

**COURS**  
**DE**  
**MACHINES**

---

25479. — PARIS, IMPRIMERIE LAHURE  
9, rue de Fleurus, 9

---

COURS  
DE  
**MACHINES**

PAR

**M. HATON DE LA GOUPILLIÈRE**

Membre de l'Institut  
Inspecteur général des Mines  
Directeur de l'École nationale supérieure des Mines  
Membre de la Commission centrale des Machines à vapeur  
et du Comité de l'Exploitation technique des chemins de fer

---

TOME SECOND

---

PARIS

**V<sup>us</sup> CH. DUNOD, ÉDITEUR**

LIBRAIRE DES CORPS DES PONTS ET CHAUSSÉES ET DES MINES

49, QUAI DES AUGUSTINS, 49

1892

Droits de traduction et de reproduction réservés



# TABLE DES MATIÈRES

## QUATRIÈME PARTIE — MACHINES A VAPEUR

### CHAPITRE XXXIII. — ORGANES ESSENTIELS.

	Pages.
§ 1. — <i>Bâti</i> . . . . .	1
Bâti. . . . .	1
Fondation. . . . .	3
§ 2. — <i>Dimensions du cylindre</i> . . . . .	4
§ 3. — <i>Constitution du cylindre</i> . . . . .	9
Matériaux. . . . .	9
Position des cylindres. . . . .	10
Multiplicité des cylindres. . . . .	11
§ 4. — <i>Piston, bielle, manivelle</i> . . . . .	12
Piston. . . . .	12
Tige. . . . .	17
Crosse. . . . .	18
Garniture. . . . .	19
Bielle, manivelle, volant. . . . .	21
§ 5. — <i>Vitesse</i> . . . . .	24
Vitesses diverses. . . . .	24
Influence de la vitesse. . . . .	27

### CHAPITRE XXXIV. — DOUBLE ENVELOPPE. — DESCRIPTION.

§ 1. — <i>Primage</i> . . . . .	31
Méthodes de mesure . . . . .	31
Résultats. . . . .	34

ii.

a.

§ 2. — <i>Purgeurs</i> . . . . .	36
§ 3. — <i>Calorifuges</i> . . . . .	40
§ 4. — <i>Action des parois</i> . . . . .	43
§ 5. — <i>Chemise de vapeur</i> . . . . .	47

## CHAPITRE XXXV. — DOUBLE ENVELOPPE. — THÉORIE.

§ 1. — <i>Formules de Hirn</i> . . . . .	55
§ 2. — <i>Méthode de M. Dwelshauvers-Dery pour l'étude des échanges de chaleur</i> . . . . .	57
§ 3. — <i>Formules de Kirsch</i> . . . . .	60
Théorie générale. . . . .	60
Spécialisation. . . . .	69

## CHAPITRE XXXVI. — TIROIR A COQUILLE.

§ 1. — <i>Généralités</i> . . . . .	75
§ 2. — <i>Tiroir normal</i> . . . . .	78
§ 3. — <i>Tiroir à avance angulaire et recouvrement</i> . . . . .	81
§ 4. — <i>Recouvrement intérieur</i> . . . . .	92
§ 5. — <i>Admission anticipée</i> . . . . .	93
§ 6. — <i>Vitesse d'écoulement</i> . . . . .	95

## CHAPITRE XXXVII. — MÉTHODES GRAPHIQUES.

§ 1. — <i>Problème inverse de la distribution</i> . . . . .	97
§ 2. — <i>Diagramme elliptique de Recch et Fauveau</i> . . . . .	100
§ 3. — <i>Courbe en œuf</i> . . . . .	104
§ 4. — <i>Diagramme sinusoidal de Moll et Montéty</i> . . . . .	107
§ 5. — <i>Diagramme circulaire de Zeuner</i> . . . . .	108
Distribution sans avance à l'admission ni recouvrement intérieur. . . . .	108
Distribution avec avance à l'admission et recouvrement intérieur. . . . .	115
§ 6. — <i>Diagramme rectiligne de Recch ou de Reuleaux</i> . . . . .	119
§ 7. — <i>Diagramme dianémométrique de M. Marcel Deprez</i> . . . . .	121

## CHAPITRE XXXVIII. — FONCTIONNEMENT DE LA VAPRUR.

§ 1. — <i>Admission, étranglement</i> . . . . .	127
Généralités. . . . .	127
Influence du laminage. . . . .	128
Moyens de combattre le laminage. . . . .	136
Déclics. . . . .	137

TABLE DES MATIÈRES.

vii

Tiroir à grille. . . . .	159
Tiroirs de Trick, Erhardt, Hanrez. . . . .	140
§ 2. — <i>Détente, espace libre.</i> . . . .	143
Détente pratique. . . . .	143
Espace libre. . . . .	144
Tiroirs solidaires. . . . .	148
§ 5. — <i>Échappement anticipé.</i> . . . .	149
§ 4. — <i>Échappement proprement dit.</i> . . . .	150
§ 5. — <i>Compression.</i> . . . .	152
§ 6. — <i>Admission anticipée</i> . . . . .	155
Admission anticipée. . . . .	155
Conclusion . . . . .	156

CHAPITRE XXXIX. — DÉTENTE VARIABLE, CHANGEMENT DE MARCHÉ.

§ 1. -- <i>Généralités.</i> . . . .	159
Détente variable. . . . .	159
Cran d'arrêt. . . . .	160
Changement de marche. . . . .	161
Marche à contre-vapeur. . . . .	165
Tube d'inversion . . . . .	168
Phases de la contre-vapeur. . . . .	170
§ 2. — <i>Pression sur le dos du tiroir</i> . . . . .	173
Effets de la pression dorsale. . . . .	173
Moyens d'atténuer la pression dorsale. . . . .	174
Tiroir à piston. . . . .	176
Tiroirs équilibrés. . . . .	178
§ 3. — <i>Commande du mécanicien.</i> . . . .	179
§ 4. — <i>Servo-moteur.</i> . . . .	183

CHAPITRE XL. — DISTRIBUTIONS A DEUX EXCENTRIQUES.

§ 1. — <i>Pieds de biche.</i> . . . .	189
§ 2. — <i>Coulisse de Stephenson.</i> . . . .	191
§ 3. — <i>Coulisse de Gooch.</i> . . . .	199
§ 4. — <i>Coulisses rectilignes. — Théorème de Guinotte.</i> . . . .	202
§ 5. — <i>Marche au point mort.</i> . . . .	204
§ 6. — <i>Coulisses Deprez, Allan, Dutheil, Challigny</i> . . . . .	209
Coulisse Marcel Deprez. . . . .	209
Coulisse Allan. . . . .	210
Coulisse Dutheil . . . . .	211
Coulisse Challigny. . . . .	213

## CHAPITRE XLI. — DISTRIBUTIONS A DEUX TIROIRS.

§ 1. — <i>Distribution Farcot</i> . . . . .	215
Généralités. . . . .	215
Distribution Farcot. . . . .	217
Distributions diverses . . . . .	219
§ 2. — <i>Distribution Meyer</i> . . . . .	220
§ 3. — <i>Distribution Bouron</i> . . . . .	228
§ 4. — <i>Distribution Deprez</i> . . . . .	230
§ 5. — <i>Distribution Polonceau</i> . . . . .	233
§ 6. — <i>Distribution Gonzenbach</i> . . . . .	236
§ 7. — <i>Distribution Bonjour</i> . . . . .	239

## CHAPITRE XLII. — DISTRIBUTIONS A EXCENTRIQUE UNIQUE.

§ 1. — <i>Excentrique unique</i> . . . . .	241
Généralités. . . . .	241
Distribution Walschaert. . . . .	243
Distribution Guinotte. . . . .	246
§ 2. — <i>Contre-manivelle</i> . . . . .	248
Distribution Pius Finck. . . . .	248
Distribution Deprez. . . . .	250
§ 3. — <i>Distributions radiales</i> . . . . .	253
Distribution Pichault. . . . .	253
Distribution Joy. . . . .	258
§ 4. <i>Excentriques variables</i> . . . . .	263
Excentrique sphérique Tripier. . . . .	263
Excentrique annulaire. . . . .	265
Excentrique Bonjour. . . . .	266
Excentrique à toc. . . . .	269

## CHAPITRE XLIII. — DISTRIBUTION ELLIPTIQUE.

§ 1. — <i>Théorie</i> . . . . .	271
§ 2. — <i>Mécanisme</i> . . . . .	279

## CHAPITRE XLIV. — INFLUENCE DE L'OBLIQUITÉ. — TIROIR.

§ 1. — <i>Distribution par tiroir unique</i> . . . . .	285
§ 2. — <i>Diagramme de Claeys</i> . . . . .	288
§ 3. — <i>Diagramme de Coste et Maniquet</i> . . . . .	290



TABLE DES MATIÈRES.

ix

4. — <i>Diagramme de Marcel Deprez</i> . . . . .	293
5. — <i>Diagramme de Muller</i> . . . . .	296
§ 6. — <i>Diagramme de Dubost</i> . . . . .	299
7. — <i>Vitesse du piston</i> . . . . .	306

CHAPITRE XLV. — INFLUENCE DE L'OBLIQUÉ. — COULISSE.

§ 1. — <i>Centre instantané</i> . . . . .	309
§ 2. — <i>Équation fondamentale</i> . . . . .	311
§ 3. — <i>Discussion</i> . . . . .	316
§ 4. — <i>Barres croisées</i> . . . . .	317
§ 5. — <i>Suspension</i> . . . . .	321

CHAPITRE XLVI. — ROBINETS.

§ 1. — <i>Généralités</i> . . . . .	326
§ 2. — <i>Machines diverses</i> . . . . .	330
Machine Biérix . . . . .	330
Machine Ridder . . . . .	330
Machine Corliss . . . . .	332
Machine Stoppani . . . . .	335
Machine Wheelock . . . . .	337

CHAPITRE XLVII. — SOUPAPES.

§ 1. — <i>Généralités</i> . . . . .	341
§ 2. — <i>Machines de rotation</i> . . . . .	344
Machine Sulzer . . . . .	344
Machine Brown . . . . .	345
Machine Meyer . . . . .	346
Machine Audemar . . . . .	349
§ 3. — <i>Machine de Cornouailles</i> . . . . .	351
Description . . . . .	351
Théorie . . . . .	356

CHAPITRE XLVIII. — MACHINES COMPOUND.

§ 1. — <i>Généralités</i> . . . . .	362
Machines à double expansion . . . . .	362
Machines à triple expansion . . . . .	364
§ 2. — <i>Dispositifs généraux</i> . . . . .	366
Machines à double expansion . . . . .	366

Machines à triple et à quadruple expansions. . . . .	373
§ 3. — <i>Détails du dispositif</i> . . . . .	378
Distribution. . . . .	378
Chemise de vapeur. . . . .	379
Réservoir. . . . .	380
§ 4. — <i>Avantages et inconvénients</i> . . . . .	382
Avantages. . . . .	382
Inconvénients. . . . .	387

## CHAPITRE XLIX. — DISPOSITIFS GÉNÉRAUX.

§ 1. — <i>Machines à double effet</i> . . . . .	389
Généralités. . . . .	389
Machine Farcot. . . . .	390
Machine Porter-Allan. . . . .	394
Machine straight-line. . . . .	394
Machine-pilon. . . . .	396
Machine à balancier. . . . .	398
Machines mi-fixes. . . . .	400
§ 2. — <i>Machines à simple effet</i> . . . . .	404
Généralités. . . . .	404
Machine Westinghouse. . . . .	405
Machine Brotherhood. . . . .	407
Machine Willans. . . . .	409
Machines à pistons conjugués. . . . .	410
§ 3. — <i>Machines oscillantes</i> . . . . .	411
Généralités. . . . .	411
Distribution. . . . .	413
§ 4. — <i>Machines rotatives</i> . . . . .	418
Généralités. . . . .	418
Machine Pecqueur. . . . .	421
Machine Behrens. . . . .	422
Machine Fielding. . . . .	425
§ 5. — <i>Turbines à vapeur</i> . . . . .	426
Généralités. . . . .	426
Turbine Dumoulin. . . . .	428
Turbo-moteur Parsons. . . . .	428
Turbine Dow. . . . .	429
Moteur-bouteille Siemens. . . . .	432

## CHAPITRE L. — RÉGULATEURS A FORCE CENTRIFUGE.

§ 1. — <i>Pendule conique</i> . . . . .	435
§ 2. — <i>Régulateur à boules</i> . . . . .	440
§ 3. — <i>Isochronisme</i> . . . . .	446
Généralités. . . . .	446
Régulateur parabolique. . . . .	448
Régulateur Farcot à bras croisés. . . . .	449
Régulateur Girard. . . . .	451
Régulateur Rolland. . . . .	455
§ 4. — <i>Théorie générale</i> . . . . .	460
Théorie générale. . . . .	460
Régulateur cosinus de Buss. . . . .	464
§ 5. — <i>Puissance et sensibilité</i> . . . . .	465
Puissance. . . . .	465
Sensibilité, stabilité. . . . .	465
Oscillations à longue période. . . . .	469
Régulateurs quasi-isochrones. . . . .	472
Régulateur Andrade . . . . .	472
Méthode de M. Dwelshauvers-Dery . . . . .	475

## CHAPITRE LI. — RÉGULATEURS DIVERS.

§ 1. — <i>Régulateurs à force centrifuge et à ressort</i> . . . . .	477
Régulateur Foucault. . . . .	477
Régulateur Deprez à ressort. . . . .	479
Régulateur Duvoir. . . . .	482
Régulateur Armington et Sims. . . . .	482
§ 2. — <i>Régulateurs à ressort</i> . . . . .	485
Régulateur Poncelet. . . . .	485
Régulateur Larivière. . . . .	486
§ 3. — <i>Régulateurs à liquide</i> . . . . .	487
Régulateur hydraulique. . . . .	487
Régulateur Deprez à air. . . . .	488
Régulateur Deprez à huile. . . . .	491
Régulateur Allan. . . . .	494
§ 4. — <i>Régulateurs chronométriques</i> . . . . .	494
§ 5. — <i>Régulateurs électriques</i> . . . . .	495
Régulateur Carus Wilson. . . . .	496
Régulateur Willans. . . . .	497
Régulateur Ledieu. . . . .	498

§ 6. — <i>Connexion</i> . . . . .	498
Connexion directe ou indirecte. . . . .	498
Oscillations de la connexion. . . . .	501
Compensateur Denis. . . . .	504

## CHAPITRE LII. — GRAISSAGE.

§ 1. — <i>Frottement dans les machines</i> . . . . .	506
§ 2. — <i>Propriétés des lubrifiants</i> . . . . .	510
§ 3. — <i>Répartition des lubrifiants</i> . . . . .	515
§ 4. — <i>Exemples de graisseurs</i> . . . . .	519
Burette. . . . .	519
Godet graisseur à la main. . . . .	520
Graisseur discontinu Thiébaud. . . . .	521
Graisseur continu Mollerup. . . . .	521
Graisseur à gouttes visibles Bourdon. . . . .	521

# COURS DE MACHINES

---

## QUATRIÈME PARTIE MACHINES A VAPEUR

---

### CHAPITRE XXXIII ORGANES GÉNÉRAUX

---

#### § 1

#### BÂTI

**558** — *Bâti*. — Les diverses pièces qui composent un moteur à vapeur <sup>(1)</sup> ne sauraient reposer indistinctement sur des appuis

<sup>(1)</sup> De Pambour. *Théorie de la machine à vapeur*, 1839. — Bataille et Julien. *Traité des machines à vapeur*, 1847. — Gaudry. *Traité élémentaire et pratique de la direction, de l'entretien et de l'installation des machines à vapeur*, 1856. — Armengaud. *Traité théorique et pratique des machines à vapeur*, 1861. — Jacqmin. *Cours de machines à vapeur*, 2 vol. in-8°. — De Fréminville. *Cours de machines à vapeur 1870-1871*. — Clapeyron. *Cours de machines à vapeur de l'École des Ponts et Chaussées*. — Hirsch et Debize. *Leçons sur la machine à vapeur*, 1885. — Morin et Tresca. *Machines à vapeur*. — Callon. *Cours de machines*, t. II. — Mahistre. *Cours de mécanique appliquée*, p. 208. — Combes. *Traité d'exploitation des mines*, t. III. — Haton de la Goupillière. *Revue des progrès récents de l'exploitation des mines et de la construction des machines à vapeur*. *Annales des mines*, 7<sup>e</sup> série, t. XVI, p. 1 à 208. — Dwelshauvers-

isolés et dépourvus de solidarité. La moindre inégalité dans les effets du tassement y déterminerait des porte-à-faux inattendus, qui se traduiraient par des tensions nuisibles, et un supplément de frottements. Autant que possible, on assure l'unité de l'assiette par l'emploi d'un même bâti métallique, sur lequel sont boulonnés les organes fixes de la machine.

La forme de cette plaque de fondation a été autrefois un peu négligée; mais depuis quelque temps l'attention des constructeurs s'y est portée d'une manière particulière. La matière a été économisée et mieux répartie, les efforts plus coordonnés, les parties inutiles supprimées. Toutefois des tendances variables se manifestent encore à cet égard suivant les circonstances.

Le bâti de la machine Corliss a été, dès son apparition, remarqué pour sa forme spéciale. Le cylindre horizontal y est boulonné en porte-à-faux à l'extrémité de la plaque, en vue de lui laisser toute liberté pour sa dilatation. La fatigue se trouve reportée aussi directement que possible sur les paliers principaux. Le bâti américain ne touche pas à la maçonnerie. Le système est supporté sur

Dery. Découvertes récentes concernant la machine à vapeur. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*; 2<sup>e</sup> série, t. VIII, p. 587; 1875, II, 113; 1878, IV, 281, 585; 1879, V, 1, 516, 478. — Georges de Cuyper. Les machines à vapeur à l'Exposition de Moscou en 1882. *Ibidem*, 2<sup>e</sup> série, t. XVI, p. 481. — Dechamps. Les machines à vapeur à l'Exposition de Dusseldorf. *Ibidem*, 2<sup>e</sup> série, t. IX, p. 509; XIII, 370. — Tresca. Rapport sur l'Exposition de Vienne. *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*, 3<sup>e</sup> série, t. II, p. 525. — Collignon. *Rapport sur l'Exposition universelle de 1878*. — Buchetti. *Les machines à vapeur actuelles*; avec supplément. — Goury. *Étude sur les machines à vapeur à l'Exposition de Vienne de 1888*, in-8°. — Gustave Richard. Les machines à vapeur rapides. *La lumière électrique*, t. XI, p. 386, 426, 465, 565; XII, 17, 51, 97, 174, 221, 254, 303; XVII, 53, 162; XIX, 7, 359; XX, 542.

Tredgold. *Traité des machines à vapeur*. Traduction de Mallet, 1828. — Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction de Gustave Richard, 1878. — Bourne. *The Steam Engine*. — J. Rose. *An elementary Treatise upon the Steam Engine*. — Spons. *Dictionary of Engineering*. — Rigg. *A practical Treatise on the Steam Engine*. Londres. 1878. — J. Cotterill. *The Steam Engine considered as a heat Engine*. — Thurston. *Histoire de la machine à vapeur*. Traduction de Hirsch, 1880. — Stuart. *Histoire descriptive de la machine à vapeur*, 1827. — L. Galloway. *The Steam Engine and its inventors*, 1881.

Muller. *La machine à vapeur, son histoire et son rôle*. — Uhlend. *Les nouvelles machines à vapeur*. Traduction de La Harpe, Baretta et Desnos, 1879. — Radinger. *Dampfmaschinen und Transmissionen in den vereinigten Staaten von Nordamerika*. — Riedler. *Excursionsbericht. Maschinen Skizzen*.

Agostino Cavellero. *Le Macchine a vapore*. — Sinigaglia. *Traité des machines à vapeur*. Traduction par de Billy. Paris, 1890, in-8°.

deux pattes assemblées au palier et au cylindre, afin d'éviter l'influence nuisible des tassements. Le bâti-cadre de la Société du Phœnix assure aux paliers une assiette transversale développée. Le guide y peut recevoir une grande surface, en restant supporté dans toute son étendue sans porte-à-faux. Le cylindre est assemblé à la plaque à l'aide de boulons à œil oblong, qui permettent la dilatation. Le bâti à baïonnette d'Allan, que construisent les ateliers Babcock et Wilcox, est coulé d'une seule pièce avec le grand palier, et boulonné au cylindre. Dans les machines rapides, on procure au système de longues portées. Le bâti repose par trois points seulement comme un trépied, de manière à rester toujours en équilibre, même sur un sol variable.

**559** — La manière dont la machine est assise présente en effet la plus grande importance. Dans certaines conditions, il y a lieu de se précautionner d'une manière toute particulière contre les affaissements du sol; par exemple pour les installations qui reposent directement sur des travaux de mines. A Montrambert, on a disposé des vérins qui permettent de redresser la verticalité du cylindre, si elle vient à être déjetée. Dans les ateliers Fourneyron, l'on a, pour des conditions analogues, construit une machine en candélabre, dans laquelle on rattache à un pied unique, dont la faible étendue prévient les tassements inégaux, deux cylindre inclinés attaquant un arbre supérieur au moyen de bielles remontantes.

Certains moteurs, relativement petits, ne s'assemblent pas toujours à une plaque horizontale. Ils sont suspendus à la muraille à l'aide de consoles; ou couchés sur les montants inclinés d'un chevalement de mines pour les manœuvres de cabestan; etc.

**560** — *Fondations.* — Le bâti doit reposer sur des fondations particulièrement soignées. A cet égard, indépendamment de la solidité de l'assiette qui prévient les tassements, il importe d'amortir autant que possible la transmission des vibrations dans le sol.

La force vive d'une machine se compose en effet, d'après le théo-

rème de Coriolis <sup>(1)</sup>, de celle qui correspond au mouvement visible de chaque pièce, réduite par la pensée à son solide moyen, et de la force vive du mouvement vibratoire rapporté à ce solide. Cette agitation moléculaire exige pour sa production une quantité correspondante de travail; mais, si elle persiste sans communication avec l'extérieur, la dépense reste limitée, et se récupère d'ailleurs intégralement au moment où l'appareil rentre dans le repos. Il en est tout autrement pour un moteur dont les vibrations se transmettent à la fois à l'atmosphère, sous la forme sonore, et dans le sol où se produit un écoulement incessant d'énergie proportionnel au temps.

Pour remédier à cette cause de perte, il convient, dans l'élaboration d'un projet de machine, de rechercher le type le moins favorable au développement des vibrations. Ces mouvements sont d'une nature essentiellement périodique; on s'attachera donc à en briser les harmonies, en désaccordant autant que possible leurs causes de production, les chocs particulièrement.

Il faudra en second lieu employer pour les fondations des matériaux peu propres à transmettre ces vibrations au terrain environnant. M. Anthoni <sup>(2)</sup> établit les machines sur des supports en caoutchouc, et parvient à opérer leur isolement complet, au point d'amortir même les ébranlements déterminés par les marteaux-pilons. La Compagnie parisienne de l'air comprimé a installé sous certaines fondations de machines un tapis en fibres de coco, matière à la fois élastique et incorruptible.

## § 2

### DIMENSIONS DU CYLINDRE

**561** — L'enceinte où s'opère la production du travail dans une machine à vapeur est le *cylindre*. On lui donne toujours la forme circulaire, afin de pouvoir l'aléser sur le tour.

<sup>(1)</sup> Résal. *Traité de cinématique pure*, p. 399.

<sup>(2)</sup> Anthoni. Isolement complet et stable des machines en vue d'amortir les chocs et les vibrations. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, novembre 1888, p. 750.



Le *piston* est le véritable récepteur de l'énergie, que l'on a développée par la voie calorifique et concentrée dans la vapeur, en vue de la recueillir ultérieurement sous la forme dynamique. Cet organe parcourt le cylindre d'un mouvement de translation rectiligne et parallèle aux génératrices (\*).

On définit un cylindre de machine à vapeur par les valeurs numériques du *diamètre* et de la *course* (²).

Ces deux éléments fournissent en effet à un praticien expérimenté un premier aperçu de l'importance d'un moteur. Ils ne sauraient cependant, à eux seuls, en déterminer exactement la *puissance*. Celle-ci s'exprime en *chevaux* de 75 kilogrammètres par seconde, ou en *poncelets* de 100 kilogrammètres par seconde (³). La connaissance de la vitesse angulaire, c'est-à-dire du nombre de cylindrées dépensées dans un temps donné, est absolument indispensable pour qu'il soit possible de déduire des dimensions géométriques la puissance de la machine.

Réciproquement, lorsque l'on fait connaître *a priori* la puissance et le nombre de tours par minute qui sont demandés pour l'établissement d'un moteur, nous savons en déduire le volume du cylindre, quand il s'agit d'en asseoir l'avant-projet (⁴). Mais la forme de cet organe reste encore indéterminée, si d'autres indications ne viennent fournir directement soit le diamètre, soit la course, soit le rapport de ces deux éléments, ou toute autre relation entre leurs valeurs.

**562** — A cet égard, un premier point de vue consiste à établir l'appareil, de manière à donner la moindre prise possible aux pertes de chaleur par rayonnement. On se trouve par là ramené à ce problème de géométrie : construire un cylindre de révolution de volume donné sous une surface minima.

(¹) À l'inverse de ce qui a lieu dans les machines rotatives (Chap. XLIV, § 4), où le volume cylindrique est engendré par la révolution d'un piston rectangulaire.

(²) Il ne faut pas confondre cette dernière donnée avec la *hauteur* du cylindre. Celle-ci comprend, outre la course, un certain espace libre aux extrémités, ainsi que l'épaisseur du piston.

(³) *Congrès international de mécanique appliquée de 1889*, t. I, p. 157.

(⁴) *Voy.* t. I, p. 817.

Si  $r$  désigne le rayon et  $h$  la hauteur, le volume aura comme expression  $\pi r^2 h$ . Sa différentielle doit être nulle, pour assigner à cet élément une valeur constante. On a donc, en supprimant le facteur  $\pi$  :

$$r^2 dh + 2rh dr = 0,$$

$$\frac{dh}{dr} = -\frac{2h}{r}.$$

D'autre part, la superficie totale offerte au refroidissement comprend la surface latérale  $2\pi rh$ , et les deux fonds, dont chacun a pour aire  $\pi r^2$ . Sa différentielle doit encore être égalée à zéro pour exprimer la condition du minimum, ce qui donne, sauf le facteur  $2\pi$  :

$$rdh + hdr + 2rdr = 0,$$

$$\frac{dh}{dr} = -\frac{h + 2r}{r}.$$

Il suit de ces deux relations :

$$h = 2r;$$

d'où la condition que *la hauteur soit égale au diamètre*, ou encore que *la projection latérale du cylindre présente la forme d'un carré* <sup>(1)</sup>.

Dans la pratique, on rencontre des cylindres qui s'éloignent plus ou moins de ce type. Les uns sont *ramassés*; la plupart sont au contraire *allongés*. Leur détermination dérive de diverses considérations qui viennent alors prendre la prépondérance sur la précédente, et que nous allons esquisser rapidement.

(1) Le volume prend alors l'expression :

$$V = \pi r^2 h = 2\pi r^3,$$

et l'on en déduit :

$$h = 2r = 2\sqrt[3]{\frac{V}{2\pi}} = 1,0859 \sqrt[3]{V},$$

en continuant à désigner par  $h$  la hauteur, qui est, comme nous l'avons dit, distincte de la course; ce qui exige que dans la valeur de  $V$  déduite de celle de la cylindrée de vapeur, on ait tenu compte du volume propre du piston.

**563** — La *force statique* est un élément qu'il est essentiel d'envisager pour un moteur, à côté de sa *puissance dynamique*. Il ne suffit pas en effet qu'une machine soit capable de fournir un certain nombre de poncelets; c'est-à-dire de pouvoir, une fois lancée à la vitesse de régime, développer du travail avec l'activité voulue. Il faut avant tout que, prise au repos, on la mette en état de démarrer, en exerçant sur le point d'application de la résistance un effort d'un nombre suffisant de kilogrammes, si l'on tient compte du rapport des vitesses virtuelles de ce point et du piston (<sup>1</sup>). La section de ce dernier se trouve par là déterminée, ou du moins limitée, d'après la tension de la vapeur.

**564** — La valeur de la course peut dans d'autres cas s'imposer de son côté *a priori*.

Comme elle est, dans une machine à double effet, égale au double du rayon de la manivelle, lequel constitue le facteur essentiel du moment des efforts exercés à chaque instant; si l'on réduisait par trop cette course, il faudrait, pour transmettre le travail demandé, des forces énormes, des équarrissages abusifs, et par suite des frottements, des prix de revient, des difficultés d'établissement accrus en proportion.

Les grandes courses présentent l'avantage de réduire l'importance proportionnelle des espaces perdus aux extrémités de la course, qui sont à peu près constants comme dimension linéaire parallèle au mouvement, et décroissent par conséquent en volume lorsque l'on vient à diminuer la section du cylindre en raison de l'augmentation de la course (<sup>2</sup>).

(<sup>1</sup>) Un petit piston mené suffisamment vite serait, par exemple, capable d'élever du fond d'une carrière un grand nombre de moellons dans un temps aussi court qu'on voudra l'imaginer, pourvu que l'on charge suffisamment peu chaque cordée; tandis qu'il restera complètement en échec devant une pierre de taille de poids équivalent, qui n'exigerait cependant pour son ascension qu'un nombre égal de kilogrammètres, lors même qu'on laisserait en outre toute latitude pour la durée de l'opération. Le bloc unique ne pourra être soulevé de terre que par un piston recevant sur une superficie suffisante la tension de la vapeur dont on dispose.

(<sup>2</sup>) A la vérité, l'espace libre s'augmente alors d'un supplément de longueur des lumières. Mais nous verrons (n° 666) que l'on reste maître, si l'on veut, de réduire celle-ci à un minimum, en installant des distributeurs distincts aux deux extrémités du cylindre.

On remarquera encore qu'en s'éloignant de la projection carrée<sup>(1)</sup>, qui correspond au minimum de surface pour un volume donné, l'on augmente l'efficacité de la chemise de vapeur, qui croît avec le rapport de la surface de transmission calorifique au volume du fluide enfermé.

La précision de la distribution se trouve de même augmentée par l'allongement du cylindre; attendu que les petites erreurs de marche du piston, par rapport aux phases du fonctionnement de la vapeur, perdent de leur importance proportionnelle sur le parcours total.

Dans le même ordre d'idées, on peut faire remarquer, en ce qui concerne les moteurs spéciaux destinés à l'extraction des mines, qu'il importe pour la précision des manœuvres, aux divers points de la hauteur du puits, en vue des réparations ou des sauvetages, de pouvoir déplacer la cage de faibles quantités sans que les mouvements corrélatifs du piston deviennent inappréciables, en raison du grand rayon d'enroulement des câbles. Il faut encore pour cela que la course, qui correspond à une demi-révolution, présente une valeur suffisante.

En sens inverse, si la course, et par suite le bras de manivelle deviennent trop grands, on arrive à exagérer les perturbations qui sont dues à l'obliquité de la bielle; à moins d'augmenter proportionnellement la longueur de cette dernière, ce qui entraînerait pour l'ensemble un développement inadmissible.

La considération qui entre le plus ordinairement en ligne de compte à cet égard est celle de la *vitesse linéaire* du piston qui, à égalité du nombre de tours de l'arbre par minute, reste à chaque instant proportionnelle à la course. Il en est de même de l'*accélération linéaire* de cet organe, et par suite des *forces d'inertie* mises en jeu. Dans une machine de rotation, le piston doit changer de direction deux fois par révolution; l'accélération passant du négatif au positif pour amortir la vitesse, l'annuler, et la ranimer de nouveau dans le sens contraire. Or certains moteurs présentent aujourd'hui des puissances, et par suite des masses gigantesques, ou bien dans d'autres cas des vitesses ver-

(1) Remarque qui s'applique encore plus directement à la forme allongée qu'au type ramassé.

tigineuses. Il s'ensuit, pour les pièces métalliques, un excès de fatigue moléculaire que l'on doit s'attacher à limiter le plus possible<sup>(1)</sup>. Nous aurons soin, pour ce motif (§ 5), d'insister avec les développements qu'elle mérite sur la question si importante de la vitesse des machines.

## § 5

### CONSTITUTION DU CYLINDRE

**565** — *Matériaux.* — Le cylindre se coule en fonte dure à grain serré. Pour cet organe, comme du reste pour tous les autres, le choix des matériaux doit être l'une des principales préoccupations des constructeurs. Certains ateliers possèdent dans ce but une fonderie spéciale, à laquelle on consacre des soins attentifs.

Le cylindre est dressé sur le tour et alésé avec soin<sup>(2)</sup>. On lui assemble les fonds, les pièces de l'enveloppe, la glace du tiroir. Les joints de vapeur se font à la cêruse, au minium, au carton d'amiante, ou à vif entre des métaux parfaitement dressés. On a employé dans certains cas le caoutchouc, ou le métal fusible qui devient compressible par l'échauffement.

L'ajustage a fait, dans ces derniers temps, des progrès tout à fait remarquables. La précision est particulièrement indispensable pour les pièces frottantes. Le bel aspect d'une machine stimule d'ailleurs l'amour-propre du mécanicien. On attache avec raison une réelle importance à la beauté des formes et à la pureté des profils, qui sont inséparables de la simplicité de l'ensemble et de l'harmonie des fonctions.

(1) Pour ces motifs, la considération des forces d'inertie fixe de plus en plus l'attention des constructeurs. On en étudie, à l'aide de diagrammes spéciaux, l'influence qui doit se combiner avec celle des efforts statiques pour le calcul des dimensions nécessaires aux pièces de machines.

(2) On lui donne parfois un excédent d'épaisseur en sus de ce qui est indispensable au point de vue de la résistance, afin de pouvoir renouveler l'alésage au bout d'un certain temps de service. Toutefois il y aurait inconvénient à entraver par une exagération sous ce rapport le jeu de la transmission calorifique de la part de la double enveloppe.

**566** — *Position des cylindres.* — Le cylindre peut être fixe ou oscillant. Mais ce dernier type constitue une catégorie de moteurs toute spéciale, sur laquelle nous reviendrons à part dans le chapitre XLIX (§ 5). Lorsqu'il est fixe, le cylindre peut être vertical, horizontal ou incliné.

Le cylindre vertical présente une assiette plus régulière, peu encombrante et sans porte-à-faux. Mais la pesanteur intervient dans le jeu du piston, et influence les deux courses d'une manière différente sous le rapport du travail. Ce qu'elle retranche dans un cas à l'action motrice de la vapeur, elle l'ajoute pour la course inverse.

Avec le cylindre horizontal, cet inconvénient disparaît. Mais en revanche l'emplacement nécessaire devient beaucoup plus notable, si l'on remarque qu'à la longueur du cylindre lui-même doit succéder d'une part celle de la tige, qui à un certain moment sort tout entière au dehors, et en outre la bielle qui s'ajoute en prolongement, et a pour longueur en général cinq fois celle de la manivelle, égale elle-même à la moitié de la course. Le total forme d'après cela quatre fois et demie la longueur du cylindre.

Il arrive même dans certains cas que, pour ne pas mettre le piston en porte-à-faux à l'extrémité de la tige, on le soutient à l'aide d'une contre-tige, qui sort par le fond opposé. Cette combinaison ajoute une fois de plus à l'ensemble la longueur de la course. Il est en effet alors indispensable, afin de prévenir les accidents, d'enfermer à l'intérieur d'une balustrade tout l'espace parcouru par cette contre-tige. L'avantage réalisé par cette combinaison se trouve d'ailleurs contre-balancé par la nécessité d'une garniture supplémentaire pour la traversée du fond du cylindre.

Un autre inconvénient de la position horizontale consiste en ce que le poids du piston fatigue d'une manière plus marquée la moitié inférieure du cylindre, en provoquant l'usure de cette partie et la production de fuites sur le cintre supérieur. Le cylindre tend de son côté à s'ovaliser par son propre poids, en déterminant un serrage du piston suivant son diamètre vertical, et des fuites sur les côtés.

Malgré ces divers défauts, cette disposition est très employée

toutes les fois qu'il devient particulièrement utile de permettre aux regards du mécanicien de planer facilement sur toutes les parties de l'appareil.

Les cylindres inclinés ne se rencontrent que très exceptionnellement en dehors de la marine, qui en fait au contraire une fréquente application. Je citerai comme exemple une machine d'extraction, dans laquelle deux cylindres inclinés à 45 degrés dans deux sens opposés attaquent, à l'aide de bielles remontantes, une manivelle, unique commandant un arbre horizontal. On supprime ainsi le point mort (1), puisque cette manivelle ne saurait, dans quelque position que la machine ait été stoppée, se trouver à la fois en prolongement des deux bielles, qui s'écartent peu de la perpendicularité l'une par rapport à l'autre.

**567** — *Multiplicité des cylindres.* — Cette grave préoccupation des points morts provoque souvent (2) l'association dans un même ensemble de deux moteurs distincts, dont on désaccorde les phases de distribution de manière à pouvoir *coupler* leurs bielles, les manivelles étant calées sur l'arbre tournant dans des plans méridiens rectangulaires. Il devient alors impossible que les deux bielles, qui s'inclinent peu de part et d'autre du plan général de la machine, se trouvent à la fois en prolongement de manivelles perpendiculaires l'une sur l'autre. Le moment moteur n'est donc jamais nul. En outre il reste compris, pour sa variation, entre des limites plus resserrées qu'avec la machine *monocylindrique*, ce qui permet de diminuer l'importance du volant (3).

En suivant la même idée, on s'est trouvé conduit à l'emploi de trois cylindres couplés, dont les bielles gouvernent les deux manivelles et le vilebrequin d'un arbre coudé, placés dans des méridiens également éloignés les uns des autres sous des angles de 120 degrés (4).

(1) Théorie des points morts. Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 182.

(2) Dans les locomotives, les machines de navigation, les moteurs d'extraction, etc.

(3) Haton de la Goupillière (Théorie des manivelles multiples en nombre quelconque. *Annales des mines*, 1865, t. III, p. 57. — *Traité des mécanismes*, p. 267). — Poncelet. *Cours de mécanique appliquée aux machines*, édité par Kretz, p. 128.

(4) On a parfois construit des machines à deux cylindres *concordants*, dont on place

Il existe également d'autres moteurs à plusieurs cylindres, que l'on appelle *machines à expansions multiples*, ou *machines compound*. Ces appareils diffèrent complètement des précédents, qui constituent en quelque sorte des batteries de moteurs individuellement distincts, dont chacun forme un tout complet, mais dont on a groupé les actions en vue d'un but commun. La machine compound au contraire est un organisme unique, que le même fluide parcourt dans toute son étendue, en y traversant diverses phases d'action échelonnées à la suite les unes des autres. L'extrême importance de cette question exige que nous lui consacrons la totalité du chapitre XLVIII.

#### § 4

#### PISTON, BIELLE, MANIVELLE

**568** — *Piston*. — Le piston nous représente en quelque sorte le fond mobile d'un cylindre de hauteur variable, dont le volume croît depuis zéro jusqu'à un maximum, pour diminuer de nouveau jusqu'à zéro. Dans cette enceinte dilatable s'exerce la tension de la vapeur, à travers des phases diverses, dont l'étude détaillée formera l'objet du chapitre XXXVIII. La pression de ce fluide agit sur le piston en l'accompagnant dans son mouvement. De là un travail engendré, qui forme l'équivalent du calorique développé originairement dans le foyer, inoculé à l'eau pour la convertir en vapeur, et apporté par celle-ci dans ce laboratoire, où s'opère la conversion de la chaleur en énergie dynamique.

En ce qui concerne la manière dont se développe ce mode d'action,

les manivelles dans un même plan en renonçant aux avantages qui viennent d'être énumérés. L'utilité de cette combinaison consiste dans une complète symétrie de l'ensemble, le volant se plaçant entre les deux cylindres.

On conserve d'ailleurs par rapport à la machine monocylindrique l'un des avantages précédents, consistant dans le raccourcissement de ces derniers; chacun d'eux ne renferme plus en effet qu'une quantité moitié moindre de vapeur. Il suit de là une diminution proportionnelle de la tige, de la manivelle et de la bielle, ce qui permet de gagner beaucoup sur l'emplacement, circonstance souvent décisive.



il y a lieu de distinguer les moteurs à *simple effet* ou à *double effet*, suivant que le piston ne reçoit l'impression de la vapeur que sur une de ses faces dans une même révolution, ou alternativement sur l'une et l'autre <sup>(1)</sup>.

Dans la machine à simple effet, la vapeur pousse le piston dans un sens. Après l'échappement, celui-ci se trouve ramené en arrière par l'action du volant ou par une résistance, qui est le plus ordinairement la pesanteur, quand la machine est verticale. Si le moteur ne renferme pas d'arbre tournant, la course peut être variable, sans comporter, au point de vue géométrique, de limite nécessaire. Le mouvement s'éteint simplement par la prédominance finale des résistances, en raison de la décroissance progressive de la tension de la vapeur. Cependant, pour plus de sûreté, il est bon de disposer un tampon de choc destiné à prévenir les accidents qui viendraient à déjouer les prévisions. Au contraire la course est rigoureusement limitée lorsque la tige du piston est mise, à l'aide d'une bielle, en connexion avec la manivelle d'un arbre tournant. Après que la vapeur a développé son action pendant une moitié au plus de la circonférence, le volant sert, en raison de la force vive qui s'y trouve accumulée, à faire franchir au système la seconde demi-circonférence, et en même temps à uniformiser l'allure de la période au degré que l'on jugera convenable, d'après la valeur que l'on attribue à son moment d'inertie.

Dans les machines à double effet, le piston se trouve ramené pendant la contre-course par une action absolument identique à la première, mais de sens contraire. Les irrégularités inhérentes à ce mode sont donc moins accentuées qu'avec le précédent, et l'importance du volant peut être beaucoup réduite.

Le double effet permet également d'adopter des dimensions moindres pour le volume du cylindre, puisque la quantité de vapeur capable du travail qui correspond à une révolution de l'arbre s'y trouve répartie entre les deux courses, par moitié sur

(1) Je rappellerai que dans la théorie des moteurs à gaz (t. I, p. 680), nous avons également rencontré des machines dites à *quart d'effet* ou à *quatre temps*, dans lesquelles l'action motrice ne s'exerce sur le piston que pendant une seule course simple sur quatre.

chacune d'elles. Les dimensions linéaires seront donc diminuées théoriquement dans le rapport :

$$\frac{1}{\sqrt[3]{2}} = 0,7957;$$

c'est-à-dire d'environ un cinquième.

**569** — Le piston des machines à vapeur est creux et nervuré à l'intérieur, de manière à concilier la légèreté avec la solidité. Les

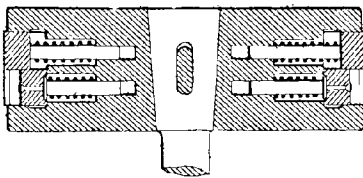
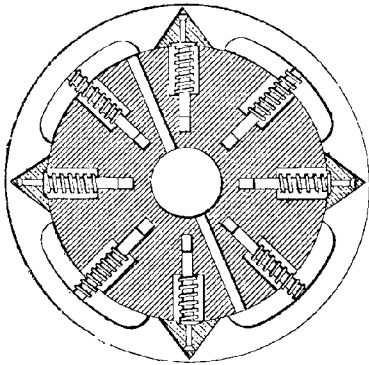


Fig. 509 et 510. — Piston à secteurs.  
(Plan et coupe méridienne).

surfaces en sont tournées lisses et nettes. Le *noyau* ne présente pas exactement le diamètre du cylindre. L'étanchéité est réalisée à l'aide de la *garniture*, qui est toujours métallique, en fonte ou en acier, parfois en bronze <sup>(1)</sup>.

Dans la *garniture à secteurs*, on emploie un certain nombre de pièces distinctes, dont chacune occupe une partie de la circonférence (fig. 509 et 510). Elles sont appuyées contre la surface du cylindre par des ressorts <sup>(2)</sup>, qui prennent leur point d'appui vers le centre, et que l'on bande plus ou moins, en observant une

juste limite entre une mollesse exagérée qui laisserait flotter la garniture en donnant naissance à des fuites, et une dureté qui consommerait beaucoup de travail

<sup>(1)</sup> Les pistons des machines hydrauliques sont établis d'après des principes différents (Haton de la Goupillière. *Cours d'exploitation des mines*, t. II, p. 263. — Résal. Du profil rationnel des pistons à vapeur. *Annales des mines*, 7<sup>e</sup> série, t. V, p. 38).

<sup>(2)</sup> Dans le piston Bourdon, un tronc de cône central refoule également tous les secteurs, quand on l'enfoncé dans le sens de son axe.

en frottements, avec usure rapide des surfaces. Lorsque le mécanicien est averti, par le bruit intérieur, du ballonnement des pièces, il profite d'un intervalle de repos pour serrer les ressorts. Les déplacements centrifuges résultant de ce réglage s'accompagnent de bâillements latéraux entre les divers secteurs, puisque ceux-ci doivent occuper une circonférence plus grande qu'auparavant. Il se produirait donc des fuites dans la portion de ces vides qui excède les bords des plaques du piston. Pour y obvier, on superpose l'un à l'autre deux systèmes semblables, en ayant soin de disposer les joints de l'un suivant les bissectrices de l'autre.

Le piston *Ramsbottom* (fig. 511), ou *piston suédois* (fig. 512, 515),

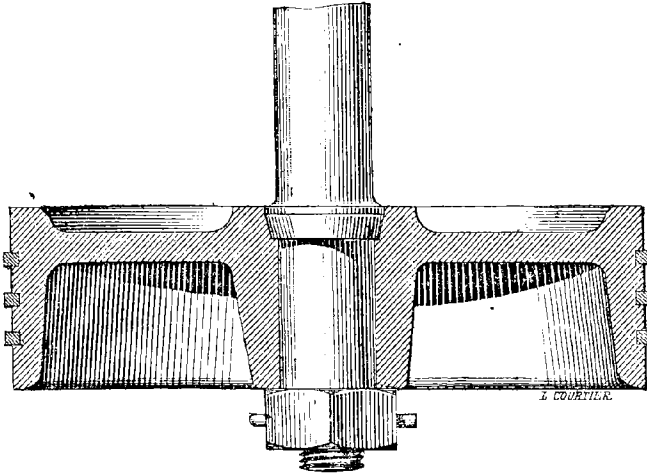


Fig. 511. Piston Ramsbottom (coupe méridienne).

plus ordinairement employé aujourd'hui, est formé d'une seule bague en fonte comprise entre deux cercles légèrement excentrés l'un par rapport à l'autre. La différence d'épaisseur détermine des tensions moléculaires au moment de la coulée du métal, en raison d'un refroidissement inégalement rapide. Quand on vient ensuite à couper la partie mince, le corps cède à son élasticité interne, et son rayon de courbure tend à augmenter. En le resserrant sur lui-même pour l'enfiler dans le cylindre, on le voit réagir et se main-

tenir au contact en raison de sa propre tension, aidée d'ailleurs par des ressorts spéciaux (fig. 314, 315). On a soin de disposer l'une au-dessus de l'autre deux bagues semblables, en opposant le maximum d'épaisseur de l'une à la solution de continuité de l'autre, pour empêcher la naissance d'une fuite en ce point. Après

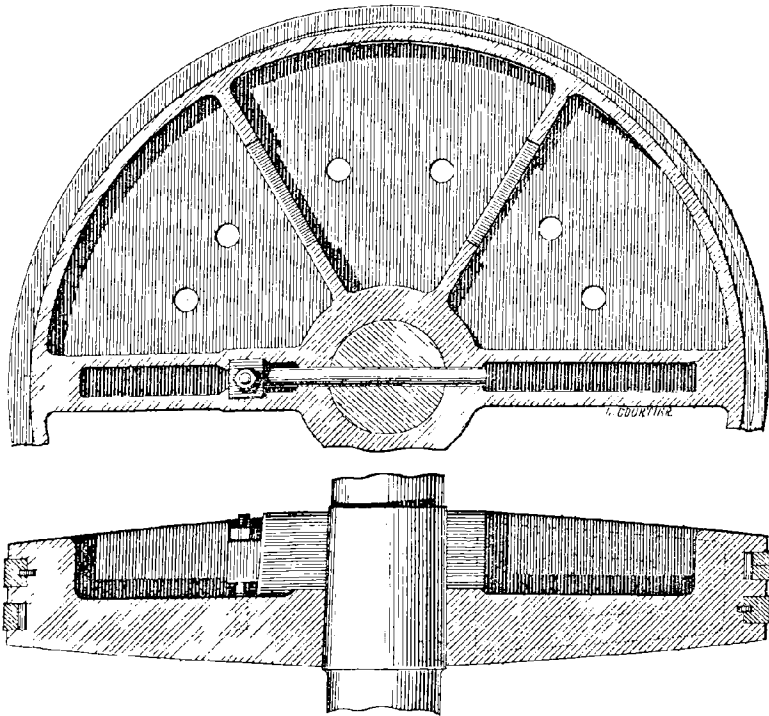


Fig. 312 et 315. — Piston suédois (plan et coupe).

avoir essayé de garnir ces anneaux de *métal antifriction*, on a été amené à renoncer à cette combinaison en se bornant à roder soigneusement la fonte.

On a signalé plusieurs exemples d'explosions de pistons creux (\*). La cause assez obscure de ce phénomène a été rapportée à la

(\*). De Grossouvre. *Annales des mines*, juillet-août, 1885. — Michel Lévy. *Ibidem*, mars-avril, 1886. — Circulaire ministérielle du 14 avril 1886. — Précautions à prendre pour le chauffage des pistons creux des machines à vapeur. *Revue industrielle*, 5 août 1886, p. 318.

décomposition par la chaleur de matières grasses, qui pénètrent, par capillarité dans l'intérieur, en quantités assez considérables.

**570** — *Tige.* — La *tige du piston* est presque toujours unique et centrale. Pour les pistons très grands ou de forme annulaire, on

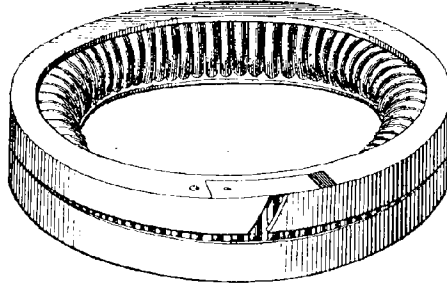


Fig. 314. — Garniture de piston Lancaster (vue perspective).

en a parfois disposé plusieurs suivant les sommets d'un polygone régulier.

La tige s'assemblait autrefois au piston à l'aide de *clavettes*, que

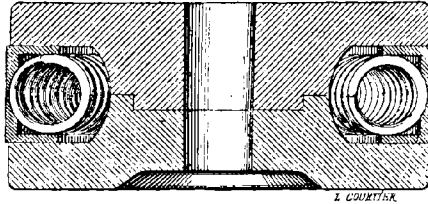


Fig. 315. — Garniture de piston Lancaster (coupe méridienne).

l'on tend aujourd'hui à proscrire de la pratique, en raison des dangers qu'elles présentent en exposant à saisir un ouvrier par ses vêtements. On préfère forcer, à l'aide d'une pression hydraulique, la tige dans son logement cylindrique, ou conique au dixième. Pour certaines locomotives, la tige vient de forge avec le piston.

Cette pièce est ordinairement pleine. Dans le *système à fourreau* de Penn, on a cherché, pour économiser l'emplacement, à loger la bielle dans la longueur de la tige. A cet effet, celle-ci est creuse

et présente un rayon d'évidement suffisant pour permettre les inclinaisons alternatives de la bielle, qui s'articule au fond de cette cavité sur le noyau même du piston. Il serait même plus juste de dire que la tige se trouve supprimée, en raison de la connexion immédiate de ces deux derniers organes ; le fourreau perdant son rôle de transmission pour jouer celui de guide, destiné simplement à assurer la rectilignité du mouvement du piston. On gagne ainsi en développement toute la longueur de la tige ; mais un tel accroissement du diamètre du stuffing-box entraîne de notables inconvénients.

**571** — La *crosse* ou *crossette* de la tige du piston (fig. 516, 517) est guidée par des glissières prises entre des longerons

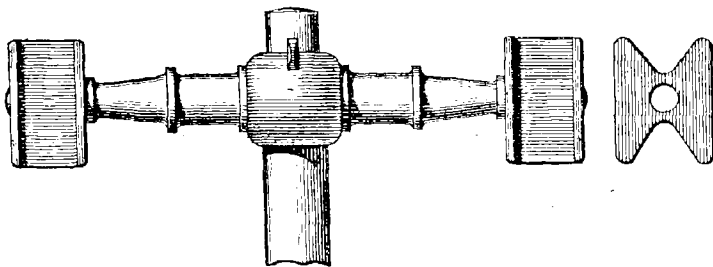


Fig. 516 et 517. — Crosse et glissières (élévation et coupe).

(fig. 518, 519). Quelquefois elle se trouve soutenue par un patin

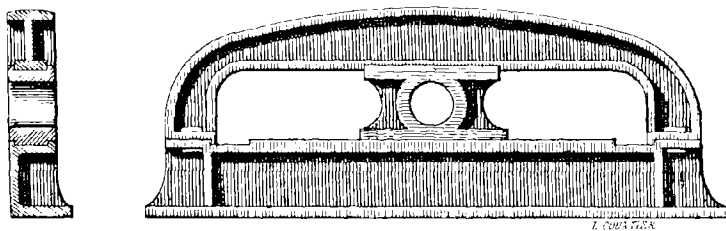


Fig. 518 et 519. — Glissière à patin (élévation et coupe).

qui baigne dans l'huile. Certains constructeurs, pour assurer le dressage des surfaces, installent l'outil sur le châssis même de la machine, de manière à travailler à la fois les parois du cylindre

et des glissières. Des repères servent ensuite à vérifier que le montage n'amène pas de dérangement.

La tige, la bielle, la manivelle et l'arbre se font souvent en acier; la bielle et la manivelle en métal doux; l'arbre en acier demi-doux; la crosse, la tige, la manivelle en métal moins doux encore. L'acier présente de grandes qualités par comparaison avec l'emploi du fer; mais il faut être bien sûr de sa provenance, et contrôler sa nature par de nombreux essais. On peut nickeler certaines pièces pour leur conserver leur éclat.

**572** — On donne le nom de *garniture, presse-étoupes* ou *stuffing-box* au joint étanche qui permet à la tige mobile de tra-

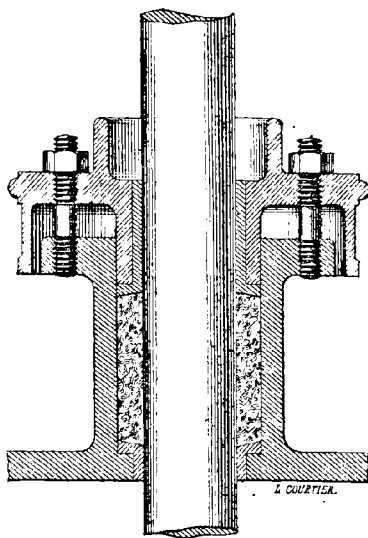


Fig. 320. — Stuffing-box (coupe méridienne).

verser le fond du cylindre. On y distingue la *boîte*, les *grains* qui maintiennent la garniture, et le *chapeau* qui serre le tout. On doit employer un serrage non réversible, ou de doubles écrous.

On peut avoir recours pour le joint aux tresses d'étoupes (fig. 320), ou d'amiante graissée (\*). On préfère de plus en plus

(\* Lullin. L'Amiante. *Le monde de la science et de l'industrie*, décembre 1888.

des garnitures entièrement métalliques (fig. 321), en bronze ou en

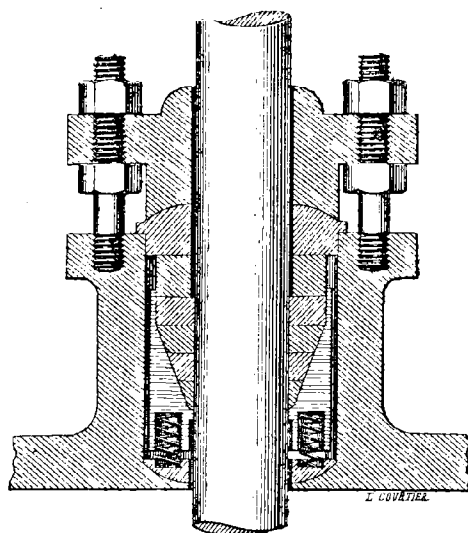


Fig. 321. — Garniture métallique Brockett (coupe méridienne).

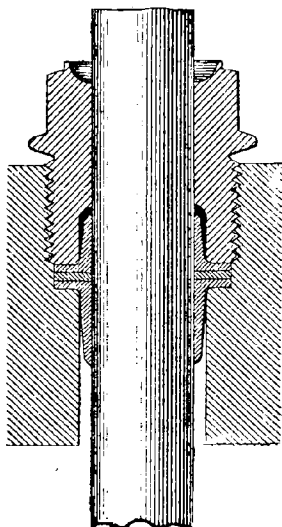


Fig. 322. — Garniture pour piston de machine hydraulique (coupe).

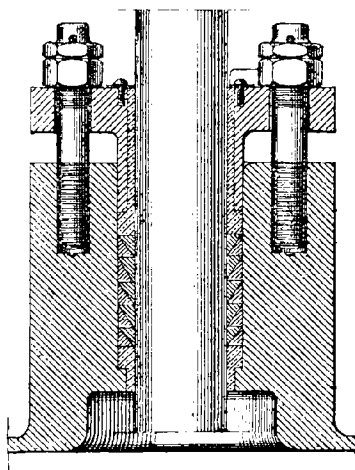


Fig. 525. — Garniture métallique Kubler. (Coupe méridienne.)



métal antifriction <sup>(1)</sup>. Dans les machines straight-line (n° 854), la douille en métal blanc se prolonge un peu à l'intérieur du cylindre, pour augmenter l'étanchéité du joint en raison de sa longueur. Un logement correspondant refouillé dans le piston permet à celui-ci d'arriver néanmoins au point mort.

La garniture Kubler <sup>(2)</sup> comprend une série de bagues doubles, formées chacune d'un cône plein emboîté dans un cône creux, et interposées entre une bague de fond et le presse-garniture (fig. 525). Elles sont fendues suivant un plan méridien, de manière à laisser pour chacune un jeu de un millimètre et demi environ. La décomposition de l'ensemble est rendue très facile, de manière à permettre les réparations.

**573** — *Bielle, Manivelle, Volant.* — La *bielle* (fig. 524, 525) doit avoir environ cinq fois la longueur du bras de manivelle, c'est-à-dire deux fois et demie celle de la course, sous peine d'exagérer beaucoup les inconvénients qui résultent de la variation de son obliquité.

Ce n'est pas ici le lieu de développer les propriétés géométriques de ce système de transmission <sup>(3)</sup>, non plus que les calculs de résistance destinés à en déterminer les dimensions <sup>(4)</sup>.

La bielle s'unit d'une part à la crosse, et de l'autre à la manivelle au moyen de *têtes de bielle* (fig. 526, 527), dont la constitution rappelle celle du palier graisseur <sup>(5)</sup>. Leurs coussinets se font en bronze dur garni de métal blanc.

La *manivelle* (fig. 528, 529) est calée sur l'arbre tournant (fig. 550, 551) au moyen d'une clavette, ou mieux en forçant simplement l'assemblage à l'aide de la presse hydraulique, après avoir

<sup>(1)</sup> Métal magnolia, bronze blanc de Parson, etc. Pour les pistons hydrauliques on emploie le *cuir embouti* (fig. 522).

<sup>(2)</sup> *Portefeuille économique des machines*, 5<sup>e</sup> série, t. XV, p. 50.

<sup>(3)</sup> Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 478. — Raffard. *L'arbre, la manivelle, la bielle et le volant*, Paris, Chaix, in-8°, 1890. *Congrès international de mécanique appliquée de 1889*, t. II, p. 254.

<sup>(4)</sup> Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 392. — Reuleaux. *Le constructeur*. — Redtenbacher. *Principes de la construction des organes de machines*.

<sup>(5)</sup> Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 68.

chauffé l'anneau de la manivelle  
avant de l'enfiler sur le bout d'arbre.

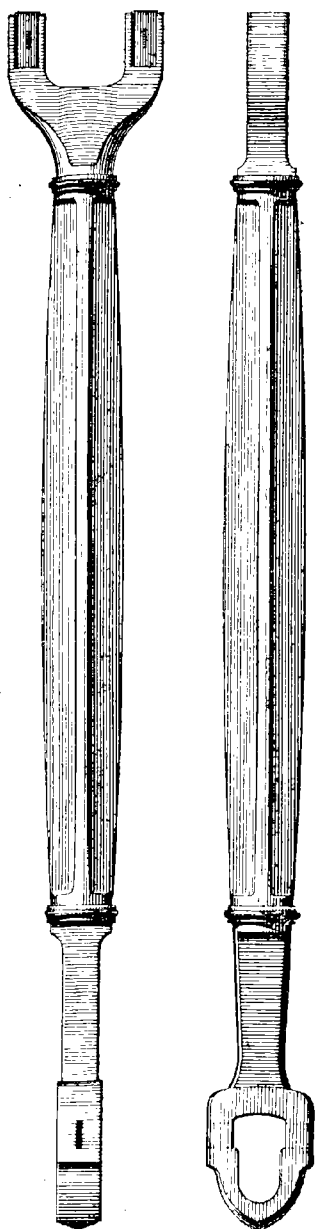


Fig. 524 et 525. — Bielle.  
(Élévations antérieure et latérale.)

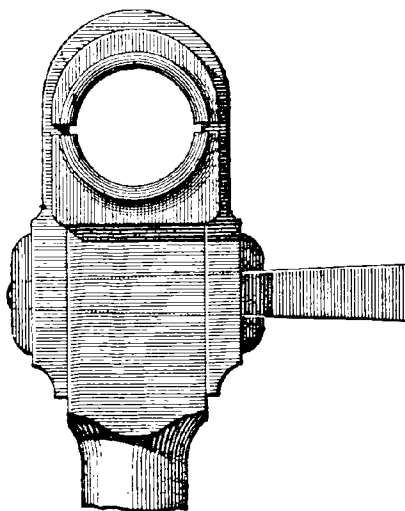
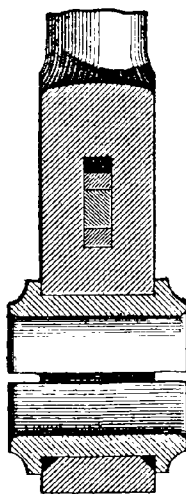


Fig. 526 et 527. — Tête de bielle.  
(Élévation et coupe.)

Le refroidissement détermine ensuite  
un serrage énergique, qui n'est pas

tel toutefois qu'un choc violent ne puisse déterminer une rotation relative des deux pièces, au lieu de la rupture complète que rendrait inévitable leur réunion par l'intermédiaire d'un prisonnier. On arrive, dans certains ateliers, à compter par microns <sup>(1)</sup> le degré

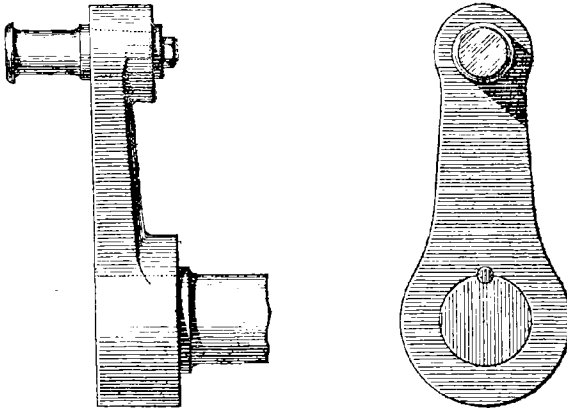


Fig. 328 et 329. — Manivelle (élevations antérieure et latérale).

de précision. L'excédent de dépense qu'occasionnent de tels soins se trouve racheté par la diminution des frais d'ajustage, et la facilité du remplacement des diverses pièces dans les machines. Le bouton de la manivelle ne doit pas, dans sa rotation, approcher

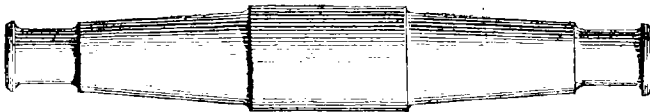


Fig. 330. — Arbre moteur (élévation).

assez près du sol pour que la main risque d'être écrasée, si on l'a glissée imprudemment par dessous. On substitue souvent à la manivelle ordinaire un *plateau-manivelle* plein, qui offre plus de sécurité pour les hommes, supprime la résistance de l'air, et se trouve constamment équilibré.

(1) Millième de millimètre.

Le volant sert à régulariser l'allure par son moment d'inertie (1). Sa jante permet d'installer un frein puissant, en profitant d'un aussi grand bras de levier. On y pratique quelquefois des trous, pour permettre d'exercer à l'aide de leviers ou d'un criquet une action à bras d'homme, afin de pouvoir démarrer quand on a stoppé

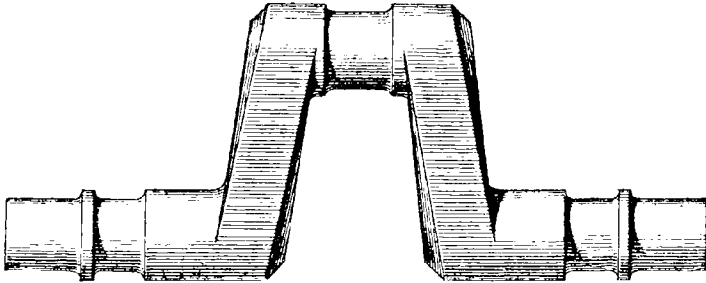


Fig. 551. — Arbre coudé (élévation).

sur le point mort. Quelquefois on munit ces grandes roues de joes en tôle, afin de diminuer la résistance due au brassage de l'air. Le plus souvent la jante porte une maîtresse-courroie, ou des cordes-sans-fin noyées dans une série de gorges. La fosse dans laquelle est plongée la partie inférieure de cette roue gigantesque doit être environnée d'une balustrade. On peut aussi disposer pour la symétrie deux volants au lieu d'un seul.

## § 5

### VITESSE

**574** — *Vitesses diverses.* — Il y a lieu, pour caractériser

(1) Poncelet. *Mécanique appliquée aux machines*, édité par Kretz, p. 155. — Résal. *Traité de mécanique générale*, t. III, p. 164. — Spineux. *Traité de la distribution de la vapeur* suivi d'une étude des volants et des régulateurs. — Dwelshauvers-Dery. Sur le calcul d'un volant. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 2<sup>e</sup> série, t. XXVIII, p. 573. — Liébaut. *Bulletin technologique de la Société des anciens élèves des Écoles d'arts et métiers*, avril 1889. — Haton de la Goupillière (Théorie des manivelles multiples. *Annales des mines*, 1863, t. III, p. 57. — *Traité des mécanismes*, p. 280).

l'allure d'un moteur, d'y considérer deux vitesses bien distinctes : celle de la rotation de l'arbre, et celle du parcours du piston.

La première est constante, ou du moins maintenue par l'influence du volant entre d'étroites limites. On la représente, soit au moyen de la *vitesse angulaire*, qui est l'*angle décrit dans une seconde*, ou le rapport d'un angle quelconque au temps employé à le parcourir, soit plus ordinairement à l'aide du *nombre n de tours par minute*. Ces deux éléments sont unis par la relation :

$$\omega = \frac{2n\pi}{60},$$

qui donne à la fois :

$$\omega = \frac{\pi}{50} n = 0,1047 n,$$

$$n = \frac{50}{\pi} \omega = 9,5495 \omega.$$

La valeur de  $n$  varie dans la pratique depuis 5 ou 10 tours jusqu'à plusieurs centaines pour les machines à mouvement alternatif du piston : parfois 300, rarement 500. Avec les moteurs rotatifs, ce nombre arrive à se compter par milliers. Il atteint industriellement le chiffre 10 000 dans le turbo-moteur Parsons, que l'on a même poussé à outrance jusqu'à 20 et 30 milliers de tours par minute <sup>(1)</sup>. Les machines de torpilleurs, la conduite des dynamos, conduisent surtout à l'emploi des grandes vitesses angulaires.

**575** — La vitesse linéaire du piston n'est plus constante comme la précédente. Négligeons en ce moment <sup>(2)</sup> l'influence de l'obliquité de la bielle, ce qui revient à supposer cette dernière de longueur infinie. Nous désignerons par  $t$  le temps, et par :

$$\varphi = \omega t,$$

<sup>(1)</sup> Voy. n° 854.

<sup>(2)</sup> Nous consacrerons à l'étude de cette influence les chapitres XLIV et XLV.

l'angle de rotation compté à partir du *point mort*, par  $x$  l'espace que parcourt le piston depuis le *fond de course*, et par  $r$  le rayon de manivelle. Il vient ainsi :

$$x = r(1 - \cos \omega t).$$

Si nous appelons  $v$  la vitesse, et  $j$  l'accélération de ce mouvement rectiligne, nous aurons en différenciant deux fois de suite :

$$v = \frac{dx}{dt} = r\omega \sin \omega t,$$

$$j = \frac{d^2x}{dt^2} = r\omega^2 \cos \omega t.$$

On voit par là que la vitesse du piston se trouve à chaque instant représentée proportionnellement par l'ordonnée du cercle que décrit le bouton de manivelle. Elle atteint son maximum au milieu de la course, et s'annule aux deux extrémités, où elle change de signe et de sens (<sup>1</sup>).

**576** — A un élément aussi variable, on substitue par la pensée, pour caractériser le régime d'une machine, la *vitesse moyenne*  $V$  du piston. On appelle ainsi celle d'un mouvement uniforme fictif dans lequel, au bout d'un nombre entier de courses, le mobile aurait parcouru le même espace que le piston réel. Pendant une révolution complète, cet organe décrit la longueur  $4r$ . Il parcourt donc en une minute  $4nr$ , et par seconde 60 fois moins, c'est-à-dire :

$$V = \frac{nr}{15} = 0,0667 nr;$$

ou, en fonction de la vitesse à la circonférence  $\omega r$  :

$$V = \frac{2}{\pi} \omega r = 0,6366 \omega r.$$

(<sup>1</sup>) Quant à l'accélération, elle varie à chaque instant en raison de la distance du

A l'époque de Watt, la vitesse moyenne variait peu aux environs d'un mètre par seconde. On rencontre encore ce chiffre dans quelques machines, et il s'abaisse même à 0<sup>m</sup>,50. Il s'est cependant accru en général. On atteint parfois aujourd'hui 3 et 4 mètres, et très exceptionnellement 5 à 6 mètres par seconde (1).

**577** — *Influence de la vitesse.* — Il est facile de caractériser l'influence qu'exerce la vitesse sur le rendement (2). Si l'on veut établir à ce point de vue une comparaison rationnelle entre deux machines, il est nécessaire de la dégager autant que possible de l'inégalité des autres éléments essentiels. Nous admettons donc que la pression est égale de part et d'autre. En outre, pour rendre aussi semblable que possible l'influence du mécanisme sur les résistances passives, nous supposerons les deux appareils homothétiques, en désignant par  $\alpha$  le rapport des dimensions homologues. Le degré de détente, en particulier, sera le même. La comparaison doit en outre se faire à égalité du poids de vapeur dépensé. Or celui-ci est le produit du poids spécifique (identique dans les deux cas, puisque les pressions sont les mêmes) par le volume d'admission (qui est proportionnel à  $\alpha^3$ ) et par le nombre de fois que ce volume se trouve rempli dans un même temps

piston au milieu de la course. Elle change de signe en ce point, pour passer de l'accroissement de vitesse au ralentissement. Elle est maximum aux fonds de course. Elle fournit à chaque instant la mesure variable de la force d'inertie.

(1) On voyait à l'Exposition de Philadelphie une machine de Porter ayant une vitesse de 7 mètres (William Auchincloss. *The practical application of the slide valve and link motor*, New-York, 1875).

Les locomotives atteignent celle de 7<sup>m</sup>,50 sur le pied de 90 kilomètres à l'heure. On s'y tient en général entre 5<sup>m</sup>,50 et 4 mètres (Cornut. *Cinquième congrès des ingénieurs en chef des associations de propriétaires d'appareils à vapeur.* — Polonceau. *Congrès international de mécanique appliquée de 1889*, t. II, p. 29).

La marine militaire, obligée de mouvoir des masses énormes, emploie des vitesses comprises entre 1<sup>m</sup>,80 et 2<sup>m</sup>,50. Elle dépasse rarement 4 mètres dans la crainte d'augmenter outre mesure les forces d'inertie, de rendre la surveillance difficile et de compromettre le graissage des articulations (Widmann. *Étude des principes et de la construction des machines marines*, p. 84).

(2) Callon. *Cours de machines*, t. II, p. 284. — E. Martin. Étude sur les machines à vapeur à grande vitesse. *Bulletin technologique de la Société des anciens élèves des Ecoles d'Arts et Métiers*, mars 1886. — Gustave Richard. Les machines à vapeur rapides. *La lumière électrique*, t. XI, XII, XVII, XIX, XX, *passim*.

(c'est-à-dire par le rapport des vitesses, que j'appellerai  $\beta$ ). Nous devons donc écrire :

$$\alpha^3\beta = 1.$$

Cela posé, analysons le jeu des résistances passives. Le frottement est, en chaque point, proportionnel aux efforts transmis ; mais ceux-ci sont de deux sortes. Une première catégorie comprend les *forces de surface* exercées par le fluide sur les parois, et proportionnelles à  $\alpha^2$ . Le travail qu'elles effectuent sera le produit de leur intensité par le chemin parcouru, qui varie lui-même en raison des dimensions (d'où le facteur  $\alpha$ ), et du nombre de tours par minute (ou de  $\beta$ ). On aura donc en définitive une expression de la forme  $A \alpha^3 \beta$  ; c'est-à-dire  $A$ , d'après l'équation précédente.

Une seconde classe d'efforts constitue les *forces de masse*, telles que les poids ou les forces centrifuges. Elles seront proportionnelles aux volumes (ou à  $\alpha^3$ ), si nous supposons que l'on ait employé les mêmes matériaux pour les pièces correspondantes. L'expression du travail renferme donc un facteur  $\alpha$  de plus que dans le cas précédent. Elle se réduira par suite à la forme  $B\alpha$ .

En résumé, la perte de travail due aux résistances passives pour l'ensemble de l'appareil aura pour expression :

$$\Sigma A + \alpha \Sigma B,$$

ou encore, d'après l'équation ci-dessus :

$$\Sigma A + \frac{\Sigma B}{\sqrt[3]{\beta}}.$$

Elle décroît donc lorsque  $\beta$  augmente.

Par conséquent, si, en vue d'isoler nettement l'influence de la vitesse, ainsi qu'il a été expliqué, l'on compare *au point de vue du rendement* des machines supposées géométriquement semblables, pour des vitesses en raison inverse du cube des dimensions, l'avantage reste aux petites machines menées rondement <sup>(1)</sup>.

(1) Les expériences de M. Willans ont mis en évidence l'avantage des grandes vitesses. (Sinigaglia. *Traité des machines à vapeur*. Traduction par de Billy, p. 161.)



**578** — En ce qui concerne d'autre part la *fatigue des matériaux*, qui est due aux forces d'inertie, elle augmente en raison directe des masses, ainsi que de l'accélération, et en raison inverse des surfaces moléculaires des sections travaillantes. Or la masse est proportionnelle à  $\alpha^3$ , puisque la densité est supposée la même de part et d'autre. L'accélération  $\frac{d^2x}{dt^2}$  appartient au même ordre d'homogénéité que  $\frac{v^2}{x}$ . Elle sera donc en raison de  $\frac{\beta^2}{\alpha}$ . Enfin l'aire moléculaire varie comme  $\alpha^2$ . De là l'expression :

$$\alpha^3 \cdot \frac{\beta^2}{\alpha} \cdot \frac{1}{\alpha^2} = \beta^2.$$

La fatigue sera par conséquent beaucoup plus accusée avec les machines rapides.

**579** — Divers points de vue pourront encore, en ce qui concerne la vitesse, influencer dans un sens ou dans l'autre le choix de l'ingénieur.

Les machines rapides seront plus petites à égalité de puissance, puisqu'elles remplissent et vident plus souvent leur cylindre. Elles seront donc moins encombrantes ; qualité précieuse en toute circonstance, et surtout dans les villes où le terrain coûte cher. Elles prêtent moins aux pertes par rayonnement. Les fuites y diminuent d'importance pour deux motifs. Elles sont, d'une part, proportionnelles à la circonférence du piston qui se trouve réduite, et, de l'autre, à la différence des vitesses de l'écoulement de la vapeur et de celle du piston, de telle sorte que si ce dernier courait aussi vite que la vapeur, celle-ci ne s'échapperait plus autour de lui. Or, la vitesse d'écoulement de ce fluide est très grande. Ce sera donc pour les moteurs rapides que celle du piston s'en rapprochera le plus. Le séjour de la vapeur dans le cylindre durant moins longtemps, cet organe offre moins de prise à la condensation au moment de l'admission. Le régime se trouve en outre, pendant toute la durée de la course, plus rapproché de l'adiabaticité, qui est avantageuse au point de vue théorique. L'extrême rapidité du moteur, en se rapprochant de l'allure qui convient pour les machines dynamo, per-

met de supprimer dans la connexion des organes de multiplication de vitesse, dont l'emploi serait plein d'inconvénients. De pareils moteurs sont plus légers en raison de leurs petites dimensions (\*), et par suite moins chers de premier établissement.

**580** — Il convient toutefois d'ajouter que si la dépense totale se trouve diminuée, le prix de revient par kilogramme sera au contraire plus élevé; car un semblable appareil a besoin d'une exécution particulièrement soignée. Un jeu, de dimensions données, devient proportionnellement plus important, eu égard à la petitesse du système. De là le besoin d'un ajustage perfectionné. Les matériaux devront être de qualité supérieure. Un défaut, une paille d'égales dimensions, jouera un rôle plus nuisible à la solidité d'une pièce plus réduite. L'entretien devient plus coûteux, l'usure plus rapide. On a davantage besoin d'un organisme parfaitement équilibré, pour éviter les alternatives dues à l'action de la pesanteur. Il convient de ne recourir qu'à des distributions simples et desmodomiques, exemptes de l'emploi des déclics que des poids ou des ressorts actionnent dans un temps déterminé *a priori*, lequel peut devenir plus comparable à la durée des phases d'un fonctionnement particulièrement rapide (n° 657).

(\*) Le poids moyen par cheval-indiqué, qui était autrefois de plusieurs quintaux, ne dépasse pas 100 kilogrammes dans les croiseurs de guerre, en y comprenant la chaudière pleine d'eau, l'arbre de couche, l'hélice et ses accessoires. Mais on a réalisé des chiffres presque incroyables dans la voie de l'allègement dû à l'emploi des grandes vitesses. La machine de Willans *Central valve Engine* s'abaisse à 16 kilogrammes. Avec des vitesses de 300 tours, M. Ahrbecker a construit des embarcations sur le pied de 2<sup>re</sup>, 38; chiffre dont l'authenticité est garantie par M. Sinigaglia (*Traité des machines à vapeur*. Traduction par de Billy, p. 167).

## CHAPITRE XXXIV

### DOUBLE ENVELOPPE — DESCRIPTION

#### § 1

#### PRIMAGE

**581** — *Méthodes de mesure.* — On désigne sous le nom de *primage* l'entraînement mécanique de l'eau par la vapeur au sortir du générateur. Sa mesure constitue une opération assez difficile.

Hirn a institué dans ce but une méthode, qui consiste à dériver une portion du courant à la sortie de la chaudière, pour le recevoir dans un calorimètre. De l'augmentation de poids et de température de ce dernier, l'on déduit les quantités correspondantes de calorique  $\mu$  et  $\rho$  <sup>(1)</sup>, et par suite les proportions de liquide et de vapeur contenues dans le mélange. L'application de ce procédé est délicate, et peut, en l'absence de certaines précautions, fournir des résultats erronés, et même négatifs <sup>(2)</sup>.

M. Leloutre a proposé une méthode différente, fondée sur la for-

<sup>(1)</sup> Voy. t. I, p. 775 et 787.

<sup>(2)</sup> Hirn (Lettre à M. Scheurer-Kestner sur la méthode propre à déterminer la quantité d'eau entraînée par la vapeur. *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 1869. — *Exposition analytique et expérimentale de la théorie mécanique de la chaleur*, t. II, p. 77). — Hallauer. *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, septembre 1874, juin 1875, 1878, p. 238. — Zeuner. *Calorimetrische Untersuchungen der Dampfmaschinen*, *Civil Ingenieur*, 1881, 6<sup>e</sup> cahier. — Hirn et Hallauer. *Réfutations d'une critique de M. Zeuner.* — Bienaymé. *Les machines marines*, p. 153. — Vinçotte. *Compte rendu du troisième congrès des ingénieurs en chef des associations de propriétaires d'appareils à vapeur*, 1878. — Boeking et Von Reiche. *Die Untersuchungen an Dampfmaschinen und Dampfkesseln*, etc., 1881.

mule suivante, pour la démonstration de laquelle nous renverrons au mémoire original <sup>(1)</sup> :

$$x = \frac{u_0}{u} \frac{2p_0 - p + \frac{u_0 - u}{2}}{p_0 - 0,5955(\theta_0 - \theta)}$$

Elle fait connaître la quantité d'eau  $1 - x$ , qui se précipite au sein d'une vapeur sortie sèche de la chaudière à la température  $\theta_0$ , lorsque celle-ci, après un certain parcours, s'est abaissée à la valeur  $\theta$ . Les symboles  $u$ ,  $\mu$ ,  $p$  continuent à y désigner les fonctions bien connues de la thermodynamique <sup>(2)</sup>.

On doit à MM. Knight et Guzzi un appareil basé sur la mesure de l'excès de poids d'un volume donné de vapeur sortant de la chaudière sur celui de ce même volume saturé d'air sec <sup>(3)</sup>.

M. Brocq a proposé un dispositif d'expérience, à l'aide duquel on augmente progressivement le volume occupé par une quantité déterminée du mélange fourni par la chaudière, jusqu'à ce qu'il se produise une dépression indiquant le point de saturation précise sans humidité <sup>(4)</sup>.

Un procédé spécial a été fondé sur l'emploi du sel marin. Le volume  $V$  de l'eau renfermée dans la chaudière étant maintenu constant pendant toute la durée de l'essai, au moyen d'une alimentation suffisante, on l'additionne au commencement de l'expérience d'un poids  $p_0$  de sel. On détermine d'autre part, au moyen d'un dosage direct, la quantité  $p_1$  de cette substance qui subsiste à la fin de l'épreuve. Un poids  $p_0 - p_1$  de sel a donc été emporté par les vésicules d'eau, ce qui correspond proportionnellement au volume liquide :

<sup>(1)</sup> Leloutre (*Recherches expérimentales et analytiques sur les machines à vapeur. Détermination de l'eau entraînée*, in-8°, Nancy, 1885. — *Bulletin de la Société industrielle du nord de la France*, mars 1874. — *Vérification d'une série d'essais sur une machine de Woolf*, Paris, in-8°, 1885).

<sup>(2)</sup> Voy. t. I, p. 775, 782, 787.

<sup>(3)</sup> Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. III, p. 277. — *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, octobre 1879, p. 487. — *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1878, p. 67. — *Engineering*, 28 décembre 1877.

<sup>(4)</sup> *Revue industrielle*, 24 août 1881, p. 534.

$$\frac{p_0 - p_1}{p_0} \sqrt{V}.$$

Connaissant d'ailleurs le volume de mélange de vapeur et d'eau qui a été dépensé par le moteur, on en déduit le degré de primage (4).

(4) M. Villié, doyen de la Faculté libre des sciences de Lille, a indiqué pour cette méthode une correction, dont la valeur est d'autant plus importante que l'essai devra être prolongé plus longtemps, dans le but d'obtenir une plus grande précision par l'atténuation de l'influence des irrégularités secondaires (*Bulletin de la Société industrielle du nord de la France*, 1890).

Il est clair que la proportion qui a été admise suppose constant le contenu salin dans le générateur, tandis que sa véritable valeur  $p$  est progressivement décroissante de  $p_0$  à  $p_1$ . De là une erreur, à l'avantage du constructeur et au détriment de l'usurier, auquel ce dernier a garanti un certain degré de vapeur sèche.

La proportionnalité n'existe rigoureusement que pour un intervalle infiniment petit. Si  $v$  désigne le volume d'alimentation et  $mv$  le primage correspondant, l'entraînement élémentaire  $mdv$  emportera une quantité  $dp$  de sel satisfaisant à la proportion :

$$- dp = mdv \frac{p}{\sqrt{V}},$$

d'où l'équation différentielle :

$$mdv = - \sqrt{V} \frac{dp}{p},$$

qui donne, en intégrant avec un logarithme népérien :

$$mv = \sqrt{V} \left( \frac{p_0}{p_1} \right).$$

M. Villié prévoit le cas où l'eau d'alimentation ne serait pas pure ; le volume  $v$  renfermant, avant l'addition de sel marin, un poids  $nv$  de substance saline. Dans cette hypothèse, l'évaporation élémentaire, en entraînant  $dp$ , apporte d'autre part dans la chaudière le poids  $ndv$ . On aura donc à modifier ainsi l'équation différentielle :

$$ndv - dp = mdv \frac{p}{\sqrt{V}},$$

ou, en séparant les variables :

$$mdv = - \sqrt{V} \frac{dp}{p - \frac{n}{m} \sqrt{V}},$$

et en intégrant :

$$mv = \sqrt{V} \left( \frac{p_0 - \frac{n}{m} \sqrt{V}}{p_1 - \frac{n}{m} \sqrt{V}} \right)$$

Cette relation n'est plus, comme la précédente, résolue directement par rapport à  $m$ .

**582** — *Résultats*. — En ce qui concerne les résultats pratiques, M. Leloutre annonce que les chaudières priment fort peu à la prise de vapeur, mais qu'il s'opère ensuite une précipitation rapidement croissante avec la distance (1). M. Willans a publié des essais, dans lesquels il ne trouvait pas plus de 1 % d'eau entraînée (2). M. Thurston affirme, d'après son expérience de vingt années, qu'en conduisant bien une chaudière, on peut toujours maintenir ce chiffre au-dessous de 5 % (3). En revanche on atteint 20 et 25 % dans les locomotives, et des proportions encore plus élevées avec les chaudières marines, en raison de l'insuffisance de la surface de dégagement et du volume de la chambre à vapeur. Toutes les fois que des artifices appropriés permettent d'améliorer ces deux éléments, nonobstant les difficultés qui résultent de l'emplacement, on en éprouve un effet avantageux (4).

A cet égard on procédera par approximations successives, en se fondant sur ce que  $n$  sera ordinairement une petite quantité. En commençant par la négliger, il viendra comme première valeur :

$$m'v = \sqrt{L} \left( \frac{p_0}{p_1} \right),$$

identique, comme cela devait être, à celle du cas précédent. Une seconde approximation donne, en substituant cette valeur de  $m'$  :

$$m''v = \sqrt{L} \left( \frac{p_0 - \frac{n}{m'} \sqrt{L}}{p_1 - \frac{n}{m'} \sqrt{L}} \right),$$

c'est-à-dire :

$$m''v = \sqrt{L} \left[ \frac{p_0 - \frac{nv}{L \left( \frac{p_0}{p_1} \right)}}{p_1 - \frac{nv}{L \left( \frac{p_0}{p_1} \right)}} \right].$$

Elle sera ordinairement suffisante, sans quoi l'on continuerait à opérer par substitutions successives.

(1) Leloutre. Sources citées ci-dessus, p. 52, note 1.

(2) Pierre William Willans. Essai sur les conditions économiques d'une machine à vapeur sans condensation. Traduction de Hubert. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 5<sup>e</sup> série, t. V, p. 37.

(3) Thurston. *Ibidem*, 5<sup>e</sup> série, t. V, p. 110.

(4) Notes de G. Richard au *Manuel de la machine à vapeur* de Rankine, p. 710. — Lencauchez et Durant. De la production et de l'emploi de la vapeur. *Mémoires de la Société des ingénieurs civils*, juin 1880, p. 27.

On a également employé, pour débarrasser la vapeur de l'eau entraînée : le pétrole <sup>(1)</sup>; l'influence de la gravité, en plaçant la chaudière en contre-bas; la force centrifuge, en déterminant des changements de direction, principalement dans des plans verticaux avec la convexité tournée sur le bas, afin de combiner ces deux dernières influences; des réservoirs appelés sécheurs ou réchauffeurs, dont la grande section a pour effet de réduire considérablement la vitesse du courant, et de faciliter le dépôt des particules liquides en raison de leur plus grande densité <sup>(2)</sup>.

On retire une influence analogue de l'étranglement produit à l'aide de l'organe qui porte les noms de *valve*, *papillon*, *soupape à gorge*, ou encore, au risque d'une confusion fâcheuse, *régulateur* (fig. 332, 333). Pour faire passer la vapeur dans cet espace rétréci à volonté, une différence de tension est nécessaire <sup>(3)</sup>; et comme celle du générateur est déterminée, c'est en aval que se produit une chute de pression <sup>(4)</sup>. Cette diminution d'énergie interne s'effectue sans compensation dynamique; car aucun objet extérieur ne la recueille directement; et la force vive du fluide n'en est pas non plus augmentée, puisque le mécanisme de la distribution, mené à la même allure, continue à dépenser des volumes égaux d'un fluide plus raréfié. Le résultat est donc une surchauffe, dont l'effet sera de volatiliser les parties restées liquides. Celles-ci, du reste, auront déjà subi une première diminution, en raison du ralentissement qu'éprouve le courant en

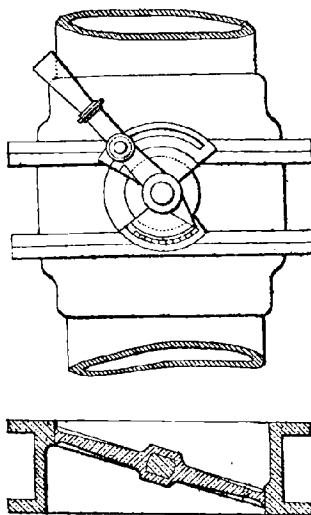


Fig. 332 et 333. — Valve.  
(Élévation et coupe méridienne.)

<sup>(1)</sup> *Society of Engineers*, 9 avril 1877.

<sup>(2)</sup> *Voy.* t. I, p. 500.

<sup>(3)</sup> *Voy.* t. I, p. 456.

<sup>(4)</sup> Phénomène dont il est très nécessaire de tenir compte pour les calculs fondés sur la valeur réelle de la pression dans le cylindre.

amont de l'obstacle, d'après la réduction de dépense en poids (<sup>1</sup>). M. Polonceau applique ce moyen dans les locomotives de la Compagnie d'Orléans, en produisant la vapeur à la pression de 16 kilogrammes, la laissant retomber à 10 ou 12 au moyen d'un détenteur, et la faisant repasser en cet état à travers des tubes immergés dans la vapeur de la chaudière (<sup>2</sup>). La différence de température due à la chute de pression a pour effet de vaporiser le brouillard, et de sécher la vapeur au degré que l'on ne veut d'ailleurs pas franchir, pour la bonne conservation de la machine.

## § 2

### PURGEURS

**583** — Il s'accumule dans le cylindre une certaine quantité d'eau produite par le primage, et en même temps par les condensations dont nous parlerons dans le paragraphe 4. Cet effet étant à peu près proportionnel au temps arriverait à dépasser toutes limites, si l'on ne prenait des mesures appropriées en vue de l'évacuation.

Or un tel encombrement expose aux plus graves inconvénients. En premier lieu, cette eau détermine une résistance mécanique pour le mouvement du piston. Elle exerce sur le jeu du calorique et le rendement de la machine une action désastreuse, ainsi que nous l'expliquerons plus loin. Enfin, quand le piston arrive à fond de

(<sup>1</sup>) C'est de cette réduction même que provient la dénomination de *régulateur*. En effet la manœuvre de la valve remplit à cet égard, entre les mains d'un mécanicien attentif, le même office que le modérateur à boules (chap. I), pour régulariser l'allure malgré la variation de la résistance. En étranglant le courant dans une mesure sensible pendant la marche normale, on se donne la ressource de restituer de la pression au cylindre par l'ouverture du papillon, en cas d'aggravation de la résistance; de même que l'on reste maître de laminer encore davantage la vapeur, lorsque, par suite d'une diminution dans le travail résistant, la machine manifeste une tendance à s'emballer.

On emploie ordinairement une valve tournante (fig. 332, 333), pour la facilité de la manœuvre; mais comme elle ferme toujours imparfaitement, on lui adjoint souvent une soupape destinée à fournir au besoin une obturation hermétique.

(<sup>2</sup>) Lencauchez et Durant. De la production et de l'emploi de la vapeur. *Mémoires de la Société des ingénieurs civils*, juin 1890, p. 30.



course, il refoule à travers les lumières ce liquide incompressible, qui fait claquer le tiroir, et peut briser les fonds si l'action est trop brusque.

Un premier moyen de s'en débarrasser consiste, pour le cas du cylindre horizontal, à placer les orifices d'échappement de la vapeur sur la génératrice inférieure. L'eau qui s'y accumule en raison de la pesanteur se trouve chassée à chaque coup de piston par la pression intérieure.

**584** — En dehors de cette circonstance, on a recours aux *robinets purgeurs*. Ils sont d'ailleurs nécessaires non seulement pour le cylindre lui-même, mais pour la double enveloppe, les conduites de vapeur, les sécheurs, etc. (1).

On distingue deux classes de ces appareils. Les *purgeurs ordinaires* sont manœuvrés directement par la main du mécanicien, au moment où celui-ci le juge convenable, soit en raison du temps écoulé depuis la précédente purge, soit d'après le clapotement intérieur qui se produit dans le cylindre.

Les *purgeurs automatiques* fonctionnent d'eux-mêmes, par le seul fait de l'accumulation de l'eau en quantité suffisante. Un tel principe est évidemment séduisant; mais la pratique est, en général, loin de répondre à ces promesses, malgré la grande ingéniosité de plusieurs de ces systèmes. Le danger devient alors d'autant plus grand que le mécanicien, comptant sur leur fonctionnement, ne se trouve plus au même degré en éveil pour suppléer en temps utile à leurs défaillances.

Ajoutons que, dans les machines rapides, la manœuvre du purgeur ne saurait être assez prompte pour le refermer, quand l'évacuation est achevée, sans ouvrir un court passage à une perte de vapeur au dehors, ou au contraire à une rentrée d'air, lequel, chassé ensuite dans le condenseur par le jeu du piston, y détermine une chute du vide (2).

(1) Dans les machines munies d'un condenseur de surface, au lieu de laisser *cracher* les purgeurs au dehors, on en recueille les produits dans le réservoir d'eau distillée, à l'aide d'une tuyauterie spéciale.

(2) On a cherché à prévenir ce dernier effet au moyen d'une petite soupape, calée par

**585** — On a proposé un très grand nombre de purgeurs <sup>(1)</sup>. Je me bornerai à esquisser le principe de quelques-uns d'entre eux.

Dans le purgeur élastique Pougault <sup>(2)</sup>, l'eau se rend en raison de son poids à un réservoir, qui est supporté en porte-à-faux par un

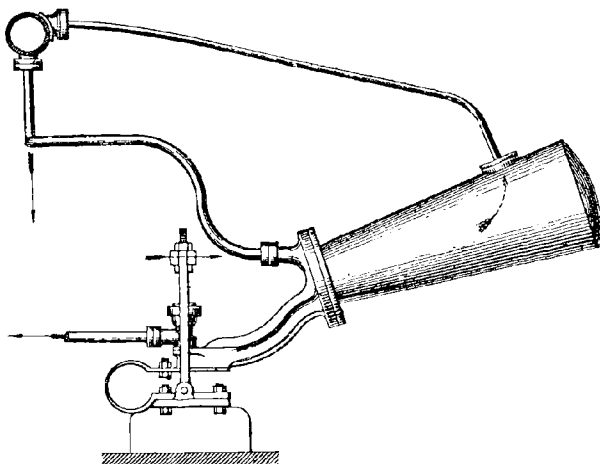


Fig. 554. — Purgéur Pougault à ressort (élévation.)

ressort (fig. 554). L'accumulation du liquide fait fléchir celui-ci, en déterminant par cette déformation même l'ouverture du robinet, qui se referme dès que le poids n'est plus suffisant pour le maintenir.

un ressort qui la referme dès que la tension atteint dans le cylindre la pression atmosphérique (Leducq. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 496).

<sup>(1)</sup> Purgéurs : GAIL (*Revue industrielle*, 18 mars 1886. — *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1886, p. 154). — CLEVEY (*Portefeuille économique des machines*, 1886, p. 102. — *Annales industrielles*, 1884, t. I, p. 556. — *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1886, p. 154). — COIGNET. *Les mondes*, t. XLI, p. 115. — DELINÈRES. *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1886, p. 154. — DREYER et ROSENKRANZ. *Portefeuille économique des machines*, 1885, p. 140. — DEMON. *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, octobre 1875, p. 15; 1886, p. 154. — FAIRBAIRN. *Revue industrielle*, 1881, p. 505. — GRANJON. — KÜENIG. — KERTING. *Ibidem*, 1885, t. II, p. 215. — LANCASTER. *Ibidem*, 1885, t. I, p. 550 et 455. — LEGAL. *Portefeuille économique des machines*, 1879, p. 17. — LENCACHEZ. *Ibidem*, 1878, p. 35. — LETHUILLIER-PINEL. *Ibidem*, 1886, p. 105. — MAILLARD. — PARADINE. *Revue industrielle*, 6 avril 1881. — SAINTE et MARCH. — VÉRY.

<sup>(2)</sup> *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1886, p. 154.

Dans le purgeur à flotteur Pougault (fig. 535), l'eau soulève par son accumulation un corps flottant, et ouvre ainsi le conduit d'évacuation.

Dans le purgeur Vaughan (fig. 536), un tube vertical est ouvert à sa partie inférieure, qui repose sur un disque fixe servant d'obturateur. L'eau s'y rassemble par la pesanteur, et comme elle est peu con-

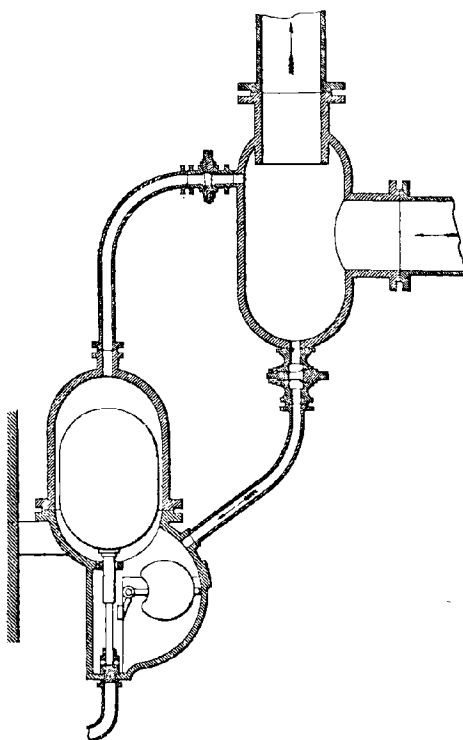


Fig. 535. — Purgeur Pougault à flotteur.  
(Coupe verticale.)

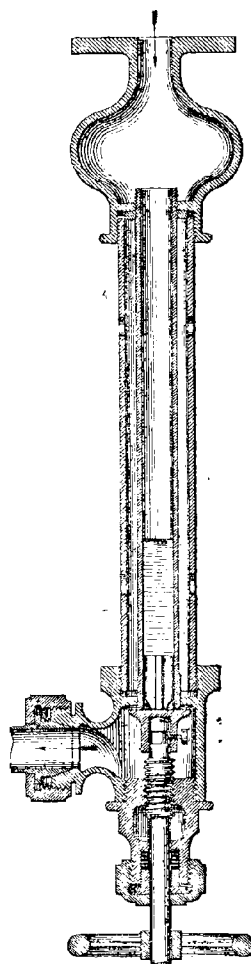


Fig. 536. — Purgeur Vaughan.  
(Coupe verticale.)

ductrice du calorique, elle laisse plus de prise au refroidissement de la paroi, que lorsque celle-ci se trouve baignée par la vapeur. Il s'opère donc une contraction du tube, et sa base abandonne le disque en raison de ce raccourcissement. L'eau s'échappe.

La vapeur crache un instant; mais le tube, aussitôt réchauffé, s'allonge de nouveau et regagne la surface fixe, en fermant le passage. La situation de cette dernière peut du reste être réglée à volonté à l'aide d'une vis, de manière à tenir compte avec précision de l'influence des températures.

### § 3

#### CALORIFUGES

**586** — Il est essentiel de défendre autant que possible le cylindre contre la déperdition du calorique due au rayonnement. Il s'ensuivra une économie de combustible, un régime plus satisfaisant par la diminution correspondante des condensations intérieures, et une amélioration des conditions hygiéniques de l'atelier, que la présence de surfaces brûlantes rend parfois inhabitable.

On a essayé de diminuer la transmission de la chaleur par la surface interne; mais ces tentatives ont eu peu de succès<sup>(1)</sup>.

C'est par l'extérieur qu'il convient d'agir au moyen d'enduits préservateurs, pour conserver dans le métal le calorique qui s'y trouve emmagasiné<sup>(2)</sup>. L'imagination des inventeurs s'est donné carrière à cet égard<sup>(3)</sup>. Le principe le plus fécond consiste dans l'interposition de l'air. C'est à elle que les tissus de laine, les

<sup>(1)</sup> M. Lissignol a proposé des fonds doublés en porcelaine, ou en verre (Mallet. *Congrès international de mécanique appliquée de 1889*, t. II, p. 17). On a garni de même des surfaces non exposées au frottement d'une lame de plomb, métal qui est trois fois moins bon conducteur que la fonte. Kennedy a également indiqué l'emploi d'un revêtement de vulcanite (*Mechanical Engineers*, 1887, p. 524).

<sup>(2)</sup> Isherwood (Efficacité des enveloppes non conductrices. *Journal of Franklin Institute*, mars 1875. — Rapport sur les expériences de M. Dollfus-Flach. *Revue industrielle*, 1880). — Bour. *Société des sciences industrielles de Lyon*, 18 janvier 1882. — Haton de la Goupillière. *Revue des travaux scientifiques*, t. II, p. 1028. — Ser. *Traité de physique industrielle*, n° 109. — Lecœuvre. *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*, 4<sup>e</sup> série, t. V, p. 285. — Radisson. *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1880, p. 110.

<sup>(3)</sup> Caloridor. — Calorifuge Leroy-Jauffret. — Ruban calorifuge en liège de J. Bourdon. — Enveloppe de liège Germond de Lavigne. — Mastic paille-liège Magniat. — Liège aggloméré Garnot. — Tresses en jonc calorifuge Poillon. — Plastique calorifuge Lombard. — Enduit Pimont. — Enduit *protector*. — Ciment William. — Coton minéral d'Ivry-port, etc.

fouurrures doivent leur efficacité. On a constaté que la limaille de fer transmet la chaleur avec 200 fois moins de facilité environ qu'une barre du même métal. Les corps poreux ou fibreux, aussi bien que les substances d'un faible coefficient de conductibilité, seront donc indiqués pour cet emploi, par exemple : la paille, la bourre, le coton, le feutre, la laine, le papier gris non collé, l'amiante, le coton siliceux, etc. Ces matières doivent être maintenues absolument sèches, car leur conductibilité augmente avec l'humidité. On les assujettit contre la paroi du cylindre à l'aide d'un revêtement en bois cerclé.

**587** — La perte de chaleur par rayonnement, rapportée au calorique que renferme la vapeur utilisée, est d'autant moins considérable que celle-ci sera elle-même plus importante dans un même temps.

M. Dollfus-Flach a formulé également cet énoncé : que le rayonnement varie en raison inverse de la racine carrée de l'épaisseur du revêtement non conducteur; ce qui doit conduire à se limiter à cet égard, le degré d'efficacité diminuant rapidement à partir d'une certaine limite.

D'après Péclét, l'effet d'un garnissage de coton sur 0<sup>m</sup>,15 d'épaisseur a fait tomber de 96 %, dans une atmosphère tranquille, la perte de chaleur par rayonnement<sup>(1)</sup>.

Des expériences de M. Walther Meunier ont indiqué, comme résultat effectif de la condensation à travers la *surface nue* de divers métaux, les chiffres suivants, qui sont exprimés en kilogrammes d'eau par mètre carré et par heure :

Cuivre. . . . .	2,816
Fonte. . . . .	3,484
Fer. . . . .	3,906

Le tableau ci-après présente quelques résultats comparatifs pour des tuyaux de cuivre recouverts de divers enduits<sup>(2)</sup>.

(1) Sinigaglia. *Traité des machines à vapeur*. Traduction par de Billy, p. 125.

(2) *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 1880. — *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1880, p. 112.

NATURE DE L'ENDUIT	CONDENSATION	TEMPÉRATURE	ÉPAISSEUR DE L'ENDUIT	PRIX DE REVIENT sans la pose
	kilogrammes par mètr. carré et par heure	degrés centigrades	millimètres	francs
Cuivre nu . . . . .	2,816	126,2	0	0,00
Kieselguhr-composition. . .	2,474	127,6	15	6,75
Tissu feutre, sans toile imperméable.	2,268	115,1	30	8,20
Enveloppe Gay, avec tasseaux. .	2,140	119,7	30	15,00
Liège . . . . .	2,000	120,1	16	15,00
Tissu feutre, avec toile imperméable.	1,955	120,7	51	9,95
Produit Leroy. . . . .	1,506	129,9	45	8,64
Produit Hutschinson. . . . .	1,181	124,8	60	18,90
Amiante . . . . .	1,150	127,5	41	42,60

**588** — Les mêmes précautions doivent être prises pour les tuyaux de conduite de vapeur, les effets prenant alors une importance qui croit avec la distance de transmission <sup>(1)</sup>.

Aux États-Unis, on a installé sur une très grande échelle le chauffage des villes par la vapeur. Les tubes sont en fer, enterrés dans le sol. On commence par les recouvrir d'un papier d'amiante, autour duquel on enroule du feutre de Russie ; on entoure le tout d'un papier imperméable, et on l'insère dans des pièces de bois forcées sur un diamètre suffisant <sup>(2)</sup>.

<sup>(1)</sup> Déperdition de la chaleur dans les tuyaux de vapeur. *Portefeuille économique des machines*, 1885, p. 40. — Enveloppes des conduites de vapeur. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, octobre 1885, p. 15. — Chrétien. Transport de la vapeur à de grandes distances et sa canalisation. *Ibidem*, 1885. — Bounotte. Transport de la force à l'aide de la vapeur. *Bulletin de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 2<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 527. — Brustlein. Emploi de la vapeur pour la distribution de la chaleur et de la force. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1885 p. 45. — Richou. Distribution de la chaleur et de la force motrice par canalisation d'eau chaude. *Génie civil*, t. XVI, p. 466.

<sup>(2)</sup> Brustlein. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1880, p. 111.

## § 4

**ACTION DES PAROIS**

**589** — Les considérations que nous avons développées dans le chapitre XXX sur le fonctionnement de la machine à vapeur supposent essentiellement l'adiabaticité<sup>(1)</sup>. Ce corps de doctrine<sup>(2)</sup> présente un intérêt qu'il serait injuste de méconnaître, et doit constituer le premier degré de l'étude de ces moteurs, en fournissant une base définie qui permet des calculs précis.

Toutefois l'attention a été portée depuis longtemps sur les écarts, souvent très considérables, qui séparent cette hypothèse de la réalité, et qui tendent à rendre de plus en plus insuffisante, eu égard aux progrès accomplis, une théorie qui se renfermerait exclusivement dans ces limites.

Divers motifs militent en effet en sens contraire de l'argument fondamental que l'on invoque d'ordinaire en faveur de l'adiabaticité, à savoir la brièveté des phénomènes, tout au moins dans les machines rapides. Il convient de mettre en balance la grande conductibilité du métal pour la chaleur, ainsi que l'état tout particulier dans lequel se trouve la vapeur saturée. Sous la plus faible influence, elle reprend l'état liquide en remettant en liberté un grand nombre de calories, en même temps qu'une quantité équivalente du même fluide prend immédiatement sa place au contact de la surface<sup>(3)</sup>. Aussi des condensations importantes se produisent-elles dans les cylindres<sup>(4)</sup>.

(1) Nous avons déjà formulé une réserve fondamentale à cet égard (voy. t. I, p. 799, note 4).

(2) Que l'on a nommé la *théorie générique* des machines à vapeur.

(3) C'est le principe même de l'action des condenseurs de surface, qui exercent, lorsqu'ils sont bien décapés, une action rapide et énergique.

Dans une de ses expériences Hirn a constaté une condensation de 61 % dans le cylindre.

Les conditions sont très différentes pour les machines à air chaud. Ce fluide n'est pas condensable, et il est peu conducteur. Aussi la théorie adiabatique de ces moteurs présente-t-elle, pour la pratique, un caractère beaucoup plus satisfaisant.

(4) Ledoux. De la condensation de vapeur à l'intérieur du cylindre. *Annales des Mines*, 7<sup>e</sup> série, t. XI, p. 486. — Hallauer. Condensation de vapeur. *Bulletin de la*

C'est Hirn qui a le premier porté la lumière sur l'influence exercée par les parois, en créant la *théorie pratique* des machines à vapeur. Il convient de dire cependant que M. Zeuner a cru devoir rattacher les perturbations observées, non pas au métal, mais à la présence de l'eau dans le cylindre (\*). M. Donkin est entré dans la

*Société industrielle de Mulhouse*, août 1875, octobre 1876. — Delafond. Phénomènes de la condensation dans les machines. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. G, p. 237. — Thurston. Loi de la condensation dans les cylindres. *Mémoires de la Société des ingénieurs civils*, septembre 1886, p. 370. — Dwelshauvers Dery (Exposé succinct de la théorie pratique des machines à vapeur. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 2<sup>e</sup> série, t. XII, p. 186. — Les découvertes récentes concernant la machine à vapeur. *Ibidem*, 2<sup>e</sup> série, t. VII, p. 306. — Les machines à vapeur et leurs progrès. *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 15 mars 1890, p. 129. — Sur la méthode calorimétrique de M. Donkin. *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*, 4<sup>e</sup> série, t. V, p. 672). — Hirn, Dwelshauvers-Dery, Grosseteste et Hallauer. *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 1877, p. 141 à 214. — Hallauer. Mémoire relatant les expériences, etc., avec un avant-propos de Hirn. *Ibidem*, 1875, 1875, p. 144, 206. — Ilaton de la Goupillière (*Revue des Sociétés savantes*, 2<sup>e</sup> série, t. XI, p. 14. — *Revue des travaux scientifiques*, t. II, p. 255). — Camille Roland. Conditions économiques de l'établissement des machines à vapeur. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 2<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 211. — Leduc. *Étude de thermodynamique expérimentale sur les machines à vapeur*, Dunod, 1881. — Lissignol. *Note sommaire sur l'application de la théorie mécanique de la chaleur au perfectionnement des machines à vapeur*, Bruxelles, 1876. — Boulvin (*Annales de l'Association des ingénieurs sortis des Ecoles spéciales de Gand. — Travaux du Congrès international de mécanique appliquée à Paris en 1889*). — *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 1888, p. 88; 1889, p. 85. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1889, 5<sup>e</sup> trim., p. 59, 287.

Peter Willans. Economy trials of a non condensing steam engine simple, compound and triple expansion. *Minutes of Proceedings of civil Engineers*, t. XCIII. Traduction par Hubert. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 3<sup>e</sup> série, t. V; 5<sup>e</sup> série, t. VII, p. 287. — Chas, Gately et Alvin Kletsch. Cylinder condensation in steam engines. *Journal of the Franklin Institute*, 1885, p. 346, 393. — Résumé par Clark. *Institute of civil Engineers*, 1886. — Thomas English. The action of steam cylinders. *Engineering*, 15 novembre 1889. — Dr Auria. The law of cylinder condensation in steam engines. *Journal of the Franklin Institute*, mai 1886, p. 375. — Dennis Marks. Note on the losses by condensation. *Ibidem*, janvier 1884, p. 1. — Hypothèses sur la condensation et la réévaporation de la vapeur dans le cylindre. *Proceedings of civil Engineers*, t. XXII, p. 371. — Bryas Donkin et Dwelshauvers-Dery. *Ibidem*, 1885. — Thomas English. Experiments on the distribution of heat in a stationary steam engine. *Institution of civil Engineers*, septembre 1887, p. 478. — *Engineering*, 1888, 2<sup>e</sup> sem., p. 99, 518; 1889, 2<sup>e</sup> sem., p. 691.

Fliegner. Untersuchung einiger Indicator Diagramme. *Schweizerische Bauzeitung*, t. XII, 1888. — Brauer. *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure*, 1885. — Ernst Alban. *Die Hochdruck Dampfmaschine Richtigstellung ihres Werthes*, etc. Rostock und Schwerin, 1843. — Brauer. *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure*, 1885, p. 649.

(\*) Zeuner. *Calorimetrische Untersuchungen der Dampfmaschinen*. — Hirn. Discussion critique et réfutation d'un travail de M. Zeuner. *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, septembre-octobre 1881. — Hallauer. Réfutation de la critique de M. Zeuner,



voie de la démonstration directe, en imaginant un appareil appelé *révélateur*, qui est destiné à rendre visibles les phénomènes de condensation et de réévaporation dans le cylindre (1).

Depuis longtemps l'observation avait montré que le poids de vapeur dépensé par le générateur est sensiblement supérieur à celui qui devrait résulter des circonstances géométriques de la distribution. L'excédent a été mis d'abord sur le compte des fuites autour du piston; mais on a dû, d'après les progrès de la construction, écarter cette explication, et lui substituer celle qui résulte de la condensation d'une partie de la vapeur d'admission, au contact de surfaces qui viennent d'être refroidies par l'échappement pendant la course précédente.

**590** — Le cylindre et le piston commencent ainsi par agir à la manière du condenseur, et une rosée abondante se dépose sur leurs parois, qu'elle réchauffe à l'aide des calories mises en liberté.

Lorsqu'arrive la détente, la température de la vapeur s'abaisse rapidement. Quand elle atteint celle de l'eau précipitée, celle-ci commence à se volatiliser de nouveau. Il s'établit ainsi une lutte entre les deux influences; car le piston, en avançant, découvre progressivement de nouvelles surfaces froides. Cependant la volatilisation finit par dominer complètement, lorsque s'ouvre l'échappement, qui établit la communication avec l'enceinte froide du condenseur (2).

La chute de pression détermine à ce moment une vaporisation abondante aux dépens de la chaleur accumulée dans le métal, en préparant celui-ci pour la reproduction des mêmes effets pendant la course suivante. La vapeur ainsi formée transporte au condenseur les calories qui avaient été fournies originairement par le

*Ibidem.* — Leloutre. *Sur le degré d'exactitude des données d'observation d'une machine à vapeur. Réponse à M. Hirn.* Paris, 1884. — Pasquier. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, mai-juin 1882. — Willans. Mémoire cité, traduction Hubert, p. 49.

(1) Donkin. *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, février-mars 1880, p. 128; août-septembre 1889, p. 458. — Dwelshauvers-Dery. *Ibidem*, 28 mai 1890. — *Engineering*, 22 novembre 1889, p. 607.

(2) En réalité le sens des échanges est des plus obscurs pour les divers instants de la détente (Sinigaglia. *Traité des machines à vapeur*. Traduction par de Billy, p. 60).

générateur, et qui sont restées un instant emmagasinées dans les parois.

Ces dernières jouent donc le rôle d'entrepôt pour le calorique, et ce genre d'action constitue en réalité une véritable fuite, non plus de vapeur matérielle, comme on l'avait admis à l'origine, mais de chaleur. Cette cause de perte a été appelée par Hirn le *refroidissement au condenseur*.

**591** — On peut résumer la description qui précède en y distinguant trois périodes : 1<sup>o</sup> l'admission, pendant laquelle l'action propre du cylindre est semblable à celle d'un condenseur ; 2<sup>o</sup> l'échappement, qui le transforme au contraire en un générateur ; 3<sup>o</sup> la détente, durant laquelle l'action de la paroi se partage, dans ses diverses parties et suivant les moments, entre ces deux rôles (1).

Mais il est essentiel de souligner ici la différence profonde qui distingue ces diverses phases. La vapeur produite pendant la détente travaille encore sur le piston. La chaleur successivement déposée et reprise dans cet intervalle se trouve intégralement utilisée, et ces alternatives sont de peu d'importance. Tout au contraire, la vaporisation qui s'opère pendant l'échappement se trouve soustraite à toute utilisation. Le calorique qu'elle enlève au générateur est perdu purement et simplement ; le supplément de liquide correspondant ne faisant d'ailleurs que compliquer encore davantage le jeu du condenseur, en augmentant la contre-pression sur la face résistante du piston. On voit par là que le refroidissement au condenseur atteint son maximum pour les moteurs sans détente (2).

(1) M. Thurston a énoncé cette règle pratique : que la perte due à la condensation dans le cylindre peut être considérée comme proportionnelle à la racine carrée du degré d'expansion de la vapeur (*Mémoires de la Société des ingénieurs civils*, septembre 1886, p. 370). Cette loi a été vérifiée par Gately et Klettsch.

(2) Sinigaglia. *Traité des machines à vapeur*, traduction par de Billy, p. 78, 81.

## § 5

## CHEMISE DE VAPEUR

**592** — C'est dans cet ordre de considérations que l'on doit chercher l'explication du rôle rempli dans les machines par l'*enveloppe de vapeur*, appelée aussi *double enveloppe*, ou *chemise de vapeur* <sup>(1)</sup>. Ce serait une grande erreur de la confondre avec les calorifuges dont nous avons parlé dans le § 3, et de la considérer comme un simple revêtement protecteur. Si elle a effectivement pour résultat de préserver contre l'influence du rayonnement la

(1) Résal. Chemise de vapeur (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXXXII, p. 537. — Note sur les chemises de vapeur. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1<sup>re</sup> série, t. XXXIX, p. 397). — Ledieu. Chemises de vapeur (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXXXII, p. 599. — *Étude expérimentale sur l'intervention calorifique des parois du cylindre. Influence des chemises de vapeur*, in-8°). — Hirn (Mémoire sur l'utilité des enveloppes de vapeur. *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 1856, p. 146; 1888, p. 86. — *Exposition analytique et expérimentale de la théorie mécanique de la chaleur*, t. II, p. 34, 45). — Hallauer (Étude de trois moteurs pourvus d'une enveloppe de vapeur. *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 1873, p. 355. — Analyse de deux machines Corliss, l'une sans enveloppe, l'autre pourvue d'une enveloppe de vapeur. *Ibidem*, 1873, p. 592). — Borodini. *Recherches expérimentales sur l'emploi des enveloppes de vapeur*, grand in-8°. — Hillereau. Note sur l'économie due à l'emploi des enveloppes de vapeur. *Bulletin technologique de la Société des anciens élèves des Écoles d'Arts et Métiers*, juin, juillet 1882. — Combes. *Traité d'exploitation des mines*, t. III, p. 557, 741, 769, 779. — Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 779. — Madaunet. *Thermodynamique*, p. 172, 205. — Moutier. *Thermodynamique*, in-12, p. 159. — Verdet. *Théorie mécanique de la chaleur*, t. I, p. 295. — Widmann. *Étude sur les principes de la construction des machines marines*, p. 75, 83. — Haton de la Goupillière. *Revue des progrès récents de la construction des machines à vapeur. Annales des Mines*, juillet-août 1879, p. 123. — Leloutre. *Recherches expérimentales sur les machines à vapeur (Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse, 1867, p. 149. — Bulletin de la Société industrielle du nord de la France, décembre 1875, mars 1874)*. — Ernest Pasquier. *Étude des machines à vapeur*, Louvain, 1883, p. 72. — Walther-Meunier et Keller. Rapport sur un essai d'une machine Corliss. *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, décembre 1878, p. 910. — Bède. *L'Ingénieur-Conseil*, Bruxelles, 1878, p. 56. — Mallet. *Étude sur l'utilisation de la vapeur dans les locomotives et application à ces machines du fonctionnement compound*, p. 65. — Vingotte. *Essai de la machine Sulzer. Rapport de l'Association belge pour la surveillance des chaudières à vapeur*, 1877, p. 315.

Il est nécessaire d'ajouter toutefois que l'utilité de la double enveloppe a été contestée. En outre beaucoup de discussions restent ouvertes parmi ses partisans en ce qui concerne le degré de son efficacité, et les diverses circonstances auxquelles elle peut se trouver plus ou moins heureusement adaptée (*The Abuse of the steam Jacket practically considered* by Fletcher. Londres, 1878).

vapeur intérieure, c'est au prix du refroidissement d'une provision particulière de ce fluide <sup>(1)</sup>, que devra fournir, tout aussi bien que la première, le générateur. La seule différence consiste en une légère aggravation; puisque la nouvelle surface rayonnante est un peu plus étendue que celle du cylindre proprement dit <sup>(2)</sup>.

Mais l'enduit calorifuge est par lui-même inerte. Il ne saurait fournir du calorique, et il n'a d'autre rôle que de s'opposer à la transmission de ce dernier au dehors. Il préserverait tout aussi bien un cylindre de machine frigorifique contre le réchauffement provenant de l'extérieur. Au contraire, la double enveloppe constitue pour le cylindre un appareil de chauffage. La vapeur apporte au métal de la chaleur, que celui-ci transmet au fluide travaillant. De là une action d'une nature toute différente, qu'il est nécessaire d'analyser avec soin.

**593** — Le but que l'on doit poursuivre consiste à obtenir que la vapeur soit sèche ou légèrement surchauffée au commencement de l'échappement <sup>(3)</sup>. Dans de telles conditions, elle emportera encore, il est vrai, sa chaleur de constitution; mais cela est inévitable. On évitera du moins le transport au condenseur d'une quantité supplémentaire de calorique, correspondant à la revolatilisation de la rosée liquide dont nous avons parlé. Divers facteurs devront concourir à la réalisation de ce *desideratum*, dans des conditions qui sont malheureusement encore peu connues, à savoir : la pression du générateur, le degré de détente, la forme du cylindre, la vitesse du piston, et surtout la double enveloppe destinée à envoyer directement de la chaleur dans le laboratoire même où s'accomplissent ces phénomènes.

Cette influence est essentiellement une action de paroi, qui atténue le rôle condensant du métal. Elle ne saurait se transmettre

<sup>(1)</sup> On doit tout au moins éviter l'effet inverse de refroidissement qui résulte trop souvent du contact du cylindre avec des circonvolutions du conduit aboutissant au condenseur.

<sup>(2)</sup> Il y aura lieu de la recouvrir elle-même d'un enduit calorifuge, pour la défendre contre les effets du rayonnement.

<sup>(3)</sup> Dwelshauvers-Dery. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 3<sup>e</sup> série. t. V, p. 225; VII, 141.

instantanément dans toute la masse fluide, pour y combattre l'humidité provenant du dépôt d'humidité vésiculaire qui accompagne une détente rapprochée de l'adiabaticité<sup>(1)</sup>. Hirn a insisté sur ce point, qui avait été méconnu avant lui<sup>(2)</sup>. A cet égard, on ne devra pas perdre de vue que l'action de la chemise de vapeur dépend de l'état de lubrification de la surface interne du cylindre, ainsi que des dépôts qui peuvent se former dans l'enveloppe elle-même.

**594** — Il reste bien entendu que l'amélioration ainsi réalisée dans le cylindre ne l'est qu'au prix d'une dépense spéciale de vapeur; mais celle-ci se trouve placée dans des conditions meilleures.

En premier lieu, la condensation liquide qui en est corrélative s'accomplit dans une enceinte distincte, où elle n'offre plus les inconvénients de la revolatilisation intempestive, et du brassage de l'eau par le piston.

De plus, on observe cette circonstance paradoxale, qui a beaucoup surpris les observateurs au premier abord, et qui est, au fond, aisée à comprendre : c'est qu'une très faible dépense de chaleur ainsi fournie peut procurer des améliorations fort importantes du rendement, dont le chiffre, dans les expériences de M. Donkin exécutées au nombre de plus de 200 sur les types les plus divers, a varié de 10 à 35 %<sup>(3)</sup>.

Il ne faut pas en effet envisager seulement la grandeur absolue de l'appoint calorifique, mais surtout son opportunité. En maintenant dans la paroi un régime de température différent de celui qui prendrait naissance en l'absence de l'enveloppe, on active la période de revolatilisation, de manière qu'elle se termine pendant la détente, en réduisant par là autant que possible le refroidissement au condenseur<sup>(4)</sup>.

(1) Voy. t. I, p. 795.

(2) *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 25 avril 1855.

(3) *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 1888, p. 80. — Mallanc cite (*ibidem*, 1878, p. 592) un exemple dans lequel une dépense de chaleur égale à 4<sup>m</sup>,445 fournie par l'enveloppe a suffi pour porter le travail recueilli pendant la détente, de 2417 à 5517 kilogrammètres, en l'augmentant de plus de 22 0/0. Cependant cette quantité de chaleur ne correspondrait qu'à 603 kilogrammètres, même en dehors de toute perte, au lieu de 900, différence observée.

(4) Hirn. *Exposition analytique et expérimentale de la théorie mécanique de la cha-*

Il y a du reste à cet égard une mesure à garder. En effet plus on fournit de la chaleur à l'aide de la double enveloppe, plus on atténue, il est vrai, les effets nuisibles des condensations, mais plus on augmente en même temps la quantité de chaleur que possède la vapeur envoyée au condenseur. On comprend donc qu'il doive exister sous ce rapport un maximum d'utilité, et M. Dwelshauvers-Dery a déduit de ses études la proposition que nous avons énoncée en commençant <sup>(1)</sup> : Le maximum d'économie correspond au cas où la vapeur se trouve, à la fin de la détente, sèche et saturée, ou légèrement surchauffée.

**595** — L'enveloppe est surtout utile pour les machines à condenseur, dont les écarts de température sont plus marqués qu'avec l'échappement à l'air libre; pour les machines lentes, dans lesquelles le refroidissement a plus de temps pour pénétrer profondément le métal <sup>(1)</sup>; avec les moteurs à vapeur saturée, qui prêtent plus directement aux précipitations liquides que la surchauffe; pour des générateurs fournissant de la plutôt vapeur humide que sèche; avec les machines à longue détente, qui donnent une prise plus prolongée aux variations de température <sup>(2)</sup>.

**596** — Il ne faut pas faire traverser l'enveloppe par le fluide qui doit travailler dans le cylindre, où il arriverait chargé d'humidité. Hallauer a conseillé d'employer une provision spéciale de vapeur. Le courant deviendrait, aux marches lentes, insuffisant pour protéger suffisamment contre les condensations intérieures <sup>(3)</sup>. Toutefois Hirn est d'un avis opposé <sup>(4)</sup>, d'après ce motif que la

*leur*, t. II, p. 44. — Ernest Pasquier. *Étude des machines à vapeur*, Louvain, in-8°. — Delafond. Essais effectués sur une machine Corliss au Creusot. *Annales des Mines*, septembre-octobre 1884. — Widmann. *Mémorial du Génie maritime*, 1883. — Dwelshauvers-Dery. Note sur divers moyens d'économiser la vapeur. *Congrès international de mécanique appliquée de 1889*, t. II, p. 172.

<sup>(1)</sup> Delafond. *Essais effectués sur une machine Corliss au Creusot*, § VII. — Willans. *Economy trials of a non condensing steam engine*, p. 51, 57, 83.

<sup>(2)</sup> Les condensations diminuent considérablement dans les machines à pleine pression sans détente (Delafond. *Essais effectués*, etc., § X).

<sup>(3)</sup> *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1878, p. 81.

<sup>(4)</sup> *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 1888, p. 86. — Sinigaglia. *Traité des machines à vapeur*. Traduction par de Billy, p. 155.;

vapeur stagnante chauffe moins bien qu'une circulation, et qu'elle expose à la formation de chambres d'air et d'eau dans certaines parties de l'enveloppe. L'alimentation directe présente l'avantage de permettre d'échauffer la paroi avant la mise en train; de manière à éviter, pour le début, d'énormes condensations dans le cylindre.

On a même trouvé avantage à employer pour l'enveloppe, de la vapeur plus chaude que celle du cylindre (1). Toutefois on doit redouter, en élevant la pression, d'être obligé de renforcer les parois d'une manière exagérée. On peut recommander, à ce point de vue, l'établissement d'une soupape de sûreté.

**597** — On avait autrefois renoncé, après essai, à l'emploi de chemises de gaz chauds (2), qui ne sont pas, comme la vapeur saturée, dépositaires d'un grand nombre de calories susceptibles de devenir instantanément disponibles. Cependant la question a repris de l'actualité; et M. Donkin insiste sur cette application comme permettant, en raison de la température plus élevée, de réaliser d'une manière plus précise la dessiccation de la vapeur en fin de détente (3). Il enveloppe à cet effet le cylindre d'une flamme de gaz Bunsen sur la moitié de son étendue, en combattant au moyen de feuilles d'amiante le rayonnement extérieur.

La double enveloppe présente le défaut de chauffer la vapeur non seulement durant les périodes motrices, mais encore pendant l'échappement, c'est-à-dire en pure perte; et surtout pendant la compression, ce qui augmente la contre-pression. Aussi son avantage s'atténue-t-il si, au lieu d'envisager le travail *absolu*, on considère le travail *indiqué*, qui est constitué par la somme algébrique de tous les travaux développés dans le cylindre.

(1) Delafond. *Essais effectués*, etc., § VIII.

(2) Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 785. — Bienaymé. *Les machines marines*, p. 134.

(3) Donkin. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 3<sup>e</sup> série, t. VII, p. 145. — Donkin et Dwelshauvers-Dery. Heat expenditure in Steam Engine. *Proceedings of the Institute of civil Engineers*, t. XCVIII, n<sup>o</sup> 2405. — Dwelshauvers-Dery. Note sur divers moyens d'économiser la vapeur. *Congrès international de mécanique appliquée de 1889*, t. II, p. 178. — Chauffage des cylindres par le gaz. *Génie civil*, t. XIV, p. 355. — Sinigaglia. *Traité des machines à vapeur*. Traduction par de Billy, p. 129.

**598** — L'enveloppe vient ordinairement de fonte avec le cylindre. Souvent cependant elle est composée de pièces rapportées, que l'on fixe au moyen de collerettes spéciales. On doit la munir de purgeurs pour l'évacuation de l'eau de condensation, que l'on ramène parfois dans le générateur, soit par la pesanteur si la chaudière se trouve placée en contre-bas, soit à l'aide d'une pompe de compression. L'essentiel est d'obtenir une bonne circulation et d'éviter, ainsi qu'il a été dit, les parties stagnantes dans lesquelles pourraient se former des réservoirs d'air ou d'eau, perdus pour l'influence utile. Il est à la vérité difficile de réaliser ce mouvement derrière les fonds. En ce qui concerne la partie cylindrique, Laboulaye avait proposé<sup>(1)</sup> de faire venir de fonte avec l'enveloppe une cloison hélicoïdale pour régulariser le courant. On a été jusqu'à réchauffer la tige et le corps du piston<sup>(2)</sup>; mais cette complication ne s'est pas répandue. On doit, dans tous les cas, recommander d'étendre l'enveloppe de vapeur aux deux plateaux des cylindres.

<sup>(1)</sup> *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*, 5<sup>e</sup> série, t. III, p. 178.

<sup>(2)</sup> Système Humphreys et Tennant. Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 200.



## CHAPITRE XXXV

### DOUBLE ENVELOPPE — THÉORIE

#### § 1

#### ÉQUATIONS DE HIRN

**599** — En formulant les principes relatifs à l'action des parois du cylindre, Hirn a tracé la marche de calcul qu'il convient de suivre à cet égard.

Appelons  $T$  le travail,  $Q$  le calorique cédé aux parois, ou rétro-cédé par elles selon son signe algébrique,  $q$  la chaleur rayonnée au dehors. Représentons pour ces diverses fonctions, à l'aide des indices  $a, d, e, c$ , les termes qui se rapportent respectivement aux périodes d'admission, de détente, d'échappement et de compression. Soit  $M$  le poids de vapeur fourni à chaque coup de piston, et  $m$  celui qui reste en roulement d'une manière permanente dans l'espace libre. Nous désignerons par les indices 0, 1, 2, 3 les états instantanés qui caractérisent le commencement de l'admission, de la détente, de l'échappement et de la compression; la fin de cette dernière phase ramenant, pour la course suivante, le commencement de l'admission.

A cet instant, l'espace libre renferme la quantité de chaleur interne  $mU_0$  <sup>(1)</sup>. On reçoit dans le cylindre le calorique  $M\lambda$ . A la fin de l'admission, le fluide  $M + m$  possède la chaleur interne  $U_1$  par

<sup>(1)</sup> Les notations  $A, U, \lambda, \mu, p, x$  sont celles que nous avons déjà définies dans la Thermodynamique (voy. t. I, p. 386, 775, 787, 791). Nous rappellerons notamment ici

unité de poids. La différence a été employée à effectuer le travail externe  $T_a$ , à fournir à la paroi la chaleur  $Q_a$ , et à perdre au dehors  $q_a$ . On peut donc écrire :

$$(1) \quad mU_0 + M\lambda - (M + m)U_1 = AT_a + Q_a + q_a.$$

A la fin de la détente, la chaleur interne est devenue  $(M + m)U_2$ . La différence a servi à produire le travail externe  $T_a$ , et à subvenir à la perte extérieure  $q_a$ , mais en recevant d'autre part de la paroi un appoint  $Q_a$ , résultante algébrique de la cession de chaleur de la vapeur au métal dans certaines parties du cylindre, et principalement pendant le commencement de cette période, en même temps que de la rétrocession inverse par diverses surfaces vers la fin de la détente. De là l'équation :

$$(2) \quad (M + m)(U_1 - U_2) = AT_a - Q_a + q_a.$$

Pendant la période d'échappement, la chaleur interne  $(M + m)U_2$  que possédait encore la cylindrée, va se perdre dans le condenseur. Le fluide y transporte en même temps le calorique  $Q_e$  qu'il continue à emprunter à la paroi. Enfin cette enceinte reçoit également, sous forme de chaleur ou de force vive, la quantité d'énergie équivalente au travail résistant  $T_e$  que doit surmonter le piston durant cet intervalle. Tout cet ensemble est employé à porter l'eau d'injection (dont je représenterai le poids par  $M'$ ) de la température  $\theta''$  que possède la source dans laquelle on la puise, à celle  $\theta'$  du condenseur ; à ramener l'eau de condensation  $M$  à la température  $\theta'$ , ce qui lui laisse la quantité de chaleur  $\mu'$  ; à conserver au mélange  $m$  qui remplit l'espace nuisible la chaleur interne  $U_3$  ; et enfin à perdre au dehors la quantité  $q_e$ , correspondant à l'échappement *anticipé* seulement. Les pertes pendant l'échappement proprement dit et la compression feraient double emploi avec les périodes d'admission

la formule :

$$U = \mu + \rho x,$$

qui ramène le symbole  $U$  aux fonctions  $\mu$  et  $\rho$ , fournies par la table de Zeuner (t. I, p. 783), et à la variable  $x$  qui caractérise le degré d'humidité de la vapeur.

et de détente (*qui sont simultanées pour le cylindre à double effet*). De là l'égalité :

$$(3) \quad M'(\mu' - \mu'') + M\mu' + mU_3 + q_0 = AT_0 + Q_0 + (M + m)U_2.$$

A la fin de la compression, il ne reste plus dans le cylindre que le poids  $m$ , qui est repassé à l'état initial en regagnant la quantité de chaleur interne  $U_0 - U_3$ . Il a pour cela emmagasiné l'énergie correspondant au travail résistant  $T_c$ , et en même temps il a cédé au cylindre la chaleur  $Q_c$ , ce qui donne :

$$(4) \quad m(U_0 - U_3) = AT_c - Q_c.$$

**600** — En ajoutant membre à membre les égalités (1) et (2) pour en retrancher (4), on obtient la relation :

$$M\lambda - (M + m)U_2 + mU_3 = A(T_a + T_d - T_c) + (Q_a - Q_d + Q_c) + q_a + q_d.$$

Si nous désignons par  $T$  le travail total recueilli par coup de piston, quantité que l'on évaluera d'après le diagramme de l'indicateur, on aura identiquement :

$$T = T_a + T_d - T_0 - T_c.$$

En second lieu, nous pouvons poser l'identité :

$$Q_a - Q_d - Q_c + Q_0 = 0,$$

exprimant que les cessions et rétrocessions de calorique de la vapeur à la paroi et réciproquement s'équilibrent mutuellement, une fois que le régime est établi, puisque la température du métal ne s'élève pas indéfiniment. Enfin l'on peut écrire :

$$q = q_a + q_d + q_c;$$

si l'on désigne par  $q$  le total de la chaleur perdue par rayonnement, conductibilité, etc.

En ayant égard à ces identités, l'équation précédente peut s'écrire :

$$Q_c = M\lambda - (M + m)U_2 + mU_3 - A(T + T_c) - (q_a + q_d).$$

Elle fait connaître le refroidissement au condenseur.

On remarquera d'ailleurs que l'égalité (3) le donne également sous la forme :

$$Q_c = (M + M')\mu' - M'\mu'' - (M + m)U_2 + mU_3 - AT_c + q_c.$$

On emploiera l'une ou l'autre de ces deux formules suivant le plus ou moins de facilité que l'on trouvera, dans chaque cas, pour l'évaluation des éléments qu'elles renferment, avec le secours des tables, et d'après la manière dont seront instituées les mesures expérimentales.

Il est inutile d'ajouter que ces deux résultats sont nécessairement équivalents. On peut d'ailleurs le mettre en évidence en les égalant l'un à l'autre, ce qui conduit à l'identité :

$$M\lambda - [M\mu' + M'(\mu' - \mu'')] = AT + q,$$

exprimant que la différence entre la chaleur  $M\lambda$  réellement fournie par la chaudière, et celle que l'on retrouve au condenseur, est égale à la chaleur qui correspond au travail recueilli augmentée de la perte extérieure.

**601** — Le refroidissement au condenseur croît évidemment, toutes choses égales d'ailleurs, avec la surface baignée par le fluide jusqu'au moment de l'échappement, et avec le rapport d'une certaine épaisseur  $\epsilon$  de vapeur *influencée*, au volume total compris à l'intérieur de ladite surface. On peut en outre le regarder, à un point de vue approximatif, comme proportionnel à la différence  $\theta_1 - \theta'$  des températures de la chaudière et du condenseur.

La caractéristique de cet effet peut donc être conçue sous la forme :

$$\frac{\varepsilon}{\pi r^2 \frac{c}{p}} \left( 2\pi r^2 + \frac{c}{p} 2\pi r \right) (0_1 - 0'),$$

si l'on appelle  $r$  le rayon,  $c$  la course du piston, et  $\frac{1}{p}$  le rapport de détente géométrique. Il vient en réduisant, et en supprimant comme inutile dans une expression de cette nature le facteur 2 :

$$\varepsilon \left( \frac{p}{c} + \frac{1}{r} \right) (0_1 - 0').$$

L'épaisseur  $\varepsilon$  ne saurait être précisée. On peut seulement admettre qu'elle diminue quand la vitesse augmente. Le facteur  $0_1 - 0'$  croît avec la pression, ce qui tend à limiter les avantages des hautes tensions (1). Le facteur  $\frac{c}{p} + \frac{1}{r}$  est lui-même croissant avec le degré  $p$  de détente, ce qui contribue également à restreindre l'utilité pratique des grandes détentes.

## § 2

### MÉTHODE DE M. DWELSHAUVERS-DERY POUR L'ÉTUDE DES ÉCHANGES DE CHALEUR

**602** — M. Dwelshauvers-Dery a institué une ingénieuse méthode

(1) Ch. Jul. et Sylv. Beer. *Quelques notes sur le travail de la vapeur dans les machines à un cylindre*. in-8°, Liège, 1880, p. 58. — Sinigaglia. *Traité des machines à vapeur*. Traduction par de Billy, p. 48.

M. Delafond a en effet constaté une perte en élevant successivement dans ses expériences la pression de 4<sup>rs</sup>,50 à 6<sup>rs</sup>,50 et 7<sup>rs</sup>,75 (*Essais effectués*, etc., § V).

Certaines tentatives ont au contraire été poussées à outrance, en ce qui concerne la pression. — Loftus Perkins a construit une machine de 25 atmosphères (*The Engineer*, 1877, t. I, p. 590. — *Institute of civil Engineers*, 7 mai 1878. — Flannery. The construction of steam Boilers adopted for very high Pressure. *Meeting de l'Institution des Ingénieurs mécaniciens*. Londres, juin 1877. — Haton de la Goupillière. *Annales des Mines*, juillet-août 1879, p. 450). — Alban a même porté la tension jusqu'à 65 atmosphères (Ernest Alban. *The high Pressure steam Engine*, Londres, 1847. — Thurston. *Histoire de la machine à vapeur*, traduction par Hirsch, t. II, p. 104).

pour l'étude expérimentale des échanges calorifiques entre la vapeur et les parois (<sup>1</sup>).

Envisageons d'abord la période d'admission. L'équation (1) nous fournit pour l'expression de la chaleur cédée aux parois :

$$Q_a = mU_0 + M\lambda - (M + m)U_1 - AT_a - q_a.$$

Le poids M s'évalue directement ; T<sub>a</sub> est fourni par l'indicateur ; on peut calculer q<sub>a</sub> par la méthode de M. Leloutre (<sup>2</sup>). Le poids m, que l'on suppose formé de vapeur sèche, a pour valeur v<sub>0</sub>τ<sub>0</sub>, si v<sub>0</sub> désigne le volume de l'espace libre et τ<sub>0</sub> le poids spécifique de la vapeur, qui est fourni par les tables. La valeur de U<sub>0</sub> (<sup>3</sup>) est égale à μ<sub>0</sub> + ρ<sub>0</sub>, et celle de U<sub>1</sub> à μ<sub>1</sub> + ρ<sub>1</sub>x<sub>1</sub>, si x<sub>1</sub> désigne le rapport :

$$x_1 = \frac{V_1\tau_1}{M + m},$$

de la quantité de vapeur, prise dans les conditions finales de l'admission, au total fonctionnant M + m, qui se trouve compris à ce moment sous le volume V<sub>1</sub>.

Examinons en second lieu la phase de détente. Soient P<sub>α</sub>, P<sub>β</sub> deux situations quelconques du piston ; p<sub>α</sub>, p<sub>β</sub> les pressions correspondantes ; U<sub>α</sub>, U<sub>β</sub> l'énergie interne de l'unité de poids ; T<sub>α</sub><sup>β</sup> le travail recueilli de l'une à l'autre de ces deux positions ; enfin Q<sub>α</sub><sup>β</sup> la chaleur cédée par le fluide à la paroi dans le même intervalle. On pourra écrire :

$$Q_{\alpha}^{\beta} = U_{\alpha} - U_{\beta} - AT_{\alpha}^{\beta}.$$

(<sup>1</sup>) Dwelshauvers-Dery (*Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 25 juin 1888, p. 93. — *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*, 1890. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, juin 1888, p. 305, et t. V, p. 111). — Bryan Donkin et Dwelshauvers-Dery. *Minutes of Proceedings of civil Engineers*, 1889. — Sinigaglia. *Traité des machines à vapeur*. Traduction par de Billy, p. 95. — *Engineering*, 1888.

(<sup>2</sup>) Leloutre. *Vérification d'une série d'essais sur une machine de Wolf*, 1885, grand in-8°, p. 19.

(<sup>3</sup>) Que l'on peut, comme à l'ordinaire, compter à partir de la température de la glace fondante, puisque cette fonction ne s'introduit ici que par des différences de valeurs successives.

La valeur de  $T_2^s$  sera relevée sur le diagramme de l'indicateur. On calcule approximativement, d'après la formule de Mariotte, à l'aide des pressions  $p_\alpha$ ,  $p_\beta$ , les températures correspondantes fournies par la loi de Regnault, et par suite les valeurs de  $U_\alpha$  et  $U_\beta$ . Si celle de  $Q_\beta^s$  s'annule, on a un résultat adiabatique pour cet intervalle; si elle est positive, il y a cession de la vapeur au métal, ou en sens contraire si cette valeur est négative.

**603** — On peut donc, à l'aide d'un certain nombre de semblables évaluations, construire un profil que M. Dwelshauvers-Dery appelle le *diagramme des échanges*.

On calcule à cet effet une ordonnée moyenne, capable de représenter  $EQ_2^s$  en regard du même segment de l'axe des abscisses que  $T_2^s$ . La série des sommets de ces ordonnées fournit le graphique cherché. L'auteur porte au-dessus de l'axe les échanges de la vapeur au métal, et au-dessous les rétrocessions de la paroi au fluide.

Les périodes d'admission ou d'échappement donnent des horizontales relatives à la valeur moyenne, la seule que l'on connaisse d'après le total  $Q_a$  ou  $Q_c$ . Celles de détente et de compression fournissent des courbes, quand on opère à l'aide de segments restreints et nombreux. On peut également les remplacer par l'horizontale moyenne. M. Dwelshauvers-Dery emploie aussi, sous le nom de courbes *probables*, des paraboles cubiques présentant la même aire que les rectangles en question. Dans la pratique, la construction de ces diagrammes est très laborieuse.

**604** — On peut rapprocher de ces courbes de travail, des diagrammes de température représentant, pour les diverses parties de la paroi, son état thermique.

A cet effet, MM. Dwelshauvers-Dery et Donkin répartissent la surface cylindrique en anneaux, dont les hauteurs, inégales entre elles, sont choisies de manière à correspondre à des intervalles égaux de temps, ou de rotation. On admet que, pendant la communication avec le condenseur, la température reste la même que

dans cette enceinte, et que, dès que le contact est établi avec la vapeur, elle devient égale à celle de ce fluide. Or nous avons déjà vu que l'on peut déterminer cette dernière à l'aide des tables de Regnault, en relevant les pressions sur le diagramme de l'indicateur. On admet également que, pendant tout le temps qu'une portion de paroi est recouverte par le piston, elle conserve la température qu'elle avait au moment précis de l'arrivée de celui-ci. Assurément ces diverses hypothèses ne sont rien moins que démontrées, mais elles sont très rationnellement assises (1).

## § 5

### FORMULES DE KIRSCH

**605** — *Théorie générale.* — Il était naturel, bien que fort malaisé, de songer à utiliser, pour l'étude des effets de transmission de la chaleur dans la masse métallique des parois du cylindre, les méthodes de thermologie analytique qui ont été instituées par d'illustres géomètres, et principalement par Fourier. Les premiers essais dans ce sens sont dus à M. Grashof (2). M. Kirsch a depuis lors donné à ces recherches un développement remarquable (3), dont MM. Henrotte et Issel de Schepper ont présenté un résumé (4). Nous chercherons à condenser ici ces investigations sous une forme aussi simple qu'il nous sera possible.

La figure complète de la surface qui se trouve au contact de la vapeur (paroi cylindrique, fonds, lumières, piston, tige, etc.) est beaucoup trop compliquée, ainsi que d'autre part le régime ther-

(1) C'est évidemment tout ce que comporte, en fait d'approximation, la question dans son état actuel. Dans la réalité, les phénomènes sont bien plus complexes (Expériences de Dulong et Petit sur le refroidissement. — Witz. *Thèse de doctorat.* — Madamet. *Thermodynamique*, p. 198, 200. — Woirhaye. *Mémorial du génie maritime*, 1877).

(2) Grashof. Mouvement de la chaleur dans les parois du cylindre. *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure*, 1884.

(3) Kirsch. *Die Bewegung der Wärme in den Cylinderwandungen der Dampfmaschinen*, Leipzig, 1886, in-8°.

(4) *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 5<sup>e</sup> série, t. VI, p. 40, 1889. — M. Cavalli vient de publier un travail important sur le même sujet.



mique du fluide lui-même, pour qu'il y ait lieu d'espérer que des formules suffisamment accessibles à la pratique arrivent à fournir l'intégrale rigoureuse d'un tel problème. Il convient donc de nous borner à discuter le cas le plus élémentaire de la théorie : celui d'une plaque indéfinie, dont les divers plans parallèles possèdent chacun une température uniforme dans toute leur étendue, variable d'ailleurs de l'un à l'autre <sup>(1)</sup>. Réduite à ces termes, la question d'application restera encore extrêmement complexe.

**606** — Nous désignerons par  $\tau$  le temps, et par  $x$  la distance comptée à partir de la surface interne. Pour fixer les idées de la manière la plus naturelle, nous considérerons cette dernière comme étant normalement la plus chaude ; de telle sorte que la température  $t$  soit une fonction décroissante à partir de cette paroi, et sa dérivée partielle  $\frac{\partial t}{\partial x}$  une quantité négative. Des oppositions de signe dans les résultats effectifs nous feront connaître, le cas échéant, les intervalles de temps ou de lieu pour lesquels cet état de choses se trouverait interverti.

La flux thermique qui traverse une surface  $S$  sera proportionnel à cette étendue, au coefficient de conductibilité  $\gamma$ , au temps élémentaire  $d\tau$  pendant lequel on envisage le phénomène, et à l'écart de température des deux faces de cette tranche infiniment mince, c'est-à-dire à la valeur absolue  $-\frac{\partial t}{\partial x}$  de la dérivée partielle dont nous avons parlé :

$$(5) \quad - S\gamma \frac{\partial t}{\partial x} d\tau.$$

La quantité de chaleur qui franchira la seconde paroi d'un bloc d'épaisseur  $dx$ , sera représentée par cette même fonction augmentée de sa propre différentielle partielle relative à  $x$ , à savoir :

$$- S\gamma \frac{\partial t}{\partial x} d\tau - S\gamma \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} dx d\tau.$$

<sup>(1)</sup> *Œuvres de Fourier*, t. I, p. 118, in-4°, Gauthier-Villars, 1889. — Lamé. *Leçons sur la théorie analytique de la chaleur*, p. 15 et 506.

La différence de l'entrée à la sortie, c'est-à-dire :

$$S\gamma \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} dx d\tau,$$

représente par suite le calorique qui est resté dans la tranche, en y déterminant, pendant le temps  $d\tau$ , un accroissement de température  $\frac{\partial t}{\partial \tau} d\tau$ .

On peut, d'autre part, donner de cette quantité de chaleur une seconde expression, en appelant  $p$  le poids spécifique du métal. Le nombre de calories nécessaire pour élever sa température de  $\frac{\partial t}{\partial \tau} d\tau$  sera en effet proportionnel à cet accroissement, à la chaleur spécifique  $c$ , et au poids  $p S dx$  de la tranche :

$$pcSdx \frac{\partial t}{\partial \tau} d\tau.$$

En égalant entre elles ces deux fonctions, nous obtenons l'équation différentielle partielle (\*) :

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = \frac{pc}{\gamma} \frac{\partial t}{\partial \tau}.$$

On en peut avec avantage éliminer le temps, en introduisant à sa place l'angle de rotation  $\varphi$  au moyen de l'égalité :

$$(6) \quad \frac{\tau}{60} = \frac{\varphi}{2n\pi}, \quad \tau = \frac{30}{n\pi} \varphi,$$

dans laquelle  $n$  représente le nombre de tours par minute. Il vient ainsi :

(\*) On peut admettre, pour les paramètres, les valeurs suivantes relatives à la fonte de moulage :

$$p = 7000; \quad c = 0,15; \quad \gamma = 16.$$

(Henrotte. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 5<sup>e</sup> série, t. VI, p. 56. — Claudel. *Formules, tables, etc.*, p. 525.)

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = \frac{ncp\pi}{50\gamma} \frac{\partial t}{\partial \varphi},$$

ou plus simplement (\*) :

$$(7) \quad \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 2k \frac{\partial t}{\partial \varphi}.$$

si nous faisons pour abrégér :

$$(8) \quad k = \frac{ncp\pi}{60\gamma}.$$

**607** — Rappelons brièvement la méthode qui permet d'intégrer les équations de ce type.

L'expression :

$$t = Ce^{Ax+B\varphi},$$

fournit une intégrale particulière, quelles que soient les valeurs des constantes A et C, à la condition que B soit remplacé par une fonction convenablement choisie de A. En effet, pour former les diverses dérivées partielles, on devra conserver la fonction elle-même, en la multipliant par certaines puissances de A ou de B. L'exponentielle disparaîtra donc, ainsi que C, de l'égalité (7) quand on l'y substituera à la place de t. Par conséquent C reste arbitraire, et il ne subsiste qu'une relation déterminée entre A et B.

Il est bien entendu que A, et par suite B, sont susceptibles de la forme complexe composée d'un terme réel et d'une partie imaginaire. Toutefois, comme nous ne pouvons accepter pour le problème actuel que des solutions réelles, il sera plus convenable de substituer dans de pareilles expressions, à la forme exponentielle imaginaire, la fonction suivante, qui lui est équivalente eu égard à l'indétermination de ses éléments, et dans laquelle tous les paramètres restent essentiellement réels :

$$Ce^{ax+b\varphi} \cos(ax + \beta\varphi).$$

(\*) Cette équation différentielle a été étudiée en elle-même par divers auteurs (Appell. Sur la théorie de la chaleur. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. CX, p. 1061. — Madame de Kowalewski. *Journal de Crelle*, t. 80 ; etc.).

L'équation différentielle partielle étant linéaire, la somme de toutes les solutions particulières ainsi obtenues satisfera également, et constituera l'intégrale générale. Nous pouvons donc poser :

$$t = Ex + F + \Sigma [Ce^{ax+bz} \cos(\alpha x + \beta \varphi)],$$

en adjoignant encore une fonction linéaire quelconque de la distance, qui disparaît d'elle-même dans les différentiations, quels que soient ses coefficients E, F.

Ce nombre infini de paramètres correspond à l'indétermination de l'état thermique initial. Il reste à en effectuer la recherche dans chaque cas particulier, lorsque les circonstances se trouvent suffisamment définies à cet égard.

**608** — Dans le problème d'application que nous avons à traiter ici, l'on suppose essentiellement qu'un état de régime est établi dans le cylindre, avec une périodicité  $m\pi$ , que nous aurons avantage à laisser pour le moment quelconque. Elle sera précisée en temps et lieu, suivant les divers cas qui peuvent se présenter, et servira alors à déterminer  $\beta$  dans la fonction périodique. Nous pouvons toutefois dès à présent considérer comme essentiellement positif ce dernier élément qui figure sous un cosinus. Quant à l'exponentielle, elle ne saurait, d'après cette remarque, renfermer l'angle de rotation. Nous devons donc faire  $b = 0$ .

Nous prendrons en conséquence comme solution simple :

$$T = Ce^{ax} \cos(\alpha x + \beta \varphi),$$

ce qui donne :

$$\frac{\partial t}{\partial \varphi} = -\beta Ce^{ax} \sin(\alpha x + \beta \varphi),$$

$$\frac{\partial t}{\partial x} = Ce^{ax} [a \cos(\alpha x + \beta \varphi) - \alpha \sin(\alpha x + \beta \varphi)],$$

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = Ce^{ax} [(a^2 - \alpha^2) \cos(\alpha x + \beta \varphi) - 2a\alpha \sin(\alpha x + \beta \varphi)].$$

Quand on substitue ces expressions dans l'équation (7), le coeffi-

cient C ainsi que l'exponentielle disparaissent, et il vient, en annulant séparément les coefficients du sinus et du cosinus :

$$a^2 - \alpha^2 = 0, \quad ax = k\beta.$$

La première relation nous donne :

$$a = \pm \alpha,$$

et la seconde devient par là :

$$\pm \alpha^2 = k\beta;$$

mais comme le second membre a été supposé positif, nous ne devons conserver que le signe supérieur. On tire alors de cette équation, avec un nouveau double signe distinct du précédent :

$$a = \alpha = \pm \sqrt{k\beta}.$$

Nous devons maintenant faire remarquer que la variation de température ne peut évidemment qu'aller en s'atténuant lorsque, par la pensée, l'on s'enfonce *indéfiniment* dans la paroi. Or, avec le signe positif, elle augmenterait au contraire au delà de toutes limites. Il ne nous faut donc conserver cette fois que le signe inférieur.

Si nous réunissons maintenant toutes les solutions simples caractérisées par les diverses valeurs que prendra l'indéterminée  $\beta$ , il vient comme intégrale complète du problème proposé :

$$(9) \quad t = Ex + F + \Sigma [Ce^{-x\sqrt{k\beta}} \cos(\beta\tau - x\sqrt{k\beta})].$$

**609** — Cherchons actuellement l'expression du flux de chaleur.

Nous avons trouvé ci-dessus, d'une manière générale (5, p. 61), son expression différentielle, qui devient, *en la rapportant à l'unité de section* :

$$dQ = -\gamma \frac{\partial t}{\partial x} d\tau,$$

ou, en faisant disparaître le temps d'après la relation (6, p. 62) :

$$dQ = - \frac{50\gamma}{n\pi} \frac{\partial t}{\partial x} d\varphi.$$

On aura donc, pour un intervalle fini quelconque compté à partir du point mort :

$$Q = - \frac{50\gamma}{n\pi} \int_0^\varphi \frac{\partial t}{\partial x} d\varphi.$$

Si nous appliquons cette formule à l'expression de  $t$  (9, p. 65), il vient, en la différenciant par rapport à  $x$  :

$$\frac{\partial t}{\partial x} = E - \sqrt{k} \Sigma \left\{ C e^{-x\sqrt{k\beta}} \sqrt{\beta} \left[ \cos(\beta\varphi - x\sqrt{k\beta}) - \sin(\beta\varphi - x\sqrt{k\beta}) \right] \right\},$$

et en intégrant relativement à l'angle de rotation entre zéro et  $\varphi$  :

$$Q = - \frac{50\gamma}{n\pi} \varphi + \frac{50\gamma\sqrt{k}}{n\pi} \Sigma \left\{ \frac{C}{\sqrt{\beta}} e^{-x\sqrt{k\beta}} \left[ \sin(\beta\varphi - x\sqrt{k\beta}) + \cos(\beta\varphi - x\sqrt{k\beta}) - \sin(x\sqrt{k\beta}) - \cos(x\sqrt{k\beta}) \right] \right\}.$$

**610** — On voit que l'importance de la partie oscillante du flux de chaleur (qui est représentée par la fonction périodique de  $\varphi$ ) diminue très rapidement quand on s'enfonce dans l'épaisseur de la paroi, en raison de l'influence du facteur exponentiel à exposant négatif. Comme il nous suffit d'ailleurs, pour l'étude du fonctionnement du moteur, de fixer notre attention sur le flux spécial  $Q_0$  qui s'opère à la surface interne elle-même, nous ferons  $x = 0$ , ce qui fournit l'expression plus simple :

$$Q_0 = - \frac{50\gamma E}{n\pi} \varphi + \frac{50\gamma\sqrt{k}}{n\pi} \Sigma \left[ \frac{C}{\sqrt{\beta}} (\sin \beta\varphi + \cos \beta\varphi - 1) \right].$$

Lorsque l'angle de rotation aura augmenté de la quantité  $m\pi$ , à laquelle correspond la périodicité (et qui est encore indéterminée),

le second terme reprendra la même valeur, et le flux total  $Q_0$  se sera accru d'une quantité que je représenterai par  $q$  :

$$q = -\frac{30m\gamma E}{n};$$

ce qui nous permet de remplacer inversement  $E$  par l'expression :

$$(10) \quad E = -\frac{nq}{30m\gamma};$$

Si en outre nous rendons à  $k$  sa valeur (8, p. 65), la valeur du flux à la surface deviendra :

$$Q_0 = -\frac{q}{m\pi} \varphi + \sqrt{\frac{15c\rho\gamma}{n\pi}} \sum \left[ \frac{C}{\sqrt{\beta}} (\sin \beta\varphi + \cos \beta\varphi - 1) \right].$$

**611** — Le premier terme constitue un appoint qui croit proportionnellement au temps. Il représente les influences extérieures au cylindre. En l'absence de chemise de vapeur, il correspond à la perte par rayonnement.

Si le cylindre est garni d'une double enveloppe, l'effet change de sens, et se rapporte aux calories qui sont transmises par cette dernière au fluide, à travers l'épaisseur du métal. Le rôle de la chemise de vapeur consiste donc à diminuer de la quantité  $\frac{q}{m\pi} \varphi$  les divers flux mesurés à toute profondeur. Elle a pour effet d'amortir les rentrées de chaleur, et d'activer au contraire le tribut de calorique abandonné par la fonte à la vapeur. La condensation pendant l'admission sera dès lors atténuée, et la dessiccation des surfaces accélérée.

Quant à la partie périodique, qui vient en quelque sorte greffer des vagues oscillantes sur ce courant permanent, nous pouvons la mettre sous cette forme plus facile à discuter :

$$\sqrt{\frac{50c\rho\gamma}{n\pi}} \sum \left\{ \frac{C}{\sqrt{\beta}} \left[ \sin \left( \beta\varphi + \frac{\pi}{4} \right) - \frac{1}{\sqrt{2}} \right] \right\}.$$

Lorsque l'expression renfermera divers termes (si l'on veut quelque jour la plier avec plus de précision à des détails d'observation, recueillis par exemple (p. 59) par la méthode de M. Dwelshauvers-Dery), il y aura lieu de suivre pour chaque cas cette discussion. Mais dans l'état actuel de la question expérimentale, nous verrons que tout ce qu'il semble possible de faire judicieusement, consiste à employer un seul terme, en adaptant de diverses manières sa périodicité aux différentes portions du cylindre.

**612** — Dans ces conditions, la partie périodique se réduit à la forme suivante :

$$C \sqrt{\frac{50 c p \gamma}{n \pi \beta}} \left[ \sin \left( \beta \varphi + \frac{\pi}{4} \right) - \frac{1}{\sqrt{2}} \right].$$

On voit qu'elle sera d'abord croissante à partir du point mort; et par suite qu'il y a, pour ce début, cession de chaleur de la part de la vapeur au métal. Elle atteint un maximum, auquel correspond une sorte de saturation de la paroi; puis la fonction devient décroissante, par le fait de la détente et de l'échappement, et la fonte cède de la chaleur au fluide. Vers la fin de la course, la parenthèse redevient croissante pendant la compression, et la cession de calorique se rétablit suivant le premier mode (1).

La différence du maximum au minimum de la fonction enfermée entre les crochets étant égale à 2, l'on voit que le *total de la chaleur alternativement cédée et rendue périodiquement par mètre carré* a pour valeur :

$$Q_1 = 2C \sqrt{\frac{50 c p \gamma}{n \pi \beta}}.$$

*Il est INVERSEMENT proportionnel à la racine carrée du nombre de tours de la machine par minute.*

Mais ce n'est pas précisément cet élément qu'il est le plus essen-

(1) Les instants précis de changement de sens varieront dans la pratique avec les circonstances de la distribution, qui devront influer en principe sur la détermination des coefficients C et  $\beta$ , quand on emploie plusieurs termes dans l'intégrale.



tiel de considérer ; c'est le refroidissement au condenseur, lequel est, non plus périodique, mais croissant avec le temps. Or, dans un délai déterminé, par exemple en une minute, il s'opère  $\beta$  retours périodiques à chaque révolution pour le facteur trigonométrique, et il s'accomplit  $n$  révolutions. Nous devons par suite, pour obtenir le total  $Q_2$  du jeu des échanges de chaleur par minute, multiplier  $Q_1$  par  $n\beta$ , ce qui donne :

$$(11) \quad Q_2 = 2C \sqrt{\frac{50c\gamma n\beta}{\pi}}.$$

*Le refroidissement au condenseur par mètre carré varie donc en raison DIRECTE de la racine carrée du nombre de tours.*

Il faut enfin en venir à considérer cet effet, non plus par unité de surface, mais en lui-même, et pour cela multiplier le résultat précédent par l'aire métallique qui entre en jeu. Or, à puissance égale et pour deux machines géométriquement semblables, le volume est proportionnel à  $n^{-1}$ , les dimensions à  $n^{-\frac{1}{3}}$ , la surface à  $n^{-\frac{2}{3}}$ . En multipliant  $Q_2$  par ce facteur, nous voyons que le résultat sera en raison de  $n^{\frac{1}{3}-\frac{2}{3}}$  ou  $n^{-\frac{1}{3}}$ . Par conséquent *le refroidissement effectif au condenseur varie en raison INVERSE de la racine sixième de la vitesse angulaire.*

La conclusion est que les grandes allures exercent, sous ce rapport, une influence favorable, bien que peu accusée. En outre l'utilité de la double enveloppe décroît pour les machines rapides, puisque le terme qui représente les fluctuations de l'état thermique de la paroi prend alors plus d'importance, par rapport au flux fixe qui a pour origine la chemise de vapeur.

**613** — *Spécialisation.* — Pour pouvoir aller plus loin et préciser davantage les résultats, il devient nécessaire de fixer la périodicité ( $m$  ou  $\beta$ ), et d'établir à cet effet une distinction fondamentale entre les diverses parties de la paroi métallique, en ce qui concerne leur mode d'action.

On peut former un premier groupe à l'aide des surfaces qui se trouvent constamment en rapport avec une même cylindrée de vapeur,

sans jamais entrer en contact avec celle qui agit sur la face opposée du piston, à savoir : le fond du cylindre, la lumière qui s'en trouve rapprochée, et la face du piston située en regard. Nous rangerons dans une seconde catégorie les aires qui ne sont pas, comme les précédentes, en relation avec la cylindrée dès le point mort, et qui n'y arrivent que successivement, mais toujours sans être baignées par la cylindrée opposée; telles que la paroi cylindrique occupée par l'épaisseur du piston au moment du point mort, et la tige de ce dernier. Il restera pour une troisième classe les parois mises alternativement en contact avec les deux cylindrées opposées, qui comprennent la plus grande partie de la surface cylindrique.

En appelant  $\Omega$  la section du piston et  $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$  les trois sommes précédentes, M. Kirsch estime de la manière suivante leur importance relative dans la pratique :

RAPPORT DES SURFACES	MOYENNE	MINIMUM	MAXIMUM
$\frac{\Omega_1}{\Omega}$	4,85	4,40	5,95
$\frac{\Omega_2}{\Omega}$	1,70	1,25	2,05
$\frac{\Omega_3}{\Omega}$	7,00	5,40	8,80

Le second groupe, en s'éloignant beaucoup du troisième pour son mode d'action, se rapproche sensiblement du premier. Toutefois son activité reste atténuée par cette circonstance que son intervention n'est que progressive. Si d'après cela nous l'adjoignons à la première classe, on voit que le chiffre relatif à leur ensemble dans la troisième colonne se rapprochera tellement de celui de la troisième ligne, que nous pouvons nous borner à considérer seulement deux types de superficies, égales l'une à l'autre, et chacune à 8 fois environ la section du piston. Nous les appellerons le *type-couvercle* et le *type-cylindre*.

La distinction fondamentale entre ces deux sortes consiste en ce que le type-couvercle admet comme périodicité la double course, ou

la révolution complète, et le type-cylindre la course simple, ou la demi-révolution. En effet le rôle de ce dernier se reproduit d'une manière identique pour la course rétrograde, à la condition seulement que l'on envisage dans un ordre inverse les divers anneaux qui le composent, ce qui ne change rien au résultat de l'ensemble pris en bloc. Cet aperçu nous oblige donc à établir ici, dans cet exposé, une sorte de bifurcation, pour conduire le calcul à son terme successivement avec l'une et l'autre sorte de surfaces.

**614** — Nous commencerons par le type-couvercle. Sa périodicité est celle de l'angle  $\varphi$  lui-même. Nous prendrons d'après cela, dans le terme unique qui a été conservé ci-dessus :

$$\beta = 1.$$

Il vient alors comme expression de la température dans toute la masse (éq. 9, page 65, et 10, page 67) :

$$t = Ce^{-x\sqrt{k}} \cos(\varphi - x\sqrt{k}) - \frac{nq}{60\gamma} x + F,$$

et en particulier sur la surface interne, quand on fait  $x = 0$  :

$$t = C \cos \varphi + F.$$

Pour déterminer les constantes inconnues, désignons par  $t_1$  la température de la chaudière, que nous pouvons considérer approximativement comme égale à celle du point mort :  $\varphi = 0$ , et par  $t_2$  celle du condenseur, correspondant au point mort opposé :  $\varphi = \pi$ . On aura ainsi :

$$t_1 = F + C, \quad t_2 = F - C,$$

d'où :

$$F = \frac{t_1 + t_2}{2}, \quad C = \frac{t_1 - t_2}{2}.$$

ce qui donne comme expression de la température :

$$t = -\frac{nq}{60\gamma} x + \frac{t_1 + t_2}{2} + \left(\frac{t_1 - t_2}{2}\right) e^{-x\sqrt{k}} \cos(\varphi - x\sqrt{k}),$$

et pour le total des échanges périodiques effectués pendant une minute par mètre carré (éq. 11, p. 69) :

$$Q_2 = (t_1 - t_2) \sqrt{\frac{50 c p \gamma n}{\pi}}.$$

Le refroidissement au condenseur est donc proportionnel à la différence des températures extrêmes. Il sera, pour ce motif, beaucoup plus accentué avec les machines à condensation que dans les moteurs à échappement direct. Les premiers ont, d'après cela, plus encore que ceux-ci, besoin du secours de la chemise de vapeur.

**615** — Envisageons en second lieu les surfaces du type-cylindre.

Nous partagerons par la pensée le cylindre en  $N$  anneaux égaux entre eux; et pour faciliter l'explication, nous supposerons que chacun d'eux soit égal au piston, simplification qui ne portera évidemment pas atteinte à la généralité des conclusions. Désignons par :

$$A_1, A_2, A_3, \dots, A_{N-1}, A_N;$$

la série de ces zones.

Pour le point mort initial,  $A_1$  est recouvert par le piston. Tous les autres anneaux se trouvent en relation avec l'échappement (\*). Pendant la course,  $A_2, A_3, \dots$ , arrivent successivement en contact avec la vapeur, d'abord en pleine pression pour les premiers, puis en détente pour eux et pour les suivants, et vers la fin en échappement anticipé pour tous.

Durant la course rétrograde,  $A_N$  sera d'abord recouvert par le piston, et la série des anneaux :

$$A_{N-1}, A_{N-2}, \dots, A_2, A_1;$$

(\*) Nous faisons abstraction de l'avance à l'admission.

reproduira ensuite les mêmes phénomènes que :

$$A_2, A_3, \dots, A_{N-1}, A_N;$$

dans la course précédente. Si donc nous nous dispensons de scruter individuellement ce qui se passe en un lieu déterminé, pour embrasser par la pensée la totalité de l'ensemble, nous trouvons, pendant le retour du piston, un état de choses identique à celui du mouvement direct. La période devient par conséquent, ainsi qu'il a été dit tout à l'heure, moitié moindre que pour le type-couvercle.

Nous pouvons, à cet égard, nous contenter de fixer notre attention sur une zone élémentaire située symétriquement au milieu du cylindre; car elle jouit directement d'une telle périodicité, se trouvant à égale distance des deux extrémités. Nous lui assimilons donc, au point de vue du résultat totalisé, tout l'ensemble de la surface cylindrique.

**616** — Nous commencerons par faire :

$$\beta = 2,$$

ce qui donne comme expression de la température (éq. 9, p. 65, et 10, p. 67) :

$$t = C'e^{-x\sqrt{2k}} \cos(2\varphi - x\sqrt{2k}) - \frac{nq'}{60\gamma} x + F',$$

et en particulier sur la surface interne, quand on fait  $x = 0$  :

$$t = C' \cos 2\varphi + F'.$$

Pour le point mort, l'anneau *moyen* se trouve en rapport avec l'échappement, ce qui donne à la fois :

$$\varphi = 0, \quad t = t_2, \quad F' + C' = t_2.$$

Au milieu de la course, on obtient une température qui pourra se

déduire du diagramme d'indicateur (page 59), et que nous désignerons par  $t_3$  :

$$\varphi = \frac{\pi}{2}, \quad t = t_3, \quad F' - G' = t_3.$$

Il suit de là :

$$F' = \frac{t_2 + t_3}{2}, \quad G' = \frac{t_2 - t_3}{2}.$$

On a donc comme expression de la température :

$$t = -\frac{nq'}{60\gamma}x + \frac{t_2 + t_3}{2} - \left(\frac{t_3 - t_2}{2}\right)e^{-x\sqrt{2k}} \cos(2\varphi - x\sqrt{2k}),$$

et pour le total des échanges périodiques effectués pendant une minute par mètre carré (éq. 11, p. 69) :

$$Q_2 = (t_3 - t_2) \sqrt{\frac{60cp\gamma n}{\pi}}$$

**617** — Le rapport avec le cas du type-couvercle est ainsi, par unité de surface :

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \sqrt{2} \frac{t_3 - t_2}{t_1 - t_2}.$$

Comme d'ailleurs nous avons reconnu (page 70) que l'on peut considérer comme sensiblement égales entre elles les superficies qui se rapportent à ces deux classes, ce rapport représente en même temps celui des résultats effectifs.

On remarquera encore, d'après la substitution de l'exponentielle  $e^{-x\sqrt{2k}}$  à  $e^{-x\sqrt{k}}$  dans l'expression de la température, que la décroissance de la propagation de chaleur suivant l'épaisseur du métal est encore plus marquée pour la paroi cylindrique qu'avec le type-couvercle.

## CHAPITRE XXXVI

### TIROIR A COQUILLE

#### § 1

#### GÉNÉRALITÉS

**618** — Tout moteur doit présenter un régime périodique. Il est donc nécessaire qu'à des instants déterminés les mêmes relations se trouvent établies entre les faces du piston et les divers états que traverse le fluide moteur. L'appareil qui réalise ces admissions et ces interruptions successives constitue la *distribution*. Il emprunte son propre mouvement à celui de la machine.

La vapeur est fournie au cylindre à travers des conduits qui portent le nom de *lumières*. Un organe spécial les bouche ou les découvre alternativement. Quel que soit son mouvement, celui-ci pourra toujours être décomposé par la pensée en deux autres, l'un normal à la surface dans laquelle est pratiqué l'orifice, l'autre dirigé suivant l'une de ses tangentes. Ajoutons que l'on s'abstient dans la pratique de compliquer inutilement la solution par la coexistence de ces deux composantes, et que l'on n'en emploie jamais qu'une seule à la fois.

Lorsque le mouvement est normal, l'organe mobile prend le nom de *soupe*. La surface fixe en est le *siège*.

Pour le mode tangentiel, on se trouve ramené au cas du déplacement relatif de deux surfaces qui ne cessent pas de rester confondues ensemble dans toute l'étendue d'une superficie finie. Nous

avons étudié ailleurs ce mode de mouvement <sup>(1)</sup>, et reconnu qu'il comporte trois solutions distinctes : 1° deux surfaces cylindriques à directrice quelconque, avec mouvement relatif rectiligne dirigé suivant les génératrices ; 2° deux surfaces de révolution à méridienne quelconque, avec mouvement relatif de rotation autour de leur axe commun ; 3° deux surfaces hélicoïdales à génératrice quelconque, avec mouvement relatif hélicoïdal le long des hélices communes de ces surfaces.

La distribution de la vapeur réclamant, dans le mécanisme destiné à la réaliser, la plus grande simplicité possible, les constructeurs se sont toujours abstenus, avec raison, de recourir à ce dernier système ; mais les deux autres se trouvent représentés dans la pratique.

Les surfaces cylindriques ou prismatiques qui glissent suivant leurs génératrices communes donnent naissance aux *tiroirs*. La partie fixe en est la *glace*. Le plus souvent la surface de contact est plane ; cependant on en rencontre également de courbes <sup>(2)</sup>.

Les surfaces de révolution qui glissent suivant leurs parallèles communs fournissent les *robinets*, appelés aussi *obturateurs*. La partie fixe en est le *boisseau*.

En résumé donc, nous pouvons répartir toutes les distributions en trois catégories, que nous étudierons dans l'ordre suivant : les tiroirs (chap. XXXVI à XLV), les robinets (chap. XLVI), les soupapes (chap. XLVII).

**619** — Dans la première classe, nous distinguerons les distributions à *tiroir unique*, ou à *tiroirs multiples* <sup>(3)</sup>.

Pour commander le tiroir unique à l'aide du mouvement du piston, l'on a proposé plusieurs moyens.

Un premier principe consiste à disposer des tasseaux sur la tige de cet organe, ou sur une poutrelle spéciale de distribution qui fait partie du moteur. Ces appendices viennent rencontrer, aux instants

<sup>(1)</sup> Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 64.

<sup>(2)</sup> Par exemple dans le tiroir à piston (n° 688).

La glace est souvent rapportée sur le cylindre, et coulée en fonte dure. La face inférieure du tiroir est garnie de métal antifricition, que l'on renouvelle de temps en temps

<sup>(3)</sup> Nous consacrerons à ces derniers le chapitre XLI.



voulus, des heurtoirs qui attaquent le tiroir et l'amènent à la destination voulue. Mais les chocs et le lancé qui se produiraient aux allures vives doivent faire réserver cette solution pour des machines de peu de masse et particulièrement lentes, telles que certaines pompes à traction directe <sup>(1)</sup>.

On peut, pour obtenir un mouvement continu du tiroir, introduire un levier et des tringles de renvoi qui le relie à la tige du piston, et lui communiquent une vitesse sensiblement proportionnelle à celle de ce dernier. On diminue ainsi les frottements dus à l'emploi des excentriques, lesquels supposent d'ailleurs la présence d'un arbre tournant, dont toutes les machines ne sont pas pourvues.

On a eu recours à l'*excentrique triangulaire* <sup>(2)</sup> ou *culbuteur*, qui réalise des intermittences de mouvement continu et d'immobilité. Mais cet organe est dur, et semble avoir disparu de la pratique.

La solution courante consiste dans l'emploi de l'*excentrique circulaire à collier* (fig. 537, 538). Il réalise le mouvement sinusoïdal <sup>(3)</sup>. Cet organe constitue, au point de vue cinématique, l'équivalent d'une manivelle qui aurait pour centre de son maneton le centre de courbure du noyau d'excentrique. Il augmente à la vérité la perte par frottement <sup>(4)</sup>, mais il présente l'avantage de pouvoir être calé en un point quelconque de l'arbre, tandis que la manivelle ne peut

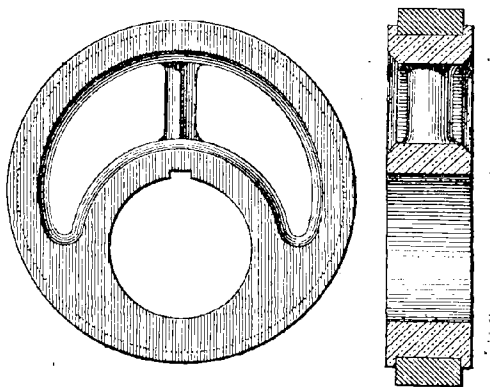


Fig. 537 et 538. — Excentrique circulaire à collier.  
(Élévation et coupe).

<sup>(1)</sup> Haton de la Goupillière. *Cours d'exploitation des mines*, t. II, p. 297.

<sup>(2)</sup> Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 94.

<sup>(3)</sup> Quand on suppose infinie la longueur des bielles, comme nous le ferons jusqu'à nouvel ordre. Les chapitres XLIV et XLV seront consacrés à l'influence spéciale de l'obliquité des bielles.

<sup>(4)</sup> Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 567.

s'installer qu'à l'extrémité de ce dernier, ou sur le vilebrequin d'un arbre coudé (fig. 331, p. 24).

## § 2

### TIROIR NORMAL

**620** — Le cas le plus simple de l'emploi du tiroir unique constitue le *tiroir normal*. Ce mode de distribution est au fond identique à celui que nous avons déjà rencontré pour la machine à colonne d'eau à double effet <sup>(1)</sup>.

Le fonctionnement du tiroir dépend essentiellement du mouvement de son bord latéral, qui couvre et découvre l'orifice de la glace en *admettant* ou *coupant* la vapeur. Toutefois comme tous les points d'un solide en translation sont animés de mouvements iden-

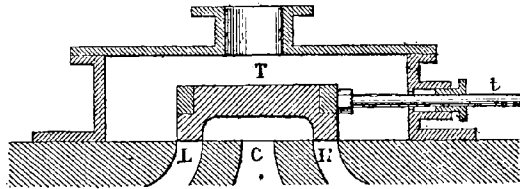


Fig. 339. — Tiroir normal (coupe).

tiques, on pourra tout aussi bien, suivant que cela fournira plus de facilité dans chaque cas, attacher sa pensée à n'importe quel autre point, tel que le centre du tiroir, l'articulation qui réunit l'extrémité de sa barre à la bielle d'excentrique, etc.

Deux lumières L, L' (fig. 339) font communiquer les extrémités du cylindre moteur avec la *chambre à vapeur*. Un troisième orifice C établit la relation avec le condenseur ou l'atmosphère extérieure. Mais la communication n'existe jamais entre C et la chambre à vapeur. Le tiroir T les sépare constamment l'une de l'autre.

Dans la *position normale*, ce dernier recouvre à la fois les lumières L, L', sans déborder sur leur largeur d'aucun côté. En raison

<sup>(1)</sup> Voy. t. I, p. 322; fig. 148 et 149.

de son mouvement alternatif, il s'écarte également de cette situation vers la droite et vers la gauche alternativement, mais jamais assez, ainsi qu'il vient d'être dit, pour démasquer l'échappement C qu'il ne doit pas cesser de recouvrir.

**621** — Quand le tiroir T occupe sa position normale, le piston P (fig. 340) se trouve à l'un de ses points morts. Je supposerai que

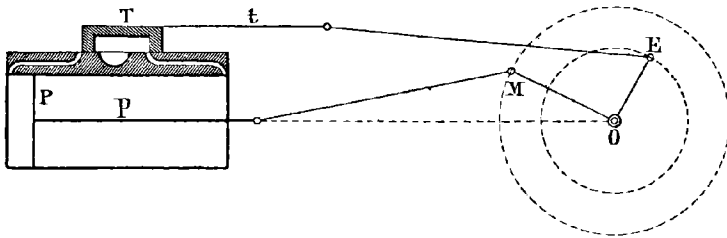


Fig. 340.

ce soit celui de gauche, et que la rotation de l'arbre s'accomplisse dans le sens du mouvement des aiguilles d'une montre. Le piston commence dès lors à se mouvoir vers la droite, et il doit en être de

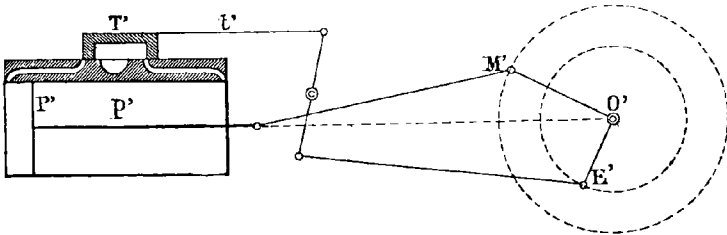


Fig. 341.

même du tiroir, afin que ce dernier fournisse la vapeur sur la face gauche du premier. Par ce motif, les deux manivelles <sup>(1)</sup> qui les relie l'un et l'autre à l'arbre moteur O doivent être calées à angle droit, et de telle sorte que celle du tiroir précède l'autre de 90 degrés.

Dans ces conditions en effet, T se trouve au milieu de son trajet lorsque P est au fond de course de gauche, et tous les deux se

<sup>(1)</sup> Ou mieux la manivelle motrice OM du piston, et l'excentricité OE de l'excentrique qui conduit le tiroir.

portent à droite sous l'influence de la vitesse acquise du volant. Le tiroir démasque le bord de gauche de L (fig. 539) pour admettre la vapeur, et le bord gauche de L' pour laisser écouler dans l'échappement C le fluide qui vient d'agir pendant la course précédente, et qui remplit actuellement le cylindre sur la face droite de P' (fig. 540). Les deux *découverts* vont en croissant, jusqu'à ce que T parvienne à son *elongation* maximum de droite, au moment où P atteint le milieu du cylindre. Ils diminuent ensuite, tandis que T rétrograde jusqu'à la position normale, et que P accomplit la seconde moitié de son trajet.

Pendant ces deux phases, la manivelle motrice a décrit successivement les deux quadrants supérieurs (de gauche et de droite) de sa demi-révolution, et l'excentricité a parcouru les deux quadrants de droite (supérieur et inférieur) de la sienne. A ce moment, nous retrouvons le tiroir dans sa position normale, et le piston au point mort de droite. Un fonctionnement tout à fait semblable, mais de sens inverse, se produira ensuite pendant la seconde demi-révolution, accomplie dans le même sens par l'arbre moteur.

**622** — Les explications qui précèdent supposent la *commande directe* (fig. 540). On emploie parfois la *commande inverse* (fig. 541), qui diffère de la précédente en ce qu'on interpose, entre la barre du tiroir et sa bielle d'excentrique, un balancier oscillant sur son milieu. Cette complication peut devenir nécessaire dans certains cas, pour racheter les dimensions transversales des pièces.

Le tiroir devant posséder néanmoins le même mouvement que dans le cas précédent, il faut alors que l'excentricité E' se déplace en sens contraire de E, c'est-à-dire qu'elle se trouve placée dans le demi-cercle inférieur, et non plus dans la partie supérieure. L'excentricité doit donc suivre à 90 degrés de distance la manivelle motrice, au lieu de la précéder.

Pour fixer le langage dans toutes les explications qui vont suivre, nous supposerons essentiellement la commande directe.

## § 5

**TIROIR A AVANCE ANGULAIRE ET RECOUVREMENT**

**623** — L'emploi du tiroir normal est caractérisé par l'absence de détente; la pleine pression s'exerçant pendant la totalité de la course. En effet pour que l'expansion de la vapeur pût continuer à pousser le piston après isolement de ce fluide, il faudrait que le tiroir stationnât pendant une durée finie dans sa position normale, de manière à maintenir fermée la lumière d'admission, tandis qu'il ne fait que passer par cette situation. Un pareil stationnement serait d'ailleurs inadmissible, puisqu'il aurait comme résultat de boucher l'orifice d'évacuation.

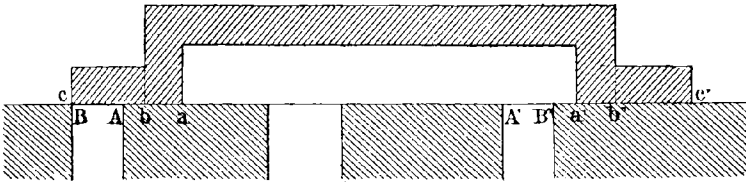


Fig. 542.

Pour que l'obturation de l'admission persiste pendant un certain glissement du tiroir sur la glace, il devient donc nécessaire que la base de ce dernier soit plus large que la lumière. On distingue alors dans ses portées (fig. 542) les segments *ab*, *a'b'*, qui correspondent aux débouchés *AB*, *A'B'* des lumières au moment du passage par la position normale, et les excédents *bc*, *b'c'*, qui prennent le nom de *recouvrements extérieurs*. Mais ce changement, si simple en apparence, nous oblige à reprendre de fond en comble l'explication précédente.

**624** — Tout d'abord le tiroir ne doit plus, comme tout à l'heure, se trouver dans sa situation normale pour le passage au point mort. Il importe, en effet, que le démasquement de l'orifice s'opère immé-

diatement, afin que la vapeur vienne sans retard combler l'espace engendré par le piston, et entretenir le mouvement par son action motrice. Il faut donc que l'extrémité  $c$  du recouvrement affleure au bord gauche B de la lumière. En d'autres termes, le recouvrement tout entier  $bc$  a dû déjà passer devant ce point, pendant la fin de la course rétrograde du piston, depuis le moment où le tiroir a traversé la position normale, pour laquelle  $ab$  coïncidait avec AB.

Ce ne sera plus, par conséquent, d'un simple angle droit que l'excentricité devra précéder la manivelle motrice. Il faut adjoindre

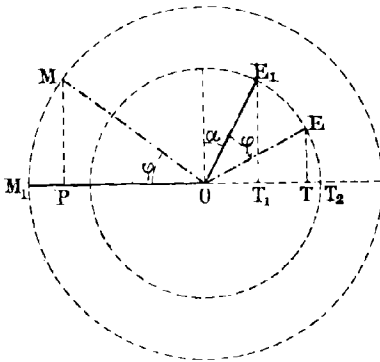


Fig. 545.

à cet écart fondamental un certain angle capable de porter, de la quantité voulue, le tiroir à droite de sa situation normale. Ce supplément est appelé *avance angulaire* ou *angle de calage*, et il est facile d'en déterminer la valeur en fonction des éléments du tiroir.

Représentons à cet effet par  $l$  la largeur  $ab$  de la lumière, et par  $r$  celle  $bc$  du recouvrement.

Puisque nous négligeons l'obliquité de la bielle, son autre extrémité, et par conséquent le piston lui-même, se meut comme la projection P (fig. 545) de l'articulation M de la manivelle motrice, en même temps que le tiroir comme la projection T du centre d'excentricité E.

Si donc  $M_1OE_1$  représente le système des deux manivelles au point mort  $M_1$  du piston, l'élongation initiale  $OT_1$  du tiroir aura pour valeur le recouvrement :

$$\overline{OT_1} = r.$$

D'un autre côté, pour que la lumière se trouve complètement démasquée par le surplus  $T_1T_2$  de la demi-course du tiroir, il faudra que

ce complément soit égal à  $L$ . On aura donc comme valeur du rayon d'excentricité :

$$\overline{OT}_2 = l + r.$$

Dans ces conditions, l'avance angulaire  $\alpha$  se trouve déterminée dans le triangle rectangle  $OE, T_1$  par la formule :

$$\sin \overline{OE, T_1} = \frac{\overline{OT}_1}{\overline{OE}_1},$$

c'est-à-dire :

$$(11) \quad \sin \alpha = \frac{r}{l+r}.$$

Nous désignerons sous le nom *d'équation paramétrique* cette relation fondamentale entre les trois paramètres  $l$ ,  $r$ ,  $\alpha$  de la distribution.

**625** — Il est maintenant facile d'établir les équations des deux mouvements rectilignes du piston et du tiroir.

Si nous figurons en MOE une position quelconque du système invariable de leurs manivelles, nous aurons en P et T les points représentatifs des déplacements de ces deux organes sur leurs courses respectives.

Le *parcours*  $M_1P$  du piston, compté à partir de son *fond de course*  $M_1$ , aura pour valeur :

$$x = \overline{OM}_1 - \overline{OP},$$

c'est-à-dire, en appelant  $c$  la course du piston, ou  $\frac{c}{2}$  la longueur de la manivelle motrice :

$$(12) \quad x = \frac{c}{2} (1 - \cos \varphi),$$

en fonction de l'*azimut*  $\varphi$  évalué à partir du *point mort*. On peut

également le mettre sous la forme plus condensée :

$$(15) \quad x = c \sin^2 \frac{\varphi}{2}.$$

L'élongation  $\overline{OT}$  du tiroir, comptée à partir de sa *position normale*, a de son côté pour valeur :

$$\overline{OT} = \overline{OE} \cos \overline{TOE},$$

c'est-à-dire :

$$(14) \quad z = (l + r) \sin (\varphi + \alpha),$$

ce que l'on peut également écrire, d'après la relation paramétrique (éq. 11) :

$$(15) \quad z = r \frac{\sin (\varphi + \alpha)}{\sin \alpha}.$$

**626** — Ces formules vont nous permettre de discuter les diverses phases de la distribution que procure *le tiroir à avance angulaire et recouvrement*.

1° — POINT MORT INITIAL. — Le piston est à fond de course à gauche, et la manivelle motrice à son point mort, ce qui donne directement :

$$\varphi_1 = 0,$$

et par suite, d'après les formules (12) et (14) :

$$x_1 = 0, \quad z_1 = r.$$

Le système occupe alors la position  $M_1OE_1$ , représentée sur les figures 342 et 343.

2° — DÉMASQUEMENT EN GRAND. — Le maximum d'élongation du tiroir est caractérisé directement par la valeur :

$$z_2 = l + r.$$



L'équation (14) donne alors :

$$\sin (\varphi_2 + \alpha) = 1,$$

$$\varphi_2 + \alpha = 90,$$

$$\varphi_2 = 90 - \alpha.$$

Il suit donc des relations (12) et (11) :

$$x_2 = \frac{c}{2} (1 - \sin \alpha) = \frac{c}{2} \left( 1 - \frac{r}{l+r} \right),$$

ou finalement :

$$x_2 = \frac{cl}{r(l+r)}.$$

Le système occupe alors la position  $M_2OE_2$  représentée sur les figures 344 et 345.

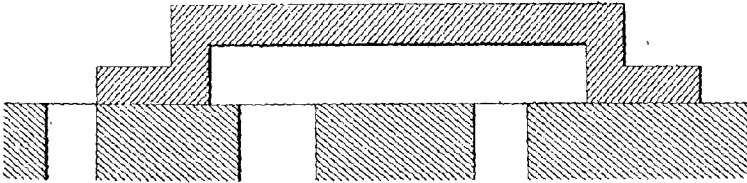


Fig. 344.

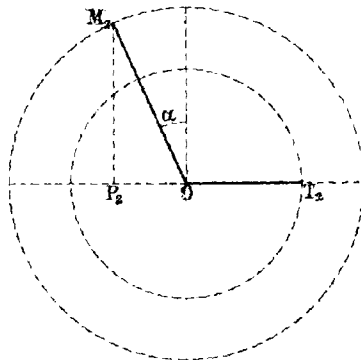


Fig. 345.

5° — FIN DE L'ADMISSION. COMMENCEMENT DE LA DÉTENTE. — L'admission prend fin quand le tiroir revient à sa position initiale (fig. 342), en refermant exactement la lumière. Nous poserons donc directement :

$$x_3 = r.$$

Dès lors la formule (15) nous donne :

$$\sin(\varphi_3 + \alpha) = \sin \alpha.$$

$$\varphi_3 + \alpha = 180 - \alpha,$$

et enfin ;

$$(16) \quad \varphi_3 = 180 - 2\alpha.$$

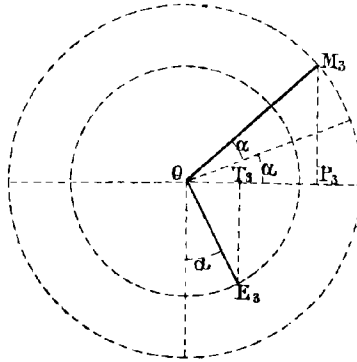


Fig. 346.

On a ensuite, d'après la relation (13) :

$$x_3 = c \sin^2(90 - \alpha),$$

c'est-à-dire :

$$(17) \quad x_3 = c \cos^2 \alpha,$$

ou sous une autre forme (éq. 11) :

$$x_3 = c(1 - \sin^2 \alpha) = c \left[ 1 - \frac{r^2}{(l+r)^2} \right] = \frac{c(l^2 + 2lr)}{(l+r)^2},$$

et enfin :

$$(18) \quad x_5 = \frac{cl(l+2r)}{(l+r)^2}.$$

Le système occupe alors la position  $M_5OE_5$  représentée sur les fig. 342 et 346.

4° — FIN DE LA DÉTENTE. COMMENCEMENT DE L'ÉCHAPPEMENT. — La détente se termine lorsque le bord intérieur de droite affleure à celui de la lumière. L'orifice commence alors à se démasquer vers l'intérieur, et l'échappement prend naissance. Cet instant correspond donc au passage du tiroir par la position normale.

Nous poserons d'après cela directement :

$$z_4 = 0,$$

c'est-à-dire (14) :

$$\sin(\varphi_4 + \alpha) = 0,$$

$$\varphi_4 + \alpha = 180,$$

et enfin :

$$\varphi_4 = 180 - \alpha.$$

Il s'ensuit (12) :

$$(19) \quad \begin{aligned} x_4 &= \frac{c}{2}(1 + \cos \alpha) \\ &= \frac{c}{2}(1 + \sqrt{1 - \sin^2 \alpha}) \\ &= \frac{c}{2} \left[ 1 + \sqrt{1 - \frac{r^2}{(l+r)^2}} \right] \\ &= \frac{c}{2(l+r)} [l+r + \sqrt{(l+r)^2 - r^2}], \end{aligned}$$

et enfin :

$$x_4 = \frac{c}{2(l+r)} [l+r + \sqrt{l(l+2r)}].$$

Le système occupe alors la position  $M_4OE_4$ , représentée sur les figures 347 et 348.

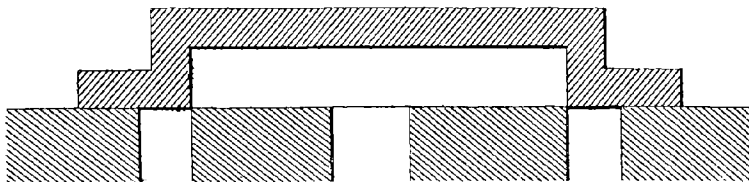


Fig. 347.

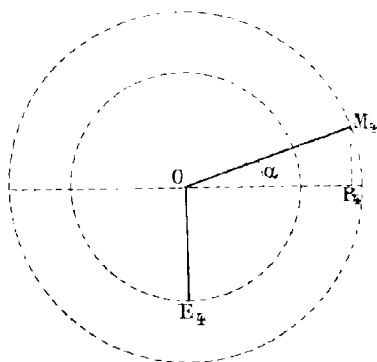


Fig. 348.

5° — POINT MORT FINAL. — La fin de la course nous fournit directement :

$$x_s = c.$$

Il s'ensuit (12) :

$$e_s = 180,$$

et (14) :

$$z_s = r \frac{\sin (180 + \alpha)}{\sin \alpha},$$

c'est-à-dire :

$$z_s = -r.$$

Le tiroir se trouve parvenu à une situation symétrique de celle qui correspond au point de départ.

Le système occupe alors la position  $M_5OE_5$ , représentée sur les figures 349 et 350.

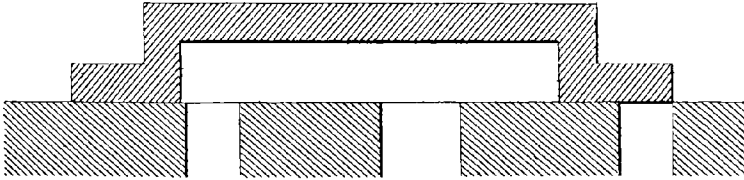


Fig. 549.

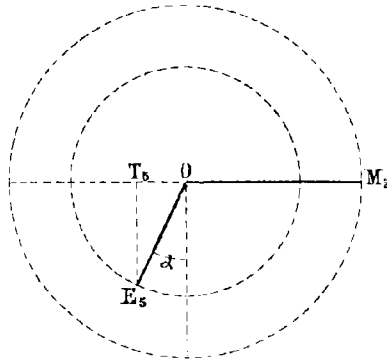


Fig. 550.

**627** — A ce moment tout est prêt pour la contre-course. Nous retrouverons successivement sur la même face du piston, *devenue résistante*, les diverses phases qui, lorsqu'elle était *motrice*, se succédaient tout à l'heure sur la face opposée. Il va donc nous être facile de les suivre, en reprenant sur les figures précédentes les situations correspondantes du tiroir.

Depuis le point de départ (fig. 342) jusqu'à la fin de la détente (fig. 347), l'évacuation reste libre. Cette phase porte le nom d'*échappement proprement dit*. Elle succède à l'*échappement anticipé*, ou *avance à l'échappement*, qui a marqué la fin de la course motrice, et constitue avec cet intervalle la période totale d'*échappement*.

A partir de la fin de la détente (fig. 347) jusqu'à l'extrémité de la course (fig. 349), la lumière d'évacuation reste fermée. La vapeur raréfiée par l'échappement se trouve désormais confinée, et se comprime sur elle-même par le recul du piston. C'est la phase de *compression*, dont nous analyserons en temps et lieu les avantages et les inconvénients (n° 669).

**628** — Il est aisé d'assigner la durée de ces diverses périodes, ou plus simplement les angles correspondants, puisque nous considérons le mouvement de l'arbre comme uniforme.

La rotation qui s'opère pendant l'admission a pour valeur :

$$\varphi_3 - \varphi_1 = 180 - 2\alpha;$$

et celle qui correspond à la détente :

$$\varphi_4 - \varphi_3 = (180 - \alpha) - (180 - 2\alpha) = \alpha.$$

La durée angulaire de l'échappement anticipé ne diffère pas de celle de la compression, qui s'opère simultanément sur la face opposée du piston. Elle est égale à :

$$\varphi_5 - \varphi_4 = 180 - (180 - \alpha) = \alpha.$$

L'échappement total comprend donc, en premier lieu l'échappement anticipé  $\alpha$ , et en outre toute la partie de la contre-course qui n'est pas employée à la compression, c'est-à-dire  $180 - \alpha$ ; soit en tout  $180^\circ$ .

Nous pouvons former par conséquent le tableau suivant :

ADMISSION. . .	$180 - 2\alpha,$	
DÉTENTE. . . .	$\alpha,$	
ÉCHAPPEMENT. .	$180$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{ÉCHAPPEMENT ANTICIPÉ. . . . . } \alpha, \\ \text{ÉCHAPPEMENT PROPREMENT DIT. . } 180 - \alpha, \end{array} \right.$
COMPRESSION. .	$\alpha.$	

**629** — Bien que l'échappement anticipé présente, comme nous le

verrons (n° 667), une utilité réelle, celle-ci n'apparaît pas aussi directement que pour les phases fondamentales de l'admission et de la détente ; et il est en outre incontestable qu'elle se changerait en inconvénient, si l'on venait à exagérer la durée de cette période.

On peut donc trouver excessif qu'elle ait une étendue égale à celle de la détente. Il importe toutefois de remarquer à cet égard que les angles décrits par la manivelle ont un rapport beaucoup moins direct avec le travail effectué, que les espaces linéaires parcourus par le piston. Or ces derniers ont pour rapport, pendant les phases de la détente et de l'échappement anticipé :

$$\begin{aligned}
 \frac{x_4 - x_5}{x_5 - x_4} &= \frac{\cos \varphi_5 - \cos \varphi_4}{\cos \varphi_4 - \cos \varphi_5} \\
 &= \frac{\sin \frac{\varphi_4 + \varphi_5}{2} \sin \frac{\varphi_4 - \varphi_5}{2}}{\sin \frac{\varphi_5 + \varphi_4}{2} \sin \frac{\varphi_5 - \varphi_4}{2}} \\
 &= \frac{\sin \frac{3\alpha}{2} \sin \frac{\alpha}{2}}{\sin^2 \frac{\alpha}{2}} \\
 &= \frac{3 \sin \frac{\alpha}{2} - 4 \sin^3 \frac{\alpha}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}} \\
 &= 3 - 4 \sin^2 \frac{\alpha}{2} \\
 &= 1 + 2 \left( 1 - 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} \right) \\
 &= 1 + 2 \cos \alpha,
 \end{aligned}$$

et enfin (éq. 17) :

$$\frac{x_4 - x_5}{x_5 - x_4} = 1 + 2 \sqrt{\frac{x_5}{c}}.$$

On voit par là que ce rapport, au lieu d'être égal à l'unité comme celui des angles correspondants, lui reste toujours supérieur, et

d'autant plus que l'admission sera plus longue, c'est-à-dire la détente plus courte, ainsi que l'échappement anticipé. Si l'on suppose, par exemple, que la détente commence au quart de la course, le rapport est égal à 2. Pour une détente infiniment courte, quand on se rapproche indéfiniment de l'emploi du tiroir normal, ce rapport tend vers une limite égale à 3.

#### § 4

#### RECOUVREMENT INTÉRIEUR

**630** — Le défaut que nous venons de signaler n'est donc pas aussi saillant qu'il le paraissait au premier abord. Cependant le correctif précédent reste bien limité dans son efficacité. Aussi les constructeurs ont-ils été conduits à en introduire un autre dans la disposition même du tiroir, en lui ajoutant un *recouvrement*

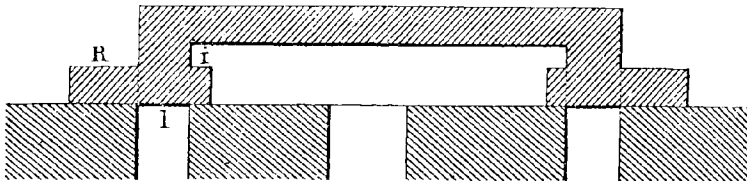


Fig. 351.

*intérieure* (fig. 351); c'est-à-dire en faisant, dans la position normale, déborder ses embases vers l'intérieur des lumières, en même temps que vers l'extérieur. Cette adjonction a en effet pour résultat de retarder le moment où s'effectuera le démasquement de la lumière du côté de l'évacuation, et par conséquent de permettre de raccourcir à volonté la durée de l'échappement anticipé.

Malheureusement il résulte de la symétrie nécessaire du tiroir, pour l'identité des deux courses du piston, que la lumière de départ se trouve, dans le retour du tiroir vers la gauche, masquée d'autant plus tôt par le recouvrement intérieur, ce qui avance le début de la compression, et augmente la durée de cette phase d'un intervalle



égal à celui qui a été gagné sur l'échappement anticipé. Or, nous pouvons répéter en ce qui la concerne, comme pour ce dernier, que bien qu'elle présente une utilité réelle (n° 669), on risque de changer celle-ci en un inconvénient en exagérant la durée de cette période.

Pour cette raison, le recouvrement intérieur se trouve toujours réduit à une très faible valeur, de quelques millimètres seulement.

Il convient d'ajouter que l'on rencontre parfois, quoique dans des cas très rares, une disposition inverse, c'est-à-dire une valeur négative de cet élément, donnant lieu à un *découvert intérieur* (<sup>1</sup>), qui a pour effet de retarder la compression et d'augmenter la période d'échappement anticipé.

## § 5

### ADMISSION ANTICIPÉE

**631** — Il me reste à indiquer une autre modification beaucoup plus fréquente que la précédente, et qui est d'un usage courant. On l'appelle *admission anticipée*, ou *avance à l'admission* (<sup>2</sup>).

Lorsque nous discuterons en détail les fonctions dynamiques que remplit la vapeur, nous reconnaitrons (n° 674) l'importance qui s'attache à ce que, dès le fond de course, le contact du fluide se trouve régulièrement établi avec le piston. Or un tel résultat serait incompatible en principe avec la simultanéité rigoureuse entre les positions de cet organe et du tiroir, que nous avons admises au moment du point mort. Aussi a-t-on imaginé de faire commencer l'admission un peu avant la fin de la contre-course.

Pour rattacher cette nouvelle distribution à la précédente, je désignerai par  $\delta$  l'avance à l'admission, et par  $\rho$  la valeur effective du recouvrement extérieur. La quantité initiale dont le tiroir doit

(<sup>1</sup>) On peut citer comme exemple une machine de M. Chaligny qui figurait à l'Exposition universelle de 1889, avec un découvert intérieur très prononcé. Voir également les distributions Polonceau (n° 752) et Gonzenbach (n° 754).

(<sup>2</sup>) Il est très nécessaire, lorsque le mot *avance* se trouve employé seul, comme il arrive fréquemment, de ne pas confondre cette avance *linéaire* avec l'avance *angulaire*, pour laquelle on doit préférer la dénomination d'angle de calage.

s'écarter à droite de la position normale, et qui a été désignée par  $r$  dans l'équation paramétrique (11), doit avoir actuellement pour valeur :

$$(20) \quad r = \delta + \rho,$$

puisque la totalité du recouvrement  $\rho$  doit être passée depuis un temps suffisant, pour qu'un découvert  $\delta$  se soit en outre produit entre son extrémité et le bord de la lumière, au moment où le piston parvient au fond de course. Nous conserverons d'ailleurs pour le tiroir la même excentricité  $l + r$ , avec ce recouvrement  $\rho$  et un démasquement en grand  $\lambda$ , c'est-à-dire une excentricité  $\lambda + \rho$  constituant sa demi-course, ce qui donne :

$$(21) \quad l + r = \lambda + \rho.$$

Il vient par suite, en retranchant membre à membre :

$$l = \lambda - \delta.$$

On aura donc pour la valeur de l'angle de calage (éq. 11) :

$$\sin \alpha = \frac{\delta + \rho}{\lambda + \rho}.$$

Il résulte de cette modification une perturbation complète du calcul qui a été présenté ci-dessus (nos 625 et 626). En effet, la détente ne s'effectuera plus par le retour du tiroir à l'élongation initiale  $r$ , laquelle laisserait encore subsister un vide  $\delta$ . La vapeur ne sera coupée qu'un peu plus tard, lorsque le tiroir aura parcouru en outre, dans son trajet rétrograde, cet espace  $\delta$ . En d'autres termes, ce sera pour l'élongation  $\rho$ , ou  $r - \delta$ , que commencera la détente, afin que le bord du recouvrement affleure exactement à celui de la lumière.

Mais je ne m'attacherai pas plus que pour le cas du recouvrement intérieur, à reconstituer, à ce point de vue, le calcul précédent; attendu qu'il ne serait d'aucun secours aux praticiens. Les études des projets se font en effet, dans ces cas complexes, non

par la voie analytique, mais à l'aide de procédés graphiques à l'examen desquels nous consacrerons le chapitre suivant.

## § 6

### VITESSE D'ÉCOULEMENT

**632** — Nous avons vu ci-dessus <sup>(1)</sup>, comment on peut déterminer la vitesse d'écoulement de la vapeur à travers l'orifice qui lui est ouvert. Mais c'est à condition que les circonstances thermiques du problème soient suffisamment spécifiées. Or elles ne sauraient, dans la pratique, l'être avec rigueur pour le cas actuel. Nous obtiendrons du moins une première approximation en supposant la densité constante, c'est-à-dire en admettant l'égalité du volume de vapeur qui s'introduit avec une vitesse inconnue  $v$ , avec celui qui est engendré par le piston pendant un temps élémentaire.

L'espace parcouru par ce dernier nous est fourni par la différentiation de l'équation (12) :

$$dx = \frac{c}{2} \sin \varphi d\varphi.$$

Si donc  $A$  désigne la section du cylindre, et  $\omega$  la vitesse angulaire  $\frac{d\varphi}{dt}$ , le volume engendré aura pour expression :

$$\frac{Ac\omega}{2} \sin \varphi dt.$$

D'autre part, le débit élémentaire est le produit du temps  $dt$  par la vitesse inconnue  $v$ , et par la section ouverte à l'écoulement. Celle-ci est un rectangle présentant une largeur transversale que nous désignerons par  $a$ , et une hauteur égale au découvert. Ce dernier élément a pour valeur initiale l'avance à l'admission  $\varepsilon$ , à l'instant du passage au point mort, pour lequel l'excentricité est inclinée

(1) Tome I, p. 802.

sous l'angle de calage  $\alpha$ , de manière à réaliser pour le tiroir une élongation  $(\lambda + \rho) \sin \alpha$ . Après une rotation  $\varphi$ , l'inclinaison est devenue  $\alpha + \varphi$ , et l'élongation  $(\lambda + \rho) \sin (\alpha + \varphi)$ . L'augmentation qu'a subie le découvert initial  $\delta$  est donc :

$$(\lambda + \rho) [\sin (\alpha + \varphi) - \sin \alpha] = 2(\lambda + \rho) \sin \frac{\varphi}{2} \cos \left( \frac{\varphi}{2} + \alpha \right).$$

Le débit élémentaire sera par conséquent :

$$av \left[ \delta + 2(\lambda + \rho) \sin \frac{\varphi}{2} \cos \left( \frac{\varphi}{2} + \alpha \right) \right] dt.$$

En égalant entre elles ces deux valeurs, on en déduit :

$$v = \frac{Ac\omega \sin \varphi}{2a \left[ \delta + 2(\lambda + \rho) \sin \frac{\varphi}{2} \cos \left( \frac{\varphi}{2} + \alpha \right) \right]}$$

A défaut d'avance à l'admission, il vient, pour  $\delta = 0$  :

$$v = \frac{Ac\omega \cos \frac{\varphi}{2}}{2a(\lambda + \rho) \cos \left( \frac{\varphi}{2} + \alpha \right)}.$$

Si nous supposons en outre l'absence de recouvrement, en faisant  $\rho = 0$  et  $\alpha = 0$ , nous obtiendrons :

$$v = \frac{Ac\omega}{2a\lambda},$$

valeur constante, ainsi que nous l'avons déjà fait remarquer dans une autre occasion <sup>(1)</sup>, comme une propriété intéressante du tiroir normal.

(1) Tome I, p. 324, note 5.

## CHAPITRE XXXVII

### MÉTHODES GRAPHIQUES

4

#### PROBLEME INVERSE DE LA DISTRIBUTION

**633** — Le chapitre précédent comprend l'étude *directe* de la distribution par tiroir unique. Mais le problème se pose le plus souvent en sens inverse, et l'on demande alors, non plus de prévoir les effets d'un tiroir donné, mais de déterminer ce dernier en vue de réaliser certains résultats assignés à l'avance.

C'est ordinairement le degré de détente *géométrique*<sup>(1)</sup> que l'on s'impose *a priori*, ou, en d'autres termes, le rapport  $\frac{1}{p}$  de l'admission  $x_3$  à la course  $c$  du piston :

$$\frac{1}{p} = \frac{x_3}{c},$$

$p$  désignant un nombre supérieur à l'unité <sup>(2)</sup>.

(1) Voy. t. I, p. 411, note 2.

(2) Le commencement de l'échappement anticipé sur la face motrice du piston, ainsi que la compression sur la face opposée, en devient une conséquence d'après les formules 19 et 17 :

$$\frac{x_4}{c} = \frac{1 + \cos \alpha}{2} = \frac{1 + \sqrt{\frac{x_3}{c}}}{2} = \frac{1 + \frac{1}{\sqrt{p}}}{2}.$$

L'angle de calage se déduit alors immédiatement de la formule (17) :

$$\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{p}}.$$

On obtient en second lieu le rapport du recouvrement à la largeur de la lumière à l'aide de la relation (18), qui devient :

$$\frac{1}{p} = \frac{1 + 2 \frac{r}{l}}{1 + \left(\frac{r}{l}\right)^2},$$

et en ordonnant :

$$\left(\frac{r}{l}\right)^2 - 2(p-1) \frac{r}{l} - (p-1) = 0.$$

Cette équation du second degré a son dernier terme négatif, et par suite deux racines de signes contraires. Celle qui est positive convient seule à la question. Elle a pour valeur, toutes réductions faites :

$$\frac{r}{l} = p - 1 + \sqrt{p(p-1)}.$$

D'après cela, on se donnera directement la valeur de  $l$ , en vue d'obtenir un découvert suffisant pour ne pas étrangler l'admission, sans pourtant exagérer l'espace nuisible (1). La formule fera dès lors connaître  $r$ . Quant à la longueur du tiroir, elle reste arbitraire, et sans influence immédiate sur la distribution. On la fixera en observant encore une juste mesure entre la crainte d'augmenter l'espace nuisible par le trop grand allongement des lumières, si leurs débouchés étaient trop rapprochés du milieu, ou d'exagérer, par la tendance opposée, la pression sur le dos du tiroir, ainsi que le frottement qui en est la conséquence (2).

(1) N° 650 et 662.

(2) N° 662 et 685.

**634** — Il ne sera pas inutile de présenter ici un aperçu de la gradation numérique que suivent les divers éléments de la question, d'après la série des valeurs croissantes du degré de détente géométrique :

DEGRÉ DE DÉTENTE	RAPPORT DU RECOURVEM <sup>nt</sup> à la LUMIÈRE	ANGLE DE CALAGE	COMMENCEMENT DE L'ÉCHAPPEMENT ANTICIPÉ ET DE LA COMPRESSION	LONGUEUR PARCOURUE pendant la détente	LONGUEUR PARCOURUE pendant la compression	RAPPORT DES LONGUEURS de compression et de détente
$\frac{x_1}{c} = \frac{1}{p}$	$\frac{r}{l}$	$\alpha$	$\frac{x_1}{c} = \frac{1 + \cos \alpha}{2}$	$\frac{x_1 - x_2}{c}$	$1 - \frac{x_1}{c}$	$\frac{c - x_1}{x_1 - x_2}$
0,90	0,460	18° 22'	0,975	0,075	0,025	0,355
0,80	0,809	26° 54'	0,947	0,147	0,053	0,360
0,70	1,214	33° 15'	0,918	0,218	0,082	0,375
0,60	1,720	39° 15'	0,887	0,287	0,115	0,394
0,50	2,410	45° 00'	0,854	0,354	0,146	0,412
0,40	3,436	50° 46'	0,816	0,416	0,184	0,442
0,30	5,115	56° 46'	0,774	0,474	0,226	0,476
0,20	8,802	63° 26'	0,724	0,524	0,276	0,529
0,10	18,487	71° 54'	0,658	0,558	0,542	0,613

Ce tableau a pour but de mettre en évidence les exagérations inadmissibles auxquelles conduisent, sans que l'on puisse s'y soustraire, les courtes admissions. Elles constituent le motif principal qui a conduit à la création des divers types de distribution que l'on a cherché à substituer au tiroir unique, et que nous étudierons ultérieurement.

Il est nécessaire d'ajouter que la méthode analytique qui précède est rarement employée dans les ateliers. On lui préfère des procédés graphiques appelés *diagrammes*, que nous allons examiner successivement. Dans la plupart des cas de la pratique, ces méthodes, bien que fondées comme la précédente sur l'hypothèse des bielles infinies, donnent une exactitude suffisante (\*). Même dans

(\*). Au moins pour les machines fixes terrestres, en mettant à part les locomotives et les moteurs de navigation.

le cas des bielles courtes, elles servent encore à asseoir rapidement un avant-projet, que l'on complète ensuite par une étude définitive. Celle-ci s'effectue, soit d'une manière empirique à l'aide de *pantins* articulés, permettant par leur déformation de suivre attentivement toutes les phases de la distribution, soit en suivant une voie théorique à l'aide de méthodes, les unes approximatives, les autres rigoureuses, qui sont destinées à tenir compte de l'obliquité de la bielle, et formeront l'objet des chapitres XLIV et XLV.

## § 2

### DIAGRAMME ELLIPTIQUE DE REECH ET FAUVEAU

**635** — Si nous rapportons le déplacement  $y$  du tiroir à son propre point mort, il prendra pour expression (éq. 14) :

$$\begin{aligned} y &= (l + r) + z \\ &= (l + r) [1 + \sin(\varphi + \alpha)] \\ &= (l + r) [1 + \sin \alpha \cos \varphi + \cos \alpha \sin \varphi]. \end{aligned}$$

Nous avons d'ailleurs, d'après les relations (11 et 12) :

$$\begin{aligned} \sin \alpha &= \frac{r}{l + r}, & \cos \alpha &= \frac{\sqrt{l^2 + 2lr}}{l + r}; \\ \cos \varphi &= \frac{c - 2x}{c}, & \sin \varphi &= \frac{2\sqrt{cx - x^2}}{c}. \end{aligned}$$

Il vient en substituant :

$$y = l + r + \frac{r}{c}(c - 2x) + \frac{2}{c}\sqrt{(l^2 + 2lr)(cx - x^2)}.$$

On en déduit :

$$[cy - c(l + 2r) + 2rx]^2 = 4(l^2 + 2lr)(cx - x^2).$$



et en ordonnant :

$$c^2 y^2 + 4crxy + 4(l+r)^2 x^2 - 2c^2(l+2r)y - 4c(l+r)(l+2r)x + c^2(l+2r)^2 = 0.$$

Cette équation représente une ellipse (<sup>1</sup>), d'après le signe, évidemment négatif, de son binôme caractéristique :

$$16c^2 [r^2 - (r+l)^2].$$

Pour connaître ses intersections avec les axes des coordonnées, nous ferons successivement :

$$\begin{aligned} y_1 = 0, & \quad [2(l+r)x_1 - (l+2r)c]^2 = 0, & \quad x_1 = \frac{l+2r}{l+r} \frac{c}{2}; \\ x_2 = 0, & \quad c^2 [y_2 - (l+2r)]^2 = 0, & \quad y_2 = l+2r. \end{aligned}$$

Le premier membre se réduisant dans les deux cas à un carré parfait, on voit que ces droites sont tangentes à l'ellipse aux points ainsi déterminés.

Les tangentes parallèles aux précédentes correspondront naturellement aux extrémités de la course de chacun des deux mobiles :

$$\begin{aligned} y_3 = 2(l+r), & \quad [2(l+r)x_3 - cl]^2 = 0, & \quad x_3 = \frac{l}{l+r} \frac{c}{2}; \\ x_4 = c, & \quad c^2 (y_4 - l)^2 = 0, & \quad y_4 = l; \end{aligned}$$

pour lesquelles on retrouve en effet la forme du carré parfait.

(<sup>1</sup>) L'inclinaison  $\varepsilon$  des axes de cette ellipse a pour valeur

$$\text{tang } 2\varepsilon = \frac{4cr}{4(l+r)^2 - c^2},$$

et leurs longueurs  $2a$  et  $2b$  :

$$\begin{aligned} \frac{a}{a^2} &= 4(l+r)^2 - c^2 - \sqrt{16c^2 r^2 + [4(l+r)^2 - c^2]^2}, \\ \frac{b}{b^2} &= 4(l+r)^2 - c^2 + \sqrt{16c^2 r^2 + [4(l+r)^2 - c^2]^2}. \end{aligned}$$



$$x' = \frac{c}{2}, \quad y' - (l + r) = \overline{GJ} = \sqrt{l(l + 2r)},$$

$$y'' = l + r, \quad x'' - \frac{c}{2} = \overline{GI} = \frac{c}{2} \frac{\sqrt{l(l + 2r)}}{l + r},$$

valeurs faciles à construire. On pourra donc connaître, pour chaque abscisse représentative d'une position du piston, l'ordonnée qui fournit celle du tiroir, ou réciproquement.

La recherche la plus utile est celle qui caractérise le commencement de la détente. Il faut à cet égard que le tiroir, qui est parti de la distance  $OM_2$  pour s'éloigner jusqu'à son élongation maximum  $HM_2$ , revienne exactement au point de départ, c'est-à-dire à la distance  $OM_2$ . Nous obtiendrons par conséquent le point cherché  $K$  en traçant l'horizontale  $M_2 K$ ; et la longueur de cette droite représentera celle qui est parcourue par le piston en pleine pression. Nous en obtenons d'ailleurs la valeur en faisant :

$$Y = l + 2r, \quad X = \frac{rl(l + 2r)}{(l + r)^2},$$

expression identique à la formule (48, p. 87).

Quant à l'instant où commencent simultanément, sur les faces respectives du piston, la compression et l'échappement anticipé, il correspond à la position normale du tiroir, c'est-à-dire à l'ordonnée  $y''$ , ou à l'horizontale  $DI$ , dont nous avons évalué la longueur  $x''$ .

Il est assez commode de reproduire quatre fois l'ellipse ainsi construite, en faisant partir ces divers tracés des deux bords de chacune des deux lumières :  $M_2$ ,  $M'_2$ ,  $M''_2$ ,  $M'''_2$ . De cette manière, en élevant une ordonnée à l'extrémité de l'abscisse qui représente une position quelconque du piston, l'on obtient d'un seul coup la situation complète de tous les éléments du tiroir; ou inversement celle du piston qui correspond à une position donnée d'un quelconque des quatre biseaux du tiroir.

Ce diagramme elliptique est dû à Reech et Fauveau, membres du Corps du génie maritime.

## § 5

## COURBE EN ŒUF

**636** — L'analyse qui précède suppose l'absence de recouvrement, intérieur et d'avance à l'admission. Mais il devient souvent nécessaire de tenir compte de ces deux éléments. En outre nous pouvons, en anticipant sur le moment où nous nous occuperons de l'influence de l'obliquité des bielles (<sup>1</sup>), prévoir ici le cas où le peu de longueur de ces dernières nécessite un correctif dans la discussion du diagramme.

Supposons donc que, soit par la voie analytique, si le mode de commande de la distribution est assez simple pour permettre de le soumettre au calcul, soit à l'aide d'une construction géométrique régulière exécutée par points, ou enfin empiriquement d'après le jeu d'un pantin articulé, on ait réussi à tracer la courbe représentative du mouvement du tiroir. Ce profil ne sera plus dans ce cas une ellipse, mais il ne s'en écartera pas beaucoup dans sa forme générale. On l'appelle *courbe en œuf*, et il est aisé d'y lire les diverses phases du phénomène.

Nous partons en A (fig. 353) du point mort du piston. La vitesse de cet organe est alors nulle. Au contraire, le tiroir possède une vitesse propre, car il a déjà découvert l'avance à l'admission et fait passer tout son recouvrement. La tangente du diagramme sera donc verticale, attendu que son coefficient angulaire  $\frac{dy}{dx}$  représente, en chaque point, le rapport des vitesses respectives  $\frac{dy}{dt}$ ,  $\frac{dx}{dt}$  de ces deux organes.

La courbe s'élève en *b* jusqu'à une tangente horizontale, qui correspond au maximum de démasquement (<sup>2</sup>). Si nous traçons l'horizontale *Aa*, le tiroir retrouve en *a* sa position initiale ; mais cette circonstance présente peu d'intérêt.

(<sup>1</sup>) Chap. XLIV et XLV.

(<sup>2</sup>) Ainsi qu'on peut le voir sur la légende placée à la partie supérieure de la figure.

Il s'en attache beaucoup plus au commencement de la détente,

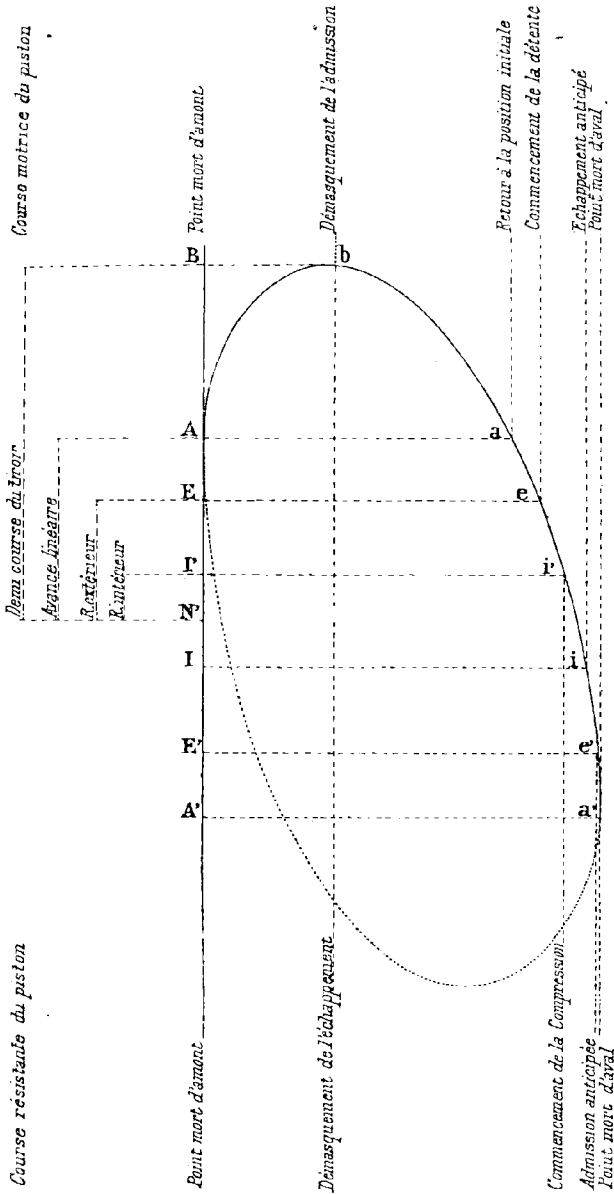


Fig. 565

qu'il est facile de déterminer. Marquons en AN l'écartement initial

qui sépare le tiroir de sa position normale  $N$ . Cette longueur représenterait le degré d'ouverture de l'admission à l'instant du passage du piston au point mort, si le recouvrement extérieur, que je porte en  $NE$ , n'en obturait une partie. C'est donc seulement  $AE$  qui constitue l'avance à l'admission; et c'est lors du retour du tiroir en  $E$ , c'est-à-dire pour l'abscisse  $Ee$ , que cet organe sera venu refermer exactement la lumière. A ce moment commence la détente,  $Ee$  mesurant la longueur parcourue par le piston en pleine pression.

La détente dure autant que la somme des passages des deux recouvrements extérieur et intérieur. Marquons donc en  $NI$  ce dernier;  $EI$  mesurera la somme en question, c'est-à-dire le parcours que doit effectuer le tiroir avant que la détente prenne fin, et que commence l'échappement anticipé. C'est par conséquent pour le point représentatif  $i$  (à la distance  $Ii$  du point mort) que se produit cette circonstance. Ce nouvel état de choses durera ensuite jusqu'au fond de course, qui est marqué par le contact  $a'$ , c'est-à-dire pendant le parcours  $A'a' - Ii$ .

A ce moment commencent le recul du piston, et la phase résistante de l'action de la vapeur sur la même face de ce dernier, que nous continuons à suivre par la pensée. Le mouvement du tiroir qui correspond à cette course rétrograde sera représenté par la partie ponctuée du contour du diagramme. Mais, pour plus de simplicité, nous reporterons notre attention sur l'arc qui est figuré par un trait plein <sup>(1)</sup>.

Le maximum de démasquement se produit, au point  $b$ , lorsque le piston a parcouru dans le sens rétrograde l'espace  $Bb$ . S'il n'y avait pas de recouvrement intérieur, l'évacuation durerait jusqu'à la position normale, qui correspond à  $N$ . Mais l'existence de cet appendice  $y$  met plus tôt un terme. Portons sa longueur en  $N'$  au-dessus de  $N$ , et traçons l'horizontale  $I'y$ . Elle mesurera l'es-

(1) La légende placée à la partie inférieure de la figure retrace les diverses phases de cette partie du fonctionnement.

Si les deux parties de la courbe présentaient entre elles, pour un motif quelconque, une différence sensible, il serait aisé de faire porter la discussion sur l'arc ponctué lui-même.

pace engendré par le piston dans son mouvement de retour, pendant l'échappement proprement dit.

Quand cette période a pris fin, la compression commence et se prolonge, comme tout à l'heure la détente, pendant un intervalle égal au passage de la somme des recouvrements  $NE' + N'V$ . C'est donc en  $e'$  que cessera cette phase, après avoir duré pendant un parcours du piston égal à  $E'e' - VZ$ . A ce moment la lumière se trouve démasquée, et donne naissance à l'admission anticipée, dont la durée est  $A'a' - E'e'$ .

#### § 4

##### DIAGRAMME SINUSOIDAL DE MOLL ET MONTÉTY

**637** — La méthode précédente présente un sérieux inconvénient. Tout y est en effet à recommencer, et l'épure devient complètement inutile, si l'on se trouve conduit à modifier l'avance angulaire  $\alpha$ , c'est-à-dire le rapport  $\frac{r}{l}$ .

Pour y remédier, MM. Moll et Montéty, ingénieurs de la marine<sup>(1)</sup>, ont proposé de construire deux courbes distinctes, représentant séparément les mouvements du piston et du tiroir. On prend pour abscisse l'angle de rotation  $\varphi$ , ou plutôt une longueur proportionnelle à l'arc que décrit le bouton de manivelle, et pour ordonnées, successivement  $x$  et  $y$ . On obtient ainsi deux sinusoides :

$$x = \frac{c}{2} (1 - \cos \varphi),$$

$$y = (l + r) [1 + \sin (\varphi + \alpha)],$$

dont les ordonnées PM et PN (fig. 354), correspondant à une même abscisse  $\varphi$ , indiquent les positions simultanées des deux corps, ce qui permet d'étudier les diverses circonstances de la distribution.

<sup>(1)</sup> Épure sinusoidale de distribution de vapeur. *Annales industrielles*, 1886, 5, 10, 17 janvier.

Si l'on veut ensuite faire varier l'avance angulaire  $\alpha$ , l'on remarquera que cette modification se réduit à un déplacement d'origine sur l'axe des abscisses pour la seconde courbe, sans rien

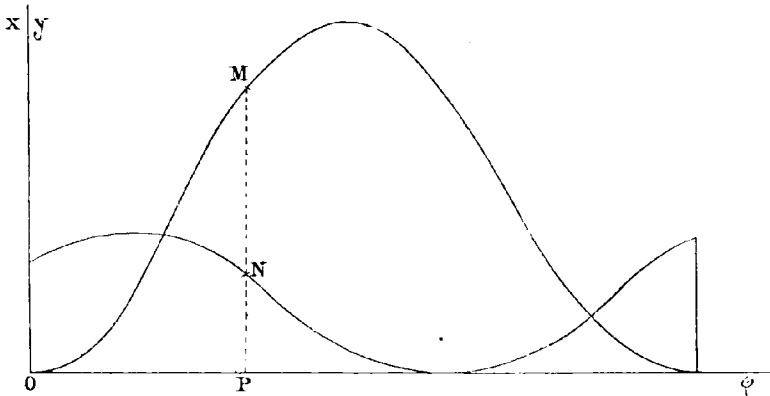


Fig. 534.

changer dans la première. On construit d'après cela le profil ( $y$ ) sur un papier calque, que l'on n'a qu'à déplacer le long de l'axe des abscisses, en appréciant par transparence les relations de cette courbe avec la ligne fixe ( $x$ ), qui représente le mouvement du piston.

## § 6

### DIAGRAMME CIRCULAIRE DE ZEUNER

**638** — *Distribution sans avance à l'admission ni recouvrement intérieur.* — M. Zeuner est l'auteur d'un remarquable procédé graphique, dont la supériorité sur les précédents consiste en ce qu'il ne fait intervenir que la règle et le compas <sup>(1)</sup>. Il suffit pour cela d'interpréter la formule (14, page 84) non plus en coordon-

<sup>(1)</sup> Zeuner. *Traité des distributions par tiroirs dans les machines à vapeur et les locomotives*. Traduction par Debize et Mérijot, p. 13. — A. Graffo. Principes de la construction du diagramme Zeuner. *Revue technique polonaise*, 1880. — Rugler. Note sur une démonstration du diagramme de Zeuner. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1<sup>re</sup> série, t. XXXVII, p. 165.





points morts à partir de laquelle s'évalue la rotation de la manivelle motrice. Prenons en  $\Phi_1 O \Phi'_1$  l'angle de calage  $\alpha$ , et portons sur la perpendiculaire  $O\Phi_2$  de la droite  $O\Phi'_1$  une longueur  $OM_2$  égale à la demi-course  $l+r$  du tiroir. Nous aurons dans le triangle rectangle  $OMM_2$  :

$$\overline{OM} = \overline{OM_2} \cos \overline{MOM_2},$$

ce qui reproduit bien l'équation (14) :

$$z = (l+r) \sin(\varphi + \alpha).$$

Elle peut également se mettre sous la forme :

$$z = A \cos \varphi + B \sin \varphi.$$

La signification des constantes est alors facile à reconnaître. On a en effet pour l'hypothèse :

$$\varphi = 0, \quad z' = A,$$

et en faisant :

$$\varphi = 90^\circ, \quad z'' = B.$$

Les coefficients du cosinus et du sinus représentent donc les longueurs interceptées par le cercle sur l'axe polaire et sur sa normale. On peut dire, en d'autres termes, que les coordonnées du centre sont  $\frac{A}{2}$  et  $\frac{B}{2}$ .

**639** — Reprenons sur ce nouveau diagramme la lecture des diverses phases de la distribution (n° 626).

Pour le passage au point mort :

$$\varphi_1 = 0, \quad z_1 = r,$$

la longueur  $OM_1$  fournit le recouvrement extérieur.

L'ouverture en grand :

$$\varphi_2 = 90 - \alpha, \quad z_2 = l + r,$$

est représentée par le rayon vecteur maximum  $OM_2$ .

Le commencement de la détente :

$$\varphi_3 = 180 - 2\alpha, \quad z_3 = r,$$

s'obtient en passant de  $M_1$  en  $M_3$ , au moyen de l'arc de cercle  $M_1M_3$  décrit autour du pôle.

La fin de la détente, qui coïncide avec le commencement de l'échappement anticipé et de la compression :

$$\varphi_4 = 180 - \alpha, \quad z_4 = 0,$$

c'est-à-dire le retour à la position normale, sont représentés par la tangente  $O\Phi_4$ .

Enfin le passage de la manivelle par le second point mort, c'est-à-dire l'arrivée du piston à l'extrémité de sa course directe :

$$\varphi_5 = 180, \quad z_5 = -r,$$

sont fournis par le prolongement  $O\Phi_5$  de l'axe polaire qui figure alors la position de la manivelle; tandis que le point représentatif retourne en  $M_1$ , d'après le signe négatif que prend le rayon vecteur  $z$  en passant par zéro.

**610** — Pour plus de clarté, M. Zeuner a imaginé d'associer au cercle fondamental  $OM_2$  un second profil identique  $ON_2$ , sur lequel aboutissent les différents rayons vecteurs négatifs, quand on les trace en faisant abstraction de leur signe.

Dans ces conditions, le point représentatif, au lieu de revenir en  $M_1$ , se trouvera en  $N_1$ , et le diagramme descriptif du mouvement du tiroir pendant la course directe du piston sera marqué par le trait plein  $M_1M_2M_3ON_1$ ; celui qui correspond à la course rétrograde étant figuré par le trait ponctué  $N_1N_2OM_1$ .

Pendant la durée du démasquement, le degré d'ouverture de la lumière est représenté par la portion  $Mm$  du rayon vecteur  $OM$  qui se trouve comprise à l'intérieur de la *lunule*  $M_1M_2M_3m_2M_1$ , formée par l'arc fondamental  $M_1M_2M_3$  et le cercle de construction  $M_1m_2M_3$ . En effet, pour un azimut  $\varphi$  quelconque, le tiroir normal s'éloigne de sa position normale d'une quantité égale à l'élongation  $z$  ou  $OM$ ; mais il est muni d'un recouvrement  $r = OM_1 = Om$ , qui masque une partie de ce découvert. Il ne reste donc comme section offerte au passage de la vapeur que  $z - r$ , c'est-à-dire  $Mm$ . Le démasquement commence par zéro en  $M_1$ , présente en  $M_2m_2$  l'ouverture en grand, et revient à zéro en  $M_3$  pour le commencement de la détente.

**641** — Ce diagramme possède une propriété dont nous aurons à faire usage : *La position du centre d'excentrique qui correspond au point mort de la manivelle est le point symétrique de l'extrémité du diamètre du cercle de Zeuner, par rapport à la perpendiculaire élevée au centre de rotation sur la ligne des points morts.*

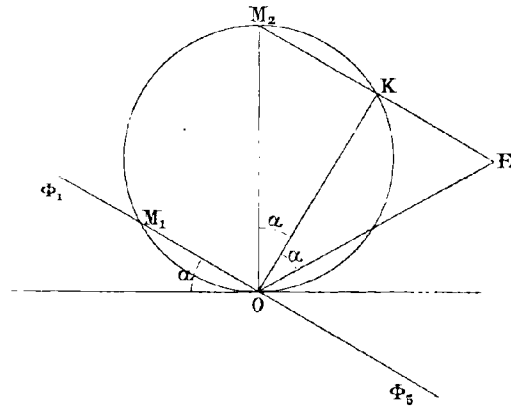


Fig. 536.

En effet, quand la manivelle est dirigée suivant  $O\Phi_1$  (fig. 536) au point mort, l'excentrique se trouve calé sous l'angle d'avance angulaire  $\alpha$  par rapport à la perpendiculaire  $OK$ , avec une lon-

gueur  $OM_1$  ou  $l+r$ . On obtient ainsi la droite OE qui répond bien à l'énoncé.

**642** — Indépendamment de la position du tiroir, le diagramme de Zeuner peut en fournir également la vitesse.

En effet l'équation (14, p. 84) donne par sa différentiation :

$$\frac{dz}{dt} = (l+r) \cos(\varphi + \alpha) \frac{d\varphi}{dt}.$$

Appelons  $V$  la quantité :

$$V = (l+r) \frac{d\varphi}{dt}.$$

dans laquelle  $\frac{d\varphi}{dt}$  désigne la vitesse angulaire constante de l'arbre tournant. Le symbole  $V$  représentera la vitesse de rotation du centre d'excentrique, ou encore la vitesse linéaire qui anime le tiroir, au moment où ce dernier traverse sa position normale. On

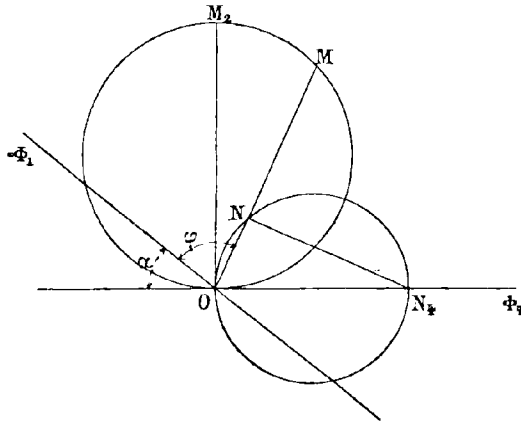


Fig. 357.

aura, dans ces conditions, pour la vitesse variable  $v$  de cet organe à chaque instant :

$$v = V \cos(\varphi + \alpha).$$

н.

8

Construisons de nouveau cette équation en coordonnées polaires, en considérant  $\varphi$  comme l'azimut et  $v$  comme un rayon vecteur (fig. 357). Elle représente alors un cercle qui passe par le pôle dans une direction perpendiculaire à la tangente  $O\Phi_4$  du précédent  $OM_2$ . Il a, par conséquent, son centre sur cette droite. Si donc on y prend comme diamètre  $ON_4 = V$ , un azimut quelconque fournira par  $OM$  dans le premier cercle la position du tiroir, et par  $ON$  dans le second sa vitesse  $v$ .

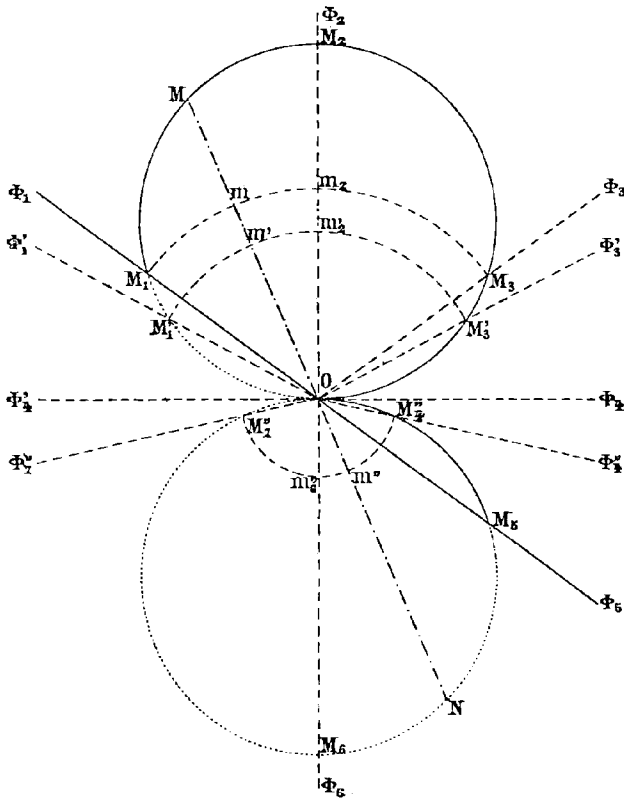


Fig. 538.

On voit en particulier que cette dernière s'annule pour le maximum d'élongation  $OM_2$ , et que, réciproquement, elle atteint son propre maximum  $ON_4$  quand l'élongation se réduit à zéro, et que le tiroir passe par sa position normale.

**613** — *Distribution avec avance à l'admission et recouvrement intérieur.* — Supposons actuellement que l'on introduise dans le système l'admission anticipée.

Nous porterons en  $m_2m'_2$  sa valeur  $\delta$  (fig. 358), et nous ferons passer par le point  $m'_2$  l'arc de cercle  $M'_1m'_2M'_3$  dont le rayon  $Om'_2$  représente le recouvrement extérieur effectif (éq. 20, p. 94) :

$$\rho = r - \delta.$$

Le découvert étant à chaque instant égal à l'élongation  $z$  diminuée de ce recouvrement  $\rho$  (fig. 359), se trouve représenté par la portion  $Mm'$  du rayon vecteur  $OM$  qui est comprise à l'intérieur de la nouvelle lunule  $M'_1M'_2M'_3m'_2M'_1$ .

Il s'annule en particulier, en marquant la fin de l'admission et le commencement de la détente, au point  $M'_3$ , pour l'azimut  $\Phi_1O\Phi'_3$ , qui se substitue à l'ancienne valeur  $\Phi_1O\Phi_3$ , ou  $180 - 2\alpha$ , de  $\varphi_3$  (éq. 16, p. 86).

Nous obtenons de même l'azimut  $\Phi_1O\Phi'_1$  qui assigne, à la fin de la contre-course, la position de la manivelle motrice pour le moment où la lumière commence à se démasquer, en produisant l'admission anticipée. L'admission totale dure ainsi pendant la rotation  $\Phi'_1O\Phi'_3$ .

**614** — Examinons de même l'influence d'un recouvrement intérieur.

Nous prendrons sa longueur  $i$  pour rayon  $Om''_6$  du cercle  $M''_1m''_6M''_7$  décrit autour du pôle. Le découvert d'évacuation (fig. 360) est à chaque instant mesuré par l'élongation négative  $z$  prise en valeur absolue, c'est-à-dire portée en  $ON_6$ , diminuée du

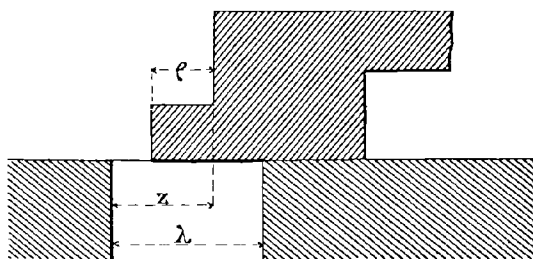


Fig. 359.

recouvrement  $i$  qui en masque une partie. Il est donc représenté par la portion  $Nm''$  du rayon vecteur  $ON$  qui se trouve renfermée à l'intérieur de la troisième lunule  $M''_4M_5NM''_6m''_6m''M''_4$ .

Ce découvert s'annule en particulier pour l'azimut  $O\Phi''_4$ , qui marque le commencement de l'échappement anticipé, lequel se

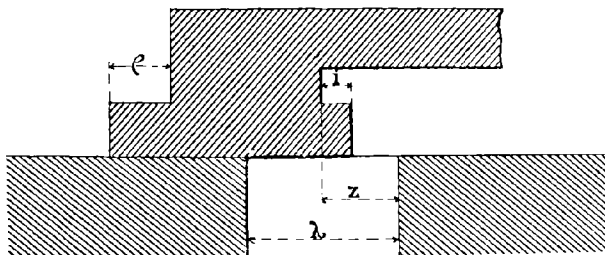


Fig. 560.

poursuit jusqu'au point mort, pour  $OM_5$ . L'évacuation continue d'ailleurs sans interruption pendant le recul du piston, sous le nom d'échappement proprement dit. Le découvert atteint en  $O\Phi_6$  son maximum  $M_6m_6$ , puis il diminue, et finit par s'annuler pour l'azimut  $O\Phi''_7$ . A ce moment commence la compression, qui s'étend entre les deux inclinaisons  $O\Phi_7$  et  $O\Phi'_1$ .

L'ensemble du fonctionnement peut être résumé dans le tableau suivant :

ADMISSION . .	$\left\{ \begin{array}{l} \text{Admission anticipée. . . . .} \\ \text{Admission proprement dite croissante. . . .} \\ \text{Admission proprement dite décroissante. . .} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \Phi'_1 O \Phi_1 \\ \Phi_1 O \Phi_2 \\ \Phi_2 O \Phi_3 \end{array} \right.$	$\left. \begin{array}{l} \text{Course} \\ \text{rétrograde} \\ \text{du piston.} \end{array} \right\}$				
				DÉTENTE . .	$\left\{ \begin{array}{l} \text{Tiroir se dirigeant vers la position normale.} \\ \text{(recouvrement extérieur)} \\ \text{Tiroir fuyant au delà de la position normale.} \\ \text{(recouvrement intérieur)} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \Phi'_3 O \Phi_4 \\ \Phi_3 O \Phi_4 \\ \Phi_4 O \Phi''_4 \end{array} \right.$	$\left. \begin{array}{l} \text{Course} \\ \text{directe} \\ \text{du piston.} \end{array} \right\}$
COMPRESSION	$\left\{ \begin{array}{l} \text{Tiroir se dirigeant vers la position normale.} \\ \text{(recouvrement intérieur)} \\ \text{Tiroir fuyant au delà de la position normale.} \\ \text{(recouvrement extérieur)} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \Phi''_7 O \Phi'_4 \\ \Phi_4 O \Phi'_1 \end{array} \right.$	$\left. \begin{array}{l} \text{Course} \\ \text{rétrograde} \\ \text{du piston.} \end{array} \right\}$				



645 — Le diagramme de Zeuner exprime la corrélation mutuelle

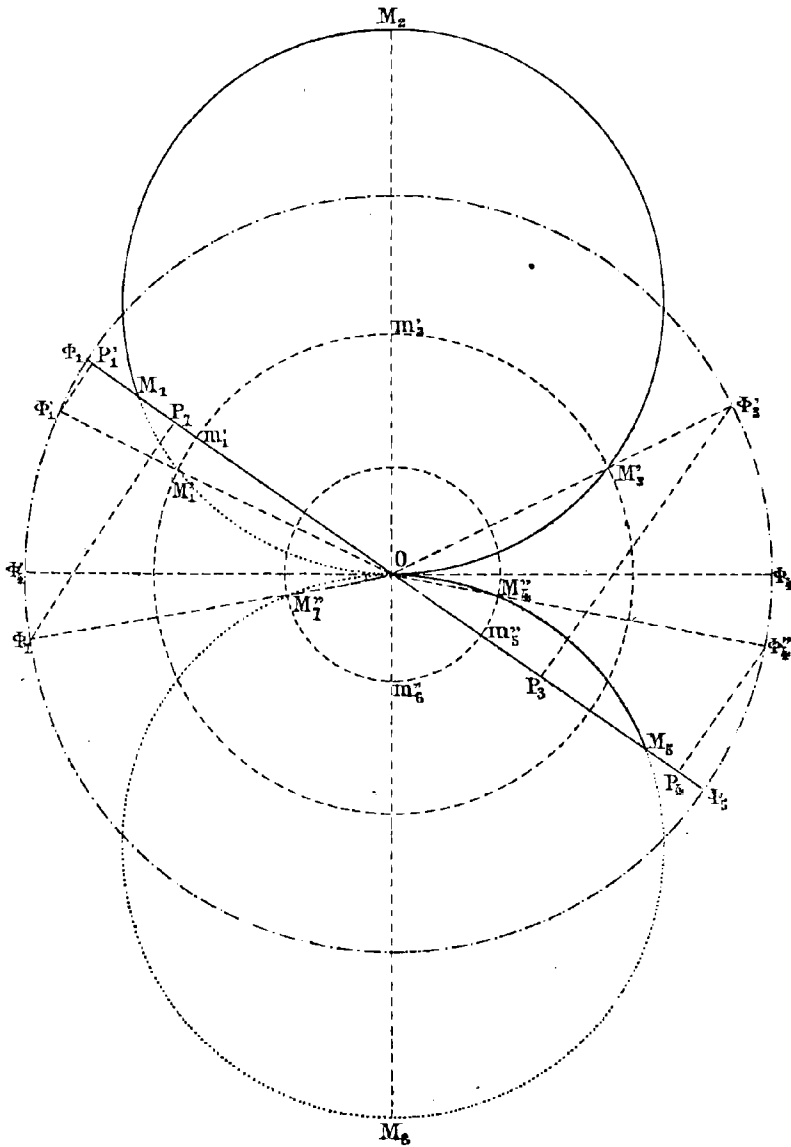


Fig. 361.

des divers éléments de la distribution. Parmi ceux-ci l'on peut à

volonté, et de bien des manières différentes, prendre les uns comme des données et les autres comme des inconnues, en constituant par là autant de problèmes distincts. Je me contenterai à cet égard d'en développer un seul exemple<sup>(1)</sup>.

Supposons que l'on donne l'excentricité  $OM_2$  (p. 364) et l'angle de calage  $\Phi_4'O\Phi_4$ , ainsi que le commencement et la fin de la détente, en demandant de déterminer les autres quantités.

Nous tracerons avec un diamètre quelconque<sup>(2)</sup>, qui représentera la course du piston, le cercle  $\Phi_1\Phi_3$ . Portons en  $\Phi_1P_3$  la longueur de l'admission proprement dite. Son extrémité  $P_3$  marque le commencement de la détente. En élevant la perpendiculaire  $P_3\Phi'_3$ , nous obtiendrons la position correspondante  $O\Phi'_3$  de la manivelle motrice. Nous déterminerons ainsi le recouvrement extérieur  $OM'_3 = OM'_4 = \rho$ , l'avance *linéaire* à l'admission  $M_1m'_1 = \delta$ , l'avance *angulaire* à l'admission  $M'_1OM_1$ , et la situation correspondante  $P'_1$  du piston.

Marquons de même en  $P_4$  celle qui correspond à la fin de la détente et au commencement de l'échappement anticipé. Nous élèverons la perpendiculaire  $P_4\Phi''_4$  pour obtenir l'inclinaison correspondante de la manivelle motrice  $O\Phi''_4$ , ainsi que le recouvrement intérieur  $OM''_4 = OM''_7 = i$ . Nous obtiendrons en même temps, en  $OM''_7$ , la position de la manivelle qui coïncide avec la fin de l'échappement ou le commencement de la compression, et en  $P_7$  la situation correspondante du piston.

En résumé nous déterminerons ainsi : 1° les deux recouvrements :

$$OM'_4 = \rho, \quad OM''_4 = i;$$

2° Les avances linéaires à l'admission et à l'échappement :

$$M_1m'_1 = \delta, \quad M_3m''_3 = \delta';$$

(1) On trouvera un certain nombre de ces problèmes dans l'ouvrage de Zeuner : *Traité des distributions par tiroirs*, traduction Debize et Mérijot; ainsi que dans le volume in-12 d'Edward Cowling Welch intitulé *Designing valve gearing*, Londres, 1875.

(2) Sur la figure 361 on a pris comme diamètre une longueur de 10 centimètres. De cette manière, une simple lecture de la règle graduée fait connaître immédiatement, en parties proportionnelles, les divers résultats de la construction.

3° Les quatre périodes du fonctionnement de la vapeur.

	MANIVELLE.	PISTON.	TIROIR.
<i>Admission</i> . . .	$\Phi'_1 \Phi'_5$	$M_1 \Phi_1 + \Phi_1 P_5$	$M'_1 M_1 + M_1 M_2 + M_2 M'_5$
<i>Détente</i> . . . .	$\Phi'_5 \Phi''_4$	$P_5 P_4$	$M'_5 O + OM''_4$
<i>Échappement</i> . .	$\Phi''_4 \Phi_7$	$P_4 \Phi_5 + \Phi_5 P_7$	$M''_4 M_5 + M_5 M_6 + M_6 M''_7$
<i>Compression</i> . .	$\Phi_7 \Phi'_1$	$P_7 P'_1$	$M''_7 O + OM'_1$

réparties sur les deux courses du piston :

$$\text{Course motrice} . . . . \Phi_1 O \Phi_5$$

$$\text{Course résistante} . . . . \Phi_5 O \Phi_1$$

et les deux courses du tiroir :

$$\text{Élongation à droite, directe et rétrograde} \quad OM_1 M_2 + M_2 M'_5 O$$

$$\text{Élongation à gauche, rétrograde et directe} \quad OM_5 M_6 + M_6 M''_7 O$$

4° Les deux lunules représentatives du démasquement :

$$\text{Admission} . . . . M'_1 M_2 M'_5 m_2,$$

$$\text{Échappement} . . . . M''_4 M_6 M''_7 m''_6.$$

## § 6

### DIAGRAMME RECTILIGNE DE REECH OU DE REULEAUX

**646** — Nous avons vu (nos 643 et 644) que le découvrément d'admission est, à chaque instant, mesuré par  $z - \rho$ , et celui de l'échappement par  $z - i$ . De là une construction fort simple qui a été indiquée par Reech, et développée par Reuleaux<sup>(1)</sup>.

Avec un rayon égal à l'excentricité  $OE = e$ <sup>(2)</sup>, l'on trace un

(1) Coste et Maniquet. *Traité pratique des épures de distribution*, 2<sup>e</sup> édit., p. 44. — Reuleaux. Sur les effets de la distribution de la vapeur dans les systèmes à coulisse. *Ingénieur civil*, t. III.

(2) Nous supposons ici l'excentricité  $e$  quelconque et différente de  $\lambda + \rho$  ou  $l + r$

cercle (fig. 362), et l'on considère son diamètre  $AA'$  comme représentant proportionnellement la course du piston, en même temps que celle du tiroir. On mène le rayon  $OO'$  qui fait avec la direction  $AA'$  du mouvement l'angle de calage  $\alpha$ ; de telle sorte que si  $OM$  figure une position de la manivelle, après qu'elle a fourni une rotation  $\varphi$  à partir du point mort  $A$ , l'on obtient en  $AP$ , sauf le rapport des rayons, l'espace parcouru par le piston. En ce qui concerne

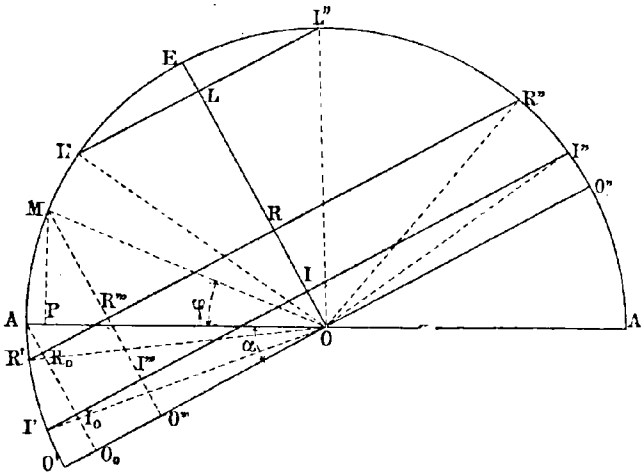


Fig. 362.

le tiroir, on a en  $MOO'$  l'angle  $\varphi + \alpha$ ; et si l'on abaisse la perpendiculaire  $MO''$  sur le rayon  $OO'$ , il vient :

$$MO'' = e \sin (\varphi + \alpha) = z.$$

Par suite, en menant parallèlement au diamètre  $OO'$  les droites  $II''$ ,  $R'R''$ ,  $L'L''$  à des distances respectives  $OI = i$ ,  $OR = \rho$ ,  $RL = \lambda$ , l'on trouvera en  $MR''$  le découvrément d'admission, et en  $MI''$  celui d'échappement. Ces deux éléments seront ainsi mesurés à chaque instant par la portion de l'ordonnée qui se trouve comprise à l'intérieur des segments circulaires  $R'ER''$  et  $I'EI''$ .

(*éq. 21*, p. 94), afin d'embrasser dès à présent le degré de généralité que comporte la théorie de la détente variable (N° 674).

Nous aurons, d'après cela, en  $OR''$  la position de la manivelle pour laquelle commence la détente, et en  $OI'$  celle qui correspond au début de la compression.

En abaissant du point mort  $A$  la perpendiculaire  $AO_0$ , nous construisons en  $AR_0$  l'avance à l'admission, et en  $AI_0$  l'avance à l'échappement. C'est lorsque la manivelle se trouve en  $OR'$  (ayant encore à tourner de  $AOR'$  pour atteindre le point mort initial) que commence l'admission anticipée; et pour la position  $OI'$  (lorsqu'on se trouve de même encore séparé du point mort final par la rotation  $AOI'$ ) que se produit l'échappement anticipé.

Quand la manivelle occupe les situations  $OO'$  ou  $OO''$ , le tiroir se trouve dans la position normale. Lorsqu'elle passe en  $OE$ , il atteint son maximum d'élongation. Les découurements extérieur et intérieur restent d'ailleurs complets, avec leurs valeurs  $LR$  et  $LI$ , pendant toute la durée de la rotation  $L'OL''$ . La longueur  $EL$  mesure l'excédent d'excursion que le bord du tiroir accomplit encore au delà de celui de la lumière qu'il a achevé de découvrir, en raison de la différence que nous avons admise ici entre  $e$  et  $\lambda + \rho$ .

## § 7

### DIAGRAMME DIANÉMOMÉTRIQUE DE M. DEPREZ

**647** — M. Marcel Deprez a fait connaître une construction fort élégante de la position du tiroir<sup>(1)</sup>.

En divisant membre à membre les équations (14) et (11), on peut écrire :

$$\frac{z}{r} = \frac{\sin(\varphi + \alpha)}{\sin \alpha}.$$

Prolongeons la manivelle motrice au delà de l'arbre, d'une longueur  $r = \rho + \delta$  (éq. 20, p. 94), et projetons obliquement sous l'angle  $\alpha$  le point  $A$  ainsi obtenu sur la direction du mouvement en  $T$

(1) Combes. *Études sur la machine à vapeur*, p. 46.

(fig. 363). Il viendra ainsi :

$$\frac{\overline{OT}}{\overline{OA}} = \frac{\sin \overline{OAT}}{\sin \overline{OTA}},$$

c'est-à-dire :

$$\frac{\overline{OT}}{r} = \frac{\sin (\varphi + \alpha)}{\sin \alpha}.$$

On voit par là que OT est égal à l'élongation z. Le point T marquera

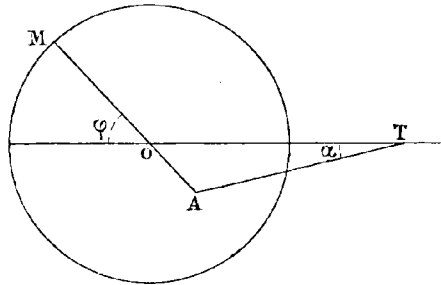


Fig. 365.

donc à chaque instant la situation du tiroir par rapport au milieu O de sa course.

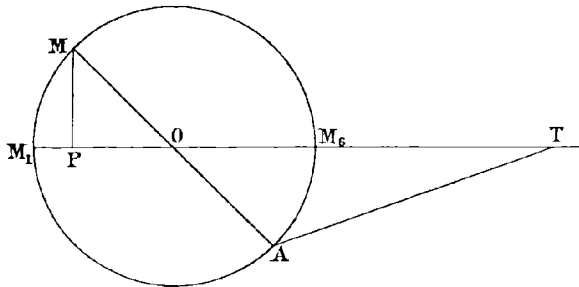


Fig. 364.

Comme il serait difficile d'associer sur une même épure des dimensions aussi dissemblables que la manivelle motrice, le recouvrement et l'avance à l'admission, l'on sera nécessairement conduit

à réduire la première dans un rapport convenable. Rien n'empêche dès lors, pour plus de simplicité, de la représenter par  $r$  lui-même, de manière à faire parcourir par la pensée le même cercle au bouton fictif  $M$  de la manivelle et au *point-opposé*  $A$  (fig. 364). La projection  $P$  de  $M$  sur la ligne des points morts représentera la position variable du piston sur sa course idéale  $M_1 M_6$ .

**648** — Il devient alors facile de suivre sur cette figure les diverses phases de la distribution. A cet effet nous porterons en  $OT_3$  et  $OT_3$  le recouvrement  $\rho$  (fig. 365); les distances  $T_3 M_1$  et  $T_3 M_6$  représentant dès lors l'avance à l'admission  $\delta$ .

Au premier instant, la manivelle se trouve au point mort de gauche en  $M_1$ , et le piston en  $P_1$ . Le point-opposé est en  $M_6$ . La projection oblique s'y confond, et le tiroir se trouve en  $T_1$ , ayant déjà franchi la distance  $\rho + \delta$ , et démasqué de la quantité  $\delta$  l'orifice d'admission.

Pour obtenir l'élongation maximum de  $T$ , il faut évidemment employer comme projetante une tangente au cercle menée sous l'angle  $\alpha$  (fig. 366). On obtient ainsi en  $A_2$  le point-opposé, et en  $T_2$  le tiroir avec son maximum de découverture. La manivelle se trouve en  $M_2$  et le piston en  $P_2$ .

La détente commence quand le tiroir revient en  $T_3$  (fig. 367), de manière que l'élongation  $OT_3$  soit exactement oblitérée par le recouvrement  $\rho$ . Menant sous l'angle  $\alpha$  l'oblique  $T_3 A_3$ , nous obtiendrons le point-opposé  $A_3$ , et, en tirant  $A_3 O$ , la manivelle  $M_3$  et le piston  $P_3$ .

Traçons parallèlement à la direction du mouvement  $OT_3$  une tangente qui coupe en  $B$  l'oblique  $T_3 A_3$ , et projetons  $B$  en  $C$ . Le triangle rectangle  $T_3 BC$  (fig. 367) est égal à  $OA_2 T_2$  (fig. 366), car tous les deux comprennent l'angle  $\alpha$  et un côté égal au rayon. Nous pouvons donc écrire l'égalité de leurs hypoténuses :

$$\overline{OT_2} = \overline{BT_3}.$$

On voit par là que si l'on essaye, pour un même recouvrement  $OT_3$  (fig. 367), divers angles de calage  $\alpha$ , l'élongation maximum  $OT_2$  sera

pour chacun d'eux représentée par le rayon vecteur  $T_3B$  de la tangente fixe parallèle à la ligne des points morts. Si l'on décrit

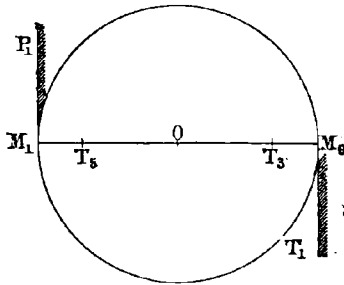


Fig. 365.

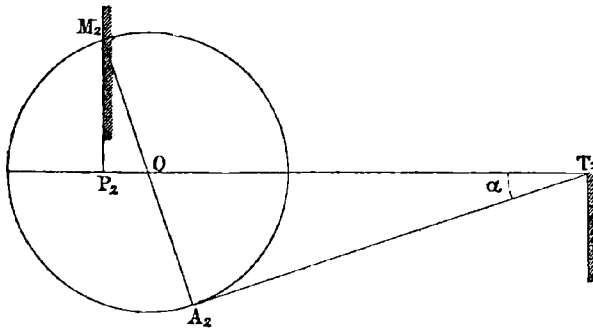


Fig. 366.

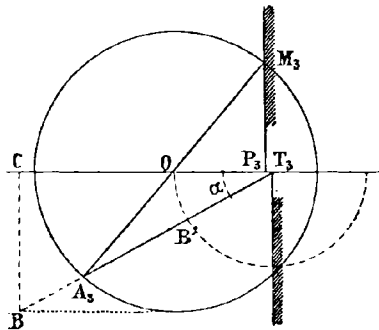


Fig. 567.

en outre, une fois pour toutes, un cercle autour du point  $T_3$  avec le rayon  $OT_3$  égal au recouvrement  $\rho$ , il fournira en  $BB'$  le découvrement maximum pour cette direction  $\alpha$ .



Le commencement de la compression correspond à la position normale. Le tiroir  $T_4$  doit donc se trouver en  $O$  (fig. 368). Si l'on

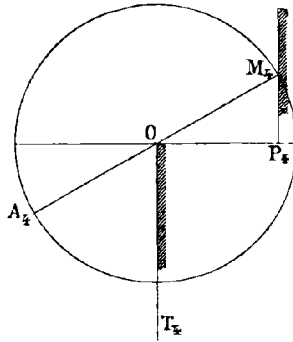


Fig. 368.

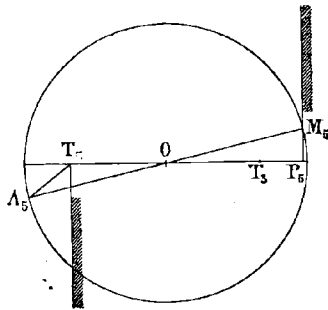


Fig. 369.

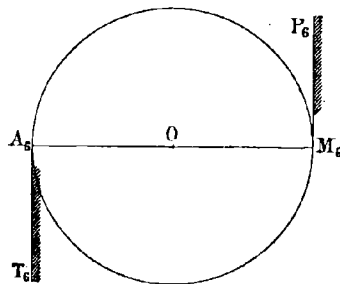


Fig. 370.

mène par ce point l'oblique  $A_4M_4$  sous l'angle  $\alpha$ , l'on aura la manivelle en  $M_4$ , et le piston en  $P_4$ .

L'admission anticipée commence lorsque le tiroir se trouve exact-

tement en  $T_s$  (fig. 569). En menant une oblique par ce point sous l'angle  $\alpha$ , on obtient en  $A_s$  le point-opposé, en  $M_s$  la manivelle, et en  $P_s$  le piston.

Enfin le point mort de droite nous donne pour le piston la position  $P_o$  (fig. 570). Le point-opposé se trouve en  $A_o$ , et le tiroir en  $T_o$ , à la distance  $r = \rho + \delta$ .

M. Marcel Deprez a imaginé, pour faciliter l'application de sa méthode, un instrument qu'il appelle *dianémomètre* <sup>(4)</sup>. Il com-

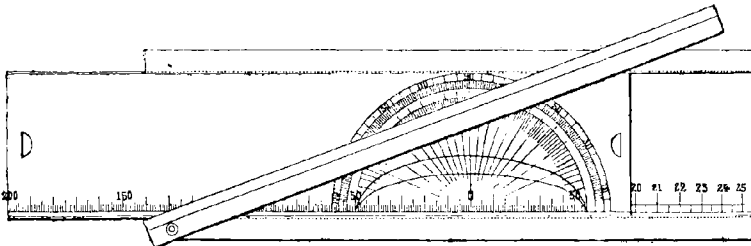


Fig. 571. — Dianémomètre Deprez et Garnier.

prend une glissière graduée (fig. 571) susceptible de coulisser dans une rainure rectiligne, sur le bord de laquelle est articulée une règlette, qui peut pivoter de manière à s'incliner sous des angles variables à volonté. Elle sert ainsi de projetante pour les divers points du cercle tracé sur la glissière, que l'on amène successivement à y affleurer. La projection se lit immédiatement sur le bord gradué de la glissière.

<sup>(4)</sup> Dianémomètre de MM. Deprez et Garnier (*Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1872, t. XXXI, p. 18). — Dianémomètre Deprez. *Bulletin de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 2<sup>e</sup> série, t. I, p. 45. — Dianémomètre Deprez et Garnier. *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*, t. XVIII, p. 155. — Combes. *Études sur la machine à vapeur*, p. 47.

Je citerai également dans cet ordre d'idées le dianémomètre Caballero, qui est fondé sur le principe de l'engrenage de Lahire. (*Mémoires de l'Académie de Turin*, 1867. — Couche. *Voie, matériel roulant*, etc., t. III, p. 328.)

## CHAPITRE XXXVIII

### FONCTIONNEMENT DE LA VAPEUR

#### § 1

#### ADMISSION — ÉTRANGLEMENT

**649** — *Généralités.* — Les deux chapitres qui précèdent sont relatifs à la théorie *géométrique* de la distribution par tiroir unique. Nous consacrerons celui-ci à la théorie *dynamique* du fonctionnement de la vapeur. Nous étendrons d'ailleurs cette étude à des types de distribution à peu près quelconques, de manière à n'avoir plus à y revenir par la suite à l'occasion de chacun d'eux.

La marche d'une machine à double effet comporte deux points de vue distincts. On peut en premier lieu s'attacher constamment à une même face du piston, en considérant successivement dans la *double course* qui correspond à une révolution de l'arbre, la course *directe* ou *motrice*, et la course *retrograde* ou *résistante*, lesquelles se trouvent placées dans des conditions complètement différentes l'une de l'autre.

On peut également embrasser à la fois par la pensée l'ensemble des phénomènes qui s'accomplissent simultanément sur l'une et l'autre face du piston; et alors toutes les courses simples, quel que soit leur sens, seront identiques entre elles.

Si nous adoptons comme plus analytique la première manière de voir, nous aurons à distinguer dans chacune des deux courses

simples trois *phases* successives; soit un total de six périodes pour la course double :

$$\left. \begin{array}{l} \text{COURSE DIRECTE. . .} \\ \\ \text{COURSE RÉTROGRADE} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \left( \begin{array}{l} \text{ADMISSION PROPREMENT DITE,} \\ \text{DÉTENTE,} \\ \text{ÉCHAPPEMENT ANTICIPÉ;} \end{array} \right. \\ \\ \left( \begin{array}{l} \text{ÉCHAPPEMENT PROPREMENT DIT,} \\ \text{COMPRESSION,} \\ \text{ADMISSION ANTICIPÉE.} \end{array} \right.$$

Les *fonctions* fondamentales accomplies par la vapeur se réduisent d'ailleurs à quatre :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{ADMISSION,} \\ \text{DÉTENTE,} \\ \text{ÉCHAPPEMENT,} \\ \text{COMPRESSION.} \end{array} \right.$$

Seulement deux d'entre elles sont *centrales*, et se terminent dans une même course simple : à savoir la détente dans le sens direct, et la compression en sens rétrograde. Les deux autres sont *chevauchantes* et réparties, bien que d'une manière inégale, sur les deux trajets opposés. L'admission se développe pour la plus grande partie de sa durée dans la course directe, après avoir commencé vers la fin de la course rétrograde. L'échappement se place au contraire pour sa partie prépondérante dans la contre-course, tout en prenant naissance vers la fin de la première.

Attachons-nous successivement à l'étude de chacune de ces six périodes.

**650** — *Influence du laminage*. — On admet souvent à première vue que la phase de pleine pression s'effectue sous la tension même qui règne dans la chaudière. Cependant un tel résultat est impossible en rigueur. Nous savons en effet que tout écoulement d'un fluide d'une enceinte dans une autre à travers certains passages :

orifice, valve <sup>(1)</sup>, tuyauterie <sup>(2)</sup>, suppose nécessairement une pression supérieure en amont, inférieure en aval. La différence, appelée *perte de charge*, varie d'ailleurs avec la nature géométrique des communications, et les conditions thermiques offertes à l'écoulement. Ce phénomène porte les noms d'*étranglement*, *étirage*, *laminage* de la vapeur. Il présente une grande importance, et je crois utile d'y insister avec quelque développement.

Il semble que, puisque l'on a fait le nécessaire pour produire une certaine pression dans le générateur, au prix d'une suffisante solidité de cet organe en ce qui concerne la dépense de premier établissement, et d'un déboursé quotidien pour le combustible, la perte qu'elle subit avant d'attaquer le piston doit être considérée comme un inconvénient pur et simple. Telle était en effet autrefois la manière de voir unanimement admise, et tous les efforts étaient dirigés en vue de diminuer ce résultat. On peut ajouter que c'est encore l'opinion dominante, mais qu'il est cependant nécessaire de la tempérer par certaines atténuations <sup>(3)</sup>.

**651** — On ne faisait pas, dans l'origine, assez attention à ce que si le travail transmis au piston a diminué par le fait de l'abaissement de la pression, la consommation de vapeur, et par suite celle du combustible, se trouvent réduites d'une manière corrélative. En effet, pour chaque tour de l'arbre, le volume engendré sous l'in-

<sup>(1)</sup> Voy. p. 56, note 1.

<sup>(2)</sup> Pour déterminer cette dernière, on emploie à Indret la formule :

$$a = 0,055 AV;$$

qui fait connaître la section *a* qu'il convient de donner à la conduite de vapeur, en fonction de celle *A* du piston et de la vitesse *V* de ce dernier. Si l'on admettait comme pour un liquide l'équation de continuité :

$$av = AV,$$

cette formule correspondrait à une vitesse de 28<sup>m</sup>,57 pour l'écoulement de la vapeur dans le tuyau. Quand la conduite doit desservir à la fois plusieurs cylindres, on n'ajoute pas intégralement toutes les aires distinctes fournies par ce calcul, car les manivelles sont ordinairement croisées, et le maximum du débit n'est pas atteint simultanément par tous les pistons (Widmann. *Étude de la construction des machines marines*, p. 22).

<sup>(3)</sup> Pasquier. *Étude des machines à vapeur*, Louvain, 1887, p. 60.

fluence de la pleine pression est maintenant rempli par un fluide dont la densité a diminué en même temps que la tension. Il correspond donc à un moindre poids d'eau vaporisée. La puissance de la machine en sera directement atteinte à la vérité; mais, quant à la variation du rendement, il y faut regarder de plus près pour pouvoir formuler une conclusion précise. Une distinction fondamentale s'impose à cet égard, suivant que la machine est à condenseur ou à simple échappement dans l'atmosphère.

Supposons d'abord une machine à condensation, et, pour simplifier cette explication, plaçons-nous par la pensée dans des conditions purement abstraites. Je suppose un condenseur parfait, procurant le vide absolu. La chaudière fonctionne à  $k$  kilogrammes par centimètre carré. La distribution s'effectue en ce moment sans aucun étranglement. La tension sur la face motrice du piston est donc  $k$ , et comme le vide existe sur la face opposée, la pression *effective* est également  $k$ . La consommation d'eau correspond au volume déjà engendré par le piston au moment où l'on coupe la vapeur, rempli avec le poids spécifique qui est relatif à la tension  $k$ .

Actuellement déterminons une perte de charge, et, pour plus de netteté, exagérons-la jusqu'à faire tomber la pression à 1 kilogramme par centimètre carré. Sur la face opposée, la tension est nulle, la pression effective est donc également de 1 kilogramme; et la consommation correspond au poids qui remplit le volume en question avec la densité relative à cette tension de 1 kilogramme.

On voit que d'un cas à l'autre le travail de la pleine pression se trouve diminué dans le rapport de  $k$  à 1. Nous admettrons par approximation qu'il s'ensuive la même conséquence pour la détente, et par suite pour l'ensemble de la période motrice. Mais en même temps la consommation se trouve réduite dans le rapport des densités, qui est également celui de  $k$  à 1, si nous admettons la formule de Mariotte (\*). Il s'ensuit que le rapport du travail développé au poids d'eau vaporisée, et par suite au combustible consommé, n'a pas varié par le fait du laminage, qui a été pourtant poussé à outrance dans l'exemple précédent.

(\*) Voy. t. I, p. 815, note.

**652** — Envisageons en second lieu une machine à échappement libre. Le piston supportera sur sa face opposée à la vapeur la pression atmosphérique, que nous réduirons pour simplifier à 1 kilogramme par centimètre carré.

En supposant d'abord l'absence d'étranglement, la tension motrice est  $k$ , la pression opposée 1, l'effort effectif par centimètre carré  $k - 1$ . La consommation est proportionnelle à la densité de vapeur qui correspond à la tension  $k$ .

Étranglons maintenant la vapeur comme dans le cas précédent jusqu'à la pression de 1 kilogramme. La tension motrice est 1, la contre-pression 1, l'effort effectif zéro, ainsi que le travail par conséquent. Et cependant, pour atteindre ce résultat nul, on fournit encore une quantité de vapeur représentée par le poids proportionnel à la densité de vapeur qui correspond à la tension de 1 kilogramme.

Le rendement qui, dans le cas précédent, n'avait ressenti aucune variation, a donc subi cette fois-ci la perte la plus complète, puisqu'il est tombé à zéro. La conclusion change par-là totalement. Tandis que dans le premier cas on ne perd rien, dans le second on perd tout (en répétant encore toutefois que ces aperçus restent basés sur des approximations très hardies).

Concluons donc, en tempérant ce que ces résultats peuvent avoir de trop absolu, que les effets de l'étranglement sont très directement influencés par le mode d'évolution de la vapeur. Fort atténuée pour les machines à condenseur, la perte reste beaucoup plus accusée avec le moteur à échappement libre (<sup>1</sup>).

**653** — Il est un second point de vue que nous devons également faire entrer en ligne de compte, pour apprécier sainement la question de l'étranglement.

Nous avons admis jusqu'ici que la vapeur reste saturée; mais il

(<sup>1</sup>) Cette différence permet d'expliquer les divergences d'appréciation qui se sont produites à l'origine, entre les ingénieurs de la marine et ceux des chemins de fer. Les locomotives, qui ne sauraient transporter avec elles l'eau nécessaire à la condensation, sont toujours à échappement libre. Au contraire la navigation, pour laquelle on a l'eau froide à discrétion, ne manque pas de lui emprunter les bénéfices que procure l'emploi du condenseur.

n'en est pas toujours ainsi. La chute de pression qui s'effectue ici sans compensation extérieure <sup>(1)</sup> s'accompagne théoriquement d'une certaine surchauffe <sup>(2)</sup>.

Supposons en effet qu'une diminution de tension vienne à se produire. La quantité de chaleur qui serait nécessaire pour constituer directement de la vapeur saturée à cette pression atténuée serait évidemment moindre. Or le fluide est resté dépositaire de son ancien calorique de constitution, sans avoir dépensé l'excédent sous forme de travail mécanique. Il se trouve donc dans les mêmes conditions que si l'on avait commencé par appliquer au liquide le nombre de calories nécessaire pour le faire passer à l'état de vapeur saturée, puis à celle-ci le surplus de la chaleur, qui aura dès lors pour effet de la surchauffer. Le résultat sera tout au moins, suivant les cas, de la débarrasser plus ou moins complètement de l'humidité qui s'y trouve mélangée, ce qui améliore les conditions du fonctionnement <sup>(3)</sup>, tout aussi bien que le ferait la surchauffe elle-même <sup>(4)</sup>.

**654** — Il y a même lieu, sous ce rapport, d'établir une distinction.

Un premier mode d'étrépage se rencontre toujours dans toutes les machines; c'est celui qui se produit aux lumières par le jeu du tiroir. Un second procédé peut ou non intervenir, au gré des ingénieurs; c'est l'emploi de la valve, et parfois d'un détenteur spécial placé sur le trajet de la vapeur. L'intervention de ce dernier se recommande notamment pour concilier avec les ménagements dus au cylindre et à la distribution, les avantages que présente, dans le cycle parcouru par la vapeur <sup>(5)</sup>, une haute pression que

<sup>(1)</sup> En négligeant les frottements, la conductibilité calorifique, etc.

<sup>(2)</sup> Il est permis de penser que l'ancienne appréhension inspirée aux constructeurs par l'étranglement était une opinion toute faite empruntée aux hydrauliciens. Pour ces derniers, en effet, ce phénomène reste très nuisible, sans comporter aucune des atténuations que nous venons de rencontrer relativement à l'influence du condenseur ou de la surchauffe.

Tout au contraire, on commence à recourir dans de fréquentes occasions à l'emploi des détenteurs proprement dits, ainsi que du laminage par la valve ou aux lumières.

<sup>(3)</sup> Voy. t. I, p. 812.

<sup>(4)</sup> Voy. t. I, p. 837.

<sup>(5)</sup> Voy. t. I, p. 816.



toléreront beaucoup plus facilement les conditions d'établissement des générateurs <sup>(1)</sup>.

En ce qui concerne le laminage aux lumières, on en a parfois contesté l'efficacité. Il semble cependant que le résultat en doive être théoriquement encore plus prononcé que celui de l'étranglement en route <sup>(2)</sup>. Supposons en effet que la chaudière engendre une pression représentée

par OA (fig. 572), que l'on se propose de détendre jusqu'à OB par l'un ou par l'autre de ces deux modes. Si l'on étrangle seulement à l'aide du tiroir le fluide amené jusque là par de larges conduites sans perte de charge, la tension sera OA pour le premier instant du démasquement. Elle décroît ensuite progressivement, afin de

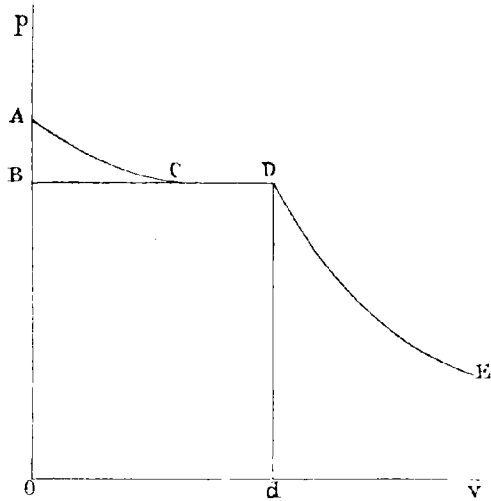


Fig. 572.

subvenir, par la différence ainsi créée, à l'écoulement de la vapeur destinée à remplir l'espace engendré par le piston avec une vitesse croissante. Le tracé représentatif s'abaissera donc de A en C, pour rester ensuite horizontal jusqu'en D, instant où l'on coupe la vapeur. Le travail recueilli est alors représenté par l'aire OACDE.

Si, au contraire, la réduction de pression a été réalisée à l'aide d'un détendeur spécial placé en amont de la boîte à vapeur, cette enceinte se trouve pour son propre compte à la tension réduite OB. Elle ne pourra donc fournir que cette pression dès le premier

<sup>(1)</sup> Sauf les atténuations qui ont été présentées ci-dessus (N° 601, note).

<sup>(2)</sup> C'est ce que l'expérience vérifie particulièrement pour les dépressions notables (Sinigaglia. *Traité des machines à vapeur*. Traduction par de Billy, p. 64.

instant du démasquement <sup>(1)</sup>, et l'ordonnée initiale du diagramme sera OB. Le travail se trouvera ainsi réduit à OBCDE.

Le résultat est, par conséquent, amélioré proportionnellement dans le premier cas, de l'appoint :

$$\frac{\overline{ABC}}{\overline{OBDE}},$$

à *égalité de consommation*, point essentiel. En effet, le poids introduit dans le cylindre est, pour les deux cas, celui du volume marqué par l'abscisse *Od*, rempli de vapeur à la densité qui correspond à la pression figurée par l'ordonnée *Dd* ou OB.

**655** — On peut de même établir que la surchauffe procurée par le laminage aux lumières est plus économique que celle qui s'obtiendrait par l'application directe de la chaleur.

En effet, avec ce dernier mode, les calories supplémentaires sont communiquées à la vapeur sous une pression sensiblement constante. Au contraire, dans le cas du laminage aux lumières, la détente s'opère pendant une partie du temps en présence du vide, ou d'une pression atténuée. Il n'y a donc pas autant de travail externe à fournir pour l'expansion correspondante, et la différence devra se retrouver en énergie interne.

Un aperçu numérique permet, du reste, de reconnaître que cette influence est au fond très peu considérable, et ne présente guère qu'un intérêt théorique. Portons, par la pensée, un kilogramme d'eau, de la température zéro à celle de 152 degrés, c'est-à-dire à la pression de 5 atmosphères, pour l'y transformer en vapeur saturée. Il faudra lui fournir dans ce but la quantité de chaleur :

$$\lambda_{152} = 606,5 + 0,505 \times 152 = 652^{\text{cal}}, 86.$$

Si l'on veut ensuite surchauffer directement ce fluide jusqu'à la température de 240 degrés, que je prendrai ici comme exemple, on

(1) En négligeant même la perte additionnelle qui se produit sur ce point.

devra lui communiquer encore :

$$(240 - 152) C,$$

en désignant par C la chaleur spécifique moyenne relative à la loi peu connue de la surchauffe. Nous avons vu à cet égard <sup>(1)</sup> que les expériences de Hirn autorisent à prendre approximativement pour ce coefficient la valeur 0,48. Il vient ainsi :

$$0,48 \times 88 = 42^{\text{cal.}}, 24;$$

et comme total :

$$652,86 + 42,24 = 695^{\text{cal.}}, 10.$$

D'un autre côté, portons d'emblée ce kilogramme d'eau à la température de 250 degrés (<sup>o</sup>). Il faudra pour cela une quantité de chaleur égale à :

$$\lambda_{250} = 606,5 + 0,505 \times 250 = 682^{\text{cal.}}, 75.$$

Si l'on étrangle ensuite la vapeur de manière à la ramener à 5 atmosphères, les expériences de Hirn montrent que l'on arrive ainsi à 240 degrés, c'est-à-dire au même point qu'avec l'opération précédente.

On voit donc que l'on économise avec ce dernier mode :

$$695,10 - 682,75 = 12^{\text{cal.}}, 35;$$

différence qui représente proportionnellement :

$$\frac{12,35}{695,10} = 0,0177;$$

ou moins de 2 pour 100.

<sup>1)</sup> Voy. t. I, p. 536.

<sup>2</sup> A laquelle correspondrait, à la vérité, une pression énorme d'environ 40 atmosphères ; mais ce n'est pas en ce moment la question.

**656** — *Moyens de combattre le laminage.* — Sous la réserve des atténuations qui précèdent, le laminage de la vapeur doit être considéré comme une influence qu'il convient en général de diminuer autant que possible. Je ferai remarquer en particulier que les orifices étant alternativement ouverts et fermés par le mouvement des obturateurs, le débouché part nécessairement de zéro, en traversant des valeurs aussi petites qu'on voudra les imaginer,

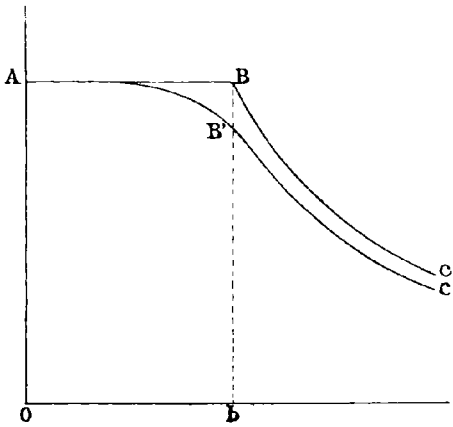


Fig. 373.

pour atteindre progressivement son maximum <sup>(1)</sup>. Ce sont précisément ces premiers instants qui occasionnent les plus grandes résistances à l'écoulement, et qui produiront les plus grandes pertes de charge <sup>(2)</sup>. Il importe donc de restreindre leur durée autant que possible, et de faire prédominer de préférence, dans l'intervalle total, la période de large ouverture.

En un mot, on doit s'attacher à ouvrir et à fermer aussi brusquement que l'on pourra les passages de la vapeur.

Ce principe est universellement admis ; et c'est à très juste titre. Il ne sera cependant pas inutile de présenter encore ici à son égard une légère atténuation à l'idée que l'on se fait quelquefois de son importance effective.

Imaginons une distribution absolument parfaite, qui exécute son mouvement dans un temps nul. Après une période d'admission en

<sup>(1)</sup> Ce maximum se calcule en général de manière que le courant de vapeur (en négligeant les condensations) qui suivrait le piston animé de sa *vitesse moyenne* (voy. p. 26) ne dépasse pas 40 à 50 mètres par seconde.

<sup>(2)</sup> Nous avons vu (t. I, p. 121) que si l'on assimile par approximation la vapeur à un liquide, la perte de charge varie en raison inverse de la *cinquième* puissance des dimensions de la section offerte à l'écoulement.

pleine pression, représentée par l'horizontale AB (fig. 373), commencera brusquement une loi de détente marquée par une courbe BC. Si au contraire on commande mollement l'organe de distribution, c'est peu à peu, suivant AB', que décroîtra la pression d'après la perte de charge croissante qui résulte du rétrécissement progressif du passage. Une détente figurée par B'C' succèdera à la fermeture définitive. Dans ces conditions, le travail représenté par l'aire OAB'C' est évidemment inférieur au premier OABC. Mais il ne sera pas indifférent de remarquer, et c'est le but de cette explication, que la consommation aura également diminué de son côté. Elle correspond, en effet, suivant les cas, à un même volume *Ob* de deux fluides distincts, dont les densités se rapportent respectivement aux tensions *bB* ou *bB'*. Nous concluons donc, au point de vue de la pratique, qu'il est bon d'ouvrir et de fermer rapidement les orifices de distribution, sans toutefois tomber pour cela dans les exagérations et les complications auxquelles a parfois conduit la recherche de ce que l'on appelle la fermeture instantanée<sup>(1)</sup>.

**657** — *Déclics*. — Un premier moyen d'y parvenir consiste dans l'emploi de *déclics* à jeu indépendant. Au lieu de conduire l'obturateur d'une manière continue, en augmentant à cet effet la force et la vitesse du moteur lui-même, on le fait commander distinctement par un poids ou par un ressort<sup>(2)</sup>, qui entrent en action aux instants voulus sous l'influence d'une simple *touche*, appartenant au mécanisme de distribution<sup>(3)</sup>. Ce moteur secondaire fonctionne alors avec la rapidité qui lui est propre, pour entraîner l'organe distributeur. Le mouvement de ce dernier n'est donc plus, comme dans les chapitres précédents, une conséquence cinématique

<sup>(1)</sup> Pichault. *Appareils de distribution par tiroirs, etc.*, p. 7. — Sinigaglia. *Traité des machines à vapeur*. Traduction par de Billy, p. 54 et 58.

<sup>(2)</sup> Ce ressort peut être solide ou pneumatique. Dans ce dernier cas, il porte le nom de *dash-pot*. On a également employé la commande directe du dé clic par la vapeur voy. n<sup>os</sup> 658 et 735).

<sup>(3)</sup> Ou de l'électricité (Féton. Distribution à détente instantanée avec arrêt électromagnétique. *La lumière électrique*, t. XXXVI, p. 348. — Libert. Disjonction électrique instantanée entre l'excentrique et la tige du tiroir pour la préservation des accidents. *Ibidem*, t. XXVI, p. 290).

nécessaire (*desmodromique*, suivant l'expression consacrée) de celui de la machine. Il en est indépendant, et continue à s'accomplir dans le même temps, si l'on vient à ralentir celle-ci, car il obéit uniquement aux lois de la pesanteur ou de l'élasticité.

Il existe du reste entre ces deux dernières influences une différence importante. La pesanteur comporte, pour le cas du vide, une loi de vitesse bien déterminée qu'il est impossible de dépasser, et dont on ne peut que se rapprocher de plus en plus, en écartant autant que possible l'influence de l'air par l'emploi de poids considérables. A cette limite, l'espace parcouru verticalement a pour valeur immuable  $\frac{1}{2}gt^2$ , et la vitesse  $gt$ . Mais leur influence relative sera fort différente, suivant qu'elle interviendra dans des machines lentes ou très rapides. Suffisante dans un cas, elle peut devenir illusoire dans l'autre<sup>(1)</sup>. Il n'en est pas de même pour l'élasticité, car l'on dispose alors d'un coefficient qui est spécial au ressort employé, et que l'on peut augmenter au besoin, en bandant davantage des appareils plus énergiques.

Il ne faut pas craindre d'ajouter cependant que les ressorts eux-mêmes sont exposés à devenir insuffisants avec les allures excessives que l'on atteint aujourd'hui<sup>(2)</sup>, principalement pour la conduite des dynamos. Aussi une réaction visible s'est-elle opérée sur ce point dans les tendances des constructeurs en faveur des distributions desmodromiques.

**658** — Dans le même ordre d'idées, on a employé directement la vapeur pour actionner les tiroirs<sup>(3)</sup>. Comme rien n'empêche d'admettre sa pression sur des pistons distributeurs aussi larges

<sup>(1)</sup> M. Boulvin, en calculant les effets d'une distribution desmodromique pour des allures encore modérées de 70 tours par minute, a montré que la fermeture des lumières s'y accomplissait en  $\frac{1}{132}$  de seconde. Or dans cet intervalle de temps, la pesanteur ne peut déterminer qu'une chute de 0<sup>m</sup>.0005 qui serait insignifiante pour l'effet à obtenir (Boulvin. Étude sur la machine Hertay. *Annales de l'association des ingénieurs sortis des Ecoles de Gand*).

<sup>(2)</sup> Des allures de 300 tours par minute se rencontrent journellement. M. Bonjour en réalise de 1800 tours. Nous ne parlons pas en ce moment des chiffres gigantesques relatifs au turbo-moteur (n° 854), dont le fonctionnement repose sur d'autres principes.

<sup>(3)</sup> Voy, n° 734.

que l'on voudra, et d'une masse relativement faible, on peut réaliser ainsi des accélérations très notables et des distributions d'une extrême rapidité. C'est au point que l'on se voit obligé d'amortir le choc de ces pistons par l'interposition de tampons de vapeur.

A cet effet, un tiroir mû par les moyens ordinaires vient, au moment voulu, déterminer l'échappement de la vapeur qui se trouve statiquement derrière l'une des faces du piston distributeur. Celui-ci, subitement déséquilibré, se précipite dans le vide ainsi produit. Mais, à l'échappement, succède presque aussitôt de la part du tiroir une phase de compression, qui amortit la fin de cette petite course.

**659** — *Tiroir à grille.* — Un second moyen de réduire l'importance des premiers instants du découverture, ou des derniers moments de la fermeture, consiste à profiter plus efficacement des déplacements *linéaires* du distributeur pour ouvrir des débouchés aussi étendus que possible *en surface*. C'est le principe des *ouvertures multiples* effectuées simultanément par le même organe.

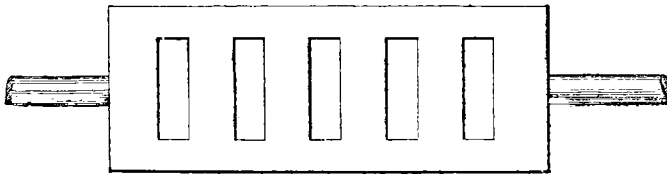


Fig. 374. — Tiroir à grille (figure schématique).

Imaginons, pour fixer le langage en parlant des tiroirs, car le même artifice s'étend aux robinets et aux soupapes (n° 802), que la glace fixe, au lieu de présenter comme ci-dessus un simple orifice rectangulaire, affecte la forme d'une grille percée de  $n$  ouvertures égales entre elles. Le *tiroir à grille* (fig. 374) est disposé de la même manière. Lorsque ses parties pleines se trouvent superposées aux vides de la glace, le passage est intercepté. Si on le déplace d'une petite quantité à partir de l'affleurement rigoureux des bords correspondants, il ouvre, non plus une seule fenêtre comme dans le cas ordinaire, mais  $n$  fenêtres de même largeur, et par suite *un*

débouché total  $n$  fois plus grand à tout instant <sup>(1)</sup>. Il est donc clair que l'on sortira plus rapidement de la région des résistances excessives, pour entrer dans celle des ouvertures plus notables <sup>(2)</sup>.

**660** — *Tiroirs de Trick, de Ehrhard, de Hanrez.* — Certaines dispositions plus complexes rappellent l'application du même principe, en offrant à la vapeur plusieurs canaux d'introduction, qui se démasquent tous ensemble pour se déverser dans la lumière d'admission.

Avec le tiroir de Trick <sup>(3)</sup>, la glace fixe présente une légère surélé-

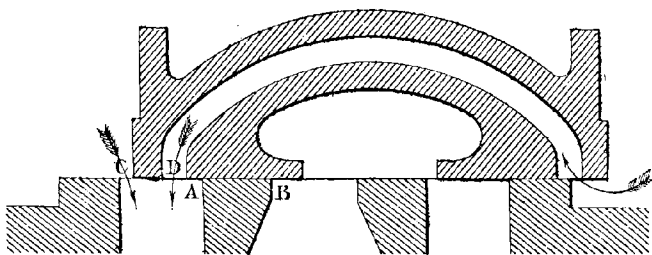


Fig. 575. — Tiroir de Trick (coupe longitudinale).

vation (fig. 575), dans l'étendue de laquelle sont pratiqués les trois orifices fondamentaux. Le tiroir est creux, et traversé par un canal intérieur qui relie ensemble les parties extrêmes de ses portées inférieures. Lorsqu'il démasque d'une petite quantité par son bord extrême la lumière de gauche, il vient présenter un débouché égal, au delà du seuil de droite. La vapeur s'y précipite donc en dessous, en même temps que par le découvert de gauche, et la sec-

<sup>(1)</sup> On a parfois poussé à l'extrême l'application de ce principe, d'après la valeur donnée à  $n$  (Tiroir Craig et Motion, *Annales industrielles*, 18 juin 1885, p. 244).

<sup>(2)</sup> *The engineer*, 1879, p. 222. — Dans le même ordre d'idées, on a employé des orifices triangulaires ou trapézoïdaux, que le tiroir découvre en commençant par leur plus grande largeur, de manière à assurer aux premiers instants une plus grande efficacité pour la création d'une surface libre d'écoulement; celle-ci n'ayant plus besoin, vers la fin, de recevoir des accroissements aussi importants pour un même déplacement linéaire du tiroir.

<sup>(3)</sup> Volkmar. Sur les perfectionnements à introduire dans les distributions à un seul tiroir. *Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens*, 1868.



tion offerte à son écoulement se trouve à chaque instant doublée.

On peut adresser à cette ingénieuse disposition le reproche, du reste peu important, d'allonger le tiroir, en augmentant d'autant la pression qu'il supporte, ainsi que les inconvénients correspondants <sup>(1)</sup>. Il faut en effet, dans les conditions ordinaires, que l'intervalle AB qui sépare, dans la glace, la lumière et l'échappement, soit assez long pour que la course du tiroir <sup>(2)</sup> ne puisse jamais amener le bord C au delà de B; sans quoi la chaudière se viderait dans l'atmosphère. Avec le dispositif actuel, il suffirait pour pro-

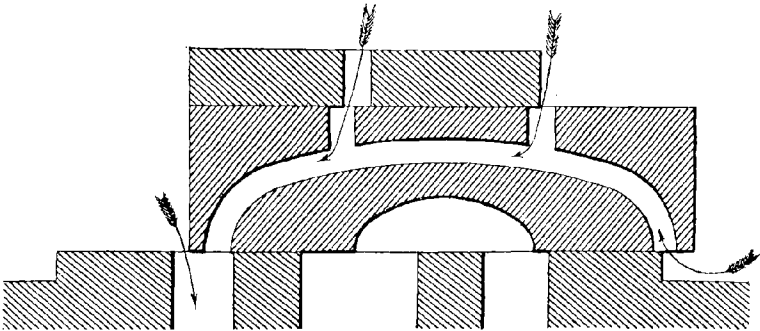


Fig. 576. — Tiroir de Hamrez (coupe longitudinale).

duire ce résultat, que le point D atteignit le bord B. On sera donc limité à une moindre élévation; ou bien, si l'on veut au contraire conserver la même excursion, il faudra employer une plus grande portée AB, et la longueur du tiroir s'accroîtra, en raison de la symétrie, du double de cet appoint.

Dans le tiroir d'Erhard <sup>(3)</sup>, les deux parties AB et CD du tiroir (fig. 575) sont indépendantes l'une de l'autre, en se recouvrant mutuellement. Cette dernière obéit seule à l'excentrique de commande pour déterminer l'admission ou la détente. Elle vient, en temps voulu, heurter et déplacer la portion AB, qui provoque l'échappement.

<sup>(1)</sup> Voy. n° 685.

<sup>(2)</sup> Quand on la fait varier en vue de modifier la détente et la puissance du moteur, ainsi que nous l'expliquerons plus loin (n° 674).

<sup>(3)</sup> Buchetti. *Les machines à vapeur nouvelles*, p. 18.

Dans le tiroir de Hanrez (<sup>1</sup>), on présente à la fois à la vapeur quatre débouchés (fig. 376). Ce sont d'abord les deux passages propres au système de Trick. On dispose en outre au-dessus de lui un ciel fixe, percé d'un orifice en son milieu. Le tiroir présente lui-même, sur sa face supérieure, deux lumières qui débouchent dans le canal intérieur. Le bord supérieur de droite et l'orifice central donnent ainsi passage à deux nouveaux courants de vapeur, qui se précipitent avec les premiers dans la lumière d'admission de la glace fixe.

Le tiroir à double orifice (fig. 377) présente un double débouché pour chacune des deux lumières qui conduisent aux extrémités du

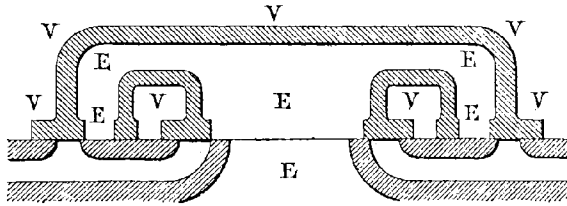


Fig. 377. — Tiroir à double lumière (coupe longitudinale).

cylindre. On a fait venir de fonte, avec la coquille extérieure, deux coquilles subordonnées, à l'intérieur desquelles la vapeur se trouve admise en V, tout comme à l'extérieur de la première. Un déplacement linéaire du système démasque donc à la fois deux introductions pour le fluide. Il en est de même pour le phénomène de l'échappement dans la région E, lequel s'opère simultanément par deux issues distinctes; circonstance que ne réalisent pas les types précédents, et dont nous reconnâtrons plus loin (n° 668) toute la valeur. Ce tiroir, fréquemment employé dans la marine, présente l'inconvénient d'offrir d'assez grandes surfaces refroidissantes, mises en rapport d'un côté avec la vapeur et de l'autre avec le condenseur (<sup>2</sup>).

(<sup>1</sup>) Armengaud. *Publication industrielle*, t. IX, 1857, p. 465. — Libert. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1<sup>re</sup> série, t. II, p. 114.

(<sup>2</sup>) On peut encore citer dans le même ordre d'idées le tiroir d'ANCOBA (*Dingler's Polytechnisches Journal*, t. 22, cahier 6; celui de BRÉVAL (Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 574); et le tiroir de THONX (*Engineering*, 1885, 1<sup>re</sup> sem., p. 485).

## § 2

**DÉTENTE — ESPACE LIBRE**

**661** — *Détente pratique.* — La détente est l'effort progressivement décroissant qu'exerce la vapeur une fois séparée du générateur et confinée derrière le piston. Nous avons vu <sup>(1)</sup> que l'idéal théorique à cet égard est la *détente complète*, poussée jusqu'à la pression qui règne dans le condenseur. Mais, en pratique, divers motifs s'opposent à ce que l'expansion doive être conduite aussi loin <sup>(2)</sup>. Chaque type de machines possède à cet égard une limite de détente qui lui est propre pour obtenir le rendement maximum <sup>(3)</sup>.

La courbe de détente, en s'abaissant vers l'axe des abscisses, communique au diagramme une forme en pointe, d'après laquelle l'aire s'accroît peu vers la fin, quand l'abscisse continue encore à augmenter. On recueille donc peu de travail moteur par le fait d'un allongement excessif du parcours, c'est-à-dire du cylindre lui-même. Or une telle exagération, indépendamment de ce qu'elle accroît les frais de premier établissement et l'encombrement, augmente les pertes dues au rayonnement, à la conductibilité, au défaut d'adiabaticité, au frottement, etc.

<sup>(1)</sup> Tome I, p. 810.

<sup>(2)</sup> Résal. Limite pratique de la détente (*Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, t. LXXXII, p. 647. — *Limite inférieure que l'on doit attribuer à l'admission*, 1876). — Leduc. Loi de la détente pratique des machines à vapeur. *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, t. LXXX, p. 1199; LXXXI, 928. — Ledoux. Emploi de la détente dans les machines d'extraction. *Annales des mines*, septembre-octobre 1879. — Autier. *Exposé d'un système de moteur à détente très prolongée*, in-8°, 1871. — Ilirn. *Exposition analytique et expérimentale de la théorie mécanique de la chaleur*, t. II, p. 150. — Hallauer. *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 1879, p. 275. — Pasquier. Étude des machines à vapeur. *Annales des ingénieurs sortis des Écoles spéciales de Louvain*, 1882, p. 95. — Delafond. *Essais effectués sur une machine Corliss aux usines du Creusot*, § V, 2°. — Notes de M. Gustave Richard au Manuel de la machine à vapeur de Rankine, p. 727. — Thurston. On the Ratio of Expansion at maximum Efficiency. *Journal of Franklin Institute*, mai 1884. — Dennis Marks. The most economical point of cut-off. *Ibidem*, juin 1880, février 1882, décembre 1885, février 1884. — Charles Emery. *Engineering*, 1875, p. 177. — Sini-gaglia. *Traité des machines à vapeur*. Traduction par de Billy, p. 61, 64.

<sup>(3)</sup> En général, dans le rapport de l'unité à 5 ou 6 pour les pressions de 6 ou 7 kilogrammes, et de 8 à 12 pour celles de 11 à 15 kilogrammes.

Un autre inconvénient des longues détentees consiste, pour la distribution par tiroir unique, en ce que si l'on augmente la durée angulaire  $\alpha$  de la détente <sup>(1)</sup>, on accroît également celle de l'échappement anticipé qui lui est précisément égale, de sorte que l'on envoie plus tôt la vapeur dans l'échappement. Au point de vue théorique, cependant, cela n'a pas d'importance, puisqu'on ne perd en définitive la vapeur qu'après l'avoir amenée au degré de raréfaction que l'on s'est proposé *a priori* de réaliser, et qu'elle a ainsi travaillé autant qu'on a voulu le lui demander. Mais l'exagération de l'échappement anticipé vers la fin de la course motrice tend à augmenter encore l'irrégularité de l'allure, et oblige, pour y obvier, à renforcer le volant.

En outre la prolongation de la détente et de l'échappement anticipé augmente le refroidissement de la paroi, ainsi que les condensations qui en deviennent la conséquence.

**662** — *Espace libre*. — La détente est très directement affectée par l'influence de l'espace libre, sur laquelle nous allons, pour ce motif, insister avec détail.

On appelle *espace libre*, *espace mort* ou *espace nuisible* le volume, de forme géométrique très compliquée, qui se trouve compris entre la face inférieure du tiroir et le piston, lorsque celui-ci arrive à son point mort. Cet espace atteignait autrefois 10 % du volume du cylindre. On a réussi à l'abaisser à 2 % environ, et certains constructeurs ont même la prétention d'atteindre 1 % <sup>(2)</sup>; souvent à la vérité, au prix de complications qui dépassent le but, et entraînent d'autres inconvénients.

Il ne serait pas bon d'ailleurs que l'espace libre fût rigoureusement annulé. On doit se préoccuper de l'eau de condensation, qui est incompressible et ferait claquer le tiroir ou sauter les fonds, si on ne lui offrait un logement suffisant, en cas d'irrégularité du jeu des purgeurs <sup>(3)</sup>.

<sup>(1)</sup> Voy. n° 628.

<sup>(2)</sup> Bienaymé. *Les machines marines*, in-8°, 1887, p. 108.

<sup>(3)</sup> Chédeville. — Appareil pour prévenir les coups d'eau dans les machines à condensation. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'Arts et Métiers*, mai 1887, p. 337.

En outre la compression de la vapeur, dont nous reconnaitrons plus loin l'utilité (n° 669), ne saurait non plus se produire dans des conditions convenables, si un certain espace n'était ménagé pour le refoulement du fluide à fond de course (1).

Il y a lieu enfin de prévoir, au point mort, un allongement variable de la tige résultant soit de la température, soit de l'élasticité et du lancé, lorsqu'il faut ramener en arrière le piston projeté en avant. De là une incertitude dans la position rigoureuse de l'extrémité de la course, qui rend inévitable un certain espace libre.

**663** — Nous avons dit que l'espace mort a pour effet d'altérer les conditions de la détente de la vapeur. Appelons en effet  $L$  la longueur parcourue en pleine pression par le piston, et  $l$  celle qu'il décrit pendant la détente. Représentons l'espace libre par un cylindre qui aurait une hauteur  $\lambda$  et la section du piston, que nous prendrons comme unité. Au moment où l'on coupe la vapeur, celle-ci occupe le volume  $L + \lambda$ , lequel s'augmente ultérieurement de  $l$ , et devient  $L + l + \lambda$ . Le rapport de détente *géométrique* est donc :

$$\frac{L + \lambda}{L + l + \lambda}.$$

Si l'on y fait  $\lambda = 0$ , pour établir la comparaison avec le cas théorique de l'absence d'espace mort, il devient :

$$\frac{L}{L + l}.$$

On voit d'après cela que sa valeur effective s'obtient en ajoutant une même quantité  $\lambda$  aux deux termes de cette dernière fraction, qui est inférieure à l'unité; opération qui tend à l'en rapprocher davantage.

(1) M. Pichault cite des cas où l'on augmente à dessein l'espace libre, en vue d'allonger la phase de compression (Pichault. *Appareils de distribution par tiroirs*, p. 13. — Ch. Jul. et Sylv. Beer. *Quelques notes sur le travail de la vapeur dans les machines à un cylindre*, in-8°, Liège, 1880, p. 42).

Ainsi donc la présence de l'espace nuisible a pour résultat de rendre moins accentué le degré géométrique de détente, et d'éloigner par conséquent de la détente complète qui forme l'idéal théorique du rendement. Si au contraire on tient à maintenir un degré déterminé de détente, il faudra pour cela pousser plus loin le piston, en augmentant la longueur totale du cylindre. De toutes les manières donc, il se produit de ce chef un inconvénient, qui a valu à l'espace libre l'épithète de *nuisible* (1).

**664** — Il est d'ailleurs nécessaire d'établir à ce sujet une distinction fondamentale, en ce qui concerne l'influence de la compression sur les résultats dus à l'espace mort.

Supposons en premier lieu l'absence complète de cette phase (2). Au moment où la lumière va commencer à se démasquer, comme elle est complètement vide, il faudra fournir une quantité de vapeur suffisante pour remplir tout l'espace libre, avant d'arriver à combler de même le volume progressivement engendré par le piston. Ce dernier seul correspond à une production de travail de pleine pression, mesuré par le produit du chemin que parcourt cet organe et de l'effort que la vapeur exerce sur lui en l'accompagnant dans son mouvement. De là une perte qui se reproduira pour chaque course, et qui sera ainsi proportionnelle à la durée de la marche.

Il est juste d'ajouter que cette perte d'effet utile reste limitée à la phase de pleine pression. Une fois la période de détente commencée, tout le fluide emprisonné travaille à la fois par son expansion; aussi bien le supplément en question que la cylindrée proprement dite.

**665** -- Plaçons-nous maintenant dans des conditions diamétralement opposées : celles de la *compression parfaite*. Nous suppo-

(1) M. de Fréminville a insisté sur cette cause d'insuccès des premières tentatives de détentes prolongées, avant les progrès accomplis par la construction qui ont diminué dans des proportions considérables l'importance de l'espace mort (De Fréminville. *Essai sur les machines compound*, in-4°).

(2) Il est bien vrai que la compression ne saurait être annulée dans la distribution basée sur l'emploi du tiroir unique. Mais j'ai eu soin d'avertir que nous étendons ici cette discussion à des dispositifs quelconques.

serons pour cela que l'on ait coupé l'échappement en un tel point, que ce qui reste alors de vapeur raréfiée devant le piston, à la tension du condenseur, arrive à régénérer exactement celle de la chaudière par son refoulement dans l'espace libre.

S'il en est ainsi, l'on n'aura plus à fournir à chaque course la quantité de vapeur destinée à remplir ce volume. Celle-ci restera perpétuellement en roulement, et servira d'intermédiaire, lors du passage au point mort, pour établir la continuité entre la chambre à vapeur et la face motrice du piston.

Suivons par la pensée, pendant la phase de détente, ce stock spécial de vapeur, distinctement de la cylindrée proprement dite. Il se détend et se comprime successivement pour son propre compte, en produisant et détruisant alternativement une même quantité de travail; si l'on suppose, pour plus de simplicité, que sa loi de compression reproduise exactement, mais en sens inverse, celle de la détente, quelle que soit cette dernière (<sup>1</sup>).

D'autre part la cylindrée proprement dite accomplit sa propre expansion; et il suffit de supposer que l'on ait déterminé les dimensions de manière à la pousser au degré de détente qui a été assigné à l'avance, en donnant au cylindre le supplément de longueur nécessaire pour permettre la dilatation distincte du stock

<sup>1</sup> Pourvu que l'on suppose également la détente complète, de même que nous avons admis déjà la compression parfaite; double condition nécessaire pour que la transformation puisse être réversible (t. I, p. 699), afin que le stock fluide se mette, sans phénomène brusque, en communication de pression avec la chaudière et le condenseur.

Cette petite provision de vapeur joue ainsi un rôle semblable à celui des plaques de caoutchouc que Bianchi avait adaptées à l'intérieur de sa pompe pneumatique, de manière que le piston s'y imprimât en fin de course, pour être ensuite repoussé. On supprime ainsi tout intervalle entre cet organe et le fond du cylindre, sans production ni perte de travail. Il y a toutefois entre les deux cas cette différence que la détente et la compression d'un solide sont mieux déterminées que celles d'un fluide aëriiforme; ce qui nous a obligés à laisser dépendre la démonstration précédente d'une hypothèse. Mais c'est évidemment la plus simple; et si, dans la pratique, elle peut subir certaines perturbations, celles-ci ne sauraient aller jusqu'à infirmer la portée de la conclusion générale qui se dégage de ces explications, à savoir l'atténuation des effets nuisibles de l'espace libre par l'emploi de la compression.

Puisque je viens de citer le procédé ingénieux employé par Bianchi pour diminuer l'espace mort, à la vérité, dans des appareils autres que la machine à vapeur, je rappellerai également l'artifice analogue que nous avons déjà rencontré dans la pompe Fixary (t. I, p. 888), à l'intérieur de laquelle un bain d'huile, refoulé par le jeu du piston, reflue dans les divers interstices de l'espace libre pour en annihiler les effets nuisibles

affecté à l'espace mort. Ce dernier n'offre donc plus dans ce cas aucun inconvénient <sup>(1)</sup>.

**666** — *Tiroirs solidaires.* — L'un des éléments de l'espace

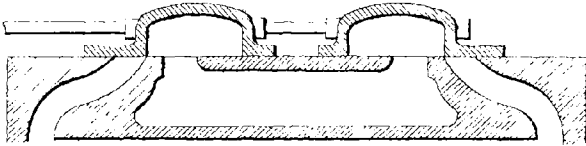


Fig. 578. — Tiroirs solidaires (coupe longitudinale).

nuisible est constitué par les lumières pratiquées dans l'épaisseur de la paroi, en vue de relier la chambre à vapeur ainsi que la cavité du tiroir avec les extrémités du cylindre. Pour les réduire au minimum irréductible, qui serait la traversée normale du métal, il faudrait que le tiroir fût plus long que le cylindre; ce qui exagérerait au delà de toute mesure la pression qu'il supporte. On a tourné la difficulté par l'emploi des *tiroirs solidaires* <sup>(2)</sup>.

On désigne ainsi deux tiroirs distincts (fig. 578),

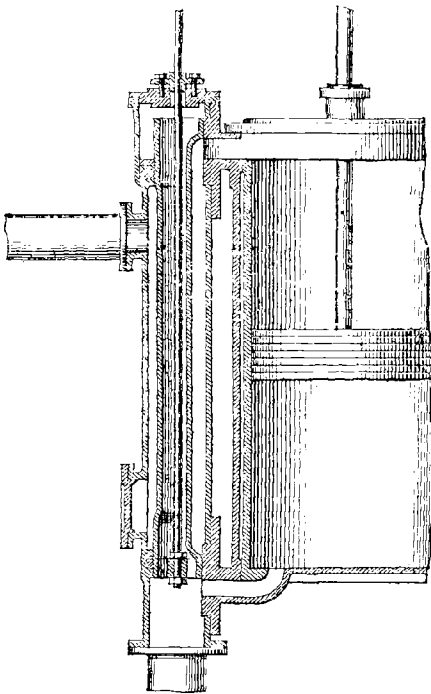


Fig. 579. — Tiroir en D (coupe longitudinale).

<sup>(1)</sup> Ce théorème a été établi analytiquement par Zeuner, et vérifié expérimentalement par Hallauer (Sinigaglia. *Traité des machines à vapeur*. Traduction par de Billy, p. 83).

<sup>(2)</sup> La même préoccupation a conduit certains constructeurs à loger dans les fonds du cylindre les robinets ou les soupapes de distribution.



dont chacun représente en principe la moitié du tiroir unique. On les relie entre eux à l'aide d'une tige qui est immergée dans la vapeur, et ne supporte de sa part aucun effort résultant. A la vérité, le conduit d'échappement se trouve alors allongé de tout ce que l'on a gagné sur les lumières d'admission; mais cette circonstance n'exerce aucune espèce d'influence.

Un dispositif analogue avait été employé par Watt dans le *tiroir* en D (fig. 579). Les lumières y sont directement normales, et placées aux deux extrémités du cylindre. Le tiroir est creux, et le canal pratiqué à son intérieur sert à mettre en relation ses deux extrémités.

## § 5

### ÉCHAPPEMENT ANTICIPÉ

**667** — Au premier abord, l'échappement anticipé semble offrir cet inconvénient gratuit de détruire prématurément la vapeur, sans lui permettre de travailler sur le piston jusqu'au fond de course, comme elle pourrait sans cela le faire encore. Mais ce serait là mal poser la question. En réalité, l'on a fait travailler la vapeur autant qu'on a jugé à propos de le lui demander, en calculant la distribution en vue de réaliser le degré de détente que l'on a considéré comme le plus profitable *a priori*. Sous ce rapport, il n'y a aucun mécompte. Tout au plus peut-on trouver ici un défaut d'un autre ordre, tenant à l'encombrement et aux inconvénients qui en sont corrélatifs, en raison du supplément de longueur que l'on doit donner au cylindre, afin d'y loger le développement de cette dernière phase.

Mais cette période est loin d'être par elle-même sans utilité réelle pour le rendement. Si elle n'existait pas, et que l'évacuation ne s'ouvrit qu'en arrivant rigoureusement au point mort, comme la chute de pression ne pourrait s'effectuer dans un temps nul, le piston rencontrerait, pour les débuts de sa course rétrograde, une résistance importante due à une contrepression dont la valeur décroissante commencerait par la tension finale de la détente, et

non par celle du condenseur, comme il arrive lorsqu'on a donné à la vapeur le temps de traverser préalablement cette chute de pression <sup>(1)</sup>.

Cette utilité accessoire ne doit pas toutefois dégénérer en exagération <sup>(2)</sup>. Nous avons expliqué déjà comment cette préoccupation a conduit à introduire le recouvrement intérieur (n° 650), et avec quelle extrême réserve cependant on use de ce moyen détourné.

## § 4

### ÉCHAPPEMENT PROPREMENT DIT

**668** — On doit, pour l'échappement comme dans l'admission, éviter l'étranglement. Nous répéterons en effet que le passage du fluide par d'étroits orifices nécessite une différence de pression. On devrait donc conserver dans le cylindre une tension sensiblement supérieure à celle du condenseur, laquelle est déterminée; et par là on opposerait gratuitement au mouvement du piston une résistance nuisible.

Il est en outre nécessaire d'ajouter que cet inconvénient n'admettrait pas la compensation théorique que nous avons reconnue pour le cas de l'admission (n° 655). En effet, le degré de surchauffe ainsi réalisé irait se perdre directement dans le condenseur <sup>(3)</sup>.

Il peut sembler difficile au premier abord de diminuer l'un des deux étranglements plus que l'autre, puisque la même lumière nous a servi jusqu'ici pour effectuer alternativement l'admission et l'évacuation. Il est cependant aisé d'y parvenir de la manière suivante. Représentons par AB, A'B' (fig. 380) les lumières de largeur *l*, qui

<sup>(1)</sup> Cet inconvénient disparaîtrait à la vérité avec la détente complète, mais nous avons expliqué (n° 661) que ce type abstrait ne se réalise pas dans l'application.

<sup>(2)</sup> On peut atteindre, et même dépasser 1 0,0 de la course (Pichault. *Appareils de distribution par tiroirs*, p. 8).

<sup>(3)</sup> On doit faire exception pour le cas des machines compound, où la vapeur d'échappement des divers cylindres, à l'exception du dernier, constitue l'alimentation du cylindre suivant.

sont démasquées par une élongation du tiroir égale à l'excentricité  $l + r$ . Enlevons d'autre part le métal sur une épaisseur BC, B'C' le long du bord interne de ces lumières. Le tiroir ne découvrant que AB, l'admission reste placée dans les mêmes conditions. Mais l'échappement s'effectue maintenant par toute la largeur A'C', et non plus seulement par A'B'.

Il va sans dire que l'on avance ainsi le commencement de l'échappement anticipé, qui ne coïncide plus avec celui de la compression sur la face opposée. Il y a là dès lors une balance à observer entre

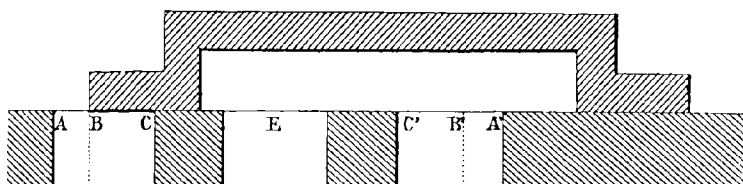


Fig. 580.

les avantages et les inconvénients inhérents aux points de vue précédents.

Il convient d'ajouter du reste que cette modification concerne moins une distribution ordinaire à détente fixe, telle que celle que nous avons envisagée jusqu'ici, que les systèmes à détente variable qui formeront l'objet du chapitre XXXIX, et dans lesquels la lumière d'admission se trouve plus ou moins démasquée, tout en laissant à l'évacuation la totalité de la largeur.

Dans certaines machines, la question se résout encore plus simplement, en affectant des conduits distincts à l'admission et à l'échappement<sup>(1)</sup>. On y trouve en outre cet avantage caractéristique de maintenir chacun d'eux dans des conditions de température plus constantes, et de diminuer ainsi l'importance des condensations. On donne alors en général aux lumières d'admission une section

<sup>1)</sup> MM. Lencauchez et Durant conduisent les tiroirs correspondants à l'aide d'une même coulisse de Stephenson, qui renferme les deux coulisseaux. Les deux bielles de commande sont reliées entre elles par des entretoises de connexion, et déplacées simultanément par le même arbre de changement de marche (*Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, juin 1890, p. 85).

comprise entre  $\frac{1}{14}$  et  $\frac{1}{25}$  de celle du piston, et à celles d'échappement  $\frac{1}{10}$  à  $\frac{1}{15}$  (').

## § 5

### COMPRESSION

**669** — De même que pour l'échappement anticipé, l'on pourrait être tenté au premier abord de considérer la compression comme nuisible, puisqu'elle crée devant le piston une force résistante qui contrebalance pour une partie l'effort moteur développé sur la face opposée. Mais il est facile de lui reconnaître au contraire un grand nombre d'avantages importants(²).

Nous en avons déjà rencontré un (n° 665), relatif à l'atténuation que la compression apporte aux effets nuisibles de l'espace libre.

On remarquera en outre qu'en l'absence de cette reconstitution de la pression dans l'espace mort, la vapeur se précipiterait dans ce vide avec une vitesse énorme, au premier instant du démasquement (³). Or, c'est d'après son carré que se mesurent les pertes de charge. En outre, le fluide ainsi lancé viendra se briser contre le piston en tournoyant et produisant des remous, avant de retrouver l'équilibre avec lequel il serait désirable de le voir agir (⁴). Ces divers inconvénients disparaîtraient si, en vertu d'une compression parfaite, l'atmosphère de la chambre de vapeur trouve à son contact un

(¹) Coste et Maniquet. *Traité théorique et pratique des machines à vapeur*, p. 15.

(²) Hallauer. Compression de la vapeur (*Revue industrielle des mines et de la métallurgie*, 1875, t. I, p. 628. — Compression dans les espaces nuisibles. *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, octobre 1874; février, avril 1875; janvier 1885). — Hillereau. De la compression de la vapeur dans les espaces nuisibles. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'Arts et Métiers*, février 1885, p. 24. — Trasenster. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1874, t. II, p. 589. — Deprez. Influence de la distribution sur le rendement des machines à vapeur. *Ibidem*, 1874. — *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minière de Saint-Étienne*, 1875, p. 44. — Cornut. *Étude géométrique des principales distributions dans les machines fixes*, in-8°. — Mac Farlane Gray. *Institution of naval Architects*, 1874.

(³) Voy. t. I, p. 805.

(⁴) M. Werdknecht fait embrasser toute la circonférence du cylindre par l'orifice d'introduction, afin d'atténuer par cette symétrie la tendance aux tourbillonnements.

milieu identique à elle-même dès le démasquement de l'orifice. La vitesse du piston étant insensible au point mort, tout le système se met alors en mouvement d'une manière parfaitement continue. On développera donc le travail complet <sup>(1)</sup>, toujours plus économique que le travail incomplet.

Dans la pratique, il en est de la compression parfaite comme de la détente complète <sup>(2)</sup>; des motifs accessoires empêchent d'adopter complètement ce desideratum théorique. Mais les études expérimentales sont moins avancées pour la détermination de la compression la plus avantageuse dans chaque type de machines, que pour celle de la détente pratique. Lorsqu'on se la sera fixée, un peu arbitrairement dans chaque cas, il suffira de connaître le volume de l'espace mort pour savoir à quel moment l'on devra couper l'échappement.

La compression atténue en partie l'effet des fuites. La tendance de la vapeur à passer autour du piston se règle en effet d'après la différence des pressions qui règnent sur les deux faces. Comme d'ailleurs il est difficile de s'apercevoir directement des fuites, il est intéressant de s'assurer *a priori* contre elles.

Cette phase contribue à diminuer le refroidissement du métal, et à le réchauffer avant l'admission ultérieure, ce qui réduit d'autant les condensations. Si cette action calorifique s'efface comme importance devant celle qui est due à la chemise de vapeur, il convient pourtant de remarquer qu'elle se trouve particulièrement bien placée en fin de course, immédiatement avant l'admission, et avec une durée qui se trouve prolongée par la lenteur du piston dans cette région. Enfin il est plus direct de réchauffer la paroi par l'intérieur que par l'extérieur.

La compression rend un grand service en ralentissant le piston, et en contribuant à l'arrêter aux points morts. On soulage ainsi l'élasticité de la tige, qui est chargée de le ramener en arrière, bien qu'il soit lancé en avant <sup>(3)</sup>.

<sup>(1)</sup> Voy. t. I, p. 392.

<sup>(2)</sup> On ne saurait dans tous les cas la réaliser pratiquement qu'avec l'échappement direct, en dehors de l'emploi du condenseur, ou pour le passage d'un cylindre à l'autre dans les machines compound.

<sup>(3)</sup> D'une manière générale, les forces d'inertie qui résultent des accélérations positives ou négatives, inséparables des changements de sens fréquemment répétés, absorbent

En raison de tels avantages, un grand nombre de constructeurs insistent dans le sens de la compression. Autrefois limitée à 10 ou 20 % de la longueur de la course, elle atteint parfois jusqu'à 50 %<sup>(1)</sup>.

**670** — A côté de cette utilité, il faut cependant signaler quelques inconvénients.

En premier lieu, la phase de compression conduit à augmenter l'importance du volant, car elle introduit un travail négatif qui ne peut qu'exagérer l'irrégularité de la période.

A puissance égale, l'appareil coûtera plus cher pour une compression plus forte, puisqu'il faudra donner pour cela au cylindre un supplément d'étendue.

On la considère comme spécialement fâcheuse pour les moteurs qu'il est indispensable d'avoir bien en main, en vue de manœuvres délicates, par exemple dans les machines d'extraction des mines. C'est au point que l'on y supprime souvent la détente elle-même, comme cause d'affaiblissement du travail positif, dans une certaine partie de la manœuvre. Or, la compression introduit en outre dans l'ensemble un terme négatif.

On peut faire une remarque analogue pour la conduite des locomotives. En approchant d'une gare, le mécanicien coupe la vapeur à l'aide du régulateur, pour laisser amortir la force vive de son train; mais il commence par mettre la distribution en pleine pression, ou

une partie de l'effort moteur et ne transmettent que la différence, ou inversement viennent s'ajouter à la force réelle. Elles n'ont jamais pour effet de créer ou d'anéantir du travail, mais elles en modifient la répartition dans un sens favorable ou nuisible.

En outre, les pièces doivent être calculées en raison du maximum des efforts qu'elles sont appelées à supporter; d'où une dépense exagérée, un excès de poids inutile, un frottement correspondant.

Pour ces motifs, la considération des forces d'inertie commence à préoccuper d'une manière spéciale les constructeurs, en raison des vitesses croissantes que l'on aborde aujourd'hui. Dans certains ateliers, on scrute leur influence à l'aide de tracés spéciaux, que l'on appelle *diagrammes d'inertie* (Sinigaglia. *Traité des machines à vapeur*. Traduction par de Billy, p. 259. — Faiveley. Étude des effets d'inertie développés dans les machines à vapeur. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'Arts et Métiers*, mai 1888, p. 549). Il est donc naturel d'attacher de l'importance, comme nous venons de le faire à l'occasion de la compression, aux influences qui tendent à contrebalancer ces forces d'inertie.

(1) Pichault. *Appareils de distribution par tiroirs*, p. 10. — Delafond. *Essais effectués sur une machine Corliss au Creusot*.

à faible détente<sup>(1)</sup>. En effet, la compression dure pendant le même temps que cette dernière. On la réduit donc par ce procédé, ce qui est important; car, à défaut de la vapeur, dont l'arrivée se trouve interceptée, c'est l'air qui joue dans les cylindres; et il risquerait par sa tension de faire claquer les tiroirs, qui n'ont plus pour les maintenir contre leurs glaces la pression de la chaudière sur leurs faces supérieures.

Pour prévenir tout à la fois ce genre d'inconvénient et celui d'une compression de vapeur exagérée, ou d'un coup d'eau dans le cylindre, capable de faire sauter les fonds, on a proposé l'emploi d'une soupape spéciale de sûreté<sup>(2)</sup>.

On remarquera soigneusement l'opposition qui ressort des appréciations précédentes : *utilité de la durée* de la compression, au point de vue du réchauffement prolongé des surfaces<sup>(3)</sup>; *inconvénient de son intensité*, dans la crainte de faire sauter le tiroir. C'est là une question d'espace libre<sup>(4)</sup>. Il ne faut pas oublier d'ailleurs que l'équilibre de cet organe s'établit, non pas simplement en vertu de l'égalité des tensions par unité de surface qui s'exercent au-dessus et au-dessous, mais en multipliant ces dernières respectivement par leurs aires d'action, estimées en projection sur le plan de la glace. Or la pression de la chaudière, même affaiblie par l'étranglement et la valve, s'étend sur la totalité du dos du tiroir, tandis que l'atmosphère intérieure agit seulement sur la bande qui recouvre l'orifice de la lumière.

## § 6

### ADMISSION ANTICIPÉE

**671** — *Admission anticipée*. — Les excès de compression trou-

<sup>(1)</sup> A l'aide du mécanisme de la détente variable, dont l'étude fera l'objet du chapitre suivant.

<sup>(2)</sup> Soupapes Normand (Buchetti. *Machines à vapeur de l'Exposition de 1889*, p. 31).

<sup>(3)</sup> Sinigaglia. *Traité des machines à vapeur*. Traduction par de Billy, p. 87, 89.

Les longues compressions se rencontrent surtout dans les machines à condenseur, en raison de la faible tension de la vapeur pendant l'évacuation.

<sup>(4)</sup> Sous ce rapport, on peut remarquer que la distribution par tiroir unique, si elle expose à une durée parfois excessive de la compression, présente en même temps un espace libre important, en raison de la longueur de ses lumières.

vent au besoin leur remède dans l'avance à l'admission. En l'absence de ce correctif, s'il venait à se produire dans l'espace libre une compression dépassant la tension du générateur, elle ferait, au moment du démasquement, refluer dans la chambre à vapeur le fluide trop comprimé, et ce ne serait qu'ensuite que celui-ci reprendrait le mouvement inverse pour accompagner le piston. De là une incertitude nuisible dans l'action motrice. Si au contraire la lumière s'ouvre pendant un temps très court avant le retour du piston, cet intervalle suffit pour l'accomplissement de ces phénomènes irréguliers, et la course se trouve préparée dans des conditions normales.

Dans le cas même où la compression serait insuffisante, ou même nulle, les perturbations inévitables, de sens contraire à ces dernières, se développent de même pendant ces courts instants. Il reste entendu toutefois que l'avance à l'admission laisse alors subsister les pertes d'effet utile résultant du choc et des tourbillonnements que la compression a pour but de supprimer; elle ne peut qu'en diminuer le retentissement sur les premiers instants de la production du travail moteur.

Ajoutons enfin, pour motiver l'introduction de cette avance, que si la coïncidence du découvrement et du point mort avait été calculée rigoureusement pour des pièces neuves, l'usure, en déterminant des *temps perdus*, amènerait un *retard à l'admission* qui serait des plus préjudiciables, et qui ne peut trouver son remède préventif que si l'on introduit nettement une avance à l'admission.

**672** — *Conclusion.* — Nous résumerons cette discussion au moyen de la figure 581. On a marqué sur son bord supérieur, qui représente la course directe : le commencement de l'admission en A, celui de la détente en B, et celui de l'échappement anticipé en C. Sur le côté inférieur, correspondant à la course rétrograde, se trouvent en D le commencement de l'échappement proprement dit, en E celui de la compression, et en F celui de l'admission anticipée.

Si les organes de distribution effectuaient leur mouvement dans un temps nul, et si néanmoins l'écoulement de la vapeur était infi-



niment lent, s'opérant sans pertes de charge, on obtiendrait comme diagramme représentatif : en *ab* la pleine pression, en *bc* la détente, en *cc'* la chute instantanée de pression produite par l'ouverture de l'évacuation, en *c'd* l'échappement anticipé, en *de* (qui se confond avec *c'd* sur une partie de sa longueur) l'échappement proprement dit, en *ef* la compression, en *ff'* le rétablissement brusque de la pression produit par l'ouverture de l'admission, en *f'a* l'admission anticipée (confondue sur l'alignement de *ab*).

Dans les conditions de la réalité, pour lesquelles les ouvertures et fermetures commencent un peu avant ou finissent un peu après l'instant théorique, et avec les pertes de pression dues aux vitesses d'écoulement, les contours du tracé s'arrondissent et se dépriment. Cet effet est d'ailleurs plus marqué en *b* qu'en *a*, attendu que la vitesse du piston est nulle au commencement de l'admission et notable à la fin. La vapeur doit donc prendre alors une allure plus rapide pour remplir l'espace engendré, et la perte de charge en est augmentée. La chute de pression est également amortie en *c* par la petitesse de l'orifice d'échappement, qui ne permet pas un dégorgeement rapide.

On obtient ainsi des diagrammes plus ou moins analogues à  $\alpha\beta\gamma\delta\epsilon\varphi$ . L'indicateur de Watt, dont nous parlerons à la fin de ce Cours, fournit automatiquement ces graphiques, qui servent à juger le bon fonctionnement d'un moteur. Un coup d'œil expéri-

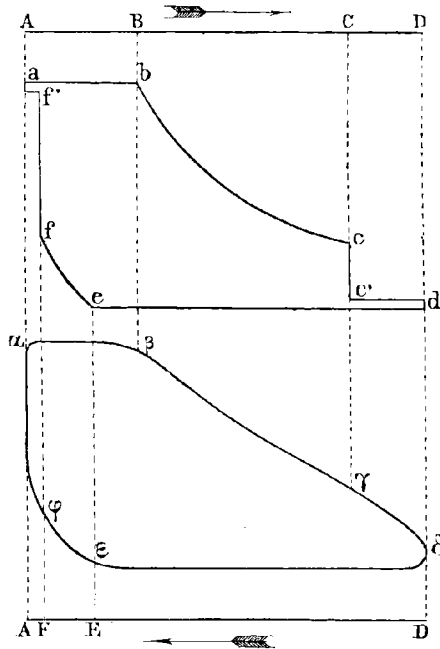


Fig. 581.

menté ne s'y trompe pas, et distingue tout de suite ce que les ingénieurs appellent de beaux diagrammes.

**673** — Comme conclusion de cette discussion, et sauf à anticiper pour certains points sur les chapitres suivants, nous pouvons formuler de la manière suivante les principales conditions du bon fonctionnement d'un moteur à vapeur<sup>(1)</sup> : pression élevée; surchauffe dans la mesure réalisable; chemise de vapeur et enveloppe isolante; longue détente, souvent effectuée dans plusieurs cylindres successifs<sup>(2)</sup>; distribution desmodromique; régulateur puissant mais sensible, prompt et précis<sup>(3)</sup>; faibles espaces nuisibles; compression notable; avance à l'échappement; organes de mouvement alternatif équilibrés; suppression des chocs; précision des ajustages; exécution soignée; formes rationnelles; matériaux de choix; graissage continu et perfectionné<sup>(4)</sup>.

(1) Thurston. *Histoire de la machine à vapeur*. Traduction par Hirsch, t. II, p. 246.

(2) Voy. chap. XLVIII.

(3) Voy. chap. I.

(4) Voy. chap. LII.

## CHAPITRE XXXIX

### DÉTENTE VARIABLE — CHANGEMENT DE MARCHE

#### § 1

#### GÉNÉRALITÉS

**674** — *Détente variable.* — Nous avons considéré jusqu'ici la détente comme un élément essentiellement fixe. Mais il devient souvent nécessaire de la faire varier.

Envisageons par exemple une locomotive qui traîne un convoi en palier. Pour s'engager en rampe sans trop perdre de sa vitesse, il lui faut déployer dans un même temps un supplément de travail, afin de vaincre celui de la gravité. On devra donc faire fonctionner, pour chaque tour de roue, une plus grande quantité du fluide moteur qui est dépositaire de l'énergie.

Un premier moyen d'y parvenir consiste à augmenter sa densité, en rendant de la pression à l'aide de la valve (n° 582), si celle-ci étranglait auparavant la vapeur. On use en effet de cette ressource, mais seulement pour de faibles variations ; et même dans ces conditions, on préfère ordinairement maintenir la tension motrice en allongeant la période d'introduction, avec raccourcissement des deux autres, et notamment de la détente (<sup>1</sup>).

<sup>1</sup>) Pasquier. Étude de la machine à vapeur (*Annales de l'Union des Écoles de Louvain*, 1882, p. 98). — Sinigaglia. *Traité des machines à vapeur*. Traduction par de Billy, p. 54. — Hallauer. *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 1879. — Keller. *Ibidem.* — Garnier. Moteur à action directe à double effet et à détente variable. *Bulletin de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 2<sup>e</sup> série, t. V, p. 405. — Machine à

Si au contraire le train aborde une pente descendante, la pesanteur venant en aide au mouvement, le mécanicien n'a plus besoin d'autant de travail : il allonge la détente, et raccourcit l'admission.

Des circonstances analogues peuvent se présenter avec les machines fixes. Il arrivera, par exemple, que, dans un atelier, on embraie ou que l'on débraie une partie des outils ou des métiers actionnés par l'arbre de couche; que, pour une machine d'épuisement de mines, la venue d'eau vienne à varier; que, dans une machine d'extraction, on commence par démarrer l'enlevage en créant une force vive considérable, sauf à n'avoir plus ensuite qu'à entretenir uniformément un travail égal à celui de la pesanteur, etc.

Pour changer la détente, dont la durée est mesurée par l'avance angulaire  $\alpha$  (n° 628), il faut pouvoir modifier ce paramètre. Or, il dépend de  $l$  et  $r$  (éq. 11, p. 85), et le recouvrement  $r$  constitue évidemment un élément immuable. C'est donc  $l$  qu'il s'agit de rendre variable à volonté. A la vérité l'on pourrait objecter que la largeur de la lumière est aussi un élément déterminé. Mais il importe de faire remarquer que  $l$  ne représente pas précisément dans le calcul ci-dessus l'évidement qui a été opéré dans la glace, mais le *démasquement en grand* effectué par le tiroir à son maximum d'élongation. Or, rien n'empêche que celui-ci se transporte au delà des limites de la lumière après qu'il l'a découverte en entier, ou bien qu'au contraire, il n'en ouvre qu'une partie <sup>(1)</sup>.

Concluons donc que la ressource qu'il s'agit en ce moment de mettre à la disposition du mécanicien pour réaliser la *détente variable* consiste dans la possibilité de *modifier à volonté la course du tiroir*.

**675** — *Cran d'arrêt*. — Mais avant d'en rechercher les moyens, il y a lieu de montrer que d'autres manœuvres encore se

détente variable Thiollier et Macabiès. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minière de Saint-Étienne*, 1881, p. 87. — Chodzko. *Sur un nouvel appareil de changement de marche*. — Schmidt (*Theorie der Dampfmaschinen*, Prague 1861, p. 236. — *Dingler's Journal*, 1880, p. 258).

(1) Comme nous l'avons précisément imaginé dans les explications du n° 668.

rattachent étroitement à ce problème, à savoir le cran d'arrêt, et le changement de marche.

L'expression de *cran d'arrêt* ne doit pas être considérée comme synonyme de l'immobilité de la machine. Elle embrasse également certains intervalles pendant lesquels le mécanisme continue à jouer, mais sans qu'on lui fournisse de fluide moteur. C'est ainsi par exemple qu'un train déjà lancé peut continuer à progresser de lui-même sur une pente suffisante par l'influence de la pesanteur, ou même en palier en raison de la vitesse acquise. De même une machine fixe peut fonctionner pendant un certain nombre de tours en vertu de la force vive accumulée dans ses organes, et particulièrement dans le volant.

À la vérité, quand il s'agit d'interrompre l'arrivée de la vapeur, on dispose de la valve, et l'on s'en sert en effet dans ce but. Mais, outre qu'elle ferme ordinairement d'une manière peu hermétique, on peut désirer trouver dans la distribution elle-même, sans avoir besoin de recourir à un organe étranger, le moyen d'empêcher l'accès de la vapeur dans le cylindre, tout en laissant jouer les pièces.

Avec le tiroir normal, ce desideratum nécessiterait l'immobilité de la distribution dans sa position normale. Mais quand on emploie le tiroir à recouvrement, la condition n'est plus aussi restrictive. Il suffit que l'excursion soit assez réduite pour que l'élongation du tiroir n'atteigne pas la valeur du recouvrement. De cette manière la lumière ne sera jamais démasquée, et le fluide, bien que présent dans la chambre à vapeur si on veut continuer à l'y admettre, ne pourra s'introduire dans le cylindre.

La solution de cette seconde question se trouve donc encore, comme pour la précédente, dans la recherche des moyens qui permettront de faire varier la course du tiroir (1).

### 676 — *Changement de marche.* — Un troisième problème

(1) Ajoutons à ce propos que lorsqu'il s'agit, non plus de *marcher au cran d'arrêt*, comme il vient d'être expliqué, mais de *maintenir la machine immobile*, il est bon d'accumuler une série de précautions pour éviter qu'un incident malencontreux ne provoque intempestivement la mise en marche. Après avoir mis la distribution au cran d'arrêt, on ferme le régulateur, on engage le frein, et même parfois on le cale avec une vis qui s'oppose à toute manœuvre fortuite de cet organe.

fondamental est celui du *changement de marche*. Certains moteurs fonctionnent toujours dans le même sens, mais la plupart doivent pouvoir réaliser à volonté la *marche en avant* ou la *marche en arrière*. Le groupe entier des locomotives, celui des machines de navigation, les moteurs d'extraction, etc., en sont les exemples les plus importants.

Cette question est compliquée, et demande des explications détaillées. Nous envisagerons pour cela successivement trois cas distincts : 1° une machine fixe que l'on veut faire partir du repos, soit dans un sens, soit dans l'autre, à volonté; 2° une machine fixe déjà lancée, que l'on a besoin d'arrêter et de faire repartir sans interruption dans le sens contraire; 3° une locomotive sur laquelle on veut exécuter cette même manœuvre.

Envisageons en premier lieu une machine fixe au repos. Le piston s'est arrêté sur une certaine position. Si l'on demandait dans quel sens il y est parvenu, il serait possible de répondre à cette question en examinant la situation du tiroir. Il est clair en effet que celui-ci occupe dans l'appareil deux positions bien distinctes suivant les cas. Supposons, pour fixer les idées, le piston près du fond de course de gauche, et en train d'effectuer sa course directe vers la droite. Le tiroir découvre alors la lumière de gauche, afin d'admettre la vapeur de ce côté. Lorsque le piston repasse par cette même situation en revenant de la droite, le tiroir doit au contraire mettre cette face en communication avec le condenseur, ou l'isoler pour la compression. Si, en laissant le tiroir à la position qu'il occupe dans la machine au repos, on vient à rendre la vapeur au moyen du régulateur, il est bien clair que le piston reprendra dans le même sens sa marche interrompue. Mais si dans l'intervalle on a réussi, par quelque moyen que nous n'examinerons pas en ce moment, à transposer le tiroir dans sa situation conjuguée, les choses se trouvant alors disposées comme si le mouvement qui a été laissé en suspens appartenait à la marche inverse, c'est celle-ci qui prendra naissance au moment de l'ouverture de la valve. Le résultat cherché sera donc obtenu.

**677** — Comme second cas, nous envisagerons une machine

(autre qu'une locomotive) actuellement en mouvement, et dont on veut renverser la marche.

Effectuons par la pensée, dans un temps très court, la transposition du tiroir dont il vient d'être question. Les choses se trouveront alors disposées comme elles devraient l'être pour distribuer la vapeur en vue de la course inverse; et cependant cette marche ne saurait se substituer instantanément à la précédente. L'inertie s'y oppose. Mais la force vive acquise par le mécanisme, et principalement par le volant, diminuera progressivement. En effet, au lieu que la distribution fournisse comme à l'ordinaire la vapeur sur la face motrice du piston, en dégageant le côté opposé; c'est sur la face résistante que nous appliquons maintenant l'effort, et en arrière que nous faisons le vide. Les forces actives joignant ainsi leur interversion aux résistantes passives, qui travaillent comme toujours dans le sens opposé au mouvement, l'allure va tomber rapidement. Cette phase porte le nom de *marche à contre-vapeur*. On dit également que le mécanicien *oppose la vapeur*, qu'il *renverse la vapeur*, qu'il *bat contre-vapeur*.

Lorsque la vitesse finit par s'annuler dans toutes les parties de ce système à liaison complète, on se trouve, pour un seul instant, dans la situation qui vient d'être envisagée tout à l'heure, d'une machine arrêtée depuis un temps quelconque, à laquelle on rend la vapeur, après avoir profité de cet intervalle pour effectuer le renversement de la distribution. Ici la durée du repos est nulle et ne permettrait pas d'exécuter la manœuvre; mais celle-ci a été réalisée depuis quelque temps déjà, et tout est prêt pour que la machine reparte à contre-sens, avec une force vive dorénavant croissante.

**678** — Envisageons enfin le troisième cas, celui d'une locomotive en marche directe avec le train qu'elle remorque. Le mécanicien renverse brusquement la distribution. Examinons ce qui va se passer.

Pas plus que dans le cas précédent, l'ensemble ne saurait rebrousser chemin subitement. La force vive acquise ne le permet pas; mais il y a lieu, pour plus de clarté, d'opérer dans sa valeur totale une distinction essentielle. On sait que la force vive d'un sys-

tème quelconque peut toujours être considérée comme la somme de deux autres : 1<sup>o</sup> celle du mouvement de translation qui animerait tout l'ensemble avec des vitesses égales et parallèles à celle du centre de gravité; 2<sup>o</sup> la force vive du mouvement relatif à cet entraînement fictif. Nous devons comprendre dans cette seconde catégorie la rotation de toutes les roues du train et de leurs essieux, ainsi que le mouvement propre des pièces du mécanisme : pistons, bielles, excentriques, coulisses, contre-poids, etc., par rapport au châssis de la locomotive qui est emporté parallèlement aux rails.

L'énergie diminue dans chacune de ces deux parties. Mais, comme les masses en mouvement relatif sont incomparablement moindres que celle du reste du train, c'est la force vive de ce mouvement qui disparaîtra la première, tandis que celle de la progression d'ensemble subsistera encore. Lorsque cette première phase de marche à contre-vapeur sera éteinte, un observateur emporté dans la translation générale se trouverait précisément dans les conditions qui viennent analysées pour le second cas. Nous devons donc nous attendre, si rien de nouveau n'intervient dans la question, à voir se produire le même résultat, et le mécanisme s'ébranler dans le sens opposé. Examinons dans quelles conditions pourrait s'effectuer un tel mouvement.

Tandis que toute la masse en translation poursuit sa marche, simplement ralentie, et que les roues des wagons, ainsi que celles de la locomotive qui ne sont pas couplées, continuent à tourner dans le même sens qu'auparavant, les roues motrices ou couplées, qui sont solidaires du mécanisme, renversent comme lui leur mouvement de rotation. On verra donc ces dernières frotter sur le rail, par cette giration inverse de celle qui devrait accompagner le roulement (\*). De là une résistance spéciale, qui s'ajoute aux précédentes pour amortir la force vive encore plus activement que pendant la première phase. Le train finira donc par s'arrêter; ce sera le terme de la seconde phase.

A cet instant, comme la distribution se trouve déjà disposée pour la marche en arrière, qu'elle est sous vapeur, et que les roues

(\*) On peut comparer ce mouvement à celui de la brosse tournante des balayeuses mécaniques à cheval de la voirie de Paris.



motrices tournent déjà dans ce sens, le train leur obéira et se mettra à reculer.

**679** — *Marche à contre-vapeur*. — Mais, dans la pratique, il est très rare que les choses se passent ainsi. On a soin de substituer, pour la seconde phase, un fonctionnement différent, qui constitue la *marche normale à contre-vapeur* (1).

Il y aurait en effet un grand inconvénient à faire frotter ainsi à contre-sens sur les rails les roues motrices, dont on doit ménager soigneusement les bandages, tant au point de vue de l'usure géométrique que de l'échauffement. La première période nous présentait un fonctionnement beaucoup mieux entendu à titre de frein. Elle constitue en effet une pompe de compression dans laquelle le travail moteur du piston s'emploie à refouler la vapeur au sein de la chaudière. L'énergie s'y change en chaleur, ce qui est sans inconvénient, puisque le générateur a été précisément construit en vue de servir de réservoir de calorique, ce qui n'est en aucune façon le rôle des roues motrices.

Or il est possible, au moyen d'un artifice très simple, de faire persister pendant la seconde phase le premier type de fonctionnement de la contre-vapeur; en l'y employant à éteindre la force vive de translation, de la même manière qu'elle a déjà, dans la première période, détruit celle du mouvement relatif. Il suffit pour cela de ne pas dépasser, pour la vapeur admise, un certain degré de puissance, ainsi que nous allons l'expliquer.

(1) Le Châtelier (*Mémoire sur la marche à contre-vapeur*, 1869. — *Supplément au mémoire sur la marche à contre-vapeur*, 1869). — Ricour. Rapport sur les inconvénients des freins ordinaires et sur l'emploi régulier de la contre-vapeur (*Annales des Mines*, 6<sup>e</sup> série, t. X, p. 141. — *Annales des Ponts et Chaussées*, mars 1869). — Combes (*Étude sur la machine à vapeur*, p. 42 et 123. — *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 15 juillet 1869). — Couche (*Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 427 à 439. — Des locomotives très puissantes et à petite vitesse. *Annales des Mines*, 5<sup>e</sup> série, t. VI, p. 395). — Zeuner. *Traité des distributions par tiroirs*. Traduction Debize et Mérijot, p. 170. — Pochet. *Nouvelle mécanique industrielle*, p. 322. — Beugnot. *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, t. XXX, p. 497. — Armengaud. *Publication industrielle*, t. XIX. — Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction Richard, p. 739. — Dombre. Note sur l'application rationnelle de la contre-vapeur à l'équilibre des machines d'extraction. *Bulletin de la Société de l'industrie minière de Saint-Étienne*, 2<sup>e</sup> série, t. IV, p. 805.

Pour plus de clarté, imaginons d'abord une locomotive au repos, appuyée contre des tampons d'arrêt, et fournissons-lui une petite quantité de vapeur. Arrêté par l'obstacle, le véhicule ne peut se porter en avant. Si donc on contraint les roues à tourner, elles devront patiner sur place. Mais la faible puissance mise en jeu, estimée à la jante d'après les rapports de vitesses virtuelles, est trop faible pour y vaincre la résistance qu'opposerait le frottement de glissement. Le seul résultat sera donc d'exercer sur les tampons une certaine pression ; laquelle ira en croissant, si nous augmentons progressivement la tension de la vapeur. Enfin viendra le moment où l'équilibre sera rompu, et où la roue se mettra à tourner en glissant sur le rail. La vapeur consommée s'emploiera dès lors à fournir un travail égal à celui de ce frottement, sans produire d'accélération, si elle reste exactement dosée à ce degré.

Les choses se passeront de même pendant la marche du train. L'adhérence de la roue sur le rail ne diffère pas alors <sup>(1)</sup> de celle qui se développait tout à l'heure au repos. Si donc le mécanicien a soin d'allonger la détente, de manière à ne fournir par tour de roue qu'une quantité insuffisante de travail, cet état de choses ne pourra prendre naissance. La roue continuera à rouler en avant, et l'on conservera la marche proprement dite à contre-vapeur, avec laquelle la destruction de force vive se consomme dans le générateur sous forme de production de chaleur, en dégageant les bandages de cette mission nuisible. On arrivera ainsi sans encombre jusqu'à l'annihilation complète de l'énergie, après quoi le train se mettra à reculer.

**680** — Cette modification présente un autre avantage d'une grande importance. Si la roue motrice tourne à contre-sens, tandis que le mécanisme moteur et celui de la distribution marchent dans un sens corrélatif, c'est, comme nous venons de le voir, au prix d'un effort vaincu considérable, qui se transmet (sauf les rapports de vitesses virtuelles) dans toutes les parties de l'appareil. Cette force peut devenir irrésistible, en cas d'un grippement des surfaces métalliques, lequel a précisément tendance à se produire,

(1) Si nous négligeons les effets secondaires, pour plus de simplicité.

comme nous le verrons bientôt (n° 682), en raison de la destruction des enduits. Le levier de changement de marche qui se trouve placé sous la main du mécanicien en reçoit donc sa part, et le cran dans lequel est engagé son loquet se trouve fortement comprimé. Si celui-ci vient à l'échapper, le levier sera vivement rejeté vers la position compatible avec la marche contraire, dont la suppression a précisément donné naissance à cet effort anormal. De là un choc violent que le machiniste risque de recevoir à la tête ou dans la poitrine (1). Aussi ces hommes, instruits de ce danger, ne se servaient-ils de cette ressource à l'origine qu'avec la plus grande appréhension. On ne l'utilise aujourd'hui que pour le cas d'un danger imminent, dans lequel il devient nécessaire de s'arrêter sur le plus petit parcours possible, en opposant la vapeur avec toute l'énergie dont elle est susceptible, en même temps que l'on engage à bloc tous les freins.

**681** — Mais il y a plus encore ; et la marche à contre-vapeur, telle qu'elle vient d'être définie, est journellement employée, non plus pour réduire à zéro, dans un parcours limité, la force vive d'un train, mais pour le laisser progresser indéfiniment sur une pente, en détruisant progressivement le travail de la pesanteur, qui déterminerait sans cela une accélération permanente. On pourrait assurément trouver dans les sabots des freins l'influence antagoniste nécessaire ; mais ce serait encore au prix d'une usure et d'un échauffement abusifs, qu'il est bon de leur éviter.

On peut citer également dans l'exploitation des mines quelques cas analogues, fort rares du reste, où l'on opère la descente verticale des bois et autres matériaux à l'aide de la machine d'extraction conduite en contre-vapeur.

Lorsque l'emploi de cette allure exceptionnelle prend ainsi un caractère normal et durable, il devient nécessaire de lui apporter un perfectionnement extrêmement ingénieux appelé *tube d'inversion*, avant l'introduction duquel on se heurtait dans la pratique à des obstacles à peu près insurmontables.

(1) On peut consulter pour ce danger le mémoire sur la contre-vapeur de Le Châtelier, p. 28.

**682** — *Tube d'inversion.* — On doit remarquer que dans ce régime, tout se trouve interverti. On aspire par l'échappement, et l'on refoule par la conduite d'amenée jusque dans la chaudière. Or on a soin, dans les locomotives, de placer l'évacuation au pied de la cheminée par laquelle s'échappent les gaz brûlés du foyer. On trouve à cette disposition l'avantage de venir en aide au tirage pendant l'allure ordinaire, au moyen des bouffées puissantes que produit l'échappement de la vapeur à chaque course.

Avec la marche à contre-vapeur, ce sera donc l'air chaud qui viendra remplir le cylindre; et la compression qu'il y subit ne pourra qu'en élever encore la température. Dans ces conditions, il oxyde le métal et brûle les graisses, dont la destruction provoquera des grippements. La carbonisation des pressé-étoupes et des joints détermine des pertes de vapeur. Cet air arrive dans la chaudière, où il ne saurait se liquéfier. Il entrave le jeu du Giffard (1). Il fait souffler les soupapes de sûreté. Ajoutons que les gaz brûlés sont loin d'être purs, et qu'ils amènent avec eux dans le cylindre des cendres et des escarbilles qui l'encrassent et rayent ses parois.

Le Châtelier a imaginé un artifice remarquable par sa simplicité (2), en vue de parer à ces difficultés. Il consiste uniquement à établir un conduit muni d'un robinet, et destiné à faire communiquer la chaudière avec la base de la cheminée, au point d'insertion de l'échappement. On l'appelle *tube d'inversion* ou *tube Le Châtelier*. Imaginons que l'on ouvre peu à peu la communication, en envoyant de la vapeur au pied de la cheminée. Elle y prendra la place des gaz chauds, qu'elle refoulera loin des abords de l'échappement. C'est donc elle qui sera aspirée à leur place à l'intérieur du cylindre. Dès lors l'obstacle se trouve écarté, et ce fluide ira se liquéfier par la compression dans le générateur.

Mais il y a plus. En vue de diminuer la température, qui n'en reste pas moins fort élevée, puisque le travail de la gravité se

(1) Appareil d'alimentation dont il sera question plus tard.

(2) M. Ricour, inspecteur général des Ponts et Chaussées, travaillait de son côté dans cette voie. Quelques autres personnes, parmi lesquelles M. Larpent, chef de dépôt, y ont également, à des degrés très divers, pris une certaine part. Toutefois l'opinion publique a sanctionné pour cette belle découverte la prééminence des titres de Le Châtelier, inspecteur général des Mines.

transforme incessamment en chaleur, l'on fournit de préférence par le tube d'inversion un mélange de vapeur et d'eau liquide, et même le plus souvent de l'eau seulement. Celle-ci, attirée par la succion qui s'opère dans le cylindre, s'y volatilise sous l'influence de cette chute de pression, en absorbant pour cela des calories, de manière à rafraîchir les surfaces, en préservant le métal et ses enduits.

**683** — On a imaginé de réaliser la contre-vapeur, non plus en renversant le tiroir, suivant l'ordre d'idées que nous avons développé uniquement jusqu'ici, mais en intervertissant le jeu des fluides. Dans la contre-vapeur Krauss <sup>(1)</sup>, à l'aide d'une tuyauterie et d'une robinetterie convenablement disposées, on se met en mesure de fournir, au moment voulu, la vapeur à l'orifice d'évacuation, en interrompant la communication de la chaudière avec la boîte à vapeur, et reliant cette dernière au condenseur ou à l'atmosphère extérieure. Dans ces conditions, un mouvement toujours identique du mécanisme de distribution déterminera, suivant la volonté du mécanicien, des fonctions motrices ou résistantes à l'intérieur du cylindre.

On peut citer de même les freins de vapeur de Landsée <sup>(2)</sup> et de Linde <sup>(3)</sup>.

M. Roirant a proposé un moyen du même genre. Il emploie deux tiroirs qui sont réglés, l'un pour la marche en avant, et l'autre pour la marche en arrière. Ils jouent constamment tous les deux sur leurs glaces. Mais le déplacement d'une plaque entre ces dernières permet, suivant la volonté du mécanicien, de condamner l'une et de dégager l'autre, en déterminant ainsi alternativement le fonctionnement dans le sens voulu.

<sup>(1)</sup> *Bulletin de l'Association des anciens Élèves de l'École des Mines de Paris*, janvier-février 1869. — Le Châtelier, *Mémoire sur la marche à contre-vapeur*, p. 113. — Linde. *Sur les freins à vapeur de Krauss*, Munich, 1866.

<sup>(2)</sup> Landsée. *Mémoire sur les différentes méthodes employées pour modérer les vitesses des trains sur les pentes, et en particulier sur le frein à vapeur*. Mulhouse, 1867.

<sup>(3)</sup> Linde. *Ueber einige Methoden zum Bremsen der Locomotiven insbesondere ueber die Dampfprepressionsbremse*. Munich, 1868.

## MARCHE NORMALE

	FACE GAUCHE	FACE DROITE	
FACE D'AMONT	A — <i>Admission propre<sup>t</sup> dite,</i> Chaudière, Piston fuyant.	D <sub>1</sub> — <i>Échappement propre<sup>t</sup> dit,</i>	FACE D'AVANT
	B — <i>Détente,</i> Isolement, Piston fuyant.	<i>Idem.</i>	
	C — <i>Échappement anticipé,</i> Cheminée, Piston fuyant, <i>Idem.</i>	E <sub>1</sub> — <i>Compression.</i>	
FACE D'AVANT	D — <i>Échappement propre<sup>t</sup> dit,</i> Cheminée, Piston foulant, <i>Idem.</i>	A <sub>1</sub> — <i>Admission propre<sup>t</sup> dite,</i>	FACE D'AMONT
	E — <i>Compression,</i> Isolement, Piston foulant.	B <sub>1</sub> — <i>Détente.</i>	
	F — <i>Admission anticipée,</i> Chaudière, Piston foulant.	C <sub>1</sub> — <i>Échappement anticipé,</i>	
		<i>Idem.</i>	

CONTRE-VAPEUR

FACE GAUCHE				FACE DROITE	
FACE D'AMONT	F' — <i>Pleine pression (courte),</i> Chaudière, Piston fuyant.	+	—	C' <sub>1</sub> — <i>Échappement,</i>	FACE D'AVANT
	E' — <i>Détente,</i> Isolement, Piston fuyant.	±	—	<i>Idem.</i>	
	D' — <i>Aspiration des gaz,</i> Cheminée, Piston fuyant, <i>Idem.</i>	—	—	B' <sub>1</sub> — <i>Compression.</i>	
FACE D'AVANT	C' — <i>Échappement,</i> Cheminée, Piston fuyant, <i>Idem.</i>	—	+	V' <sub>1</sub> — <i>Pleine pression (courte).</i>	FACE D'AMONT
	B' — <i>Compression,</i> Isolement, Piston fuyant.	—	—	E' <sub>1</sub> — <i>Détente.</i>	
	A' — <i>Contre-vapeur (longue),</i> Chaudière, Piston fuyant.	—	—	D' <sub>1</sub> — <i>Aspiration des gaz,</i> <i>Idem.</i>	

**684** — *Phases de la contre-vapeur.* — Il ne sera pas inutile de faire ressortir le parallélisme des phases respectives de la contre-vapeur et de la marche ordinaire. On le trouve dans les deux tableaux précédents (\*).

Le premier concerne la marche normale. Sa première colonne se rapporte à l'une des faces du piston, que nous appellerons la face gauche. Dans la première course simple, celle-ci joue le rôle de face d'amont; pendant la seconde, elle devient face d'aval. Les trois phases fondamentales de la première période sont désignées par les lettres A, B, C; celles de la seconde par D, E, F. La seconde colonne met en regard des phénomènes qui s'accomplissent sur la face gauche, les circonstances simultanées qui règnent du côté opposé. On y retrouve naturellement les six phases précédentes, mais dans un ordre différent. Il commence par la période  $D_1, E_1, F_1$  caractéristique de la face d'aval. Vient ensuite la série  $A_1, B_1, C_1$  relative au rôle d'amont. Les détails inscrits dans la première colonne concernent trois ordres d'indications : d'abord la fonction qu'accomplit le fluide (admission, détente, etc.); en second lieu, l'isolement, ou le genre de communication (chaudière ou cheminée) que réalise la lumière; enfin le sens du mouvement du piston par rapport au fluide (fuyant ou foulant). Ces détails ne sont pas reproduits dans la seconde colonne; c'était inutile, les lettres de renvoi suffisent à cet égard.

Le second tableau est relatif à la contre-vapeur. Il se déduit du premier à l'aide des transformations suivantes : 1° L'ordre des communications que fournit la lumière est directement interverti. A la série A, B, C, D, E, F, se substitue l'ordre  $F', E', D', C', B', A'$ . 2° Les indications *face d'amont* et *piston fuyant*, qui caractérisaient A, B, C, appartiennent maintenant à  $F', E', D'$ ; et réciproquement les expressions *face d'aval* et *piston foulant* passent de D, E, F à  $C', B', A'$ . 3° Les fonctions nouvelles du fluide qui remplit le cylindre se déduisent immédiatement des deux éléments précédents : à savoir, le genre de communication, et le sens fuyant ou foulant du

(\*) Nous y avons supposé l'absence de recouvrement intérieur, qui constitue le cas le plus ordinaire. Les complications spéciales dues à cet élément dépasseraient l'utilité que nous avons ici en vue.



piston. 4° Quant aux lettres affectées de l'indice 1 qui se trouvent inscrites dans la seconde colonne, elles gardent avec les précédentes la même correspondance que dans le premier tableau. 5° Le signe algébrique qui se trouve placé au milieu de la page indique la nature du travail, moteur ou résistant.

On reconnaît immédiatement que le travail négatif l'emporte de beaucoup. Le travail moteur ne provient que de la courte *admission motrice* qui se substitue à l'*admission anticipée résistante* de la marche ordinaire, ainsi que des premiers instants de la détente de cette petite provision de vapeur. On trouve donc une plus grande homogénéité d'action dans la marche à contre-vapeur que dans l'allure normale. Elle joue son rôle de frein avec plus de netteté que cette dernière n'accomplit sa fonction de moteur. Nous verrons cependant plus tard (n° 712) que c'est avec moins d'intensité, en ce qui concerne le total de kilogrammètres réalisé.

## § 2

### PRESSIION SUR LE DOS DU TIROIR

**685** — *Effets de la pression dorsale.* — Les développements qui précèdent ne font, malgré leur étendue, que poser le problème. Les moyens de solution restent à trouver. Nous savons du moins avec précision quel est le but à atteindre. Pour faire varier la détente, comme pour réaliser en particulier la marche au cran d'arrêt, il s'agit de nous mettre en mesure d'augmenter ou de diminuer à volonté la course du tiroir. Pour renverser la marche, nous avons besoin de pouvoir transporter brusquement celui-ci d'une position quelconque à sa situation conjuguée.

Avant d'aborder l'étude effective des organes qui permettent d'obtenir ces résultats, il sera, je pense, utile, pour mieux connaître le terrain, de commencer par étudier en elle-même la difficulté la plus sérieuse qui s'oppose à leur jeu, à savoir la *pression sur le dos du tiroir* ou *pression dorsale*, et le frottement qui en résulte.

On désigne sous ce nom la résultante de toutes les pressions qui

sollicitent à la fois cet organe. Sa surface extérieure subit directement la tension de la chaudière diminuée des pertes de charge, accidentelles ou voulues, qui sont dues à la canalisation, à la valve, au détenteur. En dessous, le tiroir supporte, à l'intérieur de la coquille, la pression du condenseur, ou celle de l'air extérieur selon les cas, et, suivant les phases de la distribution, la tension de la détente ou de la compression sous ses recouvrements sur une surface égale à la section des lumières, ou encore celle de l'admission ou de l'échappement sous les zones qui recouvrent une partie de ces dernières.

Il n'est pas besoin d'insister sur le double intérêt qui s'attache à la diminution du frottement correspondant. Il constitue en effet tout à la fois un obstacle grave à la promptitude des manœuvres que doit effectuer accidentellement le bras du mécanicien en surmontant cet obstacle, pour la production des mouvements exceptionnels dont nous avons parlé, et en outre une perte constante d'effet utile, pendant le mouvement normal des pièces du mécanisme.

Toutefois il reste à cet égard une certaine mesure à observer. Il ne serait pas bon de laisser le tiroir flottant sur sa glace. Cet état de choses compromettrait l'étanchéité, et les moindres influences accessoires suffiraient pour déterminer des ballottements nuisibles à la précision de la distribution. Dans certains cas même, on prend soin de s'assurer contre les défaillances de la pression dorsale, en arc-boutant le tiroir contre le ciel de la boîte à vapeur, à l'aide de ressorts qui permettent le glissement, tout en s'opposant au soulèvement.

Ajoutons encore qu'en vue de la possibilité d'un tel soulèvement dans des cas extrêmes, et en prévision de l'usure des surfaces, on ne doit pas assembler le tiroir d'une manière absolument rigide à l'extrémité de sa tige.

**686** — *Moyens d'atténuer la pression dorsale.* — Pour atténuer le travail résistant du tiroir, on peut s'y prendre de deux manières, en s'appliquant à réduire soit la force de frottement, soit l'espace parcouru.

Quant à ce dernier mode, le point essentiel sera, tout en diminuant par rapport au chemin décrit par la main du mécanicien, l'excursion maximum du tiroir, à laquelle ce travail reste proportionnel, de s'attacher à ne pas nuire à la vitesse *initiale* de démasquement, dont nous avons reconnu l'intérêt tout spécial au point de vue du laminage (n° 656). Bien que ce premier ordre d'idées ne soit pas le plus important, je citerai tout au moins comme exemple la transmission d'Allan (fig. 582).

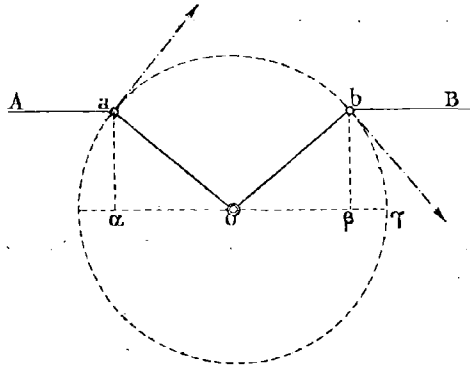


Fig. 582.

La tige AB est interrompue par un varlet  $aOb$ . La commande directe s'exerce sur  $Aa$ , et c'est  $bB$  qui actionne le tiroir. Les articulations  $a$  et  $b$  possédant au premier instant des vitesses égales, inclinées de la même manière sur la direction du mouvement, leurs composantes longitudinales auront la même valeur, et rien ne sera altéré dans le régime des premiers moments.

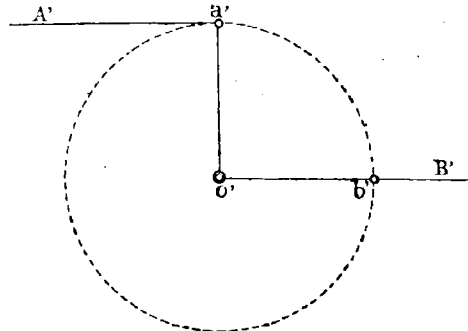


Fig. 583.

Mais le parcours total sera sensiblement diminué. Tandis que celui de la commande est égal à  $O\alpha$ , pour amener le système de la situation  $AaObB$  (fig. 582) à la position  $A'a'o'b'B'$  (fig. 583), qui correspond au maximum d'élongation, celui du tiroir est  $\beta\gamma$ , et le rapport de ces deux parcours a pour valeur :

$$\frac{\beta\gamma}{0z} = \frac{1 - \cos 45^\circ}{\cos 45^\circ} = \sqrt{2} - 1 = 0,41;$$

d'où une réduction d'environ 60 %.

**687** — L'autre moyen consiste à diminuer l'intensité du frottement <sup>(1)</sup>, dont l'expression  $fN$  renferme deux facteurs. On peut en premier lieu s'attacher à restreindre le coefficient de frottement  $f$  <sup>(2)</sup>, en soignant particulièrement le graissage. Nous consacrerons à cet ordre de préoccupations, envisagé d'une manière générale, la totalité du chapitre LII.

On a même essayé, dans les locomotives de Grant, de substituer au glissement le roulement, qui provoque beaucoup moins de résistance. Le tiroir est alors porté par de petites roulettes engagées dans des espèces d'ornières. On les construit en acier, tandis que la glace est en métal mou. Au début, on laisse à dessein leur diamètre un peu trop faible, de manière à commencer par un glissement. La glace s'use rapidement sur une petite épaisseur, et les galets arrivent alors au contact. A partir de ce moment, il s'établit une sorte d'équilibre extrêmement délicat. Les galets roulent en supprimant tout frottement sur le métal tendre, sans quoi celui-ci s'userait sous cette influence, et la pression mutuelle disparaîtrait. On conserve cependant une adhérence géométrique suffisante pour l'étanchéité, car le métal ne saurait s'user au delà du contact précis, le diamètre des galets empêchant le tiroir de l'y suivre pour effectuer cette usure. On ne peut refuser de voir dans cette combinaison une idée ingénieuse, mais dont l'application pratique ne semble pas s'être répandue.

**688** — On peut, en second lieu, s'attacher à diminuer l'effort normal  $N$ , c'est-à-dire précisément la pression dorsale. En simplifiant par approximation la définition exacte qui en a été donnée ci-des-

<sup>(1)</sup> Frottement des tiroirs des machines à vapeur. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, avril 1887, p. 638.

<sup>(2)</sup> Le coefficient  $f$  peut varier pratiquement depuis 0,05 pour un frottement très doux avec un graissage soigné, jusqu'à 0,20 dans des conditions très défavorables.

sus (n° 685), nous pouvons la considérer comme égale au produit de la tension de vapeur par la projection du tiroir sur sa glace <sup>(1)</sup>. La première doit être considérée comme déterminée par des considérations plus importantes. Quant à la seconde, nous avons déjà souligné à plusieurs reprises (n°s 655 et 666) l'intérêt qui s'attache à en restreindre autant que possible les dimensions.

On est même parvenu à la supprimer entièrement par l'introduction du dispositif appelé *tiroir à piston* <sup>(2)</sup>. Ce distributeur (fig. 584) se trouve entouré dans toute son étendue de ceintures complètes, solides ou fluides <sup>(3)</sup>. Les parties obturatrices fonctionnent comme des pistons dans des gaines alésées. Elles sont reliées l'une à l'autre par une tringle complètement immergée au sein d'un milieu qui se trouve à la tension de l'échappement. La vapeur est admise dans les deux compartiments extrêmes <sup>(4)</sup>.

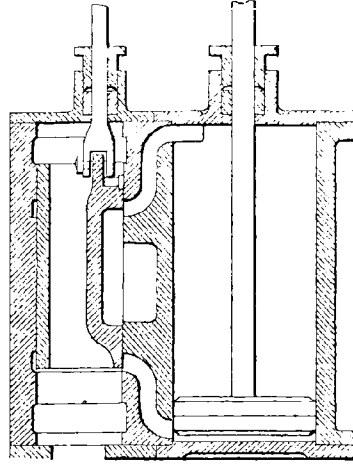


Fig. 584. — Tiroir à piston Jobin  
(coupe longitudinale).

Le tiroir à piston fournit donc théoriquement une solution radicale. Malheureusement l'usure en compromet l'efficacité, en exposant à des fuites. On s'est donc bien souvent rabattu sur des demi-mesures, en ayant recours à l'emploi des tiroirs équilibrés, eux-mêmes assez sujets à caution.

<sup>(1)</sup> Projection *algébrique* dans laquelle on soustrait les portions de surface sollicitées par dessous, comme dans le tiroir à piston et les tiroirs équilibrés dont nous allons parler à l'instant.

<sup>(2)</sup> Fortin. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'Arts et Métiers*, octobre 1889, p. 592. — Ricour. Tiroir cylindrique équilibré. *Annales des Ponts et Chaussées*, septembre 1865, p. 510. — Piston distributeur Gräbner Möller. *Revue technique des inventions modernes*, octobre 1889, p. 7. — Tiroirs à piston de Jobin, d'Erhardt, de Zimmermann.

<sup>(3)</sup> De manière à réaliser une projection algébrique nulle.

<sup>(4)</sup> Ce fonctionnement présente des rapprochements évidents avec celui du tiroir en D de Watt (n° 666), et avec la distribution de la machine à colonne d'eau (t. I, p. 322).

**689** — On se contente, avec les *tiroirs équilibrés*, de diminuer, sans l'annuler complètement, la pression sur le dos du tiroir.

Dans un premier type (fig. 585), on surmonte la boîte à vapeur

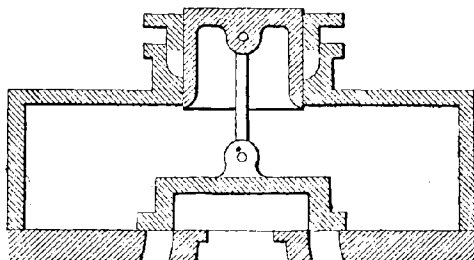


Fig. 585. — Tiroir équilibré (coupe longitudinale).

d'une sorte de cheminée, le long de laquelle se meut un piston, sollicité par la pression sur sa face inférieure et relié par une bielle au sommet du tiroir, dont l'adhérence sur la glace se trouve soulagée par cet effort antagoniste.

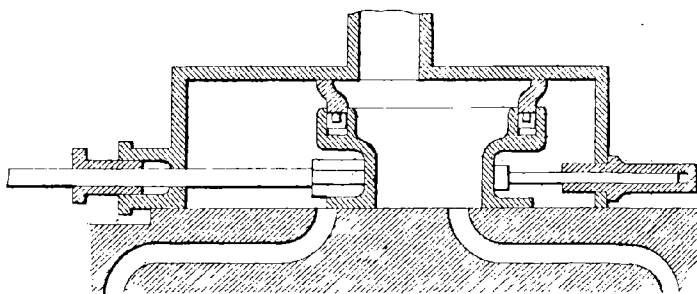


Fig. 586. — Tiroir à dos percé (coupe longitudinale).

La tige de commande s'implante dans le tiroir Taylor et Weatherbrogg à la manière d'un coin, et tend à le soulever, lorsque, à l'aide d'une vis, on agit du dehors pour l'y faire pénétrer davantage.

Dans les *tiroirs percés* de Desgranges, d'Outridge (\*), l'échappement s'opère à travers le centre de l'appareil (fig. 586), qui n'a

(\* ) Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 214.

plus, à proprement parler, de dos exposé à l'influence de la pression motrice.

M. Adams, M. Joffrey <sup>(1)</sup> appliquent contre le ciel de la boîte à vapeur une sorte de cuvette élastique, qui occupe, sur le dos du tiroir, une étendue notable, en y supprimant la tension de la vapeur.

On a créé dans cette voie, pour les machines marines, toute une série de *compensateurs* <sup>(2)</sup>. Ils consistent en une sorte de cadre interposé entre le tiroir et le ciel de la chambre à vapeur. Le défaut d'étanchéité constitue le point faible de ces appareils <sup>(3)</sup>.

### § 5

#### COMMANDE DU MÉCANICIEN

**690** — Pour embrasser l'étude des organes qui permettent d'apporter à chaque instant dans l'allure du moteur les modifications voulues, nous aurons à porter successivement notre attention aux deux extrémités de l'appareil. A l'une, nous trouvons les organes de commande qui se trouvent mis à la disposition immédiate du mécanicien <sup>(4)</sup>. A l'autre bout, nous aurons à examiner les modifications spéciales que doit recevoir dans ce but le distributeur pro-

<sup>(1)</sup> *Engineering*, 1875, p. 564.

<sup>(2)</sup> Compensateurs CADIAU, DAWES et HOLT, MOURAILLE, etc. (Bienrymé. *Machines marines*, 188. — Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 209).

<sup>(3)</sup> Citons encore les tiroirs équilibrés de BEATIE. — BEMER. — BEYER. — BUCKEVE. *American machinist*, 5 novembre 1881. — CHURCH. — COCHET. — DAVIES. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1<sup>re</sup> série, t. VI, p. 356. — DEVILLE. *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1884, p. 168. — DODD et PHILLIPS. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1<sup>re</sup> série, t. VI, p. 536. — EVERETT. — GUÉRIN. — HAUSAY et LEFEBVRE. *Ibidem*, 1<sup>re</sup> série, t. II, p. 455. — DE LANCEY (*The Engineer*, 20 février 1890, p. 167. — *Scientific American*, 3 nov. 1885, p. 275). — LECLERCQ. — LYON. *Engineering*, 16 mai 1890, p. 586. — MAC DERMOTT. *American Machinist*, 21 mars 1885, p. 8. — MALDANT. — MAYER. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1<sup>re</sup> série, t. VI, p. 356. — PALTRINIERI (Spineux. *Traité des distributions*, pl. XIV. — Ledieu. *Nouvelles machines marines*, pl. V. — *Engineering*, 1875, p. 514) — PEARCE. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1<sup>re</sup> série, t. II, p. 455. — PIROTTÉ. Spineux. *Traité des distributions*, p. 124. — RICHARDSON (*Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. XI, p. 156. — *The Engineer*, 20 février 1890, p. 167). — SIEPERMANN. *Glaser's Annalen für Gewerbe und Bauwesen*, 15 mai 1881, p. 450. — WALCKER. — WATSKA. — WISNER et STRONG. Buchetti. *Machines à vapeur nouvelles*, p. 18.

<sup>(4)</sup> Ou qui sont conduits spontanément par le régulateur à force centrifuge (chap. I).

prement dit. Nous consacrerons à ce second point de vue la totalité du chapitre suivant. La fin de celui-ci sera employée à faire connaître les moyens de commande du mécanicien.

Nous envisagerons à cet effet successivement : 1° la description des organes mis immédiatement sous sa main, pour recevoir son action musculaire; 2° les secours mécaniques que l'on a trouvé moyen d'adjoindre à cette dernière, afin de faciliter la manœuvre, malgré les résistances considérables qu'elle rencontre dans les machines puissantes.

**691** — L'organe de commande le plus ordinaire est un simple levier oscillant dans un plan vertical (fig. 587). On peut le placer à

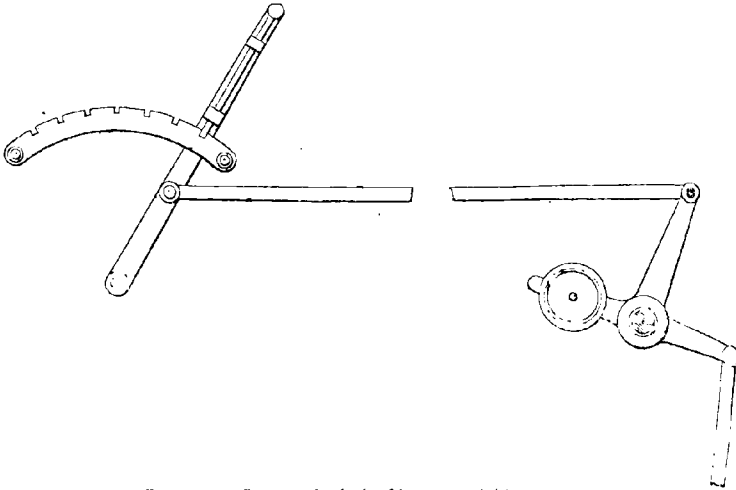


Fig. 587. — Commande de la détente variable (élévation).

fond de course, d'un côté ou de l'autre, pour déterminer la marche en avant ou la marche en arrière. On peut également, en vue de produire la détente variable, l'arrêter en divers points de cette excursion. On dispose à cet effet, le long d'un arc de cercle métallique, un certain nombre d'encoches, dans lesquelles s'introduit un loquet adhérent au levier. On le soulève avec le doigt en saisissant la poignée, et on le laisse retomber après avoir effectué le mouvement angulaire voulu. De là provient l'expression usitée de *crans de détente*.



Une barre de transmission est articulée à ce levier et accomplit, par son autre extrémité, les manœuvres de relevage de l'appareil de détente variable, quel qu'il soit. On a soin d'ailleurs d'en équilibrer les pièces à l'aide de contrepoids, de manière à n'avoir à vaincre que le frottement et les forces d'inertie.

Quelquefois, en vue d'utiliser plus avantageusement la force humaine, on donne au levier des dimensions assez grandes pour qu'il soit nécessaire au mécanicien de se tenir debout, et de faire un pas en avant ou en arrière, lorsqu'il veut effectuer la manœuvre.

On rencontre également des leviers à deux hommes, dont l'un obéit passivement à l'initiative de l'autre, en lui apportant seulement le secours de son bras (1).

Assez souvent on substitue au levier une roue complète, munie de poignées uniformément espacées sur sa circonférence. On réalise ainsi, par l'accroissement du chemin parcouru, un allègement de l'effort à exercer.

**692** — Un artifice plus décisif encore consiste dans l'emploi de la vis (2). On y trouve l'avantage de multiplier l'effort de l'homme jusqu'à le rendre irrésistible; à la condition toutefois que l'emploi d'un pas très faible reste sans inconvénient, en ce qui concerne le degré de rapidité des manœuvres.

Le défaut qui naît du ralentissement se trouve d'ailleurs atténué par cette circonstance, que ce système permet, par compensation, de supprimer la perte de temps nécessaire à la fermeture préalable de la valve, que le mécanicien effectue d'ordinaire afin de diminuer la pression sur le dos du tiroir, et par suite le frottement qui fait obstacle à sa propre action. Il se trouve suffisamment armé, avec le changement de marche à vis, pour pouvoir exécuter la manœuvre sous pression.

Cet appareil supprime également les tâtonnements auxquels on

(1) En outre cet aide-mécanicien peut suppléer le premier en cas de syncope ou de défaillance subite, comme les règlements l'exigent sur quelques bassins houillers pour les moteurs d'extraction.

(2) Marié. *Annales des Mines*, t. XX, 1885. — Baudry. *Revue des chemins de fer*, t. V. — Stevart. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XI, p. 68, et 1876, p. 101.

est exposé avec le levier ordinaire, pour trouver l'encoche et y insérer le loquet.

La variation de détente devient alors continue, tandis que la série des crans du levier reste nécessairement discontinue.

Enfin ce système est irréversible en raison de l'arc-boutement des vis lentes (<sup>1</sup>), et aucun effort n'est capable de le rejeter en arrière; ce qui écarte pour le machiniste l'appréhension de ce genre d'accident (n° 680).

On a reproché au changement de marche à vis d'engourdir la main du mécanicien par sa rotation trop fréquemment répétée. Cet inconvénient reste sans gravité sur les chemins de fer; mais il devient plus sérieux avec les machines d'extraction, dont les manœuvres sont incessantes. L'emploi de ce système, après y avoir été introduit, puis abandonné d'après ce motif, paraît y reprendre faveur.

**693** — Pour venir en aide à la force corporelle du mécanicien dans les grandes machines, un moyen tout à fait décisif consiste à emprunter le secours de la vapeur (<sup>2</sup>). On apporte par là un appoint irrésistible, en admettant la pression dans un cylindre auxiliaire d'un diamètre suffisant. Réduit à cette simplicité, le principe ne s'adapterait convenablement qu'au changement de marche, et non à la variation des crans de détente; car, une fois engagée, la vapeur pousse à fond le piston de secours.

Pour mettre mieux en main un secours aussi efficace, on le complète par l'adjonction d'un frein hydraulique (fig. 388). Au cylindre à vapeur se trouve associé un cylindre à eau glycérinée ou à huile, dont les deux extrémités sont mises en relation au moyen d'un conduit latéral, plus ou moins étranglé par le jeu d'un robinet. Son piston est monté sur la même tige que celui du précédent, et le mouvement de cet organe fait passer le liquide d'une face à l'autre à travers le tube, en surmontant cette résistance variable à volonté. On peut même la transformer en un verrou

(<sup>1</sup>) Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 379.

(<sup>2</sup>) G. Richard. Description de quelques appareils de changement de marche à vapeur. *Revue générale des chemins de fer*, août 1882, p. 104.

absolu, en fermant complètement le robinet; car l'eau est incompressible, et les pistons se trouveront alors immobilisés.

Imaginons que l'on donne à la résistance créée par le robinet une telle valeur que la puissance de la vapeur soit, à elle seule, insuffisante pour la vaincre en même temps que celle qu'oppose la

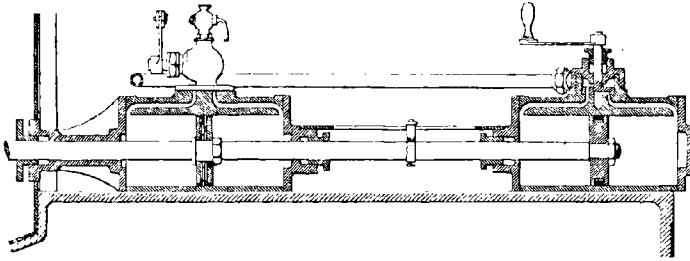


Fig. 588. — Verrouillage hydraulique Stirling (coupe longitudinale).

distribution, tout en restant très près d'y réussir. Il suffira de l'appoint apporté par la force personnelle du mécanicien, pour vaincre l'obstacle et opérer le mouvement. Mais à l'instant où la main du machiniste se relâche, la vapeur se retrouve dans son impuissance, et comme la force vive de ce petit appareil, qui a peu de lancé, décroît rapidement, le système s'arrête assez exactement dans la position voulue, sans la dépasser.

Pendant, il reste là une certaine cause d'incertitude, et il appartenait à M. Joseph Farcot de porter à sa perfection la commande des machines, par sa belle invention du servo-moteur.

## § 4

### SERVO-MOTEUR

**694** — Le principe du *servo-moteur* <sup>(1)</sup>, ou *moteur asservi*, peut

<sup>(1)</sup> Joseph Farcot. *Le Servo-moteur ou moteur asservi*, in-8°, 1875. — Barrault. *Étude historique et comparative du servo-moteur Farcot*, 1876. — Ledieu (Mise en marche Farcot-Duclos. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 255, 545. — *Étude sur les bateaux sous-marins, sur les servo-moteurs en général, et en particulier sur les servo-moteurs électriques*, in-4°, 1888, note C). — Servo-moteur JACQUEMIER. *Portefeuille économique des*

se réaliser dans l'application au moyen de types cinématiques très variés. D'une manière générale, il consiste à faire en sorte que le mécanicien n'ait à fournir, pour l'exécution de sa volonté, qu'un effort absolument insignifiant, à l'aide d'organes appelés *rênes*. Au moment précis où il cessera son intervention, non seulement l'action propulsive de la vapeur auxiliaire prendra fin, mais si l'appareil tend à continuer le mouvement commencé, l'action du fluide se retourne subitement en antagonisme, de manière à détruire activement la force vive qu'elle avait auparavant communiquée, en arrêtant ainsi l'appareil avec la plus grande précision.

Parmi les mécanismes qui ont été imaginés pour la réalisation de cette pensée, je me contenterai de prendre ici deux exemples.

Le servo-moteur de la machine d'extraction du puits Neyron <sup>(1)</sup> est représenté par la figure 389 et le dessin schématique 390. Le levier principal AOB tourne sur le point O. Il actionne la distribution du moteur à l'aide d'intermédiaires qui ont été supprimés sur ce croquis, pour plus de simplicité. En un point  $\omega$  du levier est articulée une seconde barre  $\alpha\omega\beta$ , ordinairement couchée le long de la précédente, sur laquelle la rappelle un ressort, quand on l'en a

*machines*, octobre 1874. — Servo-moteur FOUQUEMBERG. *Ibidem*, 3<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 169. — Servo-moteur GOFFINT. STEVART. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XI, p. 68. — Servo-moteur W. CRAMP. Gustave Richard. Description de quelques appareils de changement de marche. *Revue générale des chemins de fer*, 2<sup>e</sup> série, t. V, p. 105. — Servo-moteur du Mytho. ARMENGAUD. *Publication industrielle*, t. XXV. — Servo-moteur appliqué aux locomotives et aux machines marines. *Génie civil*, t. XIV, p. 155. — Baudry. Changement de marche à bras avec contrepoids de vapeur. *Annales des Mines*, 7<sup>e</sup> série, t. XX, p. 165. — Appareil Clair pour l'asservissement des machines d'extraction. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1890, p. 178. — Gaudillon. *Les machines à gouverner à bord des navires à vapeur*. — Mises en train à vapeur Mazeline, Dupuy de Lôme, Jassel, Maudslay, etc. Bienaymé. *Machines marines*, p. 255 et 265. — Mises en train à vapeur. Lédieu. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 251. — *La marine à l'Exposition de 1878*, publié en 1879 par le Ministère de la marine. — Hirsch. *Machines et appareils de la mécanique générale*. Exposition de 1878, groupe VI, classe 54, p. 270. — Reulcaux. *Le Constructeur*. Traduction par Debize, p. 957. — Timmermans. *Étude sur les machines d'extraction à détente*, in-8°, 1877, p. 69. — *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXXX, p. 1470. — *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, décembre 1876, p. 7. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1<sup>re</sup> série, t. XL, p. 101. — *Bulletin technologique des anciens Éléves des Écoles d'Arts et Métiers*, juillet-août 1884.

<sup>(1)</sup> *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1876, p. 7; février 1877, p. 20.

écartée et qu'on l'abandonne à elle-même. Son extrémité  $\beta$  commande, au moyen d'une tringle  $\beta\gamma$ , la tige  $\gamma\delta$  du tiroir normal de distribution d'un cylindre auxiliaire, dans lequel joue le piston D. Celui-ci, par sa tige DC et la bielle CB, attaque la queue du levier AOB, de manière à le mouvoir (et avec lui la distribution) d'après les impulsions que lui imprimera, ainsi que nous allons l'expliquer, la volonté du mécanicien.

Ce dernier agit sur la poignée  $\alpha$ , et l'écarte en  $\alpha'$ , pour amener

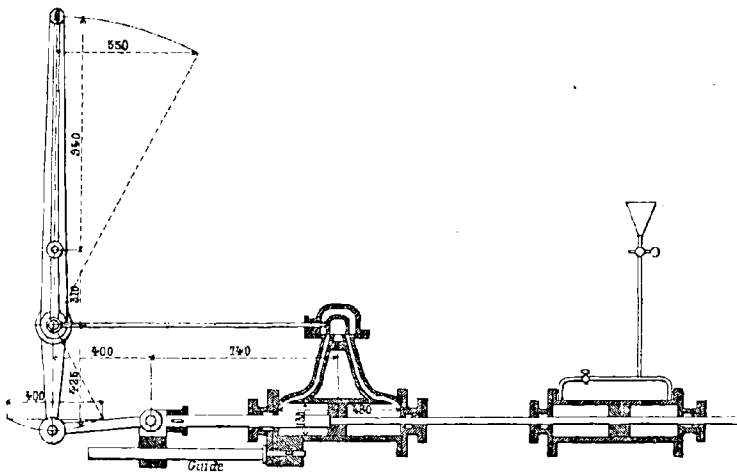


Fig. 589. — Servo-moteur (coupe longitudinale).

en  $\alpha'\omega\beta'$  le petit levier. L'extrémité  $\beta$  qui vient en  $\beta'$ , tire à elle  $\gamma$  et  $\delta$  en  $\gamma'$  et  $\delta'$ . Le tiroir démasque par là l'orifice de droite. La vapeur presse de ce côté le piston D, qu'elle pousse vers la gauche, en faisant basculer le grand levier OA dans la direction même où le machiniste a incliné la barre  $\omega\alpha$ .

Quand le système AOB $\alpha'\omega\beta'$  est parvenu, sous l'influence de cette poussée, dans la situation A<sub>1</sub>OB<sub>1</sub> $\alpha'_1\omega_1\beta'_1$ , le mécanicien jugeant que la distribution du moteur est suffisamment modifiée, lâche la main; et le ressort rappelle aussitôt  $\alpha'_1\omega_1\beta'_1$  en  $\alpha_1\omega_1\beta_1$ . La distance O $\beta$  (qui a été, pour plus de clarté, exagérée à dessein sur la figure), est en réalité assez faible pour que  $\beta_1$  diffère très peu de  $\beta$ . Le tiroir se trouve donc ramené à sa position normale, et cesse de fournir

de la vapeur par la lumière de droite. A la vérité celle qui est déjà entrée tendrait à continuer l'action commencée, et à pousser le piston  $D_1$  vers la gauche; mais aussitôt un antagonisme va se produire,

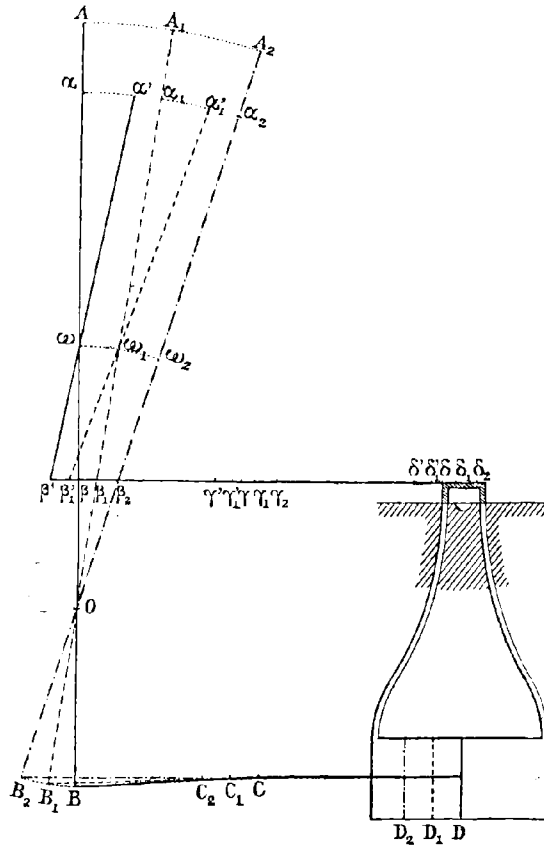


Fig. 590. — Servo-moteur (figure schématique).

et l'immobiliser au contraire dans la position qu'il vient d'atteindre.

En effet, supposons que  $D_1$  tende à prolonger son mouvement pour parvenir en  $D_2$ , en amenant le reste du système en  $D_2C_2B_2OA_2z_2\omega_2\beta_2\gamma_2\delta_2$ . Le résultat serait de démasquer la lumière de gauche, en admettant la vapeur sur la face gauche du piston  $D_2$ , et opérant la condensation sur la face droite. Ce dernier aura donc tendance à rebrousser

chemin dès qu'il a dépassé la position voulue, ce qui assure la précision de l'arrêt.

**695** — La Compagnie du chemin de fer de l'Ouest a étudié un

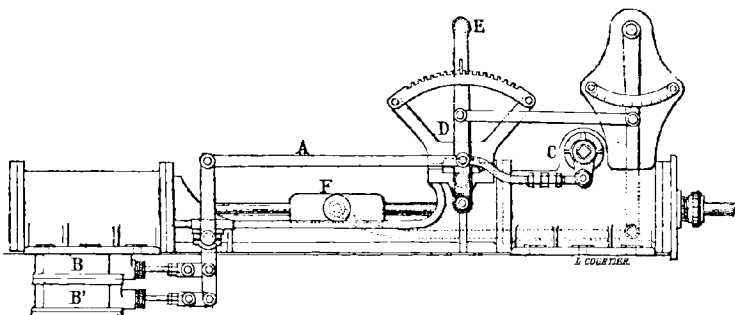


Fig. 591. — Changement de marche à vapeur de la Compagnie de l'Ouest (élévation).

servo-moteur fort ingénieux, qui se limite lui-même, en même temps qu'il actionne le mécanisme de changement de marche. Il

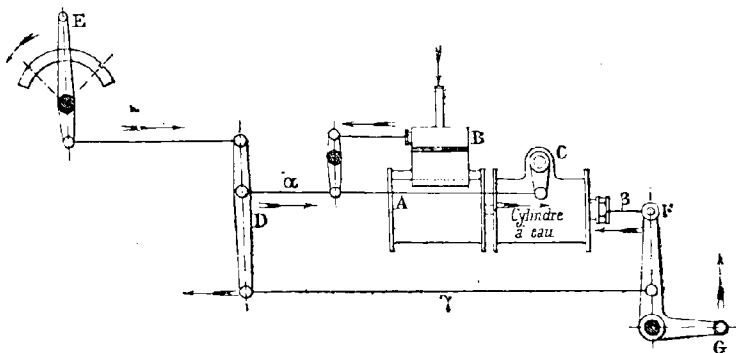


Fig. 592. — Changement de marche à vapeur de la Compagnie de l'Ouest. (Figure schématique).

s'arrête spontanément au point qu'a marqué le mécanicien en enclenchant sa manette. Cet appareil est représenté par la figure 591 et le croquis schématique 592 (<sup>1</sup>).

Au moment où l'on tire vers la gauche la manette E, elle

(<sup>1</sup>) *Génie civil*, t. XVI, p. 97.

repousse à droite la partie supérieure du levier D, dont l'extrémité inférieure joue pour le moment le rôle de point fixe, se trouvant calée par la résistance qu'oppose à son déplacement le varlet de changement de marche F. La tringle  $\alpha$  manœuvre donc vers la gauche le tiroir B du cylindre à vapeur A, et ouvre dans le sens contraire le robinet verrouilleur C du cylindre hydraulique. La vapeur admise sur la droite du piston, tire vers la gauche la tige  $\beta$  de ce dernier, et enlève la barre de relevage qui est articulée au varlet en G. Mais par cela même, la tringle  $\gamma$  pousse alors vers la gauche la partie inférieure du levier D, dont l'extrémité supérieure se trouve actuellement fixée par le cran dans lequel on a enclenché la manette. La barre  $\alpha$  est donc maintenant tirée en sens inverse. Elle referme le verrou hydraulique C, et met le tiroir B à la condensation.

Pour être sensible aux plus petits déplacements, ce tiroir doit n'avoir qu'un faible recouvrement. Dès lors, pour éviter que la vapeur puisse être admise sous l'influence de petites incertitudes en dehors des manœuvres volontaires, on superpose à cet organe un second tiroir commandé par le même mouvement, mais dont la course et le recouvrement sont doubles du précédent.

M. Joseph Farcot s'est préoccupé de son côté de ces petites perturbations. Pour éviter dans ses servo-moteurs les frétilllements qui sont inévitables avec l'emploi d'un fluide élastique comme la vapeur et d'un cylindre à huile, il demande la force motrice, non plus à l'action directe de cette vapeur, mais à celle d'une certaine quantité d'eau mise par elle sous pression, et dont la commande devient géométrique en raison de l'incompressibilité de ce liquide. Cette transformation est d'ailleurs facile, car les servo-moteurs fonctionnent toujours à pleine pression, et sans expansion élastique de la vapeur.



## CHAPITRE XL

### DISTRIBUTIONS A DEUX EXCENTRIQUES

#### § 1

#### PIEDS-DE-BICHE

**696** — Nous avons abordé, dans le chapitre précédent, trois questions étroitement connexes : la détente variable, le cran d'arrêt, le changement de marche. Nous avons, par la pensée, séparé en deux parties le mécanisme destiné à réaliser ces diverses manœuvres. L'une de ses extrémités est disposée pour subir directement la commande du machiniste; nous l'avons étudiée en détail, et n'avons plus à y revenir. L'autre est destinée à influencer immédiatement la vapeur en vue du résultat voulu. Nous lui consacrons le présent chapitre, ainsi que les deux suivants.

Le premier système que nous envisagerons à cet égard est celui des *pieds-de-biche*, ou des *becs-de-cane*. Il résout le problème du changement de marche, mais non les deux autres. Son emploi serait aujourd'hui tout à fait suranné, mais sa description forme le point de départ naturel des appareils plus complets et plus perfectionnés.

Considérons d'abord le cas d'une distribution à tiroir normal, et par conséquent, sans détente. L'excentrique doit être alors (n° 621) calé à 90 degrés *en avant* de la manivelle motrice (\*). Il suffit, par

(\*) Rappelons que cet énoncé suppose essentiellement la transmission directe (n° 622), et qu'avec la commande inverse, tous les termes de cette explication seraient intervertis.

conséquent, lorsqu'une machine est au repos, de porter les yeux sur ces deux organes, pour savoir à l'avance dans quel sens se produira le mouvement, lorsque l'on donnera la vapeur avec le régulateur. Si donc on dispose à la fois sur l'arbre, non plus un seul, mais deux excentriques suivant les deux rayons qui sont perpendiculaires à la manivelle, on n'aura qu'à embrayer l'un quelconque d'entre eux avec le tiroir, en débrayant l'autre, pour déterminer à volonté la marche en avant ou la marche en arrière au moment de l'ouverture de la valve.

A cet effet, les extrémités des deux barres d'excentrique (fig. 395) sont reliées entre elles à l'aide d'une bride. La barre supérieure est

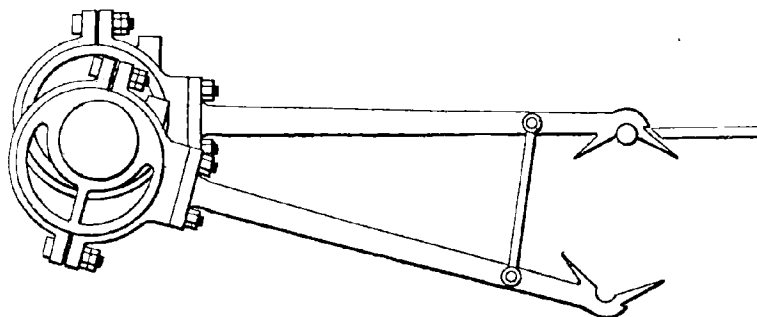


Fig. 395. — Système des becs-de-cane (élévation).

articulée à une bielle de relevage que l'on actionne à l'aide du système étudié ci-dessus (fig. 387). En tirant sur cette bielle, on relève la barre d'excentrique inférieure, jusqu'à l'alignement du tiroir. En laissant au contraire revenir le système sous l'action de la pesanteur, on fait retomber la barre d'excentrique supérieure dans sa première position.

Celle des deux barres que l'on amène en situation, saisit l'extrémité de la bielle du tiroir à l'aide d'une *selle à enfourchement*, que l'on met à cheval sur ce bouton. L'on a soin de munir cette encoche d'appendices évasés, qui sont destinés à faciliter la prise, malgré les dérangements inévitables qui accompagnent la transposition du tiroir. Il suffit que le bouton se trouve compris entre les deux branches de cette sorte d'entonnoir, pour qu'il parvienne sûrement au fond dans son mouvement relatif.

Ce système s'étend facilement au cas d'une machine à détente. Il suffit alors (n° 624) de caler les deux excentriques d'un côté et de l'autre de la manivelle motrice à la distance  $90^\circ + \alpha$ , si  $\alpha$  désigne l'avance angulaire. Le bras de manivelle forme ainsi le prolonge- de la bissectrice de l'angle  $180 - 2\alpha$  que comprennent entre elles les deux excentricités.

## § 2

## COULISSE DE STEPHENSON

**697** — Stephenson a eu l'idée (\*) de supprimer, dans la dispo- sition précédente, les becs-de-cane et la tringle articulée qui réunit les deux barres d'excentrique. Il les remplace par une *coulisse* en

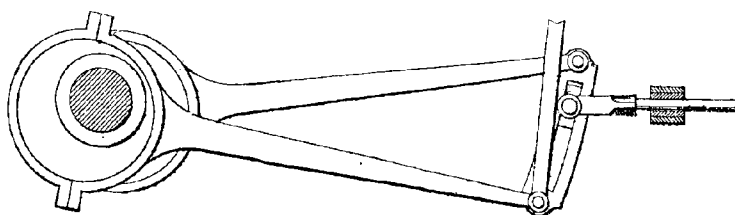


Fig. 394. — Coulisse de Stephenson (élévation).

arc de cercle (\*\*), qui réunit les extrémités de ces dernières (fig. 594). Un *coulisseau* adapté à l'extrémité de la bielle du tiroir peut glisser, ou, suivant l'expression consacrée, *coulisser* dans cette rainure. Sa position détermine à chaque instant celle du tiroir sur sa glace.

La coulisse est suspendue à la bielle de relevage, soit par son

(\*) M. Pichault reporte à W. Howe l'origine de cette admirable disposition (*Appareils de distribution par tiroirs*, p. 157).

(\*\*) Phillips. Théorie de la coulisse de Stephenson. *Annales des Mines*, 5<sup>e</sup> série, t. III, 1854. — Zeuner (*Traité des distributions par tiroirs*. Traduction Debize et Mériot, p. 64. — *Civil Ingenieur*, 1856-1857). — Pichault. *Appareils de distribution par tiroirs*, 1886, p. 108 et 157. — Coste et Maniquet. *Traité pratique des épures de distribution*, p. 256. — Spineux. *Traité des distributions*, p. 138. — Callon. *Cours de machines*, t. II, p. 224. — Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 331. — Leduc. Régulation des tiroirs. *Comptes rendus de l'Académie*

extrémité inférieure, soit le plus souvent par le milieu<sup>(1)</sup>. Ce dernier mode est plus symétrique. Le premier présente l'avantage d'allonger la barre de suspension, circonstance dont nous reconnaitrons plus loin l'utilité<sup>(2)</sup>.

L'emploi de la coulisse assure plus complètement que le système des pieds-de-biche l'arrivée du bouton du tiroir à fond de course dans les ensemlements des barres d'excentrique. Mais, en outre, cette innovation complète le système de la manière la plus remarquable, en permettant de réaliser, en même temps que le changement de marche, le cran d'arrêt et la détente variable.

**698** — Considérons d'abord un tiroir normal, et deux excentricités directement opposées suivant la perpendiculaire à la manivelle motrice. Imaginons que l'on exécute seulement la moitié du relevage, de manière à loger le coulisseau précisément au milieu de la coulisse; position que l'on appelle assez improprement le *point mort* de cette dernière.

Dans ces conditions, il y a symétrie parfaite de part et d'autre<sup>(3)</sup>. Toutes les conséquences de la liaison qui unit le coulisseau avec l'excentrique supérieur se reproduisent exactement, mais en sens inverse, avec l'excentrique inférieur. En effet, les deux centres d'excentricité se meuvent sur leur trajectoire circulaire commune avec des vitesses égales et également inclinées, mais dans des sens opposés en projection. La somme algébrique des déplacements horizontaux du coulisseau est donc exactement nulle. Ce bouton

*des sciences*, t. LXXXII, p. 152. — Desmousseaux de Givré. *Théorie de la coulisse de Stephenson*, in-8°.

Redtenbacher. Sur les distributions à coulisse (*Civil Ingénieur*, t. II, p. 202; III, 40. 155. — *Gezette des Locomotivbaues*. Mannheim, 1885). — Weissbach. *Ingénieur und Maschinen Mechanik*, t. III. — Bauschinger. *Indicator Versuche an Lokomotiven*, in-4°, Leipzig, 1868. — Zeuny. *Berg und Hüttenmännisches Jahrbuch der K. K. Schemnitzer Bergakademie*, t. VIII, 1859. — Zeech. *Zeitschrift des österreichischen Ingenieur Vereines*, 1855. — A. Rigg. *A practical Treatise on the steam engine*. Londres, 1878. — Edward Cowling Welch. *Designing valve gearing*, in-12, p. 105.

(1) Parfois même par un point quelconque; mais on risque par là de s'engager dans d'assez longs tâtonnements pour le réglage de la distribution.

(2) Voy. n° 790.

(3) Je rappelle encore que, jusqu'à ce que nous arrivions au chap. XLIV, toutes les théories supposent les bielles infinies.

reste par suite immobile dans l'espace, et l'on a ainsi réalisé le cran d'arrêt.

Il n'en est plus rigoureusement de même dans une machine à détente, dont les excentricités comprennent entre elles l'angle  $180 - 2\alpha$  <sup>(1)</sup>. Les vitesses des deux centres d'excentrique sont encore égales, mais elles occupent sur leur trajectoire circulaire des positions qui ne sont plus diamétralement opposées. Leurs inclinaisons sur l'horizontale sont donc différentes, ainsi par suite que leurs projections, dont la somme algébrique ne sera plus nulle. Il en résulte que le coulisseau placé au point mort de la coulisse ne reste pas immobile, comme dans le cas précédent. Le *cran d'arrêt rigoureux* se trouve alors remplacé par la *marche au point mort* <sup>(2)</sup>; le tiroir éprouvant encore certains déplacements peu étendus, de part et d'autre de sa situation normale.

Il ne s'ensuit pas *a priori* qu'il doive pour cela y avoir démasquement de la lumière, car le tiroir présente des recouvrements extérieurs  $r$  d'autant plus longs (éq. 41, p. 85) que l'avance angulaire  $\alpha$  est plus importante, et que la marche au point mort qui en est la conséquence devient plus prononcée.

**699** — Relevons maintenant la coulisse, de manière que le coulisseau n'occupe exactement ni les fonds, ni le milieu, mais divers points intermédiaires successivement. Selon qu'il se trouvera plus ou moins, soit près du milieu, où le balancement se trouve annulé, sous la réserve précédente, soit des extrémités, pour lesquelles l'influence de l'un des excentriques disparaît totalement, en laissant l'autre gouverner uniquement la distribution, l'excursion du coulisseau variera plus ou moins de son côté dans l'une ou l'autre des deux allures. Il en découle, comme nous le savons, la variation de la détente.

**700** — Le mode de montage de l'appareil donne naissance à

(<sup>1</sup>) Ou plus généralement  $180 - (\alpha + \alpha')$ , lorsqu'une des deux marches est avantagée au détriment de l'autre par l'emploi d'angles de calage inégaux.

(<sup>2</sup>) Que nous étudierons avec détail dans le § 4 du présent chapitre.

deux types distincts, qui sont dits à *barres ouvertes* ou à *barres croisées*.

Il est essentiel de remarquer que, avec l'un quelconque d'entre

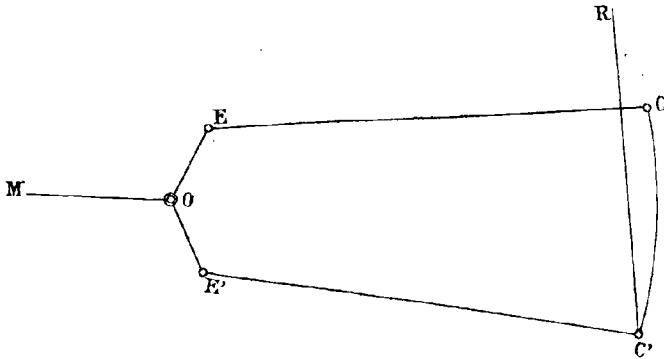


Fig. 595.

eux, les barres se croisent et se décroisent alternativement dans le cours de chaque rotation ; ce mouvement, amenant tour à tour les centres d'excentricité à se trouver l'un au-dessus de l'autre, tandis

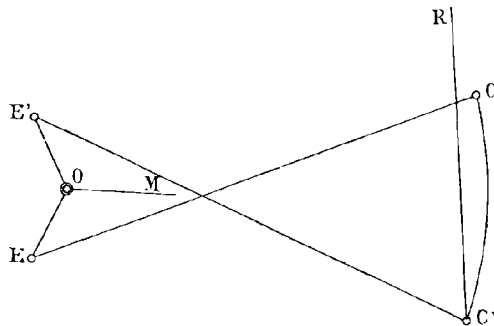


Fig. 596.

que la coulisse n'éprouve pas ce même retournement de haut en bas. La désignation du type doit donc se préciser d'après une situation bien déterminée. On choisit à cet effet celui des points morts de la manivelle motrice, pour lequel l'angle des excentricités  $180 - 2\alpha$  tourne son ouverture du côté de la coulisse. C'est alors que les bielles, suivant qu'elles sont à peu près parallèles ou

bien entre-croisées, fournissent les deux systèmes à barres ouvertes ou à barres croisées.

Le type des barres ouvertes est représenté par la figure 595 dans

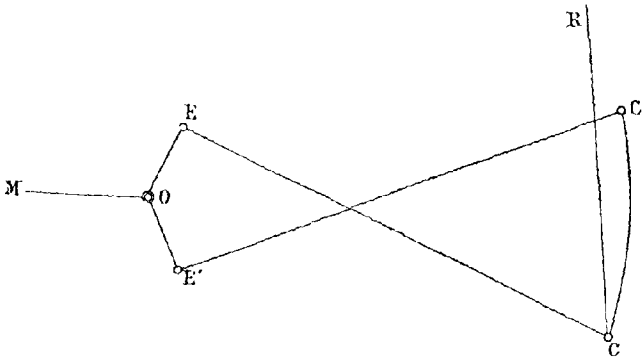


Fig. 597.

sa position droite, et par le croquis 596 dans la situation croisée. Le système des barres croisées se voit sur la figure 597 avec la

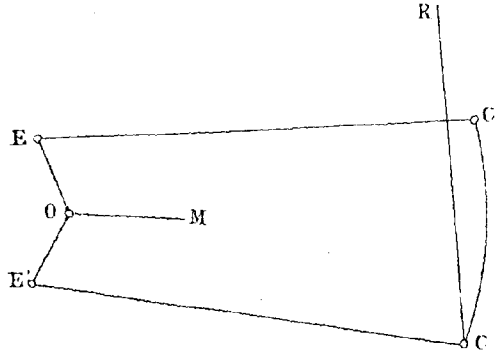


Fig. 598.

position entre-croisée, et sur la figure 598 dans sa situation droite.

**701** — Il est facile de trouver la loi du mouvement qui est communiqué au tiroir par la coulisse de Stephenson, sous la forme simple qui convient au cas des bielles infinies (<sup>1</sup>).

(<sup>1</sup> Cette question sera reprise au chap. XLV, en tenant compte de l'obliquité des bielles.

Imaginons (fig. 599) que l'on désarticule en  $C'$  l'assemblage de la coulisse et de la barre d'excentrique  $E'C'$ . Effectuons un mouvement élémentaire de l'arbre  $O$ , en maintenant fixe dans l'espace le point  $C'$ . La bielle  $EC$ , étant infinie, transmet en  $C$  un déplacement

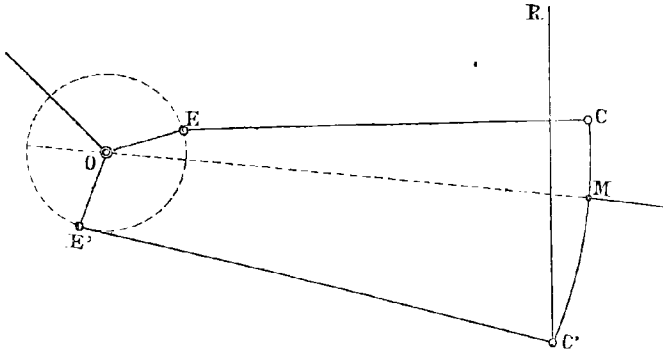


Fig. 599.

ment horizontal rigoureusement égal à la projection horizontale de l'arc de cercle que décrit l'excentricité  $E$ . Or, ce dernier constitue le mouvement sinusoïdal, dont l'élongation est représentée par la fonction :

$$(1) \quad a \sin (\varphi + \alpha),$$

dans laquelle  $a$  désigne l'élongation maximum en grandeur absolue, et  $\alpha$  l'angle de calage (Voir l'éq. 14, p. 84), ou encore :

$$(2) \quad b \sin \varphi + c \cos \varphi.$$

Son accroissement élémentaire sera par conséquent :

$$(5) \quad (b \cos \varphi - c \sin \varphi) d\varphi.$$

Puisque le point  $C'$  de la coulisse est maintenu fixe, tous les autres possèdent des vitesses proportionnelles à leur distance à ce centre de rotation. Le coulisseau, dans sa position quelconque  $M$ , éprouvera donc un déplacement horizontal, qui sera le produit du



précèdent par un certain rapport de rayons. Il présentera, par suite, la même forme analytique (3), avec d'autres coefficients  $b_1, c_1$ .

Actuellement, fixons dans l'espace le point C, et faisons tourner autour de lui la coulisse, jusqu'à faire rejoindre par C' l'extrémité de la barre qui s'est dérobée, en raison de la rotation de son extrémité E' autour de O. Cette opération reste possible sans déranger C, puisque le résultat est en réalité compatible avec la permanence des liaisons que nous avons momentanément disjointes, et que nous voulons maintenant rétablir (1).

Pour regagner l'extrémité de la barre E'C', le point C' de la coulisse doit exécuter un mouvement horizontal égal à celui qui a éloigné de lui le bout de la barre, ou, ce qui revient au même, son autre extrémité E'. Or ce dernier est également un mouvement sinusoïdal, de même amplitude totale et de calage différent. Il a donc encore une expression de la forme (3), avec des coefficients distincts  $b_2, c_2$ .

Dans ce mouvement de rotation de la coulisse autour du point C maintenu fixe, les déplacements sont entre eux comme les distances des points considérés à ce centre. Celui de M se déduira par suite du précédent en le multipliant par un certain rapport de rayons, qui transforme ses coefficients en  $b_3, c_3$ .

Actuellement il devient possible de rétablir l'articulation C'. Le coulisseau M a été amené, par la succession de ces deux opérations, à la situation réelle où le conduit en réalité le mécanisme, quand rien ne vient altérer son fonctionnement. Le déplacement résultant étant égal à la somme algébrique des deux précédents, reproduit encore l'expression (3) avec les coefficients  $b_1 + b_3, c_1 + c_3$ , et par conséquent son intégrale reste conforme au type (2).

Mais toute expression linéaire de ce genre en  $\sin \varphi$  et  $\cos \varphi$  peut inversement se remettre sous la première forme (1) :

$$a' \sin (\varphi + \alpha'),$$

avec des constantes  $a', \alpha'$  qui résulteront ici de tous les éléments

(1) Nous ne considérons ici que les déplacements horizontaux, les seuls qui interviennent dans la question. La bielle de suspension est supposée infinie comme les autres.

du calcul précédent. On voit par là que la coulisse de Stephenson, tout comme le système de la détente fixe, communique au tiroir un mouvement sinusoïdal, qui résulterait directement d'un excentrique fictif unique, variable de calage et d'amplitude d'après la position que le coulisseau occupe dans la coulisse.

Ainsi donc rien n'est changé dans les lois de la distribution par tiroir unique, si ce n'est que ses éléments, au lieu d'être immuables, ont acquis une élasticité qui les met à la disposition du machiniste pour faire varier le degré de détente.

**702** — Ce remarquable appareil présente un inconvénient sérieux. Il modifie les avances à l'admission; et même il ne les altère pas également toutes les deux, de sorte que cet élément si délicat vient affecter d'une manière différente les deux courses alternatives du piston.

Pour nous en convaincre, envisageons le système au moment du passage de la manivelle par le point mort. Le tiroir démasque alors exactement l'avance à l'admission. Effectuons instantanément un certain relevage de la coulisse. Ce mouvement n'étant pas une rotation pure et simple de la coulisse autour du coulisseau, dérangera celui-ci de sa situation actuelle. Le tiroir le suit et cesse dès lors d'affleurer exactement au même point que tout à l'heure. L'avance est donc modifiée<sup>(1)</sup>.

Je dis en second lieu que l'altération qu'elle subit n'est pas la même pour les deux extrémités. Cherchons en effet le centre instantané d'un mouvement infiniment petit *de relevage*<sup>(2)</sup>. Le déplacement que subit alors la coulisse est défini par ceux de ses extrémités. Or ces points sont articulés aux bielles d'excentrique, dont l'autre bout reste fixe avec l'arbre qui est, en ce moment, supposé immobile. Les extrémités de la coulisse décrivent donc des cercles.

(1) Nous verrons dans le chap. XLV qu'avec le système des barres ouvertes, les avances croissent lorsqu'on rapproche le coulisseau du point mort de la coulisse. Elles décroissent au contraire dans ce cas, avec le type des barres croisées.

(2) Il faut bien se garder de confondre ce centre instantané de la coulisse entraînée par le mécanisme de relevage, pendant le repos de l'arbre, avec le centre instantané du mouvement que prendra la coulisse en raison de la rotation de l'arbre, pendant la fixité du levier de relevage. Ce dernier résulte d'une construction plus compliquée et fort élégante, que nous rencontrerons plus tard (n° 780).

dont les normales ne sont autres que leurs rayons, c'est-à-dire les barres elles-mêmes. Concluons d'après cela que le centre instantané du mouvement de relevage de la coulisse se trouve à l'intersection de ses barres d'excentrique.

Mais nous avons vu que celles-ci se croisent et se décroisent à chaque tour. Par suite, pour l'un des deux points morts de la manivelle, les barres entre-croisées se coupent très près de l'arbre. Pour l'autre, elles sont assez rapprochées du parallélisme et se rencontrent fort loin. La construction qui sera basée sur l'emploi d'un centre instantané aussi variable d'un cas à l'autre, pour déduire du mouvement de l'articulation qui réunit la coulisse avec la bielle de relevage, celui du point d'insertion du coulisseau, donnera donc des résultats très différents aux deux extrémités. Par conséquent les avances, si on les supposait d'abord égales, auront cessé de l'être (1).

## § 5

### COULISSE DE GOOCH

**703** — *La coulisse de Gooch* (2), ou *coulisse renversée*, a été imaginée précisément dans le but de remédier à l'inconvénient d'altérer les avances, que présente celle de Stephenson. A l'inverse de cette dernière, la nouvelle coulisse présente sa convexité à l'arbre tournant (fig. 400). On la soutient ordinairement en son milieu à l'aide d'une *barre de suspension* S, qui n'est plus une bielle de *relevage*. Ce n'est pas en effet la coulisse que l'on relève, comme dans le cas précédent, mais une tringle B égale à son

(1) Pour ce motif, on donne parfois aux deux excentriques des angles de calage inégaux dans les locomotives, en sacrifiant, jusqu'à un certain point, la marche en arrière qui sert peu, de manière à établir dans de meilleures conditions la marche en avant, et à obvier le mieux possible à la variation des avances.

(2) Zeuner. *Traité des distributions par tiroirs*. Traduction par Debize et Mérijot, 1869, p. 108. — Pichault. *Appareils de distribution par tiroirs*, p. 165. — Coste et Maniquet. *Tracé pratique des épures de distribution*, p. 270. — Zsch. *Zeitschrift der österreichischen Ingenieurvereins*, 1866. — Gustave Schmidt. *Ingenieurvereins*, 1866. — Jenny. *Berg und Hüttenmännisches Jahrbuch der K. K. Schemnitzer Bergakademie*, t. VIII, 1839. — Edward Cowling Welch. *Designing valve gearing*, in-12, p. 142.

rayon de courbure, et articulée à l'extrémité de la tige **T** du tiroir.

Envisageons le système au moment du passage de la manivelle au point mort. Tout est symétrique par rapport à sa direction; la coulisse a sa corde verticale; son centre de courbure se trouve sur la droite du mouvement. Si donc on exécute alors instan-

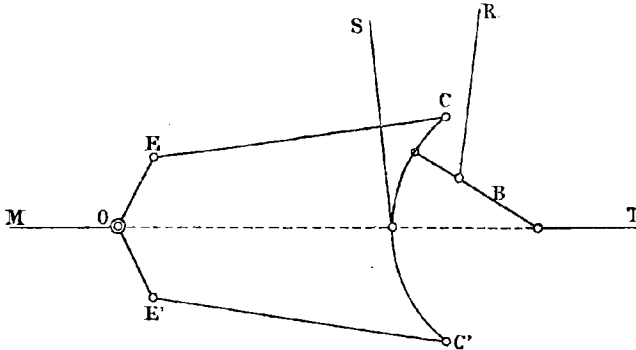


Fig. 400. — Coulisse de Gooch (figure schématique).

tanément des relevages quelconques de la tringle **B**, le coulisseau décrira cet arc de cercle d'un mouvement continu, sans que l'autre extrémité du rayon ait pour cela besoin de se déplacer. La position du tiroir à cet instant, et par suite l'avance à l'admission, restent donc constantes.

**704** — On doit souligner à l'avantage de la nouvelle disposition cette circonstance, que l'on n'a plus à relever qu'une simple tringle, et non le lourd système qui constitue la coulisse de Stephenson.

On reproche en revanche au dispositif de Gooch un développement excessif en longueur, qui deviendra gênant sur les locomotives ou dans la marine, en raison de l'addition de la tringle mobile entre la coulisse et le bouton du tiroir.

Nous devons faire remarquer en outre <sup>(1)</sup> que la propriété caractéristique de ne pas altérer les avances se paye nécessairement par l'impossibilité de réaliser le cran d'arrêt absolu. La marche au point

(1) Cette observation s'étend à tous les systèmes, assez nombreux, dans lesquels nous reconnaitrons que l'on a réussi à conserver les avances.

mort de la coulisse découvrira toujours en effet l'admission anticipée, puisque celle-ci est devenue un élément immuable, et constitue pour l'admission de vapeur un minimum qui ne saurait être nul.

**705** — On reconnaîtrait, en appliquant ici le raisonnement du n° 701, que la coulisse de Gooch communique au tiroir un mouvement sinusoïdal variable avec la position du coulisseau.

Concevons toute la série de ces excentriques fictifs, et, pour chacun d'eux, construisons par la pensée le diagramme de Zeuner (n° 659). Tous ces cercles

couperont la direction du mouvement au même point  $A_0$  (fig. 401), puisque l'avance à l'admission reste constante, et que le tiroir se retrouve toujours dans une position invariable pour le fond de course du piston.

Il s'ensuit que le lieu géométrique  $C_0, C_1, C_2, C_3, \dots$ , du centre de ces cercles n'est autre que la per-

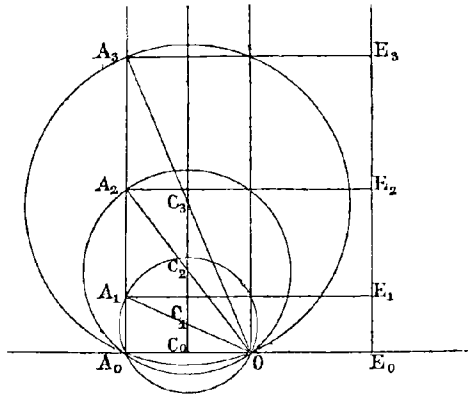


Fig. 401.

pendiculaire élevée au milieu  $C_0$  de cette longueur  $OA_0$ . Le lieu  $A_0A_1A_2A_3, \dots$ , des extrémités des diamètres sera donc la parallèle menée à cette droite par le point  $A_0$ . Nous avons reconnu (n° 641) que le centre d'excentrique, à l'instant du point mort, se trouve au point symétrique  $E$  de l'extrémité  $A$  du diamètre par rapport à la perpendiculaire élevée en  $O$ . On reconnaît par là que le lieu de ces centres d'excentrique fictifs sera la droite  $E_0E_1E_2E_3, \dots$ , symétrique de  $A_0A_1A_2A_3, \dots$  par rapport au point  $O$ .

Il est remarquable que ce résultat soit le même que si la coulisse, au lieu d'affecter la forme circulaire, était rectiligne; car dans ce cas, d'après le théorème de Guinotte que nous allons établir à l'instant même, le lieu des centres d'excentrique fictifs n'est autre que la droite qui joint deux d'entre eux.

## § 4

**COULISSES RECTILIGNES — THÉORÈME DE GUINOTTE**

**706** — M. Guinotte a établi un théorème remarquable qui est devenu fondamental pour la théorie des coulisses droites (\*). Il consiste dans l'énoncé suivant :

*Quand une coulisse RECTILIGNE est conduite par deux bielles infinies, sous la commande de deux excentriques quelconques, égaux ou inégaux, montés sur un arbre tournant, le mouvement transmis par le coulisseau dans une position quelconque est le même que celui que communiquerait à une bielle infinie un excentrique fictif unique, dont le centre divise la droite de jonction des deux centres d'excentrique dans le rapport des segments marqués sur la coulisse par le coulisseau.*

**1<sup>er</sup> Cas.** — Nous supposons d'abord deux rayons égaux d'excentrique OE, OE' (fig. 402). Détachons par la pensée l'articulation E', en maintenant fixe cette extrémité de la coulisse, pendant que la bielle E'C' se dérobe en raison de la rotation de l'arbre. Le centre E a pour élongation :

$$a \sin (\varphi + \alpha),$$

et transmet intégralement son déplacement horizontal à l'autre bout de la bielle infinie EC. Comme la coulisse tourne en ce moment autour du point C', les déplacements de l'extrémité C et du coulisseau M sont entre eux dans le rapport des rayons  $2l$  et  $l + x$ . Ce dernier éprouve donc un déplacement égal à la différentielle de :

(\*) Guinotte. *Étude générale sur la détente variable*. Mons, in-8°, 1871, p. 25. — Herdner. Étude sur les distributions par tiroirs, etc. *Annales des Mines*, juillet-août 1877. — Isidore Claeys. Essai d'une théorie générale des coulisses. *Annales de l'Association des Ingénieurs sortis des Écoles spéciales de Gand*, 1890.

On trouve une construction géométrique qui se rapproche de celle de Guinotte, sans s'y confondre, dans la *Geometry of the slide-valve* de Mac Farlane Gray (Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*, traduction par G. Richard, p. 525).

$$\frac{l+x}{2l} a \sin (\varphi + \alpha).$$

Actuellement je fixe dans l'espace le point C, et je fais rejoindre par C<sub>1</sub> l'extrémité de la bielle E<sub>1</sub>C<sub>1</sub> qui s'est éloignée de lui ; opération qui reste possible, puisque la combinaison finale des déplacements horizontaux reste perpétuellement compatible avec l'ensemble

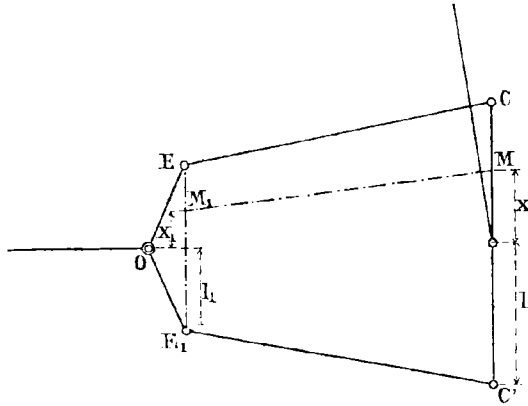


Fig. 402.

des liaisons. Il nous faut pour cela faire regagner par C<sub>1</sub> un déplacement égal à celui du point E<sub>1</sub>. Or l'élongation de ce dernier s'obtient en augmentant, dans la précédente, l'argument  $\varphi + \alpha$  du sinus, de l'intervalle  $\pi - 2\alpha$  qui sépare les deux rayons d'excentrique, ce qui en fait  $\pi + \varphi - \alpha$ , et donne :

$$- a \sin (\varphi - \alpha).$$

Le coulisseau participant à cette rotation de la droite CC<sub>1</sub> autour de C, subit dès lors un déplacement égal à la différentielle de :

$$- \frac{l-x}{2l} a \sin (\varphi - \alpha).$$

Finalement donc, ce point reçoit un mouvement égal à la somme algébrique des deux précédents, à savoir la différentielle de l'expression :

$$\begin{aligned}
& \frac{a}{2l} [(l+x) \sin(\varphi + \alpha) - (l-x) \sin(\varphi - \alpha)] \\
= & \frac{a}{2l} \left\{ l [\sin(\varphi + \alpha) - \sin(\varphi - \alpha)] + x [\sin(\varphi + \alpha) + \sin(\varphi - \alpha)] \right\} \\
= & a \left[ \sin \alpha \cos \varphi + \frac{x}{l} \cos \alpha \sin \varphi \right].
\end{aligned}$$

Actuellement nous articulerons par la pensée en  $EE_1$ , sur l'arbre tournant, une barre de longueur  $2l_1$ . Reprenons, en ce qui la concerne, un raisonnement semblable au précédent pour déterminer le mouvement que prendra un point  $M_1$  de cette barre. Nous obtiendrons évidemment une expression toute pareille, dans laquelle seulement  $\frac{x}{l}$  sera remplacé par  $\frac{x_1}{l_1}$ . Si donc on choisit en particulier le point qui divise  $EE_1$  en segments proportionnels à ceux de la coulisse, les deux expressions deviennent identiques; ce qui démontre le théorème.

2<sup>e</sup> CAS. — Il reste à étendre cette conclusion au cas où l'on ne s'astreint plus à l'égalité des excentriques fondamentaux. Or une telle généralisation est immédiate.

En effet nous venons de voir que, si l'on gradue d'une manière homologue les deux droites  $CC_1$ ,  $EE_1$  dans toute leur étendue en parties proportionnelles, tous les points correspondants sont susceptibles, sans entraver le jeu du système, d'être joints deux à deux par des bielles articulées en leurs extrémités. Dès lors on peut indifféremment, sur cet ensemble, attribuer par la pensée le rôle de conducteurs, soit à deux barres égales, soit à deux bielles inégales quelconques (comme  $M_1M$ ,  $E_1C_1$ ), toutes les autres (telles que  $EC$ ) ne cessant d'accompagner le mouvement; ce qui achève d'établir la proposition.

## § 5

### MARCHE AU POINT MORT

**707** — Nous avons reconnu (n<sup>o</sup> 698) que la coulisse procure un



cran d'arrêt absolu avec le tiroir normal, quand on amène le coulisseau en son point mort; mais que le tiroir éprouve encore certains balancements de part et d'autre de sa position centrale, quand il possède un recouvrement et une avance angulaire. Ce régime constitue la *marche au point mort de la coulisse*, que le théorème de Guinotte va nous permettre d'analyser de plus près.

Négligeons, par une approximation qui est en rapport avec l'influence de l'obliquité des bielles, la différence entre l'appareil de Stephenson et une coulisse droite  $CC'$  (fig. 405), afin de pouvoir lui appliquer le théorème en question.

Le coulisseau placé au point mort A, (ou  $A'$ ), se meut d'après

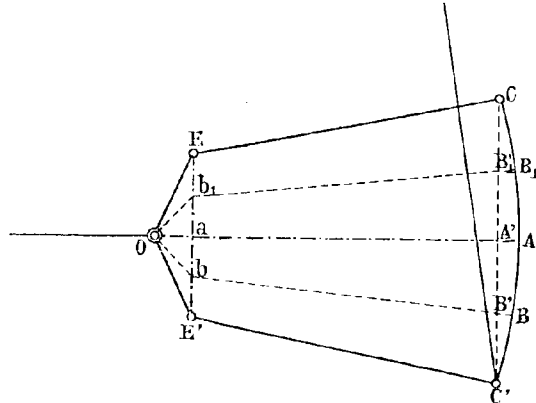


Fig. 405.

cet énoncé, comme s'il était conduit par l'excentrique  $Oa$ . Cette droite, projection de l'excentricité au point mort de la manivelle motrice, est égale à  $(l+r) \sin \alpha$ , c'est-à-dire  $r$  (éq. 41, p. 85), ou encore  $\delta + \rho$  (éq. 20, p. 94): Le tiroir a donc pour excursion totale  $2(\delta + \rho)$ . Il est clair que  $Oa$  est la droite minimum qu'il soit possible de mener du centre  $O$  à la corde des excentricités  $EE'$ . On constate aussi qu'elle s'annule en l'absence d'avance angulaire.

**708** — *Le tiroir, dans la marche au point mort, se meut incessamment à contre-sens du piston.* En effet l'excentrique fictif  $Oa$  qui le gouverne est directement opposé à la manivelle motrice. Ce

genre de commande, que nous retrouverons dans d'autres occasions, présente quelques propriétés spéciales qu'il est intéressant de développer.

**709** — *L'admission anticipée dure autant que l'admission proprement dite.*

En effet, quand le piston part du fond de course pour cheminer vers la droite, le tiroir se trouve à son maximum d'élongation de droite, et commence à revenir en arrière. L'admission proprement dite durera donc pendant le temps que le tiroir va mettre à revenir jusqu'à l'affleurement de la lumière. Mais, en raison de la symétrie que présente le mouvement sinusoïdal entre la fin de sa course directe et le commencement de sa course rétrograde, cette phase est identique à celle du découverture croissant qui a conduit le tiroir depuis l'affleurement en question jusqu'au maximum d'élongation ; phase qui constituait l'admission anticipée, attendu que les deux organes atteignent ensemble les extrémités opposées de leurs excursions respectives.

**710** — *L'échappement commence au milieu de la course du piston.*

En effet ce phénomène se produit au moment où le tiroir traverse sa position normale, c'est-à-dire le milieu de sa course. Mais alors le piston se trouve également au milieu de la sienne.

**711** — *La vitesse du tiroir est toujours proportionnelle à celle du piston.*

En effet les vitesses des deux articulations, appartenant à un même corps tournant, restent dans le rapport invariable des bras de levier. En outre, ces points étant diamétralement opposés, leurs vitesses ont à chaque instant la même inclinaison, et par suite des projections proportionnelles.

Il en est ainsi, en particulier, pour celle de la fermeture des lumières, à laquelle nous avons reconnu (n° 656) une importance spéciale au point de vue du laminage. Cette manœuvre sera donc d'autant plus rapide que le point où l'on coupe la vapeur se rapprochera davantage du milieu de la course.

**712** — Il est aisé de construire le diagramme théorique du travail dans la marche au point mort.

La pleine pression s'exerce suivant AB (fig. 404), et fournit le travail  $ABab$ . La détente s'effectue d'après le contour BC jusqu'au milieu de la course, moment où s'opère l'échappement (n° 710). Elle développe le travail  $BCbc$ . Il s'opère à ce moment une chute de

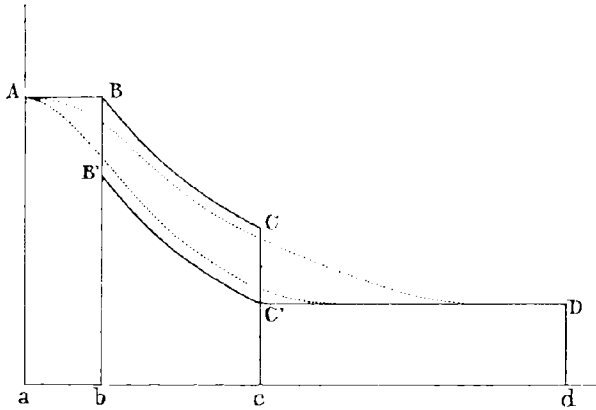


Fig. 404.

pression figurée par  $CC'$ . De là jusqu'en D, sur une longueur  $cd = ac$ , la tension reste égale à la pression atmosphérique<sup>(1)</sup>. Le piston ne recueille sur sa face motrice que le travail  $C'Dcd$ . Au total donc, on a obtenu dans la course directe l'aire  $ABCC'Dda$ .

Pendant le retour, la pression atmosphérique s'exerce en antagonisme sur le parcours  $dc$ , en opposant le travail  $C'Dcd$ . A ce moment a lieu le commencement de la compression, qui est corrélatif du début de l'échappement anticipé sur la face opposée. La pression se reconstitue suivant le contour  $C'B'$ , en exerçant le travail résistant  $C'B'cb$ . L'admission anticipée, qui est égale en longueur à l'admission proprement dite (n° 709), commence en  $b$ , et la tension se relève en  $B'B$ . Cette contre-pression subsiste ensuite jusqu'au point mort du piston, en développant le travail négatif  $ABab$ . Le total

<sup>1</sup> Cette question ne concerne guère que les locomotives, qui sont toujours sans condenseur.

est donc  $ABB'C'Dda$ ; et si on le soustrait du précédent, il reste, comme résultat effectif, le noyau  $BCB'C'$ .

Dans la réalité, les chutes et les restitutions de pression ne seront pas instantanées. L'effet du laminage substitue à ce périmètre théorique un profil tel que celui qui est ponctué sur la figure 404. Le noyau utile, déprimé dans le sens de la verticale, s'étend suivant l'horizontale en dehors des limites précédentes.

**713** — On voit par là que le travail moteur, après avoir diminué progressivement à partir du fond de la coulisse C (fig. 405), conserve encore une certaine valeur pour la marche au point mort en A. En raison de la continuité, il ne saurait tomber subitement à zéro. Le domaine du travail moteur s'étend donc un peu au delà, jusqu'à un point tel que B<sup>(4)</sup>.

Certains mécaniciens de locomotive prétendent en effet recueillir pratiquement un certain degré de puissance propulsive, en mettant la distribution aux premiers crans de la marche en arrière. Ils ne manquent pas, quand ils veulent battre contre-vapeur, en produisant un travail certainement négatif, de se mettre nettement à des crans assez éloignés du point mort de la coulisse.

Ajoutons que sur le segment réduit  $BC'$ , qui est réservé au travail négatif, ce dernier ne reprend, jusqu'à l'extrémité de la coulisse, qu'une valeur absolue moindre, dans le régime de la contre-vapeur, que le travail moteur sur le segment  $BC$ .

Telle est la manière dont les choses se passent avec une machine qui est déjà lancée dans la marche en avant, et pour laquelle on vient à renverser la vapeur. Si, au contraire, le moteur se trouve préalablement en mouvement à la marche en arrière, et qu'on manœuvre progressivement le relevage, on recueillera du travail positif sur la longueur  $C'B$ , et l'on ne battra nettement contre-vapeur que pour le segment  $B_1C$ . Il existe donc sur la coulisse un *segment central*  $BB_1$ , qui donne toujours du travail moteur aux deux allures de la machine. La marche au point mort correspond à son milieu.

(<sup>4</sup>) Le diagramme s'altère alors encore plus profondément. Il prend la forme d'une courbe en 8. Une des deux boucles correspond au travail négatif, dû à la prépondérance de la compression. Lorsque les aires de ces deux boucles sont égales, on passe de la région motrice à la région résistante.

## § 6

**COULISSES DEPREZ, ALLAN, DUTHEIL, CHALLIGNY**

**714** — *Coulisse Marcel Deprez.* — M. Deprez a proposé un système de distribution fondé sur l'emploi d'une coulisse rectiligne  $CC'$  (fig. 405), conduite par les excentriques  $E, E'$ . Il la destine à réaliser rigoureusement la constance des avances, comme le fait la coulisse de Gooch, mais avec un moindre développement en lon-

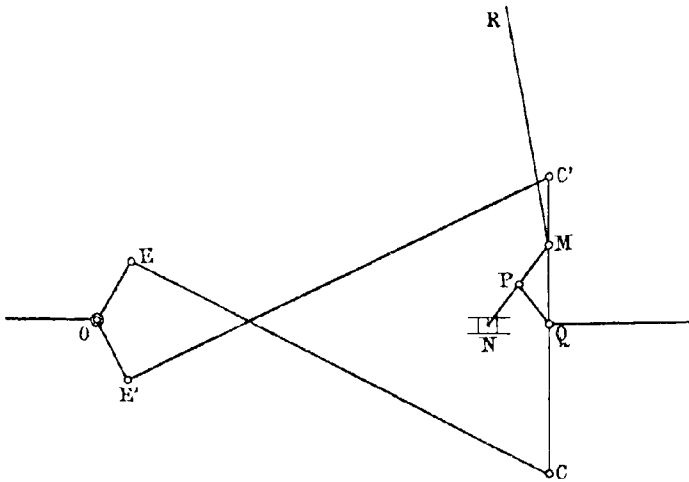


Fig. 405. — Coulisse droite Deprez (figure schématique).

gueur, en rejetant à cet effet, entre la coulisse et l'arbre, les diverses pièces du mécanisme.

Le système est fondé sur le principe du parallélogramme d'Evans <sup>(1)</sup>. Une barre  $MN$  se meut entre la coulisse mobile et la ligne  $OQ$  des points morts. Une bride  $PQ$ , égale à la moitié de  $MN$ , relie le milieu  $P$  de cette barre au bouton  $Q$  du tiroir. Le coulisseau  $M$  est directement articulé à la bielle de relevage  $R$ .

On sait que, si  $Q$  était un point fixe, le système articulé  $MNPQ$  pourrait se mouvoir, dans toutes ses déformations, en restant inscrit

<sup>(1)</sup> Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 186.

entre les droites rectangulaires MQ, NQ (<sup>1</sup>). Il s'ensuit qu'au moment du passage de la manivelle par son point mort, la coulisse, se redressant alors perpendiculairement en raison de la symétrie, sert de projetante au coulisseau M. Celui-ci, dans toutes les transformations, se projette donc au même point Q. En d'autres termes, l'avance à l'admission restera la même pour toutes les valeurs du segment MQ.

**715** — *Coulisse Allan.* — L'emploi de la coulisse rectiligne se rencontre encore, mais d'une manière plus confuse au point de

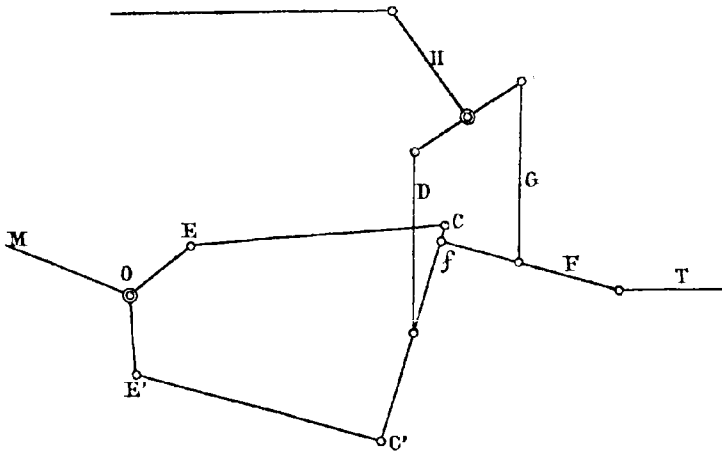


Fig. 406. — Coulisse droite Allan (figure schématique).

vue de la constance des avances, dans la distribution d'Alexandre Allan (<sup>2</sup>).

Les barres d'excentrique EC, E'C' (fig. 406) actionnent la cou-

(<sup>1</sup>) En vertu de cette propriété du triangle rectangle, que sa médiane est égale à la moitié de l'hypoténuse, puisqu'elle constitue le rayon, et celle-ci le diamètre du cercle circonscrit.

(<sup>2</sup>) Zeuner. *Traité des distributions par tiroirs*. Traduction Debize et Mérijot, p. 125. — Pichault. *Appareils de distribution par tiroirs*, p. 172. — Spineux. *Traité des distributions*, p. 96. — Coste et Maniquet. *Tracé pratique des épures de distribution*, p. 277. — Couche. *Voie, matériel roulant*, etc., t. III, p. 320 et 345. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1<sup>re</sup> série, t. XI, p. 233. — Reuleaux. Die Allan'sche Coulissensteuerung. *Civil Ingenieur*, t. III, p. 92. — Gustave Schmidt. *Ingenieurvereins*, 1866. — Edward Cowling Welch. *Designing valve gearing*, in-12, p. 157.

lisse  $CC'$ , qui est suspendue en son milieu à la bielle de relevage D. Le coulisseau  $f$  appartient à la tringle F, qui attaque la barre T du tiroir. Elle est de même sollicitée par la bielle G. Celle-ci est mue par le mécanicien, ainsi que la précédente D, à l'aide du levier coudé H.

Cet ensemble est plus compliqué que le précédent, et ne procure pas comme lui la constance *théorique* de l'avance à l'admis-

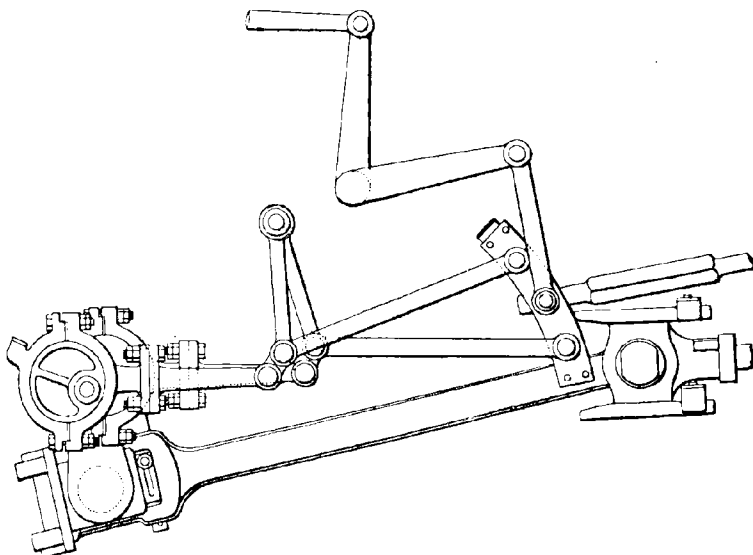


Fig. 407. — Coulisse Dutheil (élévation).

sion. L'emploi d'une rainure rectiligne  $y$  constitue, par rapport au système de Stephenson, une simplification plus apparente que réelle. Toutefois sa complexité même, bien que fâcheuse au point de vue dynamique, procure, sous le rapport cinématique, certaines facilités, en raison du grand nombre des indéterminées, pour obtenir par tâtonnement certains résultats désirés, par exemple une constance des avances pratiquement suffisante.

**716** — *Coulisse Dutheil*. — Dans la distribution Dutheil <sup>(4)</sup>, les

<sup>(4)</sup> *Notes sur les objets exposés par la Compagnie du chemin de fer de Paris à Orléans*, 1889, in-4° (Note sur la distribution par coulisse de Stephenson avec avances égales).

extrémités des bielles d'excentrique EB, E'B' (fig. 407, 408) sont guidées en ligne droite, de manière à se projeter l'une sur l'autre en un point B, qui sert d'articulation aux tiges BC, B'C'. Celles-ci forment les rayons de courbure d'une coulisse circulaire, suspendue en son milieu M à la bielle de relevage MR.

Dans ces conditions, les barres EB, E'B' alternent, pendant la rotation, de la position supérieure à la position inférieure; mais chacune des tiges BC, B'C' reste d'un même côté de la ligne des

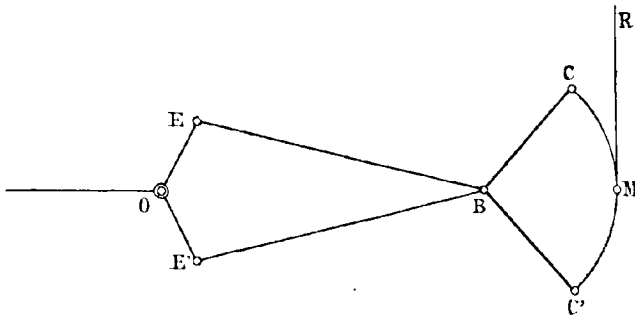


Fig. 408.

points morts. Les figures EBC; E'B'C' varient donc beaucoup plus pendant le mouvement de l'arbre avec relevage au repos, que dans le relevage avec l'arbre immobile. Mais si l'on s'attache par la pensée au passage par le point mort, OEE'B reprend chaque fois sa forme symétrique, et le point B revient toujours au même lieu. A quelque degré donc que l'on ait relevé ou abaissé la coulisse, le coulisseau qui se trouve placé sur l'alignement OB, à une distance nécessairement égale au rayon de courbure, se trouve ainsi ramené au même point, ce qui réalise la constance des avances.

**717** — M. Deprez a introduit dans cette combinaison une modification intéressante (fig. 409), en vue d'y employer une coulisse rectiligne, en se contentant, pour la constance des avances, d'une approximation qui est extraordinairement approchée, lorsqu'on la soumet au calcul.

A cet effet les deux barres d'excentrique sont coudées à angle droit d'une manière invariable, sous la forme EAB, E'A'B'. Elles



s'articulent aux tiges  $BC, B'C'$  qui commandent la coulisse droite  $CC'$ . Celle-ci est précisément double en longueur de la valeur que prend la corde  $BB'$ , au moment du passage au point mort.

On voit d'après cela que, si la coulisse est amenée de sa situation moyenne  $CC'$  à son fond de course supérieur, dans la position  $C_1C_1'$ , l'égalité de  $C_1C'$  avec  $BB'$  entraîne celle de  $BC_1$  avec  $B'C'$  ou  $BC$ . Le

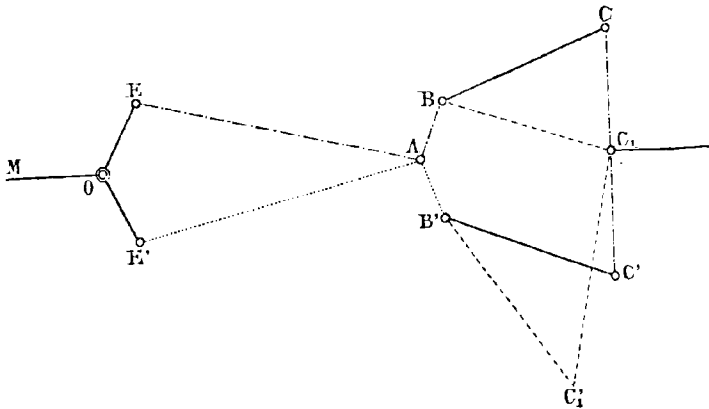


Fig. 409.

coulisseau du tiroir se retrouve donc au même point  $C_1$  pour trois positions différentes, à savoir les deux fonds de course et la situation moyenne. On comprend dès lors que ses dérangements dans l'intervalle soient très réduits par cette circonstance.

**718** — *Coulisse Challigny*. — Le dispositif de M. Challigny (\*) est encore destiné à conserver les avances.

Le centre d'excentrique (fig. 410) venant en  $E, E'$ , aux deux points morts de la manivelle motrice, on installe en un point  $c$  de la perpendiculaire  $Oc$  sur la ligne  $EE'$ , le moyeu d'oscillation d'une coulisse circulaire  $cC$ , ou  $cC'$ , qui a pour rayon de courbure la barre d'excentrique  $EC$ , ou  $E'C'$ . La seconde position  $C'$  du coulisseau  $C$  s'obtient en décrivant autour de  $c$  l'arc de cercle  $CC'$  par le point  $C$ .

(\*) Sauvage. Revue de l'état actuel de la construction des machines. *Annales des Mines*, 8<sup>e</sup> série, t. XVII, p. 471.

Le tiroir est conduit par une bielle, qui est articulée en un point T invariablement lié à la coulisse ; nous le retrouvons en T' pour le point mort opposé.

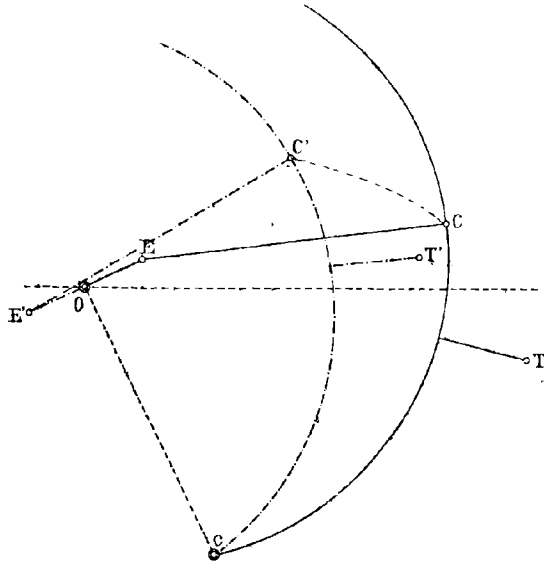


Fig. 410.

Il demeure évident que l'avance ne sera pas modifiée par le relevage, car le coulisseau C peut décrire  $cC$ , et de même  $C'$  parcourir  $c'C'$ , sans déranger la position de ces coulisses ni, par conséquent, celles de T, T', c'est-à-dire du tiroir; ces deux cercles ayant précisément pour rayon la barre d'excentrique.

## CHAPITRE XLI

### DISTRIBUTIONS A DEUX TIROIRS

—

#### § 1

##### DISTRIBUTION FARCOT

**719** — *Généralités.* — Nous avons, dans la théorie de la distribution fondée sur l'emploi d'un tiroir unique (n° 634), insisté sur l'étroite connexité des diverses périodes, qui ne permet pas de pousser un peu loin la détente, sans exercer par là sur les autres fonctions un retentissement susceptible de fâcheuses conséquences, et notamment sans exagérer les phases de compression et d'échappement anticipé.

Les constructeurs ont cherché à éluder cette difficulté, sans renoncer au principe du tiroir à excentrique, mais en apportant à son usage une modification essentielle. On associe alors à un *tiroir proprement dit*, qui est percé de lumières de part en part, un organe appelé *tuile*, *tasseau*, ou *taquet de détente*, qui se meut sur le dos du premier (1). On peut ainsi superposer à un tiroir d'un faible recouvrement extérieur (ce qui restreint à un degré acceptable la compression et l'avance à l'échappement), un taquet mû d'une manière indépendante, qui viendra fermer, dès qu'on le voudra, la lumière pratiquée à travers le tiroir. De cette manière, bien que ce dernier n'ait pas encore eu le temps de recouvrir l'orifice de la glace,

(1) On rencontre même dans la distribution Laurent trois tiroirs superposés (Coste et Maniquet. *Tracés pratiques des épures de distribution*, p. 108. — Isidore Claeys. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 2<sup>e</sup> série, t. XXII, p. 512).

de manière à provoquer la détente dans les conditions précédentes, ce phénomène se produira cependant, puisque le passage du fluide se trouve intercepté, non plus comme à l'ordinaire au ras de la glace, mais sur la surface supérieure du tiroir. On concilie ainsi la longue détente, c'est-à-dire la courte admission, avec une compression modérée.

En continuant à commander comme ci-dessus le tiroir proprement dit à l'aide d'un excentrique à collier, on a réalisé de bien des manières différentes la conduite du taquet de détente <sup>(1)</sup>.

<sup>(1)</sup> En dehors des distributions à double tiroir qui sont citées plus loin, nous pouvons encore mentionner les systèmes suivants :

ALLOT. *Bulletin technologique de la Société des anciens Elèves des Ecoles d'arts et métiers*, février 1885, p. 35. — ALLCOCK. Umland. *Les machines à vapeur nouvelles*, p. 156. — BANNEUX. *Annales des travaux publics de Belgique*, t. XXXVIII. — BARLOW. Spineux. *De la distribution de la vapeur dans les machines*, p. 59. — BAUDET et BOLE. Coste et Maniquet. *Tracés des épures de distribution*, p. 201. — BONNEFOND. *Portefeuille économique des machines*, 1884, p. 81. — BORSIG. Lehmann, *Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens*, 1858, t. XIII, p. 241. — BOURDON. Spineux. *De la distribution de la vapeur dans les machines*, p. 66. — BRANDT. Umland. *Les machines à vapeur nouvelles*, p. 143. — BRENIER. Coste et Maniquet. *Traité théorique et pratique des machines à vapeur*, planche VII. — BREVAL et FEBVRE (*Ibidem*), p. 148. — Spineux. *De la distribution de la vapeur dans les machines*, p. 48. — Pichault. *Appareils de distribution par tiroirs*, p. 237. — COUCHE. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 374). — CHARLES. *Bulletin technologique de la Société des anciens Elèves des Ecoles d'arts et métiers*, 1876. — CLAEYS. *Annales industrielles*, 26 mai 1889, p. 647. — CORREY. Cornut. *Étude géométrique des principales distributions*, p. 86. — CROW. — DUVERGIER. Coste et Maniquet. *Traité théorique et pratique des machines à vapeur*, p. 141. — EHLERS. Umland. *Les machines à vapeur nouvelles*, p. 151. — FISH (*Ibidem*), p. 138. — *American machinist*, 5 mars 1881, p. 5). — FRIEDRICH. — GEORGE. Armengaud. *Traité des machines à vapeur nouvelles*, t. I, p. 414. — GOLDIE. Umland. *Les machines à vapeur nouvelles*, p. 152. — HACKWORTH. Pichault. *Appareils de distribution par tiroirs*, p. 258. — HAYWARD (Coste et Maniquet. *Traité théorique et pratique des machines à vapeur*, planche VIII. — Claeys. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 2<sup>e</sup> série, t. XXII, p. 311). — JOUFFRAY. Coste et Maniquet. *Tracé pratique des épures de distribution*, p. 206. — MAC CORD. *Scientific American supplement*, 15 décembre 1885, p. 6620. — NAPIER et RANKINE (ZEUNER. *Die Schiebersteuerungen*, 1874. — Rankine. *The Engineer*, octobre 1867. — Pichault. *Appareils de distribution par tiroirs*, p. 214). — OCHWAOT. Umland. *Les machines à vapeur nouvelles*, p. 127. — PICHault (Pichault. *Appareils de distribution par tiroirs*, p. 248). — RIKKER. *Engineering*, 2 décembre 1881, p. 544. — SAULNIER (Callon. *Cours de machines*, t. II, p. 251. — Spineux. *De la distribution de la vapeur dans les machines*, p. 54). — SAUVAGE. Pulin. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, mai 1887, p. 860. — SCHULZ. Umland. *Les machines à vapeur nouvelles*, p. 129. — SKODA. *Ibidem*, p. 150. — Spineux (Spineux. *De la distribution de la vapeur dans les machines*, p. 68). — STÉVART. Pichault. *Appareils de distribution par tiroirs*, p. 238. — TREZEL (Armengaud. *Traité des machines à vapeur*, t. I, p. 419. — Cornut. *Étude géométrique des principales distributions*, p. 112. — Spineux. *De la distribution de la vapeur dans les machines*, p. 35). — WOLKMAR. *Civil Ingenieur*, t. V, p. 179. —

Nous consacrerons le présent chapitre à l'examen des principales. Il convient de rendre justice à cet égard à la grande ingéniosité des inventeurs; et cependant on doit constater, dans la tendance actuelle, un retour à l'emploi du tiroir unique. Sur les chemins de fer notamment, on peut le considérer comme un fait accompli.

**720** — *Distribution Farcot*. — Dans le système de distribution de Farcot père <sup>(1)</sup>, le tiroir seul se trouve en communication directe avec la machine (fig. 411, 412). Les deux taquets de détente placés à ses extrémités, et indépendants l'un de l'autre, ne sont entraînés qu'en vertu de l'adhérence déterminée par des ressorts de faible tension, qui prennent leur point d'appui contre le ciel de la boîte à vapeur <sup>(2)</sup>. Tant que la tuile ne rencontre aucun obstacle, elle chemine d'après cela de conserve avec le tiroir; mais bientôt elle vient buter alternativement sur la paroi de la chambre à vapeur, ou contre une came centrale. Réduite dès lors à l'immobilité, elle change progressivement de situation par rapport au tiroir, qui se dérobe au-dessous d'elle. Quand celui-ci revient en sens inverse, il l'entraîne de nouveau; mais elle se trouve dorénavant à son égard dans une position différente de la précédente.

Imaginons que l'appareil parte de son extrême élongation de gauche, en concordance des pleins et des vides de la grille de distribution (n° 659). Les choses se passent pour le moment comme avec un tiroir unique, et l'admission s'opère dans les conditions ordinaires. Mais avant que le système atteigne sa plus grande excursion vers la droite, la tuile vient buter contre la came centrale. Elle s'arrête, le tiroir continue, et les pleins de sa grille se glissent sous

WAG. Cornut. *Étude géométrique des principales distributions*, p. 126. — WARNECK. Uhlund. *Les machines à vapeur nouvelles*, p. 159. — WILSON. *American machinist*, 50 octobre 1886.

<sup>(1)</sup> Zeuner. *Traité des distributions par tiroirs*. Traduction Debize et Mérijot, p. 244. — Armengaud. *Traité des machines à vapeur*, t. I, p. 404. — Bienaymé. *Les machines marines*, p. 226. — Pichault. *Appareils de distribution par tiroirs*, p. 240. — Spieueux. *De la distribution de la vapeur dans les machines*, p. 63. — Cornut. *Étude géométrique des principales distributions*, 1880, p. 54.

<sup>(2)</sup> M. Bouvïn a proposé de remplacer ces ressorts par l'emploi de rainures pratiquées en dessous, et mises en communication avec le condenseur, dont le degré de vide déterminerait un effort dans le même sens.

les vides du tasseau. Le passage de la vapeur se trouve donc coupé, et la détente commence plus tôt que si le tiroir devait à cet effet, après avoir été jusqu'au bout de sa course, revenir en arrière pour obturer l'orifice de la glace fixe. La période d'échappement succède ensuite comme à l'ordinaire, et le système reprend de nouveau sa

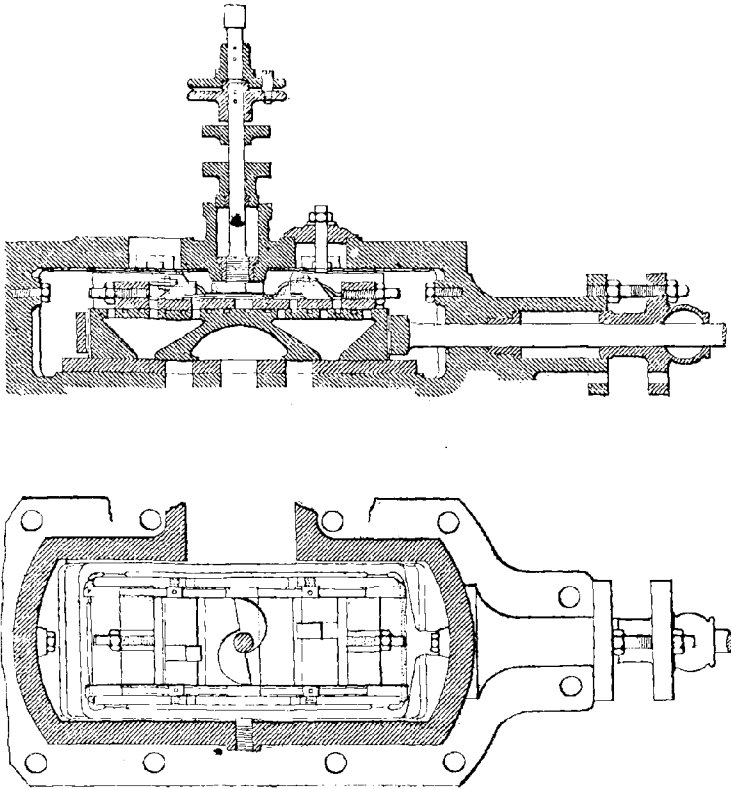


Fig. 411 et 412. — Distribution Farcot (coupe longitudinale et plan).

marche vers la droite. Mais auparavant le taquet de détente est venu heurter la paroi de gauche de la chambre à vapeur, ce qui lui rend, par rapport au tiroir, sa position initiale.

On règle avec précision la rencontre du taquet avec les parois, à l'aide de vis butantes qui servent à modifier la longueur de ces organes. Quant à la rencontre vers l'intérieur, on la fait varier à

volonté en modifiant, à l'aide d'une manivelle extérieure, l'orientation de la came-virgule. Les rayons vecteurs de son profil en développante de cercle allant en croissant, celui d'entre eux que l'on amène dans la direction du mouvement, recevra plus ou moins tôt le choc de la tuile, pour déterminer la détente.

Le système Farcot ne saurait trouver place dans les machines très rapides, à cause de la multiplicité et de l'intensité des chocs qu'entraînerait son fonctionnement.

Il présente l'inconvénient de ne se prêter qu'aux longues détentes, et non aux admissions moyennes ou prolongées. En effet la vapeur n'est coupée que par la butée de la tuile contre la came, circonstance qui précède nécessairement l'élongation maximum du tiroir, ou l'azimut  $90 - \alpha$  de la manivelle motrice (n° 626). C'est donc dans le premier quadrant de son excursion, c'est-à-dire dans la première moitié de la course du piston, que se produira la détente, et jamais au delà.

Il reste cependant possible de rendre, en cas de besoin, à un moteur trop affaibli par une longue détente, toute la puissance de la pleine pression. Il suffit pour cela de tourner la came, de manière qu'elle présente dans la direction du mouvement un rayon trop court pour pouvoir être rencontré par le tasseau. Dans ces conditions, celui-ci ne change plus jamais de place sur le dos du tiroir. Le fonctionnement de la vapeur n'a plus lieu que d'après les propriétés de ce dernier, et il suffit de le supposer sans recouvrement extérieur pour qu'il ne donne lieu à aucune détente.

**721** — *Distributions diverses.* — Thomas et Laurens ont modifié la distribution Farcot <sup>(1)</sup>, en substituant à la came-spirale un coin manœuvré par une vis. On réalise ainsi une surface de choc plus grande, et placée exactement dans l'axe du mouvement. En outre le coin est, d'après les lois du frottement <sup>(2)</sup>, un organe irréversible, tandis que la came ne partage pas cette propriété. Ce mécanisme ne risque donc pas, sous l'influence des résistances, de réagir sur le régulateur, au lieu de lui obéir passivement.

<sup>(1)</sup> Buchetti. *Machines à vapeur actuelles*, p. 21.

<sup>(2)</sup> Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 580.

Dans le système Hertay <sup>(1)</sup>, les butoirs fixes et le coin central sont montés sur un même cadre, qui est influencé par un excentrique spécial. Elle permet de faire varier l'admission depuis les plus petites valeurs jusqu'à la course totale.

On doit citer dans le même ordre d'idées la distribution Claeys <sup>(2)</sup>, avec laquelle une ingénieuse inversion permet de n'avoir que deux excentriques, mis alternativement en état de commander le tiroir principal ou les tasseaux.

La Société centrale de Pantin <sup>(3)</sup> a également obtenu des introductions très étendues, en interposant, entre le tiroir et la glace, une autre glissière mue par un second excentrique circulaire.

## § 2

### DISTRIBUTION MEYER

**722** — La distribution Meyer comprend un premier tiroir <sup>(4)</sup> qui peut être normal, ou présenter des recouvrements extérieurs, et même intérieurs. Sur les lumières qui le traversent de part et d'autre

<sup>(1)</sup> Edmond Hertay. *Nouveau système de machine à distribution de vapeur variable par l'action du régulateur sans ressort ni déclie*, Bruxelles, 1885. — Dwelshauvers Dery. *Rapport du jury de l'Exposition universelle d'Amsterdam*, 1883, p. 12. — Claeys. Étude sur les machines à vapeur au point de vue de la distribution. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1887. — *Engineering*, 1886.

<sup>(2)</sup> Isidore Claeys (*Nouveau système de machine à vapeur à détente variable automatique*, autographié, p. VI. — *Coulisse de changement de marche applicable à la distribution*).

<sup>(3)</sup> Buchetti. *Machines à vapeur actuelles*, p. 24.

<sup>(4)</sup> Zeuner. *Traité des distributions par tiroirs*. Traduction Debize et Mériot, p. 209. — *Civil Ingenieur*, t. III, 1857. — Bienaymé. *Machines marines*, p. 222. — Pichault. *Appareils de distribution par tiroirs*, p. 195. — Coste et Maniquet. *Tracés pratiques des épures de distribution*, p. 42. — Armengaud. *Traité des machines à vapeur*, t. I, p. 417. — Spineux. *De la distribution de la vapeur dans les machines*, p. 52. — Herdner. Étude sur les distributions par tiroirs. *Annales des mines*, juillet-août 1877. — Cornut. *Étude géométrique des principales distributions*, p. 58. — Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 572. — Duquénoy. *Bulletin technologique des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, septembre 1888, p. 89. — Le Châtelier. *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*, octobre 1848, avril, juin 1849. — *Congrès international de mécanique appliquée de 1889*, t. II, p. 199. — *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, n° 87. — Fuhst. Recherches sur la détente variable Meyer. *Journal de Dingerl*, t. CLI, 1859. — Buchetti. *Machines à vapeur actuelles*, p. 26.



(fig. 415), en dessinant les limites des recouvrements extérieurs, glissent deux taquets de détente. Mais, à l'inverse du cas précédent, ces deux tuiles restent solidaires l'une de l'autre, et sont directement conduites par le moteur, au moyen d'un excentrique spécial (\*). Il semble donc que l'on n'ait en définitive qu'un seul tasseau; et il en est en effet ainsi pour un instant déterminé. Seulement les deux parties de cet organe sont susceptibles de jouer l'une par rapport à l'autre à la volonté du mécanicien, en permettant de modifier la longueur totale, de manière à réaliser la détente variable.

A cet effet, ces deux taquets sont traversés par la tige de l'excentrique, qui présente deux pas de vis inverses l'un de l'autre. Si l'on imprime à cette pièce une rotation sur elle-même, les tuiles prendront des translations opposées. De là un allongement ou un raccourcissement de l'ensemble, et une variation de la durée de l'admission à travers le tiroir (\*\*).

(\*) Dans le système Charles (*Revue industrielle*, avril 1875, p. 418), on a cru préférable, pour éviter le frottement des excentriques, de leur substituer des engrenages conduisant un arbre coudé, qui attaque directement des bielles de commande. Cette complication n'a pas prévalu dans la pratique.

(\*\*) Dans la distribution Aimé Robert, on opère le rapprochement ou l'écartement des tasseaux à l'aide d'un cadre mû par un petit piston hydraulique. (Buchetti. *Les machines à vapeur actuelles*, p. 42.)

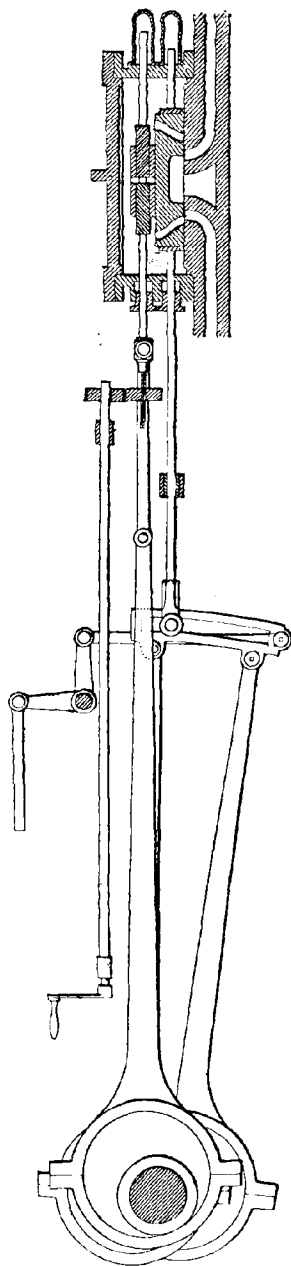


Fig. 415. - Distribution Meyer (coupe longitudinale)

Pour déterminer la rotation de la tige, il serait malaisé d'agir avec la main sur une pièce animée d'un mouvement rapide de va-et-vient. On l'engage donc à l'intérieur d'un canon, dans lequel elle joue à prisonnier, et qui est muni d'un petit volant. Tant que l'on n'agit pas sur ce dernier, la tige se borne à exécuter son mouvement alternatif; mais si l'on vient à manœuvrer le volant sur place, on la force à tourner sur elle-même.

**723** — Il est facile d'assigner la position qu'il y aura lieu de donner à l'excentrique de commande des taquets. Il doit être symétrique par rapport à ceux de la coulisse de Stephenson, afin de jouer des rôles identiques dans les deux marches opposées de la machine. Son excentricité doit donc former la bissectrice des deux précédentes. Mais déjà celles-ci sont également inclinées sur la manivelle motrice. C'est par conséquent le prolongement de cette dernière qui fournit la direction cherchée <sup>(1)</sup>.

Nous avons déjà rencontré un exemple de ce mode d'installation dans l'étude de la marche au point mort (n° 707). Nous avons reconnu notamment, pour le mouvement absolu qui en dérive, cette propriété essentielle, que la tuile de détente se meut constamment dans le sens contraire de celui du piston, et avec une vitesse proportionnelle à celle de cet organe.

**724** — Son mouvement relatif par rapport au tiroir est moins facile à saisir. On peut cependant le définir d'une manière fort simple au moyen d'un théorème général, qui porte le nom de *parallélogramme des excentriques* <sup>(2)</sup>.

Il s'énonce de la manière suivante : *Lorsque deux bielles infinies sont conduites par des excentriques circulaires, le déplacement relatif de l'un de ces corps par rapport à l'autre n'est autre que le mouvement sinusoïdal qui serait réalisé au moyen d'un excen-*

<sup>(1)</sup> Lorsque le moteur doit toujours marcher dans le même sens, et ne possède pas de mécanisme de changement de marche, il est préférable de donner à l'excentrique des taquets une avance angulaire un peu moindre.

<sup>(2)</sup> Zeuner. *Traité des distributions par tiroirs*. Traduction Debize et Mérijot. — Pichault (*Étude sur les appareils de distribution exposés à Vienne en 1875. — Appareils de distribution par tiroirs*, p. 115. — *Annales industrielles*, 1<sup>er</sup> semestre, 1874).

trique fictif, dont l'excentricité se déduit des deux précédentes par la règle du parallélogramme, en employant le mode de construction qui sert pour la composition des vitesses linéaires d'un point.

Soient en effet (fig. 414) OA et OB les deux excentricités proposées. Les mouvements des extrémités des bielles infinies repro-

duisent ceux des projections  $\alpha$  et  $\beta$  des extrémités A et B sur la ligne des points morts  $\omega\alpha$ . Le mouvement relatif est défini par la variation que subit à chaque instant leur distance mutuelle  $\alpha\beta$ . Pour la rapporter à un point fixe tel que  $\omega$ , il nous suffira de compléter le parallé-

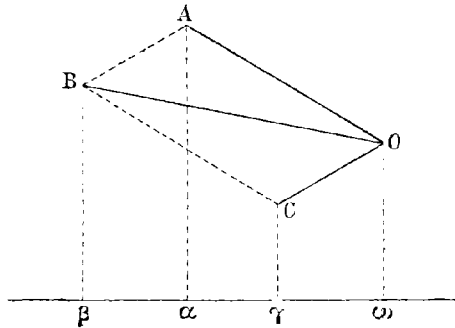


Fig. 414.

gramme OABC, en traçant OC égal et parallèle à AB. Sa projection  $\omega\gamma$  sera, à chaque instant, égale à celle  $\alpha\beta$  de AB.

On voit donc que le mouvement relatif cherché est celui de la projection  $\gamma$  du point C, qui décrit un cercle d'un mouvement uniforme. En d'autres termes, c'est celui de la bielle de l'excentrique fictif OC, déduit des deux proposés OA, OB, par la règle qui fait connaître en cinématique la vitesse relative OC, quand on connaît la vitesse absolue OB et celle d'entraînement OA.

**725** — La distribution Meyer expose à une circonstance assez inattendue, si l'on n'a pas soin d'en régler attentivement les dimensions. C'est une seconde admission vers la fin de la course.

Il peut arriver en effet que la tuile, après être venue obturer la lumière pour produire la détente, passe entièrement de l'autre côté, et que son bord postérieur arrive à découvrir cet orifice par l'arrière. On verra ainsi recommencer l'admission.

Une première condition qui pourrait amener une telle irrégularité serait une vitesse excessive des tasseaux, due à une valeur exagérée de l'excentricité qui les gouverne. Une seconde serait un défaut



ments absolus du tiroir et du taquet, ainsi que de leur mouvement relatif.

Sur la figure schématique 416, on a placé ces deux organes dans leurs positions normales. Désignons par  $h$  la distance  $\alpha\beta$  qui sépare alors les bords de gauche de la tuile et de la lumière pratiquée à travers le tiroir. Tra-

çons, avec cette longueur comme rayon, le cercle ponctué  $\Pi$  (fig. 415). Il rencontre sur les rayons  $OC$ ,  $OC'$  la circonférence  $OD_1$ , qui représente le mouvement relatif. Pour que la vapeur soit coupée, il

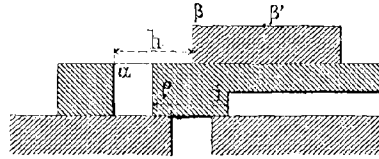


Fig. 416.

faut que, dans le déplacement du taquet vers la gauche du tiroir,  $\beta$  arrive en  $\alpha$  (fig. 416). A cet effet, l'écartement relatif du premier par rapport au second doit être égal à  $-h$  (les elongations positives étant comptées, comme à l'ordinaire, vers la droite des axes de ces deux glissières placés en coïncidence). C'est donc pour l'azimut  $OC$ , mené par l'intersection (en rayons vecteurs négatifs) avec le cercle  $OD_1$ , que la vapeur se trouvera interceptée. La manivelle motrice occupe alors, en raison du signe algébrique, la position diamétralement opposée  $OC_1$  (<sup>1</sup>). En l'absence du taquet, avec le seul tiroir proprement dit à recouvrement extérieur  $\rho$ , la vapeur n'eût été coupée que pour la direction  $OII$ , qui correspond à l'intersection du cercle  $OD$  avec la circonférence  $R$  décrite autour de  $O$  avec  $\rho$  comme rayon.

Nous pouvons, d'après cela, nous représenter la série des circonstances qui se succèdent. Si nous partons du point mort du piston, celui-ci se mouvant vers la droite, le taquet rétrograde de suite à gauche; et en effet les rayons vecteurs du cercle  $OD'$  vont en décroissant. Le tiroir marche lui-même vers la droite, car ceux de la circonférence  $OD$  sont croissants. Pour la position spéciale  $OD$ , le

(<sup>1</sup>) Quant à la seconde intersection  $OC'$ , elle ne correspond à rien de saillant dans les fonctions de la distribution. Elle représente l'instant où le point  $\beta$  s'est éloigné vers la droite d'une longueur égale à la distance  $\beta\alpha$ , à partir de la coïncidence des axes de symétrie des deux corps.

tiroir commence à rétrograder. Dans la direction  $OC_1$ , le bord  $\beta$  atteint le point  $\alpha$  (fig. 416), et la vapeur se trouve interceptée. A la fin du premier quadrant, en  $OB$  (fig. 415), la tuile passe par sa position normale absolue. Pour l'azimut  $OT$  que fournit la tangente du cercle  $OD$ , c'est le tiroir qui atteint la sienne. Enfin, en  $OE'$ , se produit le fond de course de droite, et le taquet rebrousse chemin en même temps que le piston, tandis que le tiroir continue à s'éloigner de sa situation normale vers la gauche. Quant à la coïncidence des deux axes de symétrie du tiroir et des tasseaux, elle s'effectue pour l'azimut  $OT_1$  de la tangente au cercle  $OD_1$ , perpendiculaire à ce diamètre  $OD_1$ .

**727** — On peut également se rendre compte, à l'aide de ce diagramme, de la seconde admission que permettrait une distribution Meyer mal combinée.

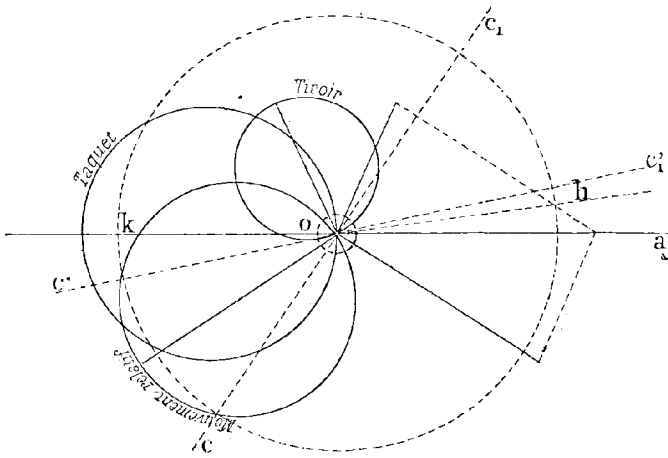


Fig. 417.

Supposons en effet que la longueur  $h$  soit assez grande pour que le cercle ponctué  $H$  qui l'a pour rayon, au lieu de couper la direction  $AA'$  du mouvement à droite du point  $K$  (fig. 415), la rencontre à gauche de ce point  $k$  (fig. 417). Dans ce cas, la rotation de la manivelle ne rencontrera plus  $C'$  avant  $C$  (fig. 415). Elle passera par  $c$  avant d'arriver en  $c'$  (fig. 417). La vapeur est donc coupée

en  $c_1$ ; puis le bord du taquet  $\beta$  passe à gauche de  $\alpha$  (fig. 416), et s'en éloigne jusqu'au rayon maximum du cercle du mouvement relatif. Il revient alors à droite, et en  $Oc'$  (c'est-à-dire pour la manivelle  $Oc'_1$ ) (fig. 417), le bord  $\beta$  revient en  $\alpha$  dans sa marche vers la droite, en rouvrant la lumière du tiroir avant le point mort  $Oa'$  de la manivelle motrice. Si donc on a employé un tiroir normal, incapable, en l'absence de recouvrement, d'obturer la lumière de la glace pendant la course, il se produira une nouvelle admission. Il en sera encore de même si ce tiroir possède un recouvrement trop petit pour que la position  $oh$ , pour laquelle le tiroir provoque par lui-même la détente, soit plus rapprochée de  $oa'$  que  $oc'_1$ .

**728** — Nous pouvons encore étudier la détente Meyer au moyen du diagramme elliptique (fig. 418).

Le mouvement du tiroir étant représenté par le contour  $AmM$ , celui de la tuile le sera par une droite telle que  $AN$ . En effet elle est conduite directement par le prolongement de la manivelle motrice. Ses déplacements (ou les ordonnées) sont donc proportionnels à ceux du piston (qui sont portés en abscisse), ce qui fournit l'équation d'une droite. Celle-ci est d'ailleurs

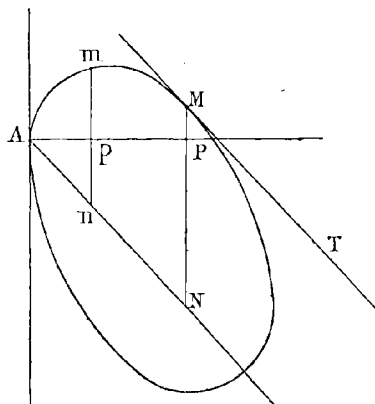


Fig. 418.

plongée, puisque la courbe  $Am$  s'élève à partir de  $A$ , et que les deux organes marchent alors dans des sens contraires.

Si l'on veut couper la vapeur après un parcours du piston tel que  $Ap$ , le tiroir a décrit le chemin  $pm$  d'un côté, et le tasseau l'espace  $pn$  de l'autre. Leur écartement relatif est donc à ce moment  $mn$ . Or il faut que le bord du taquet affleure alors à la lumière du tiroir. On connaît ainsi l'écartement initial  $mn$  qu'il est nécessaire de leur donner en vue du résultat voulu.

Pour éviter la réadmission, l'on doit redouter l'exagération de





On a évidemment les relations :

$$cd = oc \cdot \cos \alpha,$$

$$\overline{oc} = \overline{om} \cdot \cos (\alpha + \varphi).$$

Si donc on désigne par  $z$  l'élongation du tiroir T, ou celle du point  $c$  par rapport à sa situation moyenne  $d$ , et par R la longueur de la contre-manivelle  $om$ , il vient, en multipliant membre à membre ces deux égalités :

$$z = R \cos \alpha \cos (\alpha + \varphi),$$

équation identique à celle du mouvement sinusoïdal qui serait dû à un excentrique.

Si l'on change à la fois les signes de  $\alpha$  et de  $\varphi$ , cette relation n'est en rien modifiée. On obtient donc un changement de marche, identique d'allure, en transportant le système AA' sous un angle égal de l'autre côté de OY.

En faisant  $\alpha = 90^\circ$ , on trouve  $z = 0$ , quel que soit  $\varphi$ . Le système réalise par suite un cran d'arrêt absolu, quand on ramène AA' suivant OY, et aucune admission ne se produit alors pendant la rotation.

Pour  $\varphi = 0$ , il vient :

$$z_0 = R \cos^2 \alpha.$$

L'avance du tiroir n'est donc pas constante. Elle varie avec l'angle de calage  $\alpha$ . Il convient, pour ce motif, de ne demander au système que le renversement à *fond* de la marche avec un angle invariable  $\alpha$ , ainsi que le cran d'arrêt, et de n'attendre la variation de détente que de la tuile actionnée par la tige  $mt$ , comme dans le système Meyer.

## § 4

**DISTRIBUTION DEPREZ**

**730** — La distribution à deux tiroirs qui a été proposée par M. Marcel Deprez fournit une intéressante application des propriétés du frottement.

La figure 420 représente en AA' la glace du cylindre. On y voit en BB' un tiroir *normal*, fournissant la vapeur dans toutes ses situations, pourvu qu'il la reçoive lui-même par sa partie supé-

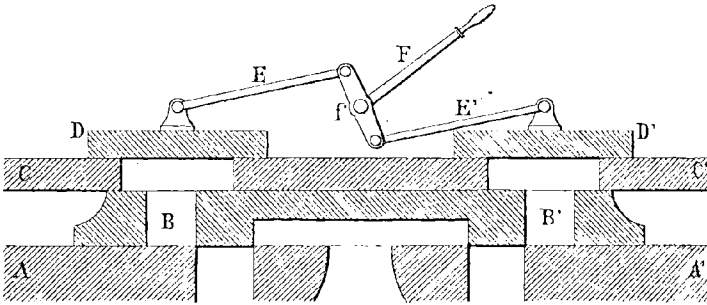


Fig. 420. — Distribution Deprez à deux tiroirs (coupe longitudinale).

rieure, à travers le taquet de détente CC'. Celui-ci est percé de larges ouvertures, qui ne cessent d'admettre que lorsqu'elles viennent se glisser sous les tasseaux D, D'.

Ces derniers sont fixes pour un régime déterminé. Mais on reste maître de le modifier, en écartant plus ou moins ces tuiles l'une de l'autre. A cet effet, les bielles E, E' relient les deux tasseaux au levier coudé Ff. Suivant que l'on tourne la poignée F dans un sens ou dans l'autre, on tend à écarter ou à rapprocher les taquets l'un de l'autre. Mais la réalisation de ce mouvement présente une particularité assez curieuse.

Supposons d'abord que l'on tourne très doucement la clef F, tandis que la pièce CC', entraînée par son excentrique, possède une allure rapide. On sait que le frottement ne dépend que du mouve-

ment relatif, et qu'il lui est opposé. Celui-ci sera, pour l'un des tasseaux, la somme, et pour l'autre, la différence de leur déplacement propre et de celui de  $CC'$ . Mais ce dernier étant prépondérant d'après l'hypothèse, les deux résultantes sont de même sens. Les frottements le seront donc eux-mêmes, et, par suite, leurs moments auront des signes contraires par rapport au point fixe  $f$ . Les forces considérables dues à la pression exercée par la vapeur sur le dos des tasseaux, s'équilibrent d'après cela mutuellement, et le mécanicien peut exécuter sa manœuvre sans difficulté.

Supposons, au contraire, que ce dernier cherche à influencer vivement le levier  $F$ . S'il y réussit, les tasseaux acquérant, dans des sens opposés, des mouvements plus importants que le déplacement que prend  $CC'$  au-dessous d'eux, les mouvements relatifs seront de sens contraires, et les moments des frottements par rapport à  $f$  de même signe. La main du mécanicien rencontrera donc ce double obstacle, qu'elle sera ordinairement impuissante à vaincre.

En outre de la variation de détente due à l'écartement ou au rapprochement des tasseaux  $D, D'$ , on peut également réaliser le changement de marche. Il suffit pour cela de tourner de  $180^\circ$  l'excentrique du tiroir normal  $BB'$ . On commence à cet effet par mouvoir les tasseaux jusqu'à intercepter complètement la vapeur. Dès lors, l'espace subordonné se vide dans le condenseur, et le tiroir ne supporte plus aucune pression dorsale. On ne rencontre donc plus de résistance sérieuse à le transporter par les moyens ordinaires, de manière à lui donner une avance de  $180^\circ$ .

**731** — Si l'on veut construire le diagramme de Zeuner, le tiroir étant normal, son excentricité  $OA$  (fig. 421) doit être portée à angle droit sur la ligne des points morts, pour former le diamètre du cercle représentatif. Admettons qu'en raison d'une liaison cinématique convenablement constituée (\*), l'excentrique fictif du taquet de détente, dans ses divers crans de relevage, varie comme le rayon vecteur  $OB$  du cercle qui a pour centre  $A$ , et  $OA$  comme rayon. Le mouvement du taquet sera représenté par le rayon vecteur du

(\*) Elle a été indiquée par M. Marcel Deprez ; mais elle présente quelque complication, et, pour abrégé, j'en supprimerai ici la description.

cercle décrit sur la droite symétrique  $OB_1$  comme diamètre (n° 641), et le mouvement relatif aura pour excentrique fictif  $OC$ , d'après le théorème du parallélogramme des excentricités (n° 724).

On remarquera que  $OC = AB$ , quantité constante. La course relative du taquet par rapport au tiroir est donc invariable.

On voit également que le lieu géométrique du centre d'excentricité  $C$  du mouvement relatif est le cercle décrit autour de  $O$  avec un rayon égal à l'excentricité du tiroir.

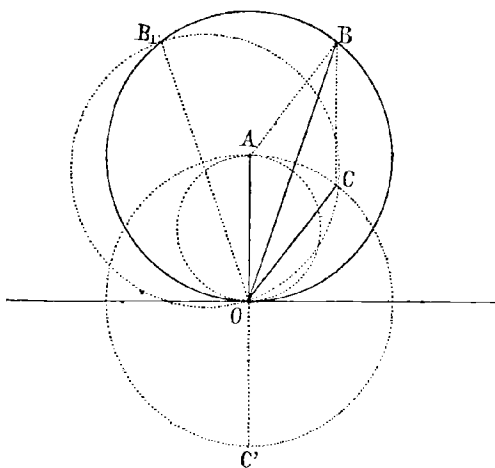


Fig. 421.

Dans le cas où l'on supposerait le taquet sans recouvrement par rapport aux lumières du tiroir, c'est dans sa position *relative* normale qu'il couperait la vapeur; c'est-à-dire au moment où l'excentricité  $OC'$  de ce mouvement relatif atteint la position perpendiculaire à la ligne des points morts. Or, c'est

à cet instant que le mouvement longitudinal est le plus rapide. Ce système coupe donc la vapeur de la manière la plus avantageuse au point de vue du laminage.

Comme d'ailleurs  $OC$  est la position initiale de cette excentricité fictive qui coïncide avec le passage au point mort, on voit que l'admission a duré pendant l'angle de rotation  $COC'$ , lequel peut, suivant le cran de relevage, approcher autant que l'on voudra de  $180^\circ$ . On peut, par conséquent, réaliser ainsi les plus longues admissions, et même au besoin la pleine pression.

Il est clair en outre que dans le cours d'une rotation de  $180^\circ$ , la position verticale ne saurait être traversée plus d'une fois. On ne court donc pas le même risque qu'avec la détente Meyer, de réadmettre une seconde fois la vapeur.

## § 5

**DISTRIBUTION POLONCEAU**

**732** — Le système Polonceau <sup>(1)</sup> présente au premier abord une certaine analogie d'aspect avec la distribution Meyer; mais il en diffère profondément, en ce qu'au lieu de faire varier la longueur totale d'un taquet de détente de course constante, on lui assigne une longueur fixe en disposant de son parcours.

Imaginons deux coulisses de Gooch (n° 703), projetées l'une sur l'autre et conduites par les mêmes barres d'excentrique (fig. 422, 423). On y insère deux coulisseaux, avec des relevages indépendants, pour gouverner le tiroir et le taquet.

Nous avons vu (n° 705) que les mouvements ainsi réalisés sont ceux d'excentriques circulaires fictifs, et peuvent être représentés par les équations :

$$x = A \sin \varphi + B \cos \varphi,$$

$$x' = A' \sin \varphi + B' \cos \varphi.$$

Toutefois nous devons supposer ici :

$$B = B',$$

afin que, lors du passage de la manivelle au point mort, quand  $\varphi = 0$ , les déplacements (alors réduits à B et B') soient égaux entre eux, en vue de réaliser la constance des avances. On tire de là, pour représenter le mouvement relatif :

$$x - x' = (A - A') \sin \varphi.$$

C'est l'équation du mouvement d'un tiroir normal, dont l'excen-

<sup>(1)</sup> Zeuner. *Traité des distributions par tiroirs*. Traduction Debize et Mérijot, p. 251. — Pichault. *Appareils de distribution par tiroirs*, p. 482. — Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 366. — Krauss. *Civil Ingenieur*, t. VI, p. 110.

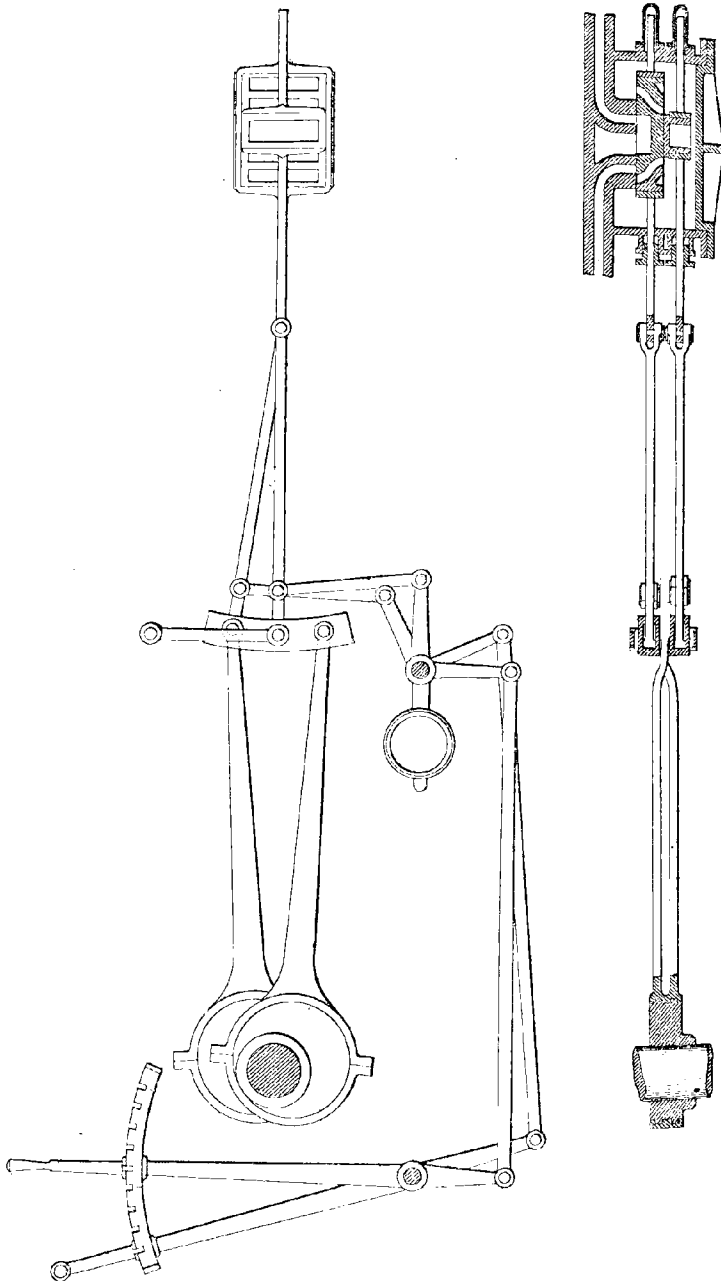


Fig. 422 et 423. — Distribution Polonceau (élévation et coupe longitudinale).

trique serait calé à angle droit sur la ligne des points morts sans avance angulaire. Sa course  $2(A - A')$  sera d'ailleurs variable, puisque  $A$  et  $A'$  dépendent des crans de relevage.

Si l'on met, par exemple, le coulisseau du tiroir à fond de course, et celui du tasseau au point mort de la coulisse, celui-ci devient à peu près immobile, et le tiroir, alors doué de sa plus grande excursion, vient faire obturer par lui sa lumière pour déterminer la détente. Si l'on met le second coulisseau à l'extrémité opposée, le tasseau s'avance au-devant du tiroir de manière à couper encore plus tôt la vapeur. Si, au contraire, les deux coulisseaux se trouvent au même fond de course de leurs coulisses respectives, les deux corps marcheront ensemble sans prendre aucun mouvement relatif, et l'on se retrouvera dans le cas de la distribution par tiroir unique.

On est obligé, pour obtenir une avance à l'admission, de donner au tasseau un *recouvrement négatif* —  $\rho$  (n° 650). En effet le tiroir normal fictif auquel nous l'assimilons au point de vue de son mouvement relatif, ne commence à découvrir qu'à partir du point mort de la manivelle. Il s'ensuit que si le tasseau vient au-devant du tiroir, c'est quand il aura parcouru un espace égal à ce recouvrement  $\rho$  que la vapeur sera interceptée. Ce sera donc, d'après l'équation ci-dessus, après un déplacement angulaire  $\varepsilon$  qui a pour valeur :

$$\sin \varepsilon = \frac{\rho}{A - A'}$$

Nous voyons par là que l'admission maximum est de 90 degrés, correspondant au milieu de la course. On se trouve alors placé dans les plus mauvaises conditions. Si en effet nous envisageons la vitesse relative :

$$\frac{d(x - x')}{dt} = (A - A') \cos \varphi \frac{d\varphi}{dt},$$

nous reconnaissons qu'elle s'annule dans ce cas. Le taquet viendra donc fermer mollement les lumières du tiroir, et l'influence de l'étirage sera aussi accentuée que possible.

La détente Polonceau présentant un dispositif analogue au système Meyer, expose comme ce dernier à l'inconvénient d'une seconde admission en fin de course, lorsque les dimensions en sont mal combinées.

## § 6

### DISTRIBUTION GONZENBACH

**733** — La détente de Gonzenbach <sup>(1)</sup> est à deux tiroirs. Mais ceux-ci ne se meuvent pas, comme dans tous les systèmes précé-

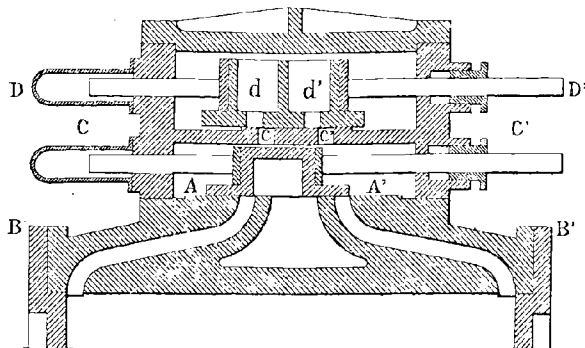


Fig. 424. — Distribution Gonzenbach (coupe longitudinale).

dents, au contact l'un de l'autre. Le tiroir proprement dit AA' (fig. 424) glisse directement sur la glace BB' du cylindre, et c'est sur le ciel CC' de la boîte à vapeur dans laquelle il se meut, qu'oscille de son côté le taquet de détente DD', percé de deux ouvertures *d*, *d'*. Selon que ces dernières se trouvent ou non en concordance avec les orifices *c*, *c'* qui sont pratiqués à travers la

(1) Zeuner (*Traité des distributions par tiroirs*. Traduction Debize et Mérijot, p. 184. — *Civil Ingénieur*, t. III). — Pichault. *Appareils de distribution par tiroirs*, p. 221. — Spineux. *De la distribution de la vapeur dans les machines*, p. 46. — Callon. *Cours de machines*, t. II, p. 251. — Machine d'Orlikon. *Portefeuille économique des machines*, avril 1890. — Machine Olry Grandemange. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1889, 3<sup>e</sup> trimestre, p. 241. — Machine Taxman. Buchetti. *Les machines à vapeur à l'Exposition de 1889*, p. 11.



cloison C (<sup>1</sup>), la vapeur du compartiment supérieur peut ou non s'introduire dans la chambre inférieure, et de là dans le cylindre, si le tiroir le lui permet (ce qui a lieu d'ailleurs pendant presque tout le temps, car on emploie un tiroir normal, ou d'un faible recouvrement).

Le tiroir A est manœuvré à l'aide de deux excentriques E, E' (fig. 425), qui commandent une coulisse de Stephenson F, F'. Mais on n'emploie celle-ci qu'à fond de course, ou à son point mort, de manière à réaliser le changement de marche ou le cran d'arrêt.

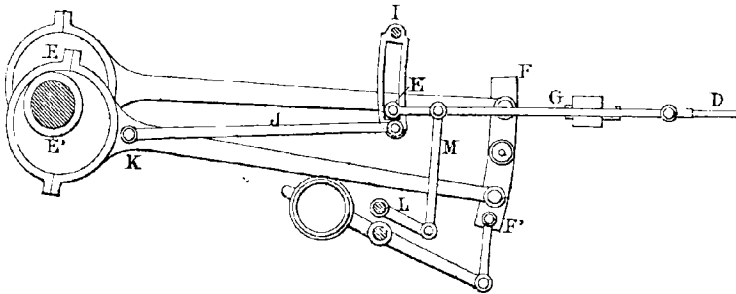


Fig. 425. — Distribution Gonzenbach (élévation).

Quant à la variation de détente, elle s'obtient à l'aide du taquet D (fig. 424).

Celui-ci est conduit, à l'aide de la bielle G (fig. 425), par un bouton H engagé dans une coulisse qui oscille autour du point fixe I, sous l'empire d'une tringle J, que gouverne une articulation K montée sur l'excentrique *d'arrière*. Le mouvement de cet organe détermine le balancement de la pièce III, et le mouvement de va-et-vient de la tuile de détente. Pour en faire varier l'amplitude, on opère le relèvement de la tringle G à l'aide du levier L et de la bielle M. On rapproche ainsi plus ou moins le coulisseau H du centre d'oscillation I.

**734** — Les orifices de la tuile sont plus grands que ceux de la cloison. Si donc leurs axes coïncident à un certain moment, on

(<sup>1</sup>) Les lumières *c, c'* pourraient d'ailleurs être réduites théoriquement à une seule. C'est uniquement pour réaliser les avantages du tiroir à grille (n° 659), que l'on a ainsi dédoublé l'ouverture de communication entre les deux enceintes.

peut être assuré que l'admission est déjà ouverte depuis un temps notable. Cette coïncidence ne saurait par conséquent se produire pour le point mort de la manivelle, sous peine de déterminer une énorme avance à l'admission, qui serait de nature à créer, pendant la course rétrograde, une contre-pression extrêmement nuisible. La tuile ne doit au contraire arriver à sa position normale qu'après le passage de la manivelle par le point mort, ce qui est précisément l'inverse des conditions ordinaires, dans lesquelles le tiroir unique doit avoir alors dépassé sa position médiane, d'un certain intervalle appelé avance angulaire. En un mot, on doit caler la tuile de la distribution Gonzenbach avec un *retard angulaire* corrélatif de son *recouvrement négatif*. Aussi prend-on sur l'excentrique d'arrière C', pour la marche en avant, la commande de la coulisse III qui gouverne le taquet de détente.

Il suit de là un grave défaut de ce système; car la détente devient impossible dans la marche en arrière. Il faudrait en effet pour l'avoir, disposer de même d'une articulation H' prise sur l'autre excentrique; et le mécanisme ne la présente pas. On doit commencer, quand on veut renverser la marche, par relever le bouton H à fond de course en I. Alors la tuile devient immobile dans la position normale, et permet le passage permanent de la vapeur à travers la cloison.

Si le manque de symétrie entre les deux sens de la distribution est à la rigueur supportable dans les locomotives, qui ne fonctionnent qu'exceptionnellement à la marche en arrière, il deviendrait inadmissible pour une machine d'extraction, dont les deux ordres de manœuvres doivent se trouver placés dans des conditions absolument équivalentes.

Un autre défaut de la détente Gonzenbach consiste dans l'exagération de l'espace nuisible, qui comprend alors tout le volume de la chambre à vapeur inférieure. Pour ces divers motifs, ce système a été fortement critiqué<sup>(1)</sup>, et nous ne nous étendrons pas davantage à son sujet.

(1) Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 564.

## § 7

**DISTRIBUTION BONJOUR**

**735** — Dans celui de ses deux systèmes de distribution <sup>(1)</sup> où M. Bonjour fait intervenir la commande directe par la vapeur, cet ingénieur emploie un double tiroir <sup>(2)</sup>. Un taquet de détente d'une seule pièce est directement attaqué par une tige qui règne dans toute la longueur de la boîte à vapeur, et qui se termine à chacune de ses extrémités par un petit piston engagé dans un cylindre. Mais ces deux corps de pompe remplissent des fonctions très différentes.

L'un d'eux reçoit la vapeur de la part d'un distributeur, qui est actionné par une coulisse de Stephenson parfaitement équilibrée, et placée sous la dépendance directe du régulateur à boules. Si la machine vient à s'accélérer, le manchon de ce dernier monte, et relève la coulisse. Le petit piston reçoit plus tôt la vapeur, et coupe d'autant plus tôt aussi l'admission dans le cylindre moteur.

L'autre corps de pompe a pour fonction d'amortir le lancé de la distribution. C'est un *dash-pot* rempli d'eau glycéринée. Il présente dans ses parois des rainures tronc-coniques, analogues à celles du piston-distributeur de la machine à colonne d'eau <sup>(3)</sup>. Lorsque celui-ci se trouve au milieu de sa course, le liquide reflue librement; mais quand on approche des extrémités, la décroissance de la section offerte au passage du fluide crée une résistance rapidement croissante, qui atténue efficacement le choc.

On obtient ainsi une distribution sans déclics, sans articulations, sans frottements importants. La course est réduite, car le tiroir a très peu de recouvrement. Le régulateur ne surmonte que de faibles efforts. L'admission peut osciller dans des limites très étendues. A la vérité, les variations de tension du générateur semblent de nature à introduire quelque incertitude dans le jeu du petit piston ;

<sup>1)</sup> Voy. n<sup>os</sup> 658 et 755.

<sup>2)</sup> Coste et Maniquet. *Tracés pratiques des épures de distribution*, p. 212.

<sup>3)</sup> Voy. t. I, p. 318.

mais il faut remarquer que la pression sur le dos des plaques se modifie par cela même, et avec elle le frottement, d'où résulte une certaine compensation. Ajoutons que la vapeur de la distribution n'est pas perdue. On l'évacue dans le grand cylindre des moteurs compound <sup>(1)</sup>, où elle travaille pour son propre compte <sup>(2)</sup>.

<sup>(1)</sup> Voy. chap. XLVIII.

<sup>(2)</sup> D'autres systèmes de distribution par impulsion directe de vapeur ont été indiqués par MM. BAKER (*American machinist*, 16 mai 1885). — MARCEL DEPREZ. — HOFFMANN. *Ibidem*, 4 juin 1887, p. 4. — HORSFIELD (*Scientific American*, 22 août 1885, p. 115.) — LAURENT MARIUS Procédé de distribution à organes très petits. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Ecoles d'arts et métiers*, octobre 1885, p. 934.

## CHAPITRE XLII

### DISTRIBUTIONS A EXCENTRIQUE UNIQUE

#### § 1

#### EXCENTRIQUE UNIQUE

**736** — *Généralités.* — On a pu reconnaître dans le chapitre XL avec quelle fécondité de moyens les constructeurs ont su mettre en œuvre la commande d'une coulisse par deux excentriques. Toutefois, on est arrivé à se préoccuper, peut-être même avec quelque exagération, du travail perdu par le frottement de ces organes, lequel croît en effet avec leur rayon de courbure <sup>(1)</sup>.

On a imaginé, dans cet ordre d'idées, des *distributions à excentrique unique* que nous envisagerons dans ce premier paragraphe.

On est arrivé en outre jusqu'à supprimer ce dernier excentrique, en le remplaçant par un prolongement de la manivelle au delà de l'arbre moteur. On obtient par là des *distributions à contre-manivelle*, auxquelles nous consacrerons le § 2 du présent chapitre. Mais une nuance seulement les sépare des précédentes, car nous pouvons considérer la contre-manivelle comme constituant, dans notre pensée, un excentrique calé à 180° de la manivelle, c'est-à-dire avec une avance angulaire de 90°.

Enfin, l'on a songé à demander la commande, non plus au prolongement de la manivelle, mais à cet organe lui-même, en articulant en certains points de la bielle motrice les tringles de renvoi

(1) Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 567.

qui actionnent les tiroirs. On donne à ces derniers systèmes le nom de *distributions radiales* <sup>(1)</sup>. Nous les étudierons dans le paragraphe 3. Ce principe se rattache encore dans une certaine mesure au premier; la manivelle motrice se confondant, au point de vue abstrait, avec un excentrique dont l'avance angulaire aurait crû jusqu'à 270°.

Enfin nous envisagerons, dans le paragraphe 4, sous le nom d'*excentriques variables*, des distributions dans lesquelles un excentrique unique arrive à suffire aux diverses fonctions voulues, au moyen de la variation directe de son angle de calage <sup>(2)</sup>.

(1) On définit parfois cette dénomination avec plus de généralité, en disant que le mouvement du tiroir est alors commandé par un point quelconque d'une bielle dont une extrémité décrit une courbe fermée, et l'autre une courbe ouverte, qui sera souvent une droite (Léauté. Sur les trajectoires des divers points d'une bielle en mouvement. — Règles pratiques pour la substitution à un arc donné de certaines courbes engendrées par les points d'une bielle en mouvement, etc. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 7 mai, 4 juin 1883. — Sur une famille de courbes qui se rencontrent dans les transmissions de mouvement par bielles. *Journal de l'École polytechnique*, 55<sup>e</sup> cahier, p. 59).

(2) Pour l'étude des distributions de ces diverses catégories, on peut consulter les travaux suivants : BOUTVIN. Étude sur les distributions sans excentriques (*Annales de l'Association des Ingénieurs sortis des Écoles spéciales de Gand*, 1884. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 2<sup>e</sup> série, t. XVI, p. 545). — GRAHAM. On radial valve Gears. *The Engineer*, 23 février, 30 mars, 17 avril, 29 juin 1883, 5 juin 1885. — *Engineering*, 17 septembre, 8 octobre 1886). — Traduction G. Richard. Les distributions radiales. *Revue générale des chemins de fer*, avril 1888, p. 215. — ANGUS SINCLAIR. Tests comparing radial motion and link motion locomotives. *The railway Engineer*, mai 1888. — SMITH. *The railroad and engineering Journal*, février 1890, p. 60. — BURG. Link motion and expansion Gears. *Revue générale des chemins de fer*, avril 1888, p. 216.

Indépendamment de ceux de ces systèmes qui sont décrits dans ce chapitre, je mentionnerai encore les suivants : ANGSTROM (*Revue générale des chemins de fer*, avril 1888, p. 224. — *Journal of Franklin Institute*, décembre 1883, p. 460). — CH. BOURDON. *Génie civil*, 10 juillet 1886, p. 166. — BREMME. — BROWN (*Revue générale des chemins de fer*, p. 225. — *Engineering*, 1<sup>er</sup> octobre 1880, p. 271. — BOUTVIN. Étude sur les distributions sans excentriques. — *Congrès international de mécanique appliquée de 1889*, t. II, p. 127). — DAMEY. Collier-coulisse monté sur un seul excentrique. — DEMOLENS. *Génie civil*, t. XIV, p. 11. — BRUCE DOUGLAS. *Revue générale des chemins de fer*, janvier 1887, p. 32. — FISCHER. *Couche. Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, pl. VI, fig. 6. — HACKWORTH. (*Burg. Link motion*, etc. — *Engineering*, 24 janvier 1890, p. 96). — HARTLEY. *Scientific American*, 15 octobre 1887, p. 242. — HAWTHORN. *Burg. Link Motion*, etc. — COUCHE. *Voie, matériel roulant*, etc., t. III, pl. V, fig. 65. — HILL. — HOWE. *The Engineer*, 31 juillet 1880. — KIRK. *Engineering*, 30 janvier 1882, p. 111. — KIRSON. *Ibidem*, août 1880, p. 159. — KING. *Revue industrielle*, 25 octobre 1882, p. 421. — LAHARDE (*Annales industrielles*, 1885, II, p. 244. — *Scientific American Supplement*, 17 novembre 1885). — MARSHALL Bienaymé. *Les machines marines*, p. 258. — *Engineering*, 15 août 1880, p. 127;

**737** — *Distribution Walschaert*. — La distribution de Walschaert (<sup>1</sup>), qui porte également le nom d'Heusinger de Waldegg (<sup>2</sup>), ne renferme qu'un seul excentrique OE (fig. 426), calé perpendiculairement à la manivelle motrice OM. Une bielle EC le relie à l'extrémité d'une coulisse CC' qui oscille sur son milieu c. Un coulisseau H s'y trouve engagé. Il est rattaché à l'articulation K par la tringle HK, que l'on peut déplacer à l'aide de la bielle de relevage R. Une barre TP, actionnée par cette tringle, s'articule en l'une de ses extrémités T à la tige du tiroir, tandis que la seconde P est engagée dans une fourchette portée par la crosse du piston. Une articulation directe serait inadmissible en ce point, car elle mettrait la pièce TP dans l'impossibilité de prendre diverses inclinaisons entre les deux droites parallèles TT' et PP'.

**738** — Cette distribution assure la constance des avances. Appliquons en effet le théorème de Guinotte à la droite PK, de manière à déduire le mouvement de l'articulation T de ceux de K et de P.

D'une part, le point P se meut comme le piston, c'est-à-dire

4 novembre 1881. — *Annales des mines*, 8<sup>e</sup> série, t. XVII, p. 470. — Madamet. *Considérations géométriques relatives aux systèmes Marshall, Joy et autres*, in-8°. — *Revue générale des chemins de fer*, avril 1888, p. 220]. — MELLING (Burg. *Link motion*, etc. — Clarke. *Railway machinery*, p. 29. — Couche. *Voie, matériel roulant*, etc., t. III, pl. V, fig. 62). — MORTON (*Revue générale des chemins de fer*, juillet 1886, p. 53. — *The Steamship*, 2 septembre 1889, p. 107). — NORMAND. *Génie civil*, t. XIV, p. 61. — OMMAMY (*Dingler's polytechnisches Journal*, vol. CCXII, 1874. — *The Engineer*, 11 mai 1883). — RAFFER. *Dingler's polytechnisches Journal*, vol. CCXII. — REYNOLDS. — RICHARDSON. *American machinist*, 26 mai 1883. — SISSON. — DE SOLMS (Bienaymé. *Les machines marines*, p. 253. — *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, août, octobre 1887). — STEVART et HOPE. Couche. *Voie, matériel roulant*, etc., t. III, p. 349. — STRONG. — SWAN. — TATHAM. *Dingler's polytechnisches Journal*, vol. CCXII, pl. I. — WEBER. *Ibidem*. — WHISTONE. *Journal of Franklin Institute*, février 1882, p. 107. — WILSON. *Engineering*, 24 janvier 1890, p. 99.

(<sup>1</sup>) Zeuner. *Traité des distributions par tiroirs*. Traduction Debize et Mérijot, p. 141. — Pichault. *Appareils de distribution par tiroirs*, p. 141. — Spineux. *De la distribution dans les machines à vapeur*, p. 86. — Coste et Maniquet (*Tracés pratiques des épures de distribution*, p. 285. — Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 349. — Gustave Richard. *Revue générale des chemins de fer*, décembre 1878, avril 1881. — Schmidt. *Zeitschrift des österreichischen Ingenieur Vereins*, 1866.

(<sup>2</sup>) Ces deux distributions ne diffèrent que par le sens de la concavité de la coulisse, et certains détails sans importance.

comme la projection horizontale de  $M$ , qui est reliée à ce dernier par la bielle motrice.

En second lieu, l'excentrique  $E$  imprime, par l'intermédiaire de la barre  $EC$ , un mouvement horizontal égal à celui qu'il possède en propre, à l'extrémité  $C$  de la coulisse circulaire. Celle-ci tournant sur son milieu, transmet au coulisseau  $H$  ce même déplacement réduit dans le rapport  $\frac{\overline{cH}}{cC}$ . Enfin le point  $H$  communique intégralement ce dernier mouvement à l'articulation  $K$ , par l'intermédiaire de la tringle  $HK$ .

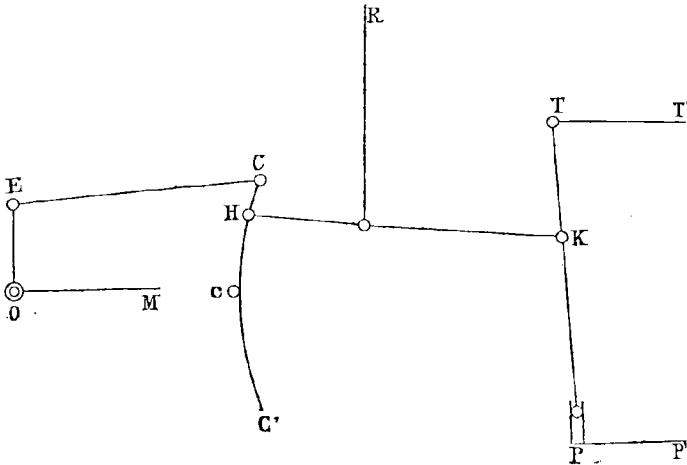


Fig. 426. — Distribution Walschaert (figure schématique).

On voit donc que les deux extrémités de la barre  $PK$  sont conduites respectivement par le rayon  $OM$ , et par une excentricité fictive, rectangulaire sur la première, et égale à  $\overline{OE} \times \frac{\overline{cH}}{cC}$ .

Portons la première longueur en  $\omega m$  (fig. 427), et menons perpendiculairement la seconde en  $\omega n$ . Tirons la corde  $mn$  des deux centres d'excentricité, et construisons y un point homologue de la position de  $T$  sur la droite  $PK$ . A cet effet, prolongeons  $mn$  en  $mt$  dans le rapport  $\frac{\overline{TP}}{\overline{KP}}$ . Nous obtiendrons en  $\omega t$  l'excentricité fictive capable d'engendrer le mouvement du tiroir.



Si l'on vient ensuite à effectuer des relevages, le rapport  $\frac{\overline{cH}}{cC}$  variera en conséquence, mais  $\omega n$  ne change pas, non plus que la direction de la perpendiculaire. La valeur seule de  $\omega n$  sera donc modifiée. Elle deviendra  $\omega n'$ ,  $\omega n''$ ...., et le lieu géométrique de son extrémité sera la perpendiculaire  $\omega n$ . Comme d'ailleurs le rapport  $\frac{\overline{TP}}{\overline{KP}}$  reste fixe, celui des extrémités  $t$  sera de même la parallèle  $\theta t$ . Tous les cercles de Zeuner décrits sur  $\omega t$ ,  $\omega t'$ ,  $\omega t''$ ...., couperont donc la direction du mouvement au même point  $\theta$ , et par conséquent le tiroir occupera toujours la même position pour le passage au point mort, ce qui constitue la constance de l'avance à l'admission.

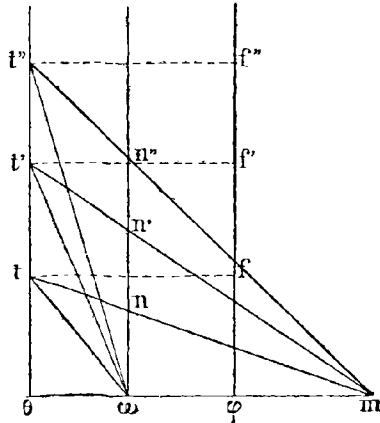


Fig. 427.

Les centres de l'excentrique fictif se trouveront d'ailleurs en  $f$ ,  $f'$ ,  $f''$ ...., (n° 641) aux points symétriques de  $t$ ,  $t'$ ,  $t''$ ...., par rapport à la droite  $\omega n$ . Leur lieu géométrique sera par suite la droite  $\phi f$  perpendiculaire à la ligne des points morts (\*).

**739** — MM. Belpaire et Stévant ont imaginé, pour les machines conjuguées dont les deux manivelles sont couplées à angle droit sur le même arbre, une combinaison qui reproduit le principe de l'excentrique unique de Walschaert calé perpendiculairement à la manivelle motrice. On fait alors conduire le tiroir de chacun des deux moteurs par la crosse du piston de l'autre (\*).

(\*) Nous avons déjà reconnu pour la distribution de Gooch cette même propriété, qui est caractéristique de la constance des avances. Nous verrons plus tard (chap. XLV) que, pour la coulisse de Stephenson, ce lieu est une parabole.

(\*) Cette solution, imaginée principalement en vue des locomotives, a été appliquée, en 1868, aux machines destinées à remonter les trains sur les grands plans inclinés de



complémentaires qu'il nous reste à énumérer, et qui déterminent le mouvement du tasseau  $T'_1$ .

Le coulisseau H actionne, par l'intermédiaire de la bielle HK, la barre PKTL. Celle-ci conduit directement, par son articulation T, le tiroir proprement dit T'. Elle commande en outre, à son extrémité L, au moyen de la bielle LC<sub>1</sub>, la coulisse C<sub>1</sub>C<sub>1</sub>', qui est suspendue par sa partie inférieure C<sub>1</sub>' à un balancier C<sub>1</sub>'D oscillant sur le point fixe F. La seconde extrémité D de ce balancier est influencée par la tige du piston P, au moyen de la barre DP. Sur la coulisse C<sub>1</sub>C<sub>1</sub>' se trouve engagé un coulisseau T<sub>1</sub>, conduisant le taquet de détente T'<sub>1</sub> qui se meut sur le tiroir T.

**741** — On peut réaliser avec cette distribution la constance des avances.

Portons en effet en  $\omega m$  (fig. 429) la longueur de la manivelle OM (fig. 428), dont le bouton M possède le mouvement horizontal du piston P; et en  $\omega e$  l'excentricité OE, dont l'extrémité E' reproduit celui de C<sub>1</sub>, ou de K. Pour appliquer le théorème de Guinotte à la barre PKTL, dont le point L se meut comme C<sub>1</sub>, traçons la ligne  $me$  et prolongeons-la en  $metc_1$ , suivant les rapports respectifs des segments PKTL.

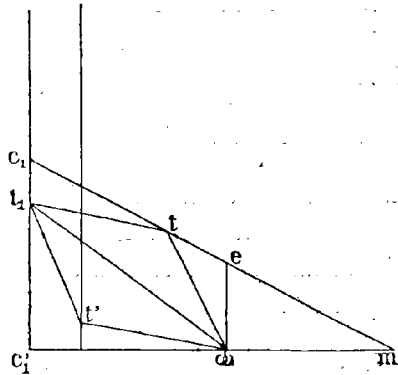


Fig. 429.

La droite  $\omega t$  nous représentera l'excentricité qui conduit le tiroir T, et  $\omega c_1$  celle du point I, ou de C<sub>1</sub>.

D'autre part le mouvement horizontal de M, ou de P, appartient également à D, et par suite (sauf le sens, et sauf amplification suivant le rapport  $\frac{FC'_1}{FD}$ ), il représente aussi le déplacement de C<sub>1</sub>.

Nous connaissons donc les mouvements des deux extrémités C<sub>1</sub> et C<sub>1</sub>' de la coulisse C<sub>1</sub>C<sub>1</sub>', sur laquelle glisse le coulisseau T'<sub>1</sub>.

Pour lui appliquer également le théorème de Guinotte, prenons en  $\omega c_1'$  (à l'opposé de  $\omega m$ , pour avoir égard à l'opposition de sens du mouvement), la longueur  $\overline{OM} \times \frac{\overline{FC_1'}}{\overline{FD}}$ . Nous aurons en  $\omega c_1'$  et  $\omega c_1$  les excentricités qui conduisent  $C_1$  et  $C_1'$ . Joignons  $c_1 c_1'$ , et divisons cette droite en  $t_1$  dans le rapport des segments  $C_1 T_1 C_1'$ . En tirant  $\omega t_1$ , nous obtiendrons l'excentricité fictive qui conduit  $T_1$ , ainsi que le taquet de détente  $T_1'$ .

Ayant en  $\omega t$  et  $\omega t_1$  les excentriques qui actionnent les deux tiroirs  $T'$  et  $T_1'$ , nous formerons, pour connaître leur mouvement relatif, le parallélogramme  $\omega t t_1 t'$ ; et  $\omega t'$  sera l'excentrique fictif.

Lorsque l'on effectuera divers relevages, le point  $t_1$  se déplacera sur la droite  $c_1 c_1'$ , qui en constitue ainsi le lieu géométrique. Celui de  $t'$  sera dès lors une droite parallèle. Pour que l'avance soit constante, il faut que la projection de l'extrémité du diamètre du cercle de Zeuner sur la ligne des points morts reste toujours la même, ou que  $c_1 c_1'$  soit perpendiculaire à la droite  $\omega m$ . Il suffit évidemment pour cela de disposer convenablement de la valeur du rapport  $\frac{\overline{FC_1'}}{\overline{FD}}$  des bras du balancier. Comme le lieu géométrique de  $t'$  est une droite parallèle, l'avance sera de même constante dans le mouvement relatif; et comme conséquence de ces deux circonstances, elle le sera encore dans le mouvement propre du taquet de détente.

En ce qui concerne la marche en arrière, le coulisseau  $T_1$  venant en  $C_1'$ , l'on devra porter  $\omega c$  au-dessous de la droite  $\omega m$ , et la figure se reproduira symétriquement sans aucune autre modification.

## § 2

### CONTRE-MANIVELLE

**742** — *Distribution Pius Finck.* La distribution de Pius Finck <sup>(1)</sup> est la première pour laquelle on ait emprunté la com-

<sup>(1)</sup> Zeuner. *Traité des distributions par tiroirs.* Traduction Debize et Mérijot, p. 155.

mande au prolongement de la manivelle motrice. Elle a été dès son origine très remarquée en raison de sa simplicité. Cependant son emploi ne s'est pas répandu à cause de l'usure rapide des organes, qui arrive bientôt à jeter de l'incertitude sur les résultats, et notamment sur la constance des avances, que l'auteur s'était proposé de réaliser. Elle a été abandonnée pour les locomotives, et ne se rencontre guère que dans quelques machines marines. Je me contenterai donc à son égard d'une simple description.

Sur l'arbre moteur O (fig. 450) est calée la manivelle A, et à

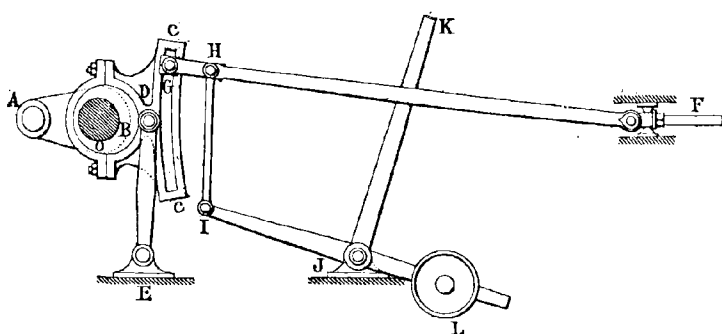


Fig. 450. — Distribution Pius Finck (élévation).

l'opposé l'excentrique B. Son collier C est assemblé en D à un levier DE, qui oscille sur le point fixe E, et assujettit l'articulation D à décrire un arc de cercle peu différent de la ligne des points morts OF. Ce collier porte en outre une coulisse, dans laquelle est engagé le bouton G, qui commande la bielle GF du tiroir. Le système de relevage de cette barre comprend une bride HI, que commande le levier coudé LJK, équilibré en L. On le manœuvre en agissant sur sa branche K. En rapprochant ainsi plus ou moins le coulisseau G

— Pichault. *Appareils de distribution par tiroirs*, p. 148. — Bienaymé. *Les machines marines*, p. 255. — Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 551. — Jenni. *Berg und Hüttenmännisches Jahrbuch der K. K. Schemnitzer Bergakademie*, t. VIII, 1859. — Von Grimburg. *Zeitschrift des österreichischen Ingenieur Vereins*, 1862. — Muller. *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure*, t. X, 1866. — Gustave Schmidt. *Ingenieur Vereins*, 1866. — Burgh. *Link motion and expansion Gear practically considered*, Londres, 1872.

du point mort de la coulisse, ou de chacune de ses extrémités, on arrive à communiquer au tiroir des mouvements respectivement opposés, et à en faire varier l'étendue.

**743** — *Distribution Deprez.* — Dans la distribution à contre-manivelle de M. Deprez (<sup>1</sup>), la tige AA du tiroir (fig. 431) est guidée

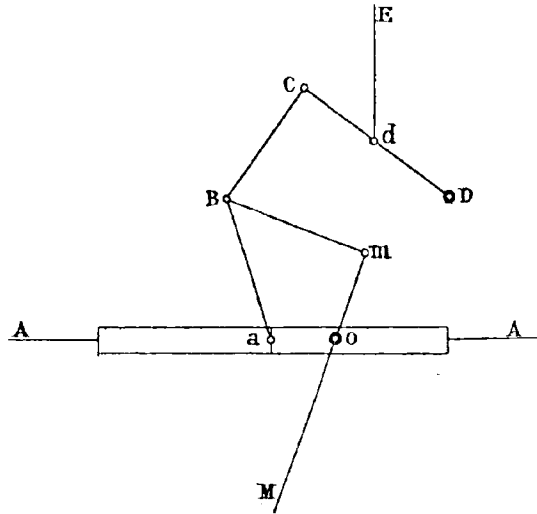


Fig. 451. — Distribution radiale Deprez (figure schématique).

en ligne droite, et porte une rainure qui embrasse l'arbre de rotation O. La manivelle motrice OM est prolongée par une contre-manivelle Om. De l'extrémité m de cette dernière, et du milieu a de la coulisse partent les branches égales mB, aB d'un compas, réunies en une articulation B (<sup>2</sup>).

(<sup>1</sup>) Combes. *Études analytiques sur la machine à vapeur*, p. 60. — Flachat. *Mémoires des Ingénieurs civils*, 19 novembre 1869, p. 519. — Chodzko. *Bulletin de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 2<sup>e</sup> série, t. VII, p. 381. — *Ibidem*. 1872, p. 45. — *Bulletin des anciens Elèves des Écoles d'arts et métiers*, janvier 1875. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1872. — *Engineering*, juin 1875. — Haton de la Goupillière. *Revue des progrès récents de la construction des machines à vapeur*. *Annales des mines*, juillet-août 1879, p. 143.

(<sup>2</sup>) Pour permettre le jeu de l'appareil, on réalisera le rayon fictif mB au moyen d'un excentrique (fig. 452), et le rayon aB à l'aide d'une rainure circulaire pratiquée dans la pièce A autour du point a.

Imaginons que l'on arrête la manivelle dans une série de positions  $M_1, M_2, M_3, \dots$ , constituant les instants remarquables du fonctionnement que l'on veut réaliser. Amenons de son côté le tiroir aux situations  $A_1, A_2, A_3, \dots$ , que l'on veut dans ce but attribuer à cet organe. Le compas obéit, et son sommet prend de lui-même certaines positions  $B_1, B_2, B_3, \dots$ . Supposons d'abord

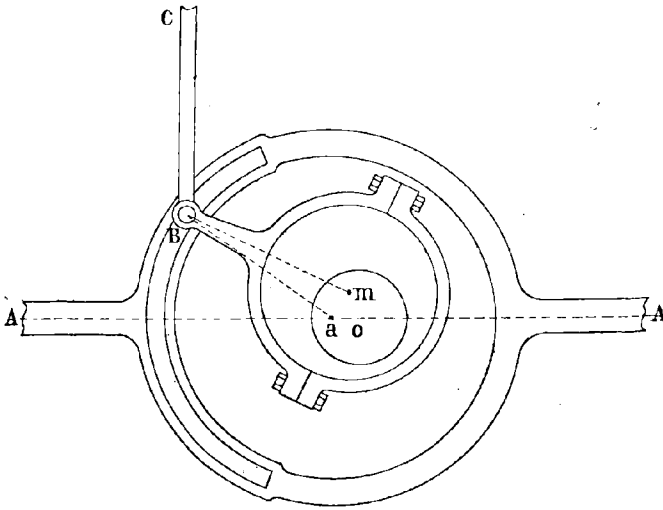


Fig. 452. — Distribution radiale Deprez (élévation).

que le problème que l'on se propose n'en comporte que trois. Dans ce cas, on fera passer un cercle par ces trois points  $B_1, B_2, B_3$ , et l'on déterminera son centre  $C$ , ainsi que son rayon  $CB$ . Puis on reliera le sommet du compas au centre ainsi trouvé, à l'aide d'un levier  $CB$ . Si alors on vient à effectuer la rotation continue de l'arbre, on est assuré que le tiroir prendra exactement les situations voulues aux instants considérés.

Si le problème était plus complexe, et comportait un plus grand nombre de points, on devrait se contenter d'une solution approximative, et déterminer un cercle qui se rapproche le mieux possible de toute la série des points  $B$  (\*). Il convient de remarquer toutefois

\* Léauté (Tracé pratique du cercle qu'il convient de substituer à une courbe donnée

que la solution rigoureuse qui précède concerne notamment le cas, qui est presque le seul de la pratique courante, où l'on impose *a priori* la détente et les avances; c'est-à-dire le commencement de l'admission anticipée, et la fin de l'admission proprement dite, dans chacune des deux courses. Cela constitue, à la vérité, quatre conditions au lieu de trois; mais la symétrie des deux courses, ainsi que celle du mécanisme les rendent conciliables entre elles.

Supposons, en second lieu, que l'on veuille pouvoir changer arbitrairement de régime, et obtenir, pour de nouvelles positions  $M'_1, M'_2, M'_3, \dots$ , de la manivelle, des situations  $A'_1, A'_2, A'_3, \dots$ , du tiroir. On opérera de la même manière, et l'on déterminera le centre  $C'$  d'un levier  $B'C'$ , capable de réaliser cet état de choses. Mais l'on aura soin de s'imposer en outre la condition :

$$\overline{B'C'} = \overline{BC}.$$

Il est bien clair que, pour un nombre quelconque de points, on sera encore plus gêné dans les tâtonnements que dans le cas précédent par cette nouvelle condition.

Toutefois je ferai remarquer que la solution restera rigoureuse, si l'on n'envisage que deux positions  $A'_1, A'_2$ ; car on pourra toujours faire passer par ces deux points un cercle de rayon donné  $BC$ . Or, ce cas se présentera précisément dans les conditions où l'on ne se préoccupe que de la variation de la détente <sup>(1)</sup>; c'est-à-dire de la fin de l'admission dans l'une et l'autre course. Admettons donc que l'on ait trouvé, pour ce nouveau régime, une seconde position  $C'$  de l'extrémité du levier constant  $BC$ .

Concevons enfin que l'on envisage ainsi toute une série d'allures, ou si l'on veut de crans de détente, pour lesquels on aura trouvé une suite de points  $C, C', C'', C'''\dots$ . On cherchera le centre  $D$  et le rayon  $CD$  d'un arc de cercle qui les comprenne tous; problème qui

dans une étendue finie. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 3 décembre 1877. — Étude sur le rapprochement de deux arcs de courbes voisins. Application au cas d'un cercle. *Ibidem*, 24 juin 1878).

(1) Nous reviendrons plus loin (p. 744) sur la question de la constance des avances.



comportera une solution rigoureuse si l'on ne s'impose que trois régimes différents, ou seulement approximative dans les autres cas. On articulera au *point fixe* D un levier CD, relié à l'extrémité du précédent, et on lui adaptera une bielle de relevage dE. Dès lors, si l'on vient à manœuvrer cette dernière, pour amener l'articulation aux divers points C, C', C'', ..., on est assuré de produire dans le moteur les résultats demandés.

**744** — Ce principe fournit la constance des avances. Pour le prouver, je ferai remarquer que lorsque la manivelle motrice passe aux points morts, la contre-manivelle se trouve couchée sur la direction du mouvement, dans une position  $Om_0$ . Le compas  $m_0Ba_0$  doit alors être replié sur lui-même, et  $a_0$  confondu avec  $m_0$ . Si en effet les droites  $Ba_0$ ,  $Bm_0$  étaient distinctes, on aurait deux obliques égales menées d'un même point B à la droite AA d'un même côté, et les mêmes raisonnements en donneraient autant de l'autre côté, ce qui est impossible. On voit donc que le point  $a$  de la bielle du tiroir se trouve toujours dans la même position  $m_0$ , lors du passage de la manivelle au point mort; et c'est précisément en cela que consiste la constance des avances.

### § 5

#### DISTRIBUTIONS RADIALES

**745** — *Distribution Pichault*. — Les systèmes dans lesquels on a supprimé tout excentrique, en prenant la commande en un point de la bielle motrice, ont pour type le plus général celui qui a été étudié par M. Pichault (\*). Cet ingénieur emploie respectivement, pour produire l'admission, la détente et l'échappement, trois tiroirs distincts, qui sont conduits par trois mécanismes de même nature.

(\*) Pichault (*Appareils de distribution par tiroirs*, p. 529. — *Génie civil*, t. VIII, 26 décembre 1885, 10 juillet 1886). — Haton de la Goupillière. *Revue des travaux scientifiques*, t. VI, p. 61.

On peut également affecter à ces fonctions trois doubles tiroirs, qui seront gouvernés respectivement par six appareils similaires. Il nous suffit d'en étudier ici un seul.

La figure 453 le représente dans sa réalité, et le tracé schématique (fig. 454) nous le montre réduit à ses axes. En un point A invariablement lié à la bielle motrice MB, s'articule la tringle AD, qui attaque en D le levier coudé DFE; celui-ci oscille sur le point fixe F, et commande par son autre extrémité la bride EG, qui conduit directement la bielle GH du tiroir. On a soin de s'attacher à ce

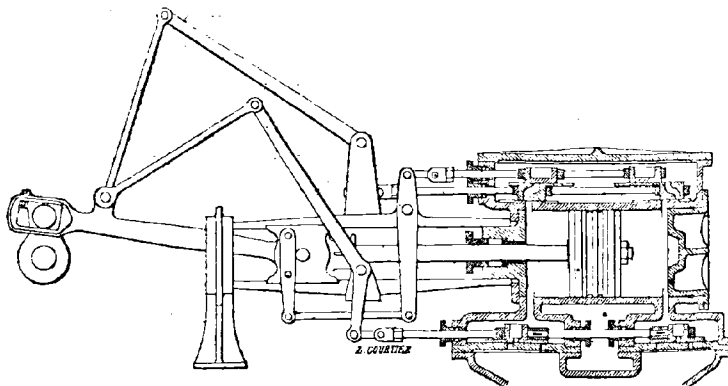


Fig. 453. — Distribution Pichault (coupe longitudinale).

que la droite menée par les positions  $D_0$ ,  $D'_0$  de l'articulation D, qui correspondent aux points morts  $M_0$ ,  $M'_0$  de la manivelle motrice, passe par le milieu C de la distance des situations correspondantes  $A_0$ ,  $A'_0$  de l'articulation A. De cette manière, la position moyenne du levier DF peut, avec une approximation très suffisante, être considérée comme rectangulaire sur cette droite  $CD_0D'_0$ . De même FE se trouve, dans sa position moyenne, perpendiculaire à la trajectoire du tiroir. On peut donc assimiler les espaces que décrit ce dernier, aux arcs de cercle parcourus par le point E, et ceux-ci (sauf le rapport  $\frac{\lambda'}{\lambda}$  des bras de levier) aux chemins parcourus par le point A en projection sur la droite  $CD_0D'_0$ , que nous prendrons pour axe des  $x$ . Nous emploierons toutefois provisoire-



tiroir. Je désignerai enfin par  $\xi$ ,  $\eta$  les coordonnées arbitraires de l'articulation A, relativement à l'axe MB de la bielle.

**746** — Il vient, dans ces conditions, si l'on projette successivement sur les axes X et Y le contour polygonal CPOMaA :

$$X = \xi + R \cos \varphi - \xi \cos \varepsilon + \eta \sin \varepsilon,$$

$$Y = \eta - R \sin \varphi - \xi \sin \varepsilon - \eta \cos \varepsilon.$$

On aura d'ailleurs, pour passer de ce système aux coordonnées  $x$ ,  $y$  :

$$x = Y \sin \alpha - X \cos \alpha,$$

si l'on désigne par  $\alpha$  l'inclinaison fixe de la droite CD<sub>0</sub>D'<sub>0</sub> sur la direction du mouvement du tiroir. Il vient, par conséquent, en effectuant la substitution :

$$\begin{aligned} x &= (\eta - R \sin \varphi) \sin \alpha - (\xi + R \cos \varphi) \cos \alpha \\ &- (\xi \sin \alpha + \eta \cos \alpha) \sin \varepsilon + (\xi \cos \alpha - \eta \sin \alpha) \cos \varepsilon. \end{aligned}$$

Pour exprimer la variable auxiliaire  $\varepsilon$  en fonction de l'angle de rotation  $\varphi$  de la manivelle, compté à partir du point mort M'<sub>0</sub>, nous avons directement dans le triangle OMB :

$$\frac{\sin \varepsilon}{R} = \frac{\sin (\varphi - 180)}{L},$$

ce qui donne :

$$-\sin \varepsilon = \frac{R}{L} \sin \varphi,$$

et, par suite, en employant une formule approximative <sup>(1)</sup> :

(1) On a en effet, quelle que soit la quantité  $m$ , l'identité :

$$\sqrt{1 - m + \frac{m^2}{4}} = 1 - \frac{m}{2}.$$

Si donc, lorsque  $m$  est une petite quantité, on néglige devant elle sous le radical  $\frac{m^2}{4}$ , il vient simplement :

$$\sqrt{1 - m} = 1 - \frac{m}{2}.$$

$$\cos \varepsilon = \sqrt{1 - \frac{R^2}{L^2} \sin^2 \varphi} = 1 - \frac{R^2}{2L^2} \sin^2 \varphi.$$

Cette nouvelle substitution donnera :

$$\begin{aligned} x &= (\eta - R \sin \varphi) \sin \alpha - (\xi + R \cos \varphi) \cos \alpha \\ &+ \frac{R}{L} \sin \varphi (\xi \sin \alpha + \eta \cos \alpha) \\ &+ \left(1 - \frac{R^2}{2L^2} \sin^2 \varphi\right) (\xi \cos \alpha - \eta \sin \alpha); \end{aligned}$$

c'est-à-dire, en effectuant toutes les réductions, et remplaçant  $x$  en fonction de l'élongation  $z$  du tiroir, comptée à partir du milieu de l'excursion de ce dernier :

$$\begin{aligned} \frac{\lambda}{\lambda'} \frac{z}{R} &= \left[ \left( \frac{\xi}{L} - 1 \right) \sin \alpha + \frac{\eta}{L} \cos \alpha \right] \sin \varphi - \cos \alpha \cos \varphi \\ &+ \frac{R}{2L^2} (\eta \sin \alpha - \xi \cos \alpha) \sin^2 \varphi, \end{aligned}$$

expression remarquablement simple, si l'on réfléchit à la complication et à l'entière généralité de ce mécanisme.

**747** — Il vient pour les excursions-limites :

$$\begin{aligned} \varphi = 0, & & z_0 &= -\frac{\lambda'}{\lambda} R \cos \alpha, \\ \varphi = 180, & & z'_0 &= \frac{\lambda'}{\lambda} R \cos \alpha. \end{aligned}$$

On remarquera que le terme de correction de l'expression de  $z$  :

$$\frac{\lambda'}{\lambda} \cdot \frac{R^2}{2L^2} (\eta \sin \alpha - \xi \cos \alpha) \sin^2 \varphi,$$

est très faible, car  $\frac{R^2}{2L^2}$  est au plus égal à  $\frac{1}{50}$  dans la pratique, en

même temps que  $\frac{\lambda}{\lambda'}$  et les trois facteurs trigonométriques sont inférieurs à l'unité. Si l'on en fait abstraction, l'expression de l'élongation prend la forme :

$$z = \frac{R\lambda'}{L\lambda} [(\xi - L) \sin \alpha + \eta \cos \alpha] \sin \varphi - \frac{R\lambda'}{\lambda} \cos \alpha \cos \varphi,$$

qui correspond à une courbe de marche exactement circulaire, comme dans le diagramme de Zeuner. Ce résultat devient d'ailleurs rigoureux, si l'on s'astreint à choisir les arbitraires  $\xi$ ,  $\eta$ , de manière à satisfaire à la condition :

$$\eta \sin \alpha - \xi \cos \alpha = 0,$$

ce qui donne :

$$\text{tang } \alpha = \frac{\xi}{\eta},$$

ou encore, dans le triangle MAa :

$$\alpha = \beta,$$

solution digne de remarque pour sa simplicité.

Cependant, au lieu de s'y assujettir directement, il sera plus logique de remarquer que l'analyse précédente néglige l'influence de l'obliquité de la tringle AD sur la droite CD<sub>0</sub>D'<sub>0</sub>, qui donnerait lieu à un terme de correction du même ordre que celui que nous avons supprimé. Il conviendra donc plutôt de formuler ce nouveau terme par les méthodes qui seront développées dans le chapitre XLIV, et de disposer, seulement alors, des arbitraires  $\xi$ ,  $\eta$  pour annuler, ou pour réduire au degré d'importance que l'on jugera convenable, l'influence de l'ensemble de ces termes, de manière à réaliser pour le tiroir le mouvement sinusoïdal proprement dit.

**748** — *Distribution Joy.* — La distribution de Joy <sup>(1)</sup> emprunte.

<sup>(1)</sup> Joy. On a reversing and expansion valve gear. *Proceedings of the Institution of mechanical Engineers*, août 1880, p. 418. — *Rules for laying down the centre line of the Joy valve gear for locomotives.* — Carrick. Joy's valve gear applied to locomotives. *Institution of civil Engineers*, 15 août 1888. — Demoulin. Mécanisme de distri-

comme la précédente, la commande à un point A de la bielle

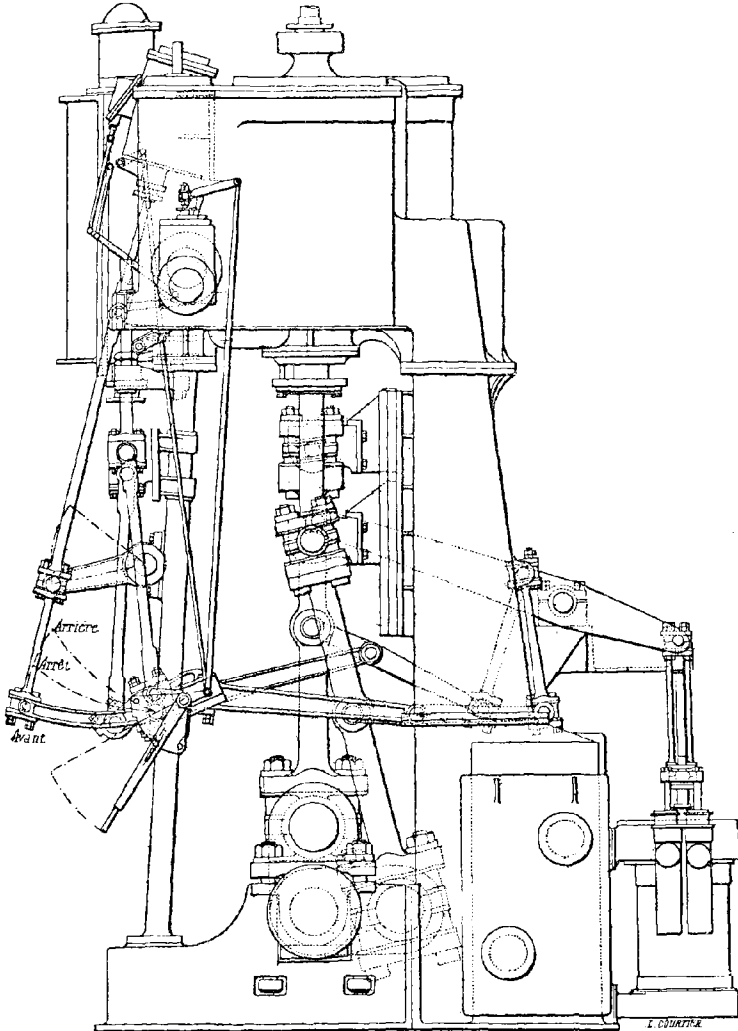


Fig. 435. — Distribution Joy (élévation).

motrice (fig. 435, 436), situé ou non sur son axe de figure. Une

bution à renversement, système Joy. *Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. XI, p. 33. — Madamet. *Considérations géométriques relatives aux systèmes Marshall, Joy, etc.*, in-8°. — Smith. *An historical and critical Examination of single eccentric*





dans une coulisse droite  $Hf$ , qui oscille sur son milieu  $f$ <sup>(1)</sup>. En  $G$  se trouve articulée la bielle  $GJ$ , qui attaque directement le tiroir.

Un peu bizarre dans son ensemble, ce dispositif présente, en raison du grand nombre de ses éléments arbitraires, une véritable élasticité d'adaptation à des conditions d'emplacement plus ou moins gênées, comme dans la marine et sur les locomotives. On arrive ainsi à modeler avec beaucoup de précision le mouvement du tiroir, de manière à l'identifier aux diverses conditions que l'on s'impose d'y réaliser. C'est ce qui peut expliquer la grande expansion qu'a reçue ce système dans la pratique, particulièrement en Amérique.

Lorsque l'on manque de place, on supprime tout le système EDF, en articulant directement  $E$  à l'extrémité d'une manivelle  $C'E$ , telle que  $CC' = AE$ . En effet le point  $A$  se meut comme  $M$ , en projection sur la droite  $OB$ . La distance à la ligne  $DC$  a donc pour valeur :

$$X = R \cos \varphi.$$

Celle du point  $E$  à cette même droite sera dès lors :

$$x = \frac{\overline{DE}}{\overline{DA}} R \cos \varphi.$$

De son côté le point  $E$  se meut, en projection sur  $CD$ , comme l'articulation  $A$ . Sa distance  $y$  à l'axe  $C'x$  sera donc la même que celle de  $A$  à la droite  $CB$  :

$$y = Y = \frac{\overline{BA}}{\overline{BM}} R \sin \varphi.$$

Il suffit d'après cela d'adopter la proportion :

$$\frac{\overline{DE}}{\overline{DA}} = \frac{\overline{BA}}{\overline{BM}},$$

<sup>(1)</sup> Dans d'autres cas, la coulisse est supprimée, et l'articulation  $H$  reliée au point fixe  $f$  par un compas  $Hf$  articulé en  $I$ .

pour déduire de ces deux relations :

$$x^2 + y^2 = \left( \frac{\overline{DE}}{\overline{DA}} R \right)^2,$$

équation d'un cercle qui a pour centre  $C'$ , et que l'on pourra réaliser au moyen d'une manivelle.

**749** — Il est aisé de représenter analytiquement la marche du tiroir  $J$ , évaluant l'abscisse  $x'$  du point  $G$ . Les segments  $EG$ ,  $EH$  de la tringle de renvoi sont entre eux comme les différences de coordonnées de leurs extrémités (lesquelles se changent en somme sur la figure 436, si nous introduisons dans le calcul les valeurs absolues de ces dernières) :

$$\frac{\overline{EG}}{\overline{EH}} = \frac{x + x'}{x + x''}.$$

On en déduit :

$$x' = \frac{\overline{GH}}{\overline{EH}} x + \frac{\overline{GE}}{\overline{EH}} x''.$$

Or nous possédons déjà la valeur de  $x$  :

$$x = \frac{\overline{DE}}{\overline{DA}} R \cos \varphi.$$

Il vient en outre, en fonction de l'angle de calage arbitraire  $\alpha$  :

$$x'' = y'' \operatorname{tang} \alpha.$$

Mais d'autre part le point  $H$  se mouvant, en projection sur la verticale, de la même manière que  $E$ , on peut écrire :

$$y'' = y = \frac{\overline{BA}}{\overline{BM}} R \sin \varphi.$$

Nous aurons donc :

$$x'' = \frac{\overline{BA}}{\overline{BM}} R \operatorname{tang} \alpha \sin \varphi,$$

et en substituant :

$$x' = \frac{\overline{GH}}{\overline{EH}} \cdot \frac{\overline{DE}}{\overline{DA}} R \cos \varphi + \frac{\overline{EG}}{\overline{EH}} \cdot \frac{\overline{BA}}{\overline{BM}} R \operatorname{tang} \alpha \sin \varphi,$$

ce qui reproduit la formule du mouvement sinusoïdal.

On aura pour les points morts de la manivelle motrice :

$$\begin{aligned} \varphi = 0, & \quad x'_1 = \frac{\overline{GH}}{\overline{EH}} \cdot \frac{\overline{DE}}{\overline{DA}} R, \\ \varphi = 180, & \quad x'_2 = - \frac{\overline{GH}}{\overline{EH}} \cdot \frac{\overline{DE}}{\overline{DA}} R, \end{aligned}$$

et comme valeur de la course du tiroir :

$$2R \cdot \frac{\overline{GH}}{\overline{EH}} \cdot \frac{\overline{DE}}{\overline{DA}},$$

c'est-à-dire celle du piston, réduite dans le rapport :

$$\frac{\overline{GH}}{\overline{EH}} \cdot \frac{\overline{DE}}{\overline{DA}}.$$

On remarquera que les valeurs de  $x'_1$  et  $x'_2$  sont indépendantes de l'angle de calage  $\alpha$ , d'où cette conséquence essentielle que les avances sont constantes.

#### § 4

#### EXCENTRIQUES VARIABLES

**750** — *Excentrique sphérique Tripier*. — Le théorème de Guinotte, rigoureux pour une coulisse droite et approximatif pour

celles qui présentent une faible courbure, nous montre que les mécanismes qui conduisent une coulisse à l'aide de deux excentriques

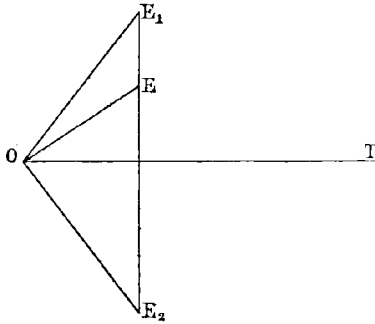


Fig. 437.

effectifs  $OE_1$ ,  $OE_2$  (fig. 437), ont à chaque instant pour équivalent un excentrique fictif  $OE$ , dont le centre  $E$  parcourt, suivant le degré de relevage, la perpendiculaire  $E_1E_2$  à la direction  $OT$  du mouvement du tiroir  $T$  <sup>(1)</sup>.

M. Tripier a imaginé, d'après cela, de supprimer tout le reste de l'appareil, en réalisant directement cet excentrique unique. A cet effet, il en assujettit le centre à décrire, non pas rigoureusement une droite,

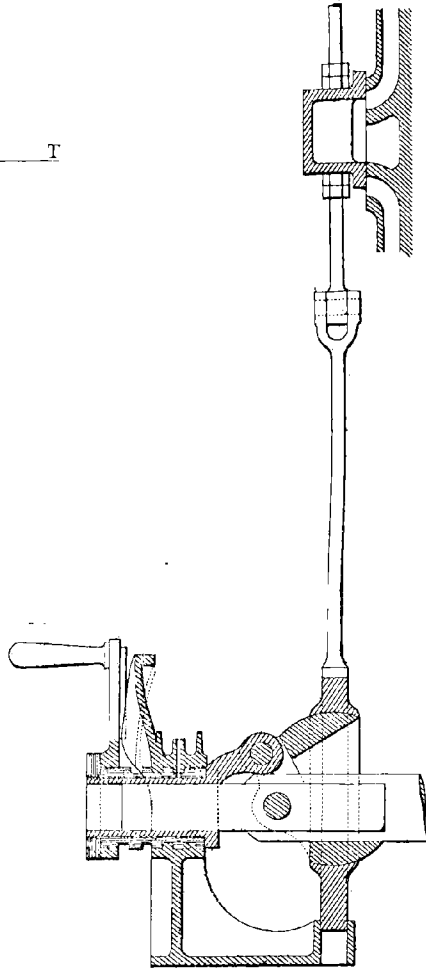


Fig. 458. - Excentrique sphérique Tripier (coupe).

(1) A ce point de vue, l'intérêt se réduit à peu près à la question de la constance des avances, et plus encore peut-être, de la simplicité et de la sûreté du fonctionnement. On trouve encore à se diriger dans le choix à faire, d'après cette circonstance que, suivant les cas, le prolongement de la glace du tiroir rencontre l'arbre moteur, ou forme un plan parallèle. Dans le premier, on emploie surtout les coulisses de Stephenson, de Gooch, d'Allan. Avec la seconde disposition, l'on aura plutôt recours aux distributeurs de Walschaert, de Joy ou de Marshall.

à la vérité, mais un arc de cercle d'une faible courbure, en le conduisant au moyen de l'une des branches d'un levier coudé, que l'on actionne par l'autre branche.

Cette conception rencontre à la vérité un obstacle immédiat dans la forme des surfaces cylindriques de contact employées pour les excentriques ordinaires; lesquelles se trouveraient ainsi déjetées

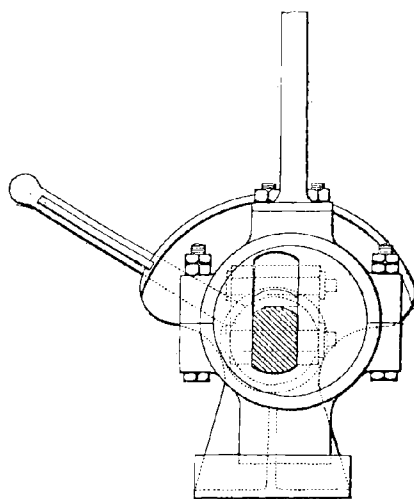


Fig 459. — Excentrique sphérique Tripier (élévation).

pour le noyau qui subit ces déplacements, sans l'être pour le collier, qui doit rester dans un plan fixe déterminé par le mouvement du tiroir. L'auteur a levé cette difficulté en leur substituant une surface sphérique (fig. 458, 459) partout identique à elle-même, capable par suite de permettre les déplacements transversaux, en même temps que le jeu mutuel qui doit s'opérer dans le plan du mouvement. Tel est l'excentrique sphérique Tripier <sup>(1)</sup>.

**751** — *Excentrique annulaire.* — On a obtenu le même résultat

<sup>(1)</sup> Pichault. *Appareils de distribution par tiroirs*, p. 371. — Coste et Maniquet. *Tracés pratiques des épures de distribution*, p. 226. — *Annales des mines*, 8<sup>e</sup> série, t. XVII, p. 474. — *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1884, p. 171. — *Génie civil*, t. VI, p. 208. — *Revue industrielle*, 31 octobre 1883. — *Annales industrielles*, 1883, t. II, p. 620. — *Proceedings of the Institution of civil Engineers*, août 1885, p. 422.

en superposant deux colliers d'excentriques, dont l'un enveloppe l'autre.

Soit en effet (fig. 440) un excentrique unique OE calé sur l'arbre moteur (par exemple à  $90^\circ$  de la manivelle motrice, sans avance

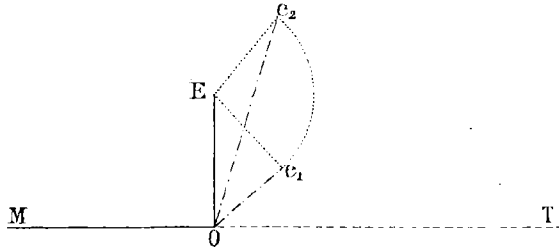


Fig. 440.

angulaire). Montons sur son noyau un *collier-noyau* d'excentrique, formant bague intermédiaire. Il portera le collier définitif, solidaire de la bielle de commande de la distribution. Si l'excentricité  $Ee$  de ce second organe peut varier, par rapport au premier, entre les limites  $Ee_1$ ,  $Ee_2$ , on obtiendra en définitive le même résultat qu'avec un excentrique fictif unique, dont l'excentricité oscillerait de  $Oe_1$  à  $Oe_2$  <sup>(1)</sup>.

**752** — *Excentrique Bonjour*. — La distribution *cinématique* <sup>(2)</sup> de M. Bonjour <sup>(3)</sup> est à deux tiroirs et à un seul excentrique (fig. 441). Les bielles A et B qui actionnent le tiroir proprement dit et la tuile de détente, s'articulent directement sur le collier. Quant à ce dernier, au lieu de l'installer comme à l'ordinaire avec un calage fixe et une avance angulaire déterminée, l'auteur lui attribue une *orientation* variable sous l'influence du régulateur. A cet effet, une troisième articulation le relie à une barre de suspension C, et

<sup>(1)</sup> Excentrique DEPAPE à course variable. — Excentrique MAC CARTER. *Scientific American*, 7 juin 1884, p. 555. — Excentriques VARNER, FRIEDRICH, HARTNELL et GETHRIE. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1875, p. 166, 169.

<sup>(2)</sup> Appelée ainsi par son auteur, pour la distinguer de son système de distribution mû directement par la vapeur (n° 755).

<sup>(3)</sup> Coste et Maniquet. *Tracés pratiques des épures de distribution*, p. 212. — *Congrès international de mécanique appliquée de 1889*, t. II, p. 195. — Buchetti. *Les machines à vapeur à l'Exposition de 1889*, p. 52.

au levier d'orientation D, commandé par la tige E du modérateur.

En disposant de la suspension au moyen d'un relevage, on peut assujettir l'articulation d'orientation sur des courbes très variables. En outre, le choix arbitraire de l'insertion des diverses articulations sur le collier vient encore augmenter le nombre des éléments dont on dispose, en vue des résultats à atteindre.

On se préoccupera d'abord de ne pas créer de réactions trop importantes sur le régulateur. On cherchera de plus à réaliser des avances aussi constantes que possible, ainsi que le degré de com-

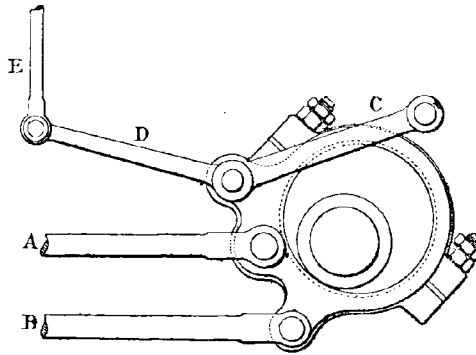


Fig. 441. — Distribution Bonjour (élévation).

pression voulu. On arrive, avec ce système, à obtenir les admissions les plus étendues, ainsi qu'une suffisante rapidité de l'ouverture et de la fermeture des lumières. M. Bonjour choisit les articulations de commande dans un rayon beaucoup plus rapproché de l'arbre, qu'on ne le fait d'ordinaire pour les distributions radiales. Il obtient par là une variabilité plus accentuée dans les trajectoires, depuis le profil circulaire ou ovoïde plus ou moins aplati, en passant par la forme en 8, pour arriver au type quasi triangulaire. La figure 442 donne une idée de ces modifications successives, dont l'auteur a su tirer parti avec une grande habileté, dans ces tâtonnements presque indéterminés.

Si le moteur vient à *s'emballer*, les orifices du tiroir de distribution restent constamment recouverts par le taquet de détente; toute admission cesse, et la machine s'arrête.

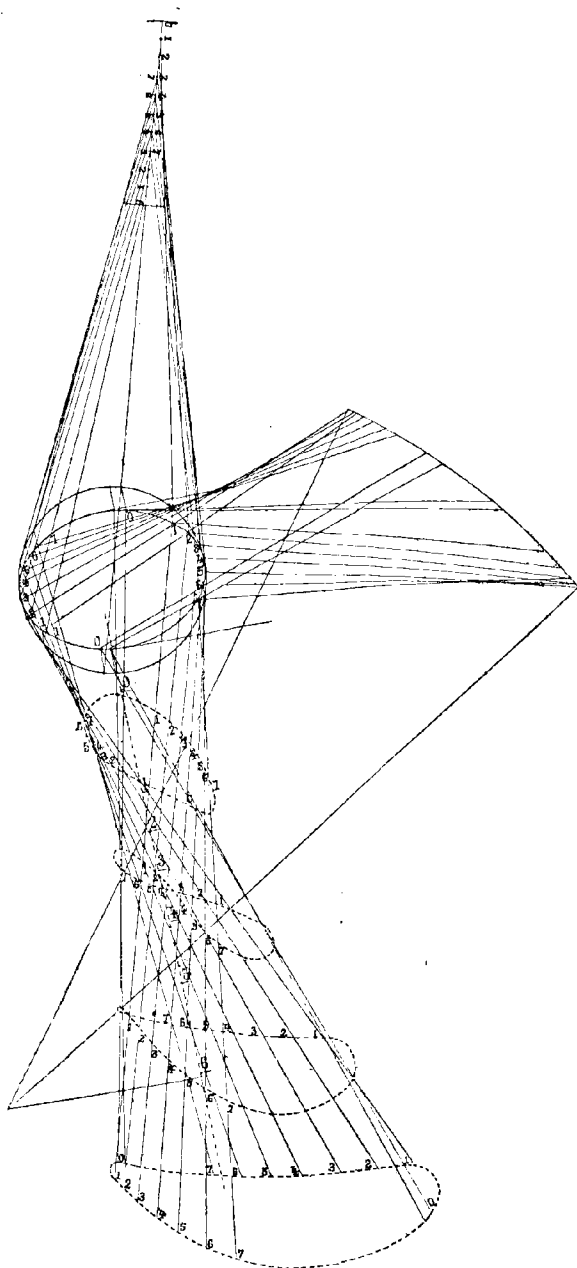


Fig. 442.



**753** — *Excentrique à toc.* — Je mentionnerai en terminant, quoique bien suranné, l'un des premiers mécanismes qui aient été employés pour réaliser le changement de marche. Il est connu sous le nom d'*excentrique à toc* <sup>(1)</sup>.

L'arbre et le noyau d'excentrique (fig. 443, 444) portent l'un et l'autre toc. On désigne sous ce nom des arcs en saillie AA', EE', ayant l'un et l'autre pour développement angulaire  $90^\circ + \alpha$ . Il en résulte, pour l'intervalle libre, la valeur  $180 - 2\alpha$ . L'excentrique, au lieu d'être calé invariablement sur l'arbre moteur, peut y jouer à frottement doux. Leur relation mutuelle ne s'établit que par le contact des deux tocs.

La figure 443 représente la marche directe. Le toc AA' de l'arbre moteur conduit celui EE' de l'excentrique par le contact des bords A et E'. L'excentrique occupe ainsi la position voulue pour la marche en avant, puisque son excentricité OE précède de  $90^\circ + \alpha$  dans le sens du mouvement la manivelle OA, que l'on a supposée au point mort.

La figure 444 est relative au sens rétrograde du mouvement. Le toc AA' de l'arbre conduit celui de l'excentrique EE' par le contact de A' avec E. On voit que ce dernier occupe en effet la position voulue pour la marche en arrière, son excentricité OE précédant encore, dans ce nouveau sens de rotation, la manivelle OA,

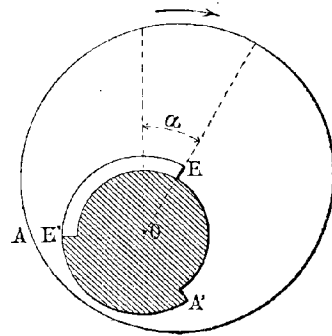


Fig. 443. — Excentrique à toc.  
(Marche en avant.)

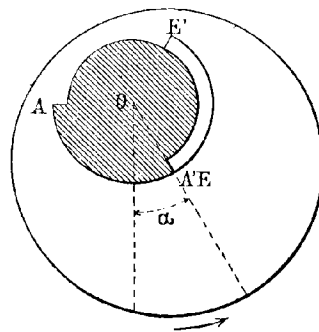


Fig. 444. — Excentrique à toc.  
(Marche en arrière.)

<sup>(1)</sup> Pichault. *Distributions par tiroirs*, p. 369. — Coste et Maniquet. *Tracés pratiques des épures de distribution*, p. 221. — Bienaymé. *Les machines marines*, p. 231.

considérée aussi à l'instant actuel comme passant par son point mort.

Pour exécuter la manœuvre, on commence par ralentir la machine, en fermant la valve. Quand la lenteur est suffisante, on déclenche l'ensellement qui sert à unir la bielle d'excentrique avec le bouton de la tige du tiroir, et l'on reporte à la main ce dernier, de la position qui correspond à la marche actuelle, à celle de la marche inverse. Le toc de l'arbre change par là de contact. On rétablit la connexion de la barre d'excentrique et du tiroir, et le mouvement se poursuit dans ce nouveau sens quand on rouvre le régulateur (4).

(4) On peut rattacher à ce principe le système de changement de marche FRANÇOIS DANGY, qui figurait à l'Exposition de 1889.

## CHAPITRE XLIII

### DISTRIBUTION ELLIPTIQUE

#### § 1

#### THÉORIE

**754** — On peut rattacher aux distributions radiales, dont l'étude nous a occupés dans le chapitre précédent, un système proposé par M. Marcel Deprez sous le nom de *distribution elliptique* <sup>(1)</sup>. Ses propriétés sont assez intéressantes pour que je croie utile de leur consacrer ici un examen détaillé.

Malgré la grande ingéniosité déployée par les constructeurs dans les innombrables dispositifs qui ont été fondés sur la combinaison de deux tiroirs superposés, une réaction sensible s'accroît de plus en plus en faveur du tiroir unique, ainsi que nous l'avons déjà dit (n° 718). La grande simplicité de ce système, et la sécurité qui en résulte pour un bon fonctionnement, tendent à faire passer par-dessus les inconvénients que nous lui avons reconnus (p. 99); d'autant mieux que les opinions se sont peu à peu modifiées relativement au rôle d'une longue compression (p. 155).

(1) Marcel Deprez. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, 19 novembre 1869, p. 519. — Pascal. Sur la distribution elliptique. *Bulletin de la Société des anciens Elèves des Écoles d'arts et métiers*, janvier 1875. — Combes (*Études sur la machine à vapeur*, p. 76. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1868). — Fouert Norbert. *Revue industrielle*, 2 août 1876. — Pichault. *Appareils de distribution par tiroirs*, p. 291. — Dwelshauvers-Dery. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXXIV, p. 172. — Poillon. *Cours de machines à vapeur*. — Peslin. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, mai 1889, p. 807.

Il n'en reste pas moins vrai que la complète dépendance mutuelle de toutes les phases d'une telle distribution constitue une gêne, dont il serait avantageux de pouvoir se dégager, si l'on peut y arriver sans sacrifier la simplicité de l'organe distributeur. Si par exemple nous allons jusqu'à imaginer que le tiroir soit dégagé de toute connexion avec l'arbre, et que le mécanicien le conduise à la main, comme dans la manœuvre du marteau-pilon à vapeur, l'on restera maître de disposer ces diverses périodes de la manière qui sera jugée la plus avantageuse pour chacune d'elles en particulier.

Une telle hypothèse est, bien entendu, irréalisable pour une machine de rotation d'un fonctionnement continu, sans même que l'on songe à la pousser aux grandes vitesses. Mais on peut, dans cet ordre d'idées, tout en rétablissant par la pensée une connexion mécanique entre le tiroir et l'arbre, la supposer réalisée d'après d'autres types que l'excentrique circulaire. Il nous est loisible à cet égard d'imaginer les dispositifs les plus divers, d'en établir et d'en discuter les équations, en vue de nous arrêter finalement à celui d'entre eux qui paraîtra préférable. On peut même s'épargner la conception concrète de tous ces mécanismes, et essayer directement les formules analytiques les plus simples pour en apprécier les avantages respectifs. On n'aura plus, après avoir fait choix définitivement de la plus favorable, qu'à entreprendre, seulement alors, de la réaliser à l'aide d'un appareil approprié.

Sans vouloir étendre ici une telle recherche au delà de ce qui serait raisonnable, je me contenterai d'examiner sous cet aspect une relation très simple, qui a été envisagée par M. Deprez.

**755** — Imaginons un ensemble constitué de la manière suivante. En premier lieu, un moteur dont la vitesse est maintenue constante par un volant puissant, de telle sorte que l'angle  $\varphi$  ainsi décrit soit proportionnel au temps. Nous l'appellerons, pour fixer le langage, la *machine réelle*, en lui associant par la pensée une *machine fictive*, dont l'axe serait tellement lié au précédent qu'il décrive corrélativement des angles  $\theta$  fournis par l'équation suivante:

$$(1) \qquad \text{tang } \theta = m \text{ tang } \varphi,$$

avec cette condition essentielle que le *module*  $m$  soit supérieur à l'unité :

$$m > 1.$$

C'est l'arbre de cette machine fictive qui portera l'excentrique destiné à commander le tiroir de la machine réelle. Il est bien clair que, dans ces conditions, la distribution ainsi réglée sous l'influence des angles  $\theta$ , sera tout à fait différente de celle qui serait gouvernée, dans les conditions ordinaires, d'après les angles  $\varphi$ ; et c'est cette modification des diverses phases du phénomène que nous avons à examiner en détail.

**756** — La relation mutuelle des positions simultanées des pistons des deux machines peut s'exprimer facilement au moyen d'une ellipse; et c'est pour ce motif que M. Deprez a donné à ce système le nom de distribution elliptique.

Décrivons à cet effet un cercle, en prenant la course des pistons comme diamètre. Nous en ferons également le grand axe d'une ellipse, présentant comme rapport de ses axes le module  $m$ . On sait que, pour une abscisse quelconque OF (fig. 445), ce même rapport subsistera entre les ordonnées FM, FN des deux courbes. Traçons le rayon ON jusqu'en  $M_1$ , ainsi que l'ordonnée  $M_1R$ . On aura identiquement :

$$\text{tang } \overline{MOF} = \frac{\overline{MF}}{\overline{OF}}, \quad \text{tang } \overline{NOF} = \frac{\overline{NF}}{\overline{OF}},$$

et en divisant membre à membre :

$$\text{tang } \overline{MOF} = \frac{\overline{MF}}{\overline{NF}} \text{ tang } \overline{M_1OR},$$

c'est-à-dire précisément la relation (1).

On voit donc que le piston réel R et le piston fictif F décrivent leurs courses respectives en restant reliés par la construction du polygone  $FMONM_1R$ . De cette propriété fondamentale découlent diverses conséquences.

**757** — Les deux pistons arrivent ensemble au milieu O de leur course, pour lequel le polygone se replie entièrement suivant le rayon vertical du cercle.

Dans le premier quadrant de la révolution, le piston fictif précède le piston réel. C'est ce que montre immédiatement la figure 445 (1).

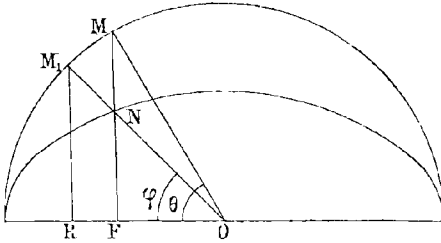


Fig. 445.

Il s'ensuit par symé-

(1) La vitesse du piston réel est donc d'abord moindre que celle du piston fictif, mais elle finit par devenir supérieure, puisque ce dernier doit rejoindre l'autre au milieu de la

course. Il existe par suite un point pour lequel ces deux vitesses sont égales.

Pour le déterminer, nous remarquerons que les distances des pistons au centre sont marquées par  $\cos \varphi$  et  $\cos \theta$ . On peut donc prendre pour expression de leurs vitesses

$$\frac{\sin \varphi d\varphi}{dt} = \frac{\sin \theta d\theta}{dt}.$$

Mais on a d'un autre côté, en différenciant l'équation (1) :

$$(2) \quad \frac{d\theta}{\cos^2 \theta} = \frac{d\varphi}{\cos^2 \varphi},$$

ce qui donne en multipliant membre à membre :

$$\sin \varphi \cos^2 \varphi = m \sin \theta \cos^2 \theta.$$

On en déduit :

$$\frac{\tan \varphi}{(1 + \tan^2 \varphi)^{\frac{3}{2}}} = m \frac{\tan \theta}{(1 + \tan^2 \theta)^{\frac{3}{2}}} = m^2 \frac{\tan \varphi}{(1 + m^2 \tan^2 \varphi)^{\frac{3}{2}}}.$$

et enfin :

$$\tan \varphi = \sqrt{m^{-\frac{2}{3}} + m^{-\frac{4}{3}}}.$$

On aurait, par exemple, pour :

$$m = 2 \quad , \quad \varphi = 45^{\circ} 22' 43''.$$

Nous pouvons également déterminer le point pour lequel les deux arbres tournants se trouvent animés de la même vitesse angulaire.

En faisant pour cela dans l'équation (2) :  $d\theta = d\varphi$ , on obtient :

$$\cos^2 \varphi = m \cos^2 \theta,$$

trie que, dans le second quadrant, le piston fictif suit au contraire le piston réel. La figure 446 met également ce fait en évidence, si l'on fait attention que les angles comptés dans le même sens que précédemment deviennent alors obtus, et leurs tangentes négatives. Le signe algébrique disparaît de l'équation ; mais, au plus grand angle, correspond alors la plus petite tangente en valeur absolue.

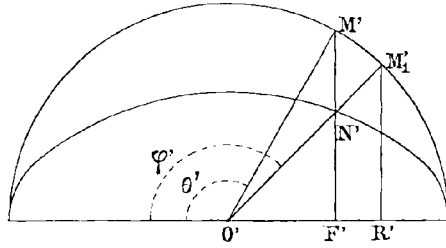


Fig. 446.

Comme c'est le piston fictif qui conduit le tiroir réel, on voit que ce dernier atteindra *plus tôt*

qu'avec le mode ordinaire celles de ses positions qui sont comprises dans le *premier* quadrant, et *plus tard* au contraire celles du *second* quadrant.

La durée des phases *comptée à partir du point mort d'amont* sera donc raccourcie, quand elles se terminent dans le premier quadrant, et allongée, lorsqu'elles aboutissent dans le second.

Plus généralement, on reconnaît que la durée des phases évaluée à partir de l'un quelconque des points morts est raccourcie quand elles se terminent dans le quadrant qui leur est adjacent, et allongée quand elles ont leur extrémité dans l'autre.

Sous une forme encore plus condensée, bien qu'un peu moins

c'est-à-dire :

$$m(1 + \operatorname{tang}^2 \varphi) = 1 + \operatorname{tang}^2 \theta = 1 + m^2 \operatorname{tang}^2 \varphi.$$

On tire de là :

$$\operatorname{tang} \varphi = \frac{1}{\sqrt{m}},$$

et par suite :

$$\operatorname{tang} \theta = \sqrt{m}.$$

La position cherchée est donc celle pour laquelle les deux azimuts sont complémentaires.

On aura, en particulier, pour  $m = 2$  :

$$\varphi = 55^{\circ} 45' 8'' 19 \quad ; \quad \theta = 54^{\circ} 14' 61'' 81.$$

claire, nous dirons que les phases courtes sont raccourcies et les phases longues allongées; ou enfin, pour tout embrasser dans une formule unique : que le caractère de durée des périodes s'accuse encore davantage avec la distribution elliptique que dans le système ordinaire.

Passons en revue, à la lumière de cet énoncé, les diverses phases fondamentales de la distribution.

**758** — 1<sup>o</sup> PLEINE PRESSION ET DÉTENTE. — *Premier cas : courte admission, longue détente.* — Les courtes admissions sont celles qui se terminent dans le premier quadrant. Elles seront encore raccourcies. Lors donc que l'on s'attache à prolonger la détente dans des vues d'économie, le mode elliptique procure pour cela plus de facilités que le système ordinaire, dont c'est le plus grand écueil.

*Second cas : longue admission, courte détente.* — Les longues admissions sont celles qui atteignent le second quadrant. Elles seront encore allongées. Par suite, quand on se propose cet objectif, inverse du précédent, en vue d'obtenir plus de puissance et de régularité, l'on trouvera également plus d'avantage dans l'emploi du système elliptique.

Il placera notamment dans de meilleures conditions le démarrage des machines d'extraction. En effet, pour cet instant, où l'on mettra certainement le levier de changement de marche à un cran de longue admission, l'on introduira encore plus de vapeur avec le mode elliptique qu'avec le système ordinaire, ce qui aura pour effet d'augmenter la puissance d'enlèvement.

Le laminage se trouve atténué, car nous avons vu (n<sup>o</sup> 656) que ses effets fâcheux sont surtout concentrés dans les plus faibles démasquements. Or les courtes périodes sont encore raccourcies. On franchira donc plus rapidement cette zone nuisible. Il est même facile d'indiquer la mesure précise de l'avantage ainsi réalisé. En effet les espaces parcourus par le piston sont en raison de la fonction  $1 - \cos \varphi$ , que nous pouvons, pour les petits angles, réduire à  $\frac{\varphi^2}{2}$  par le développement en série. Or la relation fondamentale (1)



prend alors elle-même la forme approximative :

$$\theta = m\varphi.$$

On voit donc, puisque  $\varphi$  mesure le temps, et  $\frac{\theta^2}{2}$  le nouveau parcours, que ce dernier se trouve, pour un même instant, amplifié dans le rapport de 1 à  $m^2$ ; ou, en d'autres termes, que la durée de la traversée d'un même parcours est raccourcie dans le rapport inverse. Si, par exemple, on emploie une ellipse dont les axes soient doubles l'un de l'autre, l'activité du démasquement, pour les premiers instants, se trouve quadruplée.

2° ÉCHAPPEMENT ANTICIPÉ ET COMPRESSION. — Nous savons qu'en l'absence de recouvrement intérieur, ces deux phases coexistent sur les faces opposées du piston. Comme d'ailleurs ces fonctions doivent toujours être maintenues dans des limites modérées, elles seront essentiellement, par rapport au point mort d'aval, au nombre de celles que nous appelons courtes, et par suite se trouveront encore raccourcies. On trouvera par conséquent, tout en avançant la détente; une amélioration corrélative sous ces derniers points de vue; tandis que, dans les conditions ordinaires, ces diverses questions se trouvent placées en antagonisme (n° 629).

3° ADMISSION ANTICIPÉE. — Cette phase étant essentiellement courte, se trouvera encore abrégée; ce qui revient à dire que l'on trouvera encore plus de facilité pour réaliser l'avance à l'admission.

**759** — Envisageons maintenant la valeur de la course du tiroir. Cet examen va nous montrer que les longues courses se trouvent raccourcies, et les petites allongées. Il en résultera que les premières, qui risquent d'exagérer le travail de frottement de cet organe sur sa glace, deviendront moins nuisibles; en même temps qu'avec les autres, qui exposent à augmenter l'étranglement en insistant plus longtemps sur les petits démasquements, cet inconvénient se trouvera de même atténué.

Ajoutons que la longueur de la course se trouvant ainsi diminuée à la fois par les deux extrémités, on aura, d'une manière générale, moins de parcours à effectuer dans les relevages, et par suite moins de travail à demander pour cette manœuvre au bras du mécanicien.

PREMIER CAS. — Supposons en premier lieu que l'on veuille couper la vapeur quand le piston réel se trouve en  $R'$ , dans la seconde moitié de sa course (fig. 447). S'il conduisait lui-même son

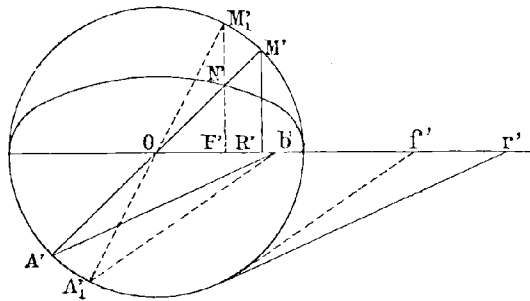


Fig. 447.

tiroir, nous devrions, pour trouver la position correspondante de ce dernier au moyen du diagramme de M. Marcel Deprez (p. 648), déterminer en  $M'$  le bouton de la manivelle, et en  $A'$  le point-opposé, joindre celui-ci à l'extrémité  $b'$  du recouvrement  $\rho$ , puis mener parallèlement à cette droite  $A'b'$  une tangente qui aboutit en  $r'$ . Mais comme c'est au contraire la machine fictive qui conduit le tiroir, il nous faut exécuter la même construction en partant, non plus de  $R'$ , mais du point  $F'$ , que nous fournira le polygone  $R'M'N'O'M_1'F'$  (p. 273). Nous déterminerons donc le point  $A_1'$  opposé à  $M_1'$ , pour le joindre à  $b'$ , et mener la tangente parallèle qui fournit le point cherché  $f'$ , extrémité de la course du tiroir.

Or, dans le second quadrant,  $F'$  se trouve à gauche de  $R'$ , par suite  $M_1'$  à gauche de  $M'$ , et  $A_1'$  à droite de  $A'$ . La droite  $A_1'b'$  sera donc plus inclinée que  $A'b'$ , et par suite  $f'$  plus rapproché du centre que  $r'$ ; ce qu'il fallait démontrer.

SECOND CAS. — Supposons actuellement que l'on coupe la vapeur dans le premier quadrant, lorsque le piston réel est en R (fig. 448). Nous tracerons la figure RMOA $b'$ ; et la tangente parallèle à A $b'$  nous donnera en  $r$  la position du tiroir, au moment du maximum d'élongation que lui communiquerait, dans les conditions ordinaires, la commande par la machine réelle. Pour obtenir, au contraire, la situation extrême  $f$  due à la connexion que nous avons établie entre le tiroir et la machine fictive, nous chercherons, à l'aide du

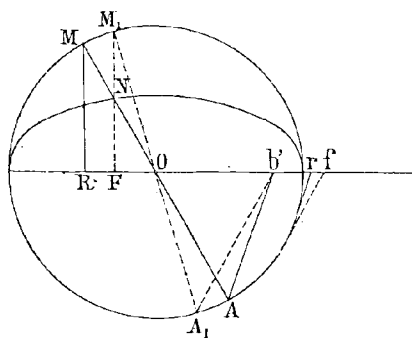


Fig. 448.

polygone RMNOM $_1$ F, le piston fictif F, et le point A $_1$  opposé à la manivelle M $_1$ . En tirant A $_1b'$ , nous aurons ensuite à mener une tangente, qui sera plus rapprochée de l'horizontale que la précédente, et aboutira en un point  $f$  plus éloigné que  $r$ . En effet, dans le premier quadrant, F est à droite de R, M $_1$  à droite de M, A $_1$  à gauche de A, et la droite A $_1b'$  moins inclinée que A $b'$ .

## § 2

## MECANISME

**760** — Cette discussion met en relief les nombreux avantages que procurera la relation (1), si l'on parvient à l'établir entre l'angle  $\varphi$ , réellement décrit par l'arbre du volant, et la rotation  $\theta$

d'un axe auxiliaire, qui serait chargé de conduire le tiroir à l'aide de la transmission ordinaire. Il y a donc lieu maintenant de rechercher la réalisation effective d'une telle connexion.

Remarquons d'abord que le répertoire classique de la cinématique appliquée nous en fournit immédiatement une solution complètement rigoureuse, dans le *joint hollandais* ou *joint universel* <sup>(1)</sup>, qui sert précisément à établir cette relation entre deux arbres tournants.

Il est toutefois certain qu'une telle combinaison ne serait pas goûtée par les constructeurs, pour des moteurs de quelque importance. M. Marcel Deprez a donc été amené à en constituer une autre plus pratique. Elle n'est à la vérité qu'approximative, mais il importe peu ; car un faible écart, par rapport aux constructions exactes qui précèdent, laissera subsister, sans aucune modification dans les termes, tous nos énoncés, qui ne constituent que de simples comparaisons ; lesquelles ont été reconnues favorables de tous points au système elliptique.

**761** — Sur l'arbre moteur  $O$  (fig. 449) est monté un plateau

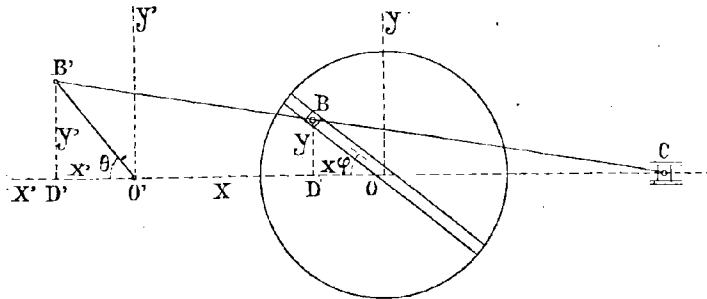


Fig. 449. — Distribution elliptique Deprez (figure schématique).

circulaire, portant une rainure diamétrale qui nous représente le bras de manivelle réel  $OB$ , dont le bouton  $B$  est porté par un coulisseau engagé dans cette coulisse droite. Une bielle  $BC$  le relie à la crosse  $C$  du piston. Le prolongement de cette bielle attaque en  $B'$

<sup>(1)</sup> Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 202.

la manivelle  $B'O'$  de l'arbre  $O'$ , qui porte l'excentrique du tiroir, et correspondra ici à la machine fictive.

Cherchons en effet la relation mutuelle des angles  $\varphi$  et  $\theta$  que décrivent simultanément ces deux rayons. Je rapporte pour cela les boutons  $B$  et  $B'$  à des axes rectangulaires  $XOY$ ,  $X'O'Y'$ . Il vient en toute rigueur :

$$\text{tang } \varphi = \frac{y}{x}, \quad \text{tang } \theta = \frac{y'}{x'},$$

et dans les triangles semblables  $CBD$ ,  $C'B'D'$  :

$$y' = my,$$

en désignant par  $m$  le rapport des longueurs  $CB'$  et  $CB$ . On a de plus approximativement :

$$x' = x,$$

si l'on néglige, comme nous l'avons toujours fait jusqu'ici, l'influence de l'obliquité de la bielle. On déduit de là, en divisant membre à membre :

$$\text{tang } \theta = m \text{ tang } \varphi;$$

ce qu'il fallait démontrer.

Ces relations permettent encore de déduire de l'équation du cercle :

$$x'^2 + y'^2 = 1,$$

celle de la trajectoire que parcourt le coulisseau  $B$  :

$$x^2 + m^2 y^2 = 1.$$

On reconnaît ainsi que, sauf l'influence de l'obliquité, cette dernière est une ellipse semblable à celle qui figure dans les construc-

tions fondamentales (fig. 445 et 446). De là un second motif pour justifier la dénomination de distribution elliptique (1).

(1) Ce système a été réalisé par M. Deprez sur une machine fixe de la maison Combe à Lyon. Ce moteur de 25 chevaux consommait par cheval-heure 1<sup>m</sup>.850 d'un mauvais charbon à 23 0/0 de cendres.

Un dispositif plus complexe (*Revue industrielle*, 2 août 1876, p. 206) a également été installé sur la locomotive n° 2430 de la Compagnie du chemin de fer du Nord. Cette machine a parcouru, de 1874 à 1877, un total de 30 701 kilomètres, à raison de 8<sup>m</sup>.147 de charbon par kilomètre; tandis qu'avant sa transformation elle consommait 10<sup>m</sup>.100. Les diagrammes relevés à l'indicateur ont montré que le laminage de la vapeur était beaucoup diminué. Malgré ces expériences favorables, ce système ne paraît pas s'être répandu.

Le dispositif précédent a été, dans des vues toutes différentes, interverti par M. Lissignol (Pichault. *Appareils de distribution par tiroirs*, p. 86 et 158), en substituant l'un à l'autre l'arbre moteur et le plateau à rainure du coulisseau de distribution.

## CHAPITRE XLIV

### INFLUENCE DE L'OBLIQUITÉ — TIROIR

—

#### § 1

#### DISTRIBUTION PAR TIROIR UNIQUE

**762** — Toutes les théories précédentes ont été établies dans l'hypothèse des bielles infinies. Quand il s'agit de machines fixes, pour lesquelles on n'est pas ordinairement trop gêné en ce qui concerne l'emplacement, on s'attache à leur donner une longueur importante : au moins cinq fois, mais rarement plus de six fois celle de la manivelle motrice ; et encore davantage pour le rapport des barres d'excentrique à l'excentricité qui les gouverne. On se voit, au contraire, obligé par le défaut d'espace de descendre à des rapports beaucoup moindres dans les locomotives ou les machines marines. Il convient donc, sous ce rapport, de considérer alors la théorie qui précède comme constituant seulement une première approximation, et de nous attacher maintenant à déterminer les corrections qu'il y a lieu d'y apporter, afin de tenir compte de l'influence de l'obliquité, lorsque cela devient nécessaire (\*). Reprenons à ce point de vue la théorie de la distribution ordinaire par tiroir unique (chap. xxxvi).

Nous représenterons par E (fig. 450) le centre de l'excentrique,

\* Zeuner. *Traité des distributions par tiroirs*. — Combes. *Études analytiques sur la machine à vapeur*, p. 1. — Marcel Deprez. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1872, t. XXXI, p. 18.

par  $e$  son excentricité  $OE$ , et par  $ET$  la longueur  $b$  de la barre d'excentrique qui le réunit à l'extrémité de la tige du tiroir. La position  $t$  que nous avons considérée jusqu'ici, s'obtenait en prenant la distance  $At = b$ . Elle diffère donc de la situation exacte par un écart  $Tt$  qui constitue, relativement à la théorie des bielles infinies, un *retard* dans la *course directe*, dirigée de  $O$  vers  $T$ , et au contraire une *avance* pour la *course rétrograde*, dont le sens est de  $T$  vers  $O$ .

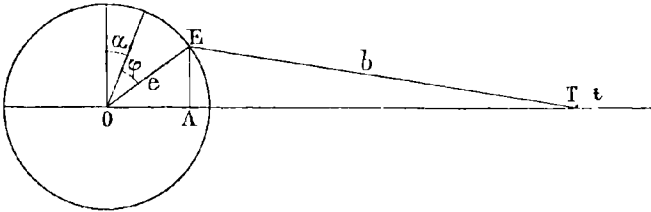


Fig. 450.

Cette remarque a son importance. L'on voit, par exemple, que l'influence en question affecte les deux avances dans des sens opposés. Il est arrivé parfois pour ce motif, lorsque le tiroir présente des dimensions suffisantes, qu'on lui donne des recouvrements extérieurs différents l'un de l'autre, à savoir  $\rho - \varepsilon$  pour celui d'entre eux qui est situé du côté de l'axe, et  $\rho + \varepsilon$  pour l'autre; en désignant par  $\rho$  le recouvrement théorique, et par  $\varepsilon$  la valeur que prend, au moment de l'ouverture de l'admission, le terme de correction; valeur qui est d'ailleurs fort petite, comme nous allons le reconnaître.

**763** — L'évaluation générale de ce terme de correction peut se faire par le calcul de la manière suivante (\*).

La distance  $OT$  de l'arbre à l'articulation de la tige du tiroir a pour valeur :

(\*) Dans la pratique, on opère plutôt par tâtonnement; et cette opération s'appelle *réglage du tiroir*. Elle consiste à déterminer la longueur de la tige, de manière à obtenir des avances égales. On a parfois cherché à faciliter cette manœuvre en interposant un écrou de réglage. Mais cette facilité même expose ensuite à un usage intempestif de l'appareil, qui serait de nature à dérégler la distribution.



$$\begin{aligned} \overline{OT} &= \overline{OA} + \overline{AT} \\ &= e \sin (\varphi + \alpha) + \sqrt{b^2 - e^2 \cos^2 (\varphi + \alpha)}. \end{aligned}$$

Si l'on fait alternativement  $\varphi = 0$ , et  $\varphi = 180^\circ$ , on aura pour les abscisses qui correspondent aux points morts de la manivelle :

$$\begin{aligned} OT' &= \sqrt{b^2 - e^2 \cos^2 \alpha} + e \sin \alpha, \\ \overline{OT''} &= \sqrt{b^2 - e^2 \cos^2 \alpha} - e \sin \alpha; \end{aligned}$$

et pour le milieu  $T_0$  de leur distance :

$$\overline{OT_0} = \sqrt{b^2 - e^2 \cos^2 \alpha}.$$

Si donc on rapporte la position variable du tiroir à cette situation moyenne  $T_0$ , au moyen de son élongation  $Z$ , il viendra :

$$Z = e \sin (\varphi + \alpha) + \sqrt{b^2 - e^2 \cos^2 (\varphi + \alpha)} - \sqrt{b^2 - e^2 \cos^2 \alpha}.$$

En comparant cette formule à celle que nous avons obtenue (p. 84) pour le cas des bielles infinies :

$$z = e \sin (\varphi + \alpha),$$

l'on voit que le terme de correction  $\varepsilon$ , qui permet de passer de l'une à l'autre, a pour valeur :

$$\varepsilon = \sqrt{b^2 - e^2 \cos^2 (\varphi + \alpha)} - \sqrt{b^2 - e^2 \cos^2 \alpha},$$

ce qui permet de le mettre sous la forme :

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{[b^2 - e^2 \cos^2 (\varphi + \alpha)] - [b^2 - e^2 \cos^2 \alpha]}{\sqrt{b^2 - e^2 \cos^2 (\varphi + \alpha)} + \sqrt{b^2 - e^2 \cos^2 \alpha}} \\ &= \frac{e^2}{b} \cdot \frac{\cos^2 \alpha - \cos^2 (\varphi + \alpha)}{\sqrt{1 - \left[\frac{e}{b} \cos (\varphi + \alpha)\right]^2} + \sqrt{1 - \left[\frac{e}{b} \cos \alpha\right]^2}}. \end{aligned}$$

Or  $\frac{e}{b}$  doit garder dans tous les cas une faible valeur. Son produit par un cosinus, et surtout le carré de ce produit, constituent donc une quantité du second ordre, que nous négligerons devant l'unité (1). Il vient dans ces conditions :

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{e^2}{2b} [\cos \alpha + \cos (\varphi + \alpha)] [\cos \alpha - \cos (\varphi + \alpha)] \\ &= \frac{2e^2}{b} \cos \left( \alpha + \frac{\varphi}{2} \right) \cos \frac{\varphi}{2} \sin \left( \alpha + \frac{\varphi}{2} \right) \sin \frac{\varphi}{2},\end{aligned}$$

et enfin :

$$\varepsilon = \frac{e^2}{2b} \sin \varphi \sin (\varphi + 2\alpha).$$

Telle est la forme qui a été donnée par M. Zeuner au terme de correction, et à l'aide de laquelle on peut écrire, pour l'élongation du tiroir :

$$Z = e \sin (\varphi + \alpha) + \frac{e^2}{2b} \sin \varphi \sin (\varphi + 2\alpha).$$

**764** — Le nouveau terme s'annule pour les quatre valeurs suivantes de  $\varphi$  :

$$0, \quad 180 - 2\alpha, \quad 180, \quad 360 - 2\alpha.$$

Elles représentent deux systèmes de positions diamétralement opposées de la manivelle, à savoir les deux points morts et les situations que nous avons autrefois (p. 86) désignées par  $\varphi_5$  et  $180 + \varphi_5$ . Ce terme ne modifie donc nullement la détente, et fort peu l'avance à l'admission, qui est voisine des points morts.

Sa plus grande influence correspond au maximum de la fonction :

$$\sin \varphi \sin (\varphi + 2\alpha).$$

(1) Vidal, en développant cette expression en série, a dressé une table numérique de la valeur des premiers termes, d'après une échelle de valeurs du rapport  $\frac{r}{l}$  (*Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*, 1864, p. 506).

Il nous sera fourni par l'équation dérivée :

$$\sin \varphi \sin (\varphi + 2\alpha) + \cos \varphi \sin (\varphi + 2\alpha) = 0,$$

que l'on peut mettre sous la forme très simple :

$$\sin 2 (\varphi + \alpha) = 0.$$

On y satisfait par les quatre valeurs :

$$90 - \alpha, \quad 180 - \alpha, \quad 270 - \alpha, \quad 360 - \alpha.$$

De là deux groupes de positions diamétralement opposées de la manivelle. Le premier correspond à l'angle  $\varphi_2$  (p. 85), c'est-à-dire au maximum d'élongation du tiroir théorique; et la seconde à l'azimut  $\varphi_4$  (p. 87) ou à la fin de la détente. La valeur de ce maximum devient, pour la première de ces situations :

$$\frac{e^2}{2b} \cos^2 \alpha,$$

et pour la seconde :

$$\frac{e^2}{2b} \cos^2 \alpha.$$

On remarquera que ces diverses circonstances seront favorables à l'application de la théorie des bielles infinies, quand on jugera à propos de s'en contenter. Nous voyons en effet que celle-ci donne avec une rigueur suffisante les avances à l'admission et le commencement de la détente. Quant à la fin de cette dernière période, elle correspond, à la vérité, à un maximum d'influence, mais il est négatif; ce qui indique un retard du tiroir par rapport à la position moyenne, pour laquelle doit commencer l'échappement anticipé. La détente se trouvera donc un peu plus prolongée en réalité que dans les prévisions théoriques, et l'on pourra par suite compter *a fortiori* sur le degré d'économie qu'on en attend. Quant au maximum opposé, il se rapporte au moment du démasquement en

grand; et une légère inexactitude sur la position du tiroir à cet instant ne présente aucune importance

## § 2

## DIAGRAMME DE CLAEYS

765 — M. Isidore Claeys a cherché à étendre le procédé graphique de M. Zeuner au cas des courtes bielles (<sup>1</sup>). Il construit à cet effet une *courbe de marche* peu différente du cercle de cet auteur, en portant sur la direction du rayon d'excentricité, pour chaque azimut, l'élongation exacte du centre d'oscillation du tiroir.

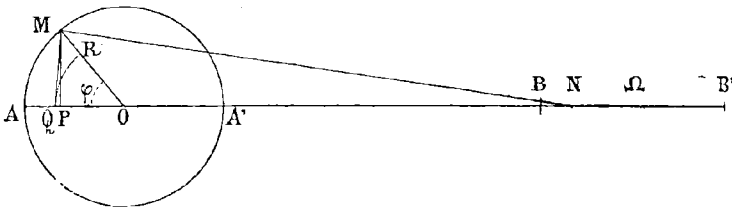


Fig. 451.

Soient A, A' (fig. 451) les points morts de la manivelle; B, B', ceux de l'articulation de la tige du tiroir;  $\overline{AB} = \overline{A'B'} = b$  la longueur de la barre d'excentrique;  $\overline{AA'} = \overline{BB'} = 2r$  le double du rayon d'excentricité. Envisageons une position OM de ce rayon sous un azimut quelconque  $\varphi$ . De M comme centre, avec  $b$  pour rayon, déterminons l'extrémité N de la barre MN; puis, de ce dernier point

(<sup>1</sup>) Claeys (Étude sur la machine à vapeur au point de vue de la distribution. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 2<sup>e</sup> série, t. XXII, p. 254. — Épure donnant les positions simultanées du piston et du tiroir. *Génie civil*, t. XII, p. 56, t. XV, p. 565. — Tracés empiriques relatifs aux positions et aux vitesses des pistons des machines à vapeur. *Annales de l'Association des Ingénieurs sortis des Écoles spéciales de la ville de Gand*, 1889. — Nouveau système de machine à vapeur à détente automatique. *Annales industrielles*, 26 mai 1889, p. 644). — Léauté. Sur la modification apportée par M. Claeys au tracé de Zeuner. *Génie civil*, t. XII, p. 108. — Haton de la Goupillière. *Revue des travaux scientifiques*, t. VIII, p. 422.

comme centre, traçons l'arc de cercle MQ, en même temps que la projetante MP. D'après les égalités :

$$\overline{NQ} = \overline{NM} = \overline{AB},$$

il vient :

$$\overline{AQ} = \overline{NB}.$$

On retrouve donc en AQ le chemin exact BN qui est décrit par l'articulation N de la tige du tiroir, ou par le centre d'oscillation de ce dernier, à partir de son point mort. On aura par suite en OQ la valeur rigoureuse de l'élongation. Il suffit dès lors de la ramener en OR, par l'arc de cercle QR, pour connaître le point cherché R de la courbe de marche, qui correspond à l'azimut  $\varphi$ .

**766** — Il est facile d'obtenir l'équation de cette ligne. Nous avons comme expression de son rayon vecteur :

$$\rho = \overline{OR} = \overline{OQ} = \overline{OP} + \overline{PQ}.$$

Mais :

$$\overline{OP} = r \cos \varphi,$$

et :

$$\overline{PQ} = \overline{NQ} - \overline{NP} = \overline{NQ} - \sqrt{\overline{MN}^2 - \overline{MP}^2},$$

ce qui donne :

$$\overline{PQ} = b - \sqrt{b^2 - r^2 \sin^2 \varphi},$$

et finalement :

$$\rho = r \cos \varphi + b - \sqrt{b^2 - r^2 \sin^2 \varphi}.$$

On aura également, en résolvant cette égalité par rapport à  $\varphi$ , pour déterminer inversement les positions de la manivelle d'après celles du piston :

$$\cos \varphi = \frac{2l\rho - \rho^2 - r^2}{2r(l - \rho)}.$$

On peut discuter cette équation de manière à en déduire un certain nombre d'éléments remarquables <sup>(1)</sup>, qui suffiront à la tracer avec une précision suffisante dans chaque cas. Elle fournit par exemple des expressions simples du rayon vecteur pour les azimuts : 30° ; 60° ; 90°. On obtient, en faisant  $\rho = 0$ , l'inclinaison des tangentes à l'origine :

$$\cos \varphi_0 = - \frac{r}{2l}.$$

Le profil est composé de deux boucles, et l'intersection de ces tangentes avec la courbe est également susceptible d'une valeur simple du rayon vecteur. On obtient à l'aide de tous ces éléments une précision très complète, que M. Claeys a scrutée avec détail. Il a en même temps déterminé une série d'arcs de cercle, qui épousent avec une exactitude suffisante le contour théorique.

M. Léauté a repris de son côté la question <sup>(2)</sup>, et a fait connaître une *anse de panier* formée de quatre arcs de cercle, qui fournit pour cette identification une très grande approximation.

### § 3

#### DIAGRAMME DE COSTE ET MANIQUET

**767** — L'une des principales difficultés que l'on rencontre dans les tracés relatifs à l'étude des distributions, consiste dans la longueur excessive des bielles, qui rend difficile, soit d'exécuter des épures en vraie grandeur, soit de conserver une précision suffisante si l'on réduit l'échelle ; l'amplification ultérieure des erreurs ainsi commises par le trait, venant alors compromettre l'exactitude de certains éléments délicats.

MM. Coste et Maniquet ont introduit un principe ingénieux, qui

<sup>(1)</sup> M. Cornut a construit des tables numériques destinées à faciliter cette dernière recherche (Cornut. *Compte rendu des séances du cinquième congrès des ingénieurs en chef des associations de propriétaires d'appareils à vapeur*. Lyon, 1881, p. 98).

<sup>(2)</sup> Léauté, *Génie civil*, t. XII, p. 108.

consiste dans l'emploi de certains *gabarits* <sup>(1)</sup>. Ils en ont fait l'application détaillée à presque toutes les distributions que la pratique a consacrées. Nous ne saurions les suivre ici dans de pareils développements; mais nous ferons du moins connaître leur méthode générale, dont nous présenterons en outre une application.

Considérons une droite MN (fig. 452) assujettie à s'appuyer par

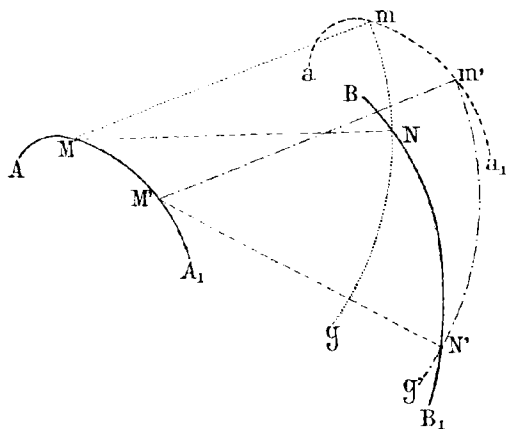


Fig. 452.

ses extrémités sur deux courbes déterminées  $AA_1$ ,  $BB_1$ . La méthode directe qui permettrait de construire, dans des conditions ordinaires, diverses positions de cette bielle, consiste à prendre une ouverture de compas convenable, et à en placer successivement les pointes en  $MN$ , en  $M'N'$ , etc. Mais nous supposons précisément ici que la grandeur excessive de  $MN$  doit faire écarter ce procédé.

Transportons par la pensée la courbe  $AA_1$  parallèlement à elle-même en  $aa_1$ , suivant une direction quelconque  $Mm$ , et à une distance égale à la bielle  $MN$ . Les divers points  $M, M', \dots$ , viendront en  $m, m', \dots$ , en décrivant des droites égales et parallèles  $Mm, M'm', \dots$ . Rabattons, à l'aide des arcs de cercle  $mN, m'N', \dots$ , les extrémités de ces dernières sur la seconde courbe-guide  $BB_1$ . Nous obtiendrons par là les extrémités cherchées  $N, N', \dots$ .

<sup>1</sup> Coste et Maniquet. *Traité théorique et pratique des machines à vapeur au point de vue de la distribution*, in-8°. Paris, 1886. — Haton de la Goupillière. *Revue des Sociétés savantes*, 5<sup>e</sup> série, t. III, p. III et 15.

Or il est à remarquer que la figure  $Mmg$  reste invariable, et se retrouve sans altération en  $M'm'g'$ , etc. Il suffit donc de construire un gabarit  $mg$  en forme d'arc de cercle, que l'on pourra tracer, notwithstanding la grandeur de son rayon, à l'aide de tables numériques (1). On n'aura plus alors qu'à faire courir cet instrument parallèlement à lui-même le long de la courbe  $aa_1$ , de manière que son premier élément  $m$  soit partout normal à la direction arbitrairement adoptée  $Mm$ . On aura soin en même temps de tourner sa concavité du côté où est censée se retrouver la courbe  $AA_1$ , laquelle n'existe plus en réalité sur l'épure effective, qui est rassemblée dans un espace restreint autour de la ligne  $BB_1$ , lieu des secondes extrémités. En traçant au crayon le long de ce contour, ou en piquant à travers le calque, selon la manière dont on aura réalisé le gabarit, on obtiendra les extrémités  $N, N', \dots$ , homologues des points  $m, m', \dots$ , ou  $M, M', \dots$ .

Ce procédé peut s'appliquer de deux manières différentes, suivant que l'on transporte  $AA_1$  dans le voisinage de  $BB_1$  ou réciproquement. On se décidera sous ce rapport d'après la plus ou moins grande simplicité de chacune de ces courbes. La méthode offrira en outre une très grande latitude, puisque l'on reste encore maître du choix de la direction  $Mm$ . On en profitera pour simplifier le plus possible le tracé, en s'inspirant à cet égard de la forme de ces lignes.

Il convient enfin de remarquer que, dans la presque totalité des cas, les courbes-guides  $AA_1, BB_1$ , sont des cercles ou des droites; et que rien dès lors n'est plus simple que de tracer les lignes conjuguées  $aa_1$  ou  $bb_1$ .

**768** — Appliquons par exemple cette méthode à la graduation de la course du piston, en fonction de celle du cercle qui est parcouru par le bouton de manivelle.

Les lignes ainsi décrites  $AA_1, BB_1$  (fig. 453) sont la trajectoire circulaire du bouton de manivelle, et la droite suivant laquelle se meut la tige du piston. C'est cette dernière que nous choisirons

(1) On trouve d'ailleurs dans l'atlas de MM. Coste et Maniquet une série de ces profils, que l'on peut calquer pour se procurer dans les ateliers un *jeu de gabarits* de diverses grandeurs.



pour la transporter, comme étant la plus simple des deux. De plus, nous effectuerons sa translation suivant sa propre direction, ce qui ne laisse plus rien à tracer matériellement ; la droite  $aa_1$  se confondant alors avec  $AA_1$ .

Si donc on veut connaître la position N du bouton de manivelle qui correspond à un point quelconque  $m$  de la course  $aa_1$ , on n'aura qu'à y implanter, normalement à cette droite, le gabarit  $mg$ ,

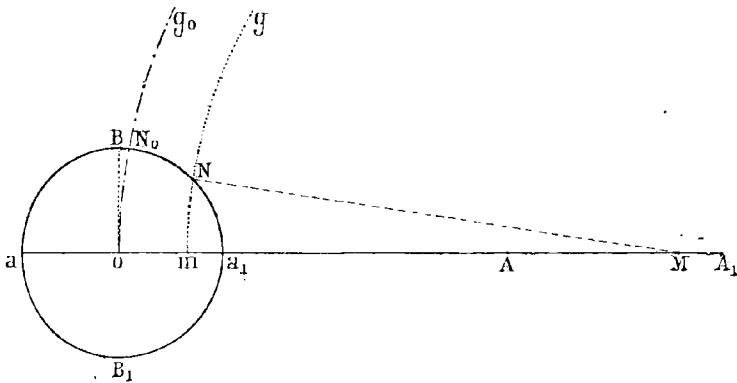


Fig. 433.

en tournant sa concavité du côté de A. Son intersection avec le cercle  $BB_1$  fournira le point cherché N. Si, par exemple, on envisage le milieu O de la course, le gabarit  $Og_0$  fournit le point  $N_0$ . Le petit arc  $BN_0$  met ainsi en évidence, pour cet instant spécial, l'écart qui sépare la théorie des bielles infinies de la réalité. La première placerait en effet en B le point correspondant à O.

§ 4

**DIAGRAMME DEPREZ**

**769** — M. Marcel Deprez a découvert empiriquement des théorèmes approximatifs sur lesquels il a basé, pour la pratique, un procédé graphique d'une grande précision (1).

(1) Léauté (Sur la détermination de la position de la manivelle qui correspond à

Décrivons du point O (fig. 454) un cercle, avec un rayon égal à l'excentricité. Puis reportons en  $A_0A_{10}$  la droite  $B_0B_{10}$ , à une distance

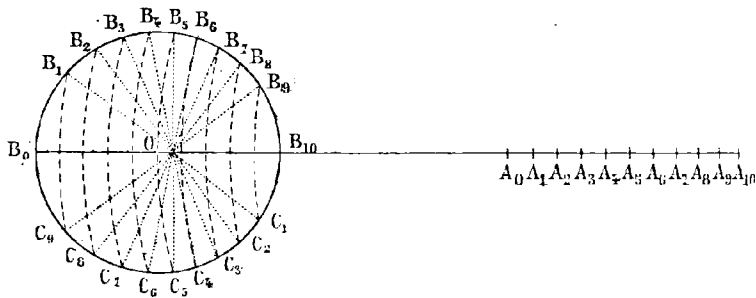


Fig. 454.

égale à la longueur de la barre d'excentrique. Divisons ce diamètre aux points :

$$(1) \quad A_1, \quad A_2, \quad A_3, \quad \dots, \quad A_9.$$

en un certain nombre de parties égales, que je suppose ici égal à 10 pour fixer les idées. Des points de division comme centre, avec la bielle comme rayon, je trace une série d'ares de cercle. Ils marqueront sur la demi-circconférence supérieure les positions :

$$(2) \quad B_1, \quad B_2, \quad B_3, \quad \dots, \quad B_9;$$

corrélatives des précédentes dans la course directe ; et sur la demi-circconférence inférieure la graduation :

$$C_1, \quad C_2, \quad C_3, \quad \dots, \quad C_9;$$

relative à la course rétrograde. Joignons deux à deux les points ainsi obtenus. On observe alors que les droites :

$$B_1C_1, \quad B_2C_2, \quad B_3C_3, \quad \dots, \quad B_9C_9;$$

une position donnée du piston. *Génie civil*, t. X, p. 288. — *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. CIV, p. 410).

se croisent très sensiblement en un même point  $O'$ , lorsque la longueur de la bielle est au moins triple de celle de l'excentricité.

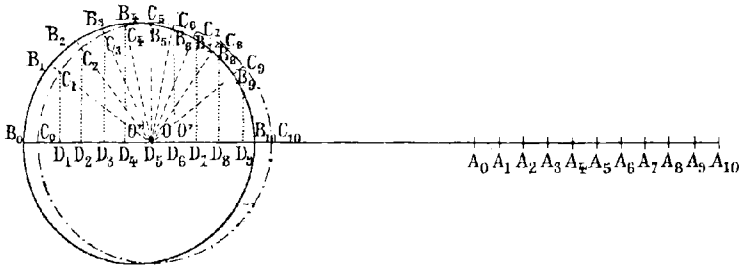


Fig. 455.

M. Deprez décrit alors de  $O'$  comme centre (fig. 455) un cercle auxiliaire égal au précédent. Il prolonge les droites de jonction qui viennent d'être tracées :

$$(5) \quad O'B_1, \quad O'B_2, \quad O'B_3, \quad \dots, \quad O'B_9;$$

jusqu'à leur rencontre avec la section de circonférence, aux nouveaux points désignés par :

$$(4) \quad C_1, \quad C_2, \quad C_3, \quad \dots, \quad C_9.$$

On mène les projetantes de ces derniers :

$$(5) \quad C_1D_1, \quad C_2D_2, \quad C_3D_3, \quad \dots, \quad C_9D_9;$$

et l'on constate que la graduation ainsi obtenue :

$$(6) \quad D_1, \quad D_2, \quad D_3, \quad \dots, \quad D_9;$$

divise très sensiblement en parties égales le diamètre du cercle auxiliaire.

De là cette règle : on prend à droite de l'arbre de rotation  $O$  une longueur  $OO'$ , pour laquelle M. Deprez adopte la valeur  $\frac{r^2}{2b}$  de la troisième proportionnelle entre le rayon  $r$  d'excentricité et le double

de la longueur de la barre  $b$ . De ce point, on trace une circonférence égale à la première, et on la gradue dans les conditions de la théorie des bielles infinies. On divise pour cela son diamètre en parties égales aux points D (6), et l'on élève leurs projetantes DC (5), qui fournissent sur le cercle auxiliaire la graduation C (4). On joint alors ces derniers points au centre O' de cette circonférence par les droites O'C (3), qui marquent sur le cercle de rotation proposé les positions B (2) du bouton de manivelle. Ces points correspondent avec une très grande approximation aux extrémités de la bielle, qui constituent dans notre pensée la graduation A (1) de la course du piston en parties égales. On évite ainsi le tracé des arcs de cercle qui auraient pour rayon la longueur de cette bielle.

**770** — M. Léauté a repris cette question, en cherchant à réaliser dans l'application une précision plus grande encore. Il joint, à cet effet, les points C (fig. 455), obtenus ainsi qu'il vient d'être dit sur le cercle auxiliaire, non plus au centre O' de ce dernier, mais à un nouveau point O'' situé de l'autre côté de l'axe de rotation O, à une distance OO'' moitié moindre que la précédente OO'; égale par conséquent à  $\frac{r^2}{4b}$ . Les nouvelles droites de jonction fournissent alors pour le bouton de manivelle des positions encore plus satisfaisantes qu'avec le premier procédé (1).

## § 5

### DIAGRAMME MULLER

**771** — Les méthodes précédentes ne sont qu'approximatives. Il nous reste à en faire connaître deux autres qui sont entièrement rigoureuses. La première est due au professeur Muller (2).

(1) On trouve dans l'article de M. Léauté (*Génie civil*, t. X, p. 288), sous forme de tableaux, l'évaluation numérique de l'erreur ainsi commise par rapport aux positions rigoureuses. Les écarts sont absolument minimes, et M. Léauté les caractérise en disant qu'ils ne dépassent pas l'épaisseur du plus fin trait de crayon.

(2) Zeuner. *Traité des distributions par tiroir*. Traduction Debize et Mérijot, p. 55.



angle  $\widehat{tOT} = \widehat{E_0OE} = \varphi$ ; et si, de  $E_0$  comme centre, avec la barre  $E_0E$  pour rayon, nous traçons un cercle qui coupe en  $T$  le rayon  $OT$ , nous formerons en  $OE_0T$  un triangle identique à  $OEt$ . Mais il y aura cette différence essentielle, par rapport aux conditions précédentes, que  $E_0$  étant un point fixe, la circonférence auxiliaire reste immuable pour toutes les constructions analogues. L'opération sera conduite, d'après cela, de la manière suivante.

**772** — De la position  $E_0$  du centre d'excentrique qui correspond au point mort de la manivelle, avec un rayon égal à la barre d'excentrique, on décrit une fois pour toutes un cercle  $E_0T$ . Puis on prend, à partir de l'alignement  $Ot$  de la glace du tiroir, à *contresens* du mouvement réel, un angle quelconque  $\varphi = tOT$  pour représenter une position de la manivelle. La distance  $OT$ , comptée entre le cercle et le centre de rotation, fournit rigoureusement celle qui sépare de ce point, dans la réalité, l'articulation de la tige du tiroir.

Pour régler cet organe, envisageons en  $OT_0$  et  $OT'_0$  les abscisses de son articulation qui correspondent aux deux points morts de la manivelle. Celle du centre d'oscillation du tiroir devra être leur moyenne arithmétique, ou la moitié de leur somme  $T_0T'_0$ . Traçons donc un cercle à partir du centre de rotation  $O$ , avec ce rayon moyen  $\overline{OM}$ . Nous détacherons ainsi en  $MT$  l'élongation du tiroir par rapport à son centre d'oscillation.

Si de plus nous portons en  $MR$  et  $MI$  les recouvrements extérieur et intérieur  $\rho$  et  $i$ , en décrivant des circonférences concentriques avec  $OR$  et  $OI$  comme rayons, nous obtiendrons, pour chaque azimut, les découverts d'admission et d'échappement  $TR$  et  $TI$ . Nous opérerons de même à l'opposite, en prenant dans le même ordre, entre  $M'$  et  $T'$ , les recouvrements  $\overline{M'T'} = i$  et  $\overline{M'R'} = \rho$ , de manière à décaler ces deux éléments de la valeur absolue de l'élongation négative  $M'T'$ .

**773** — Il est facile, d'après ces explications, de lire sur cette figure les diverses circonstances du mouvement.

L'élongation  $MT$  s'annule aux points d'intersection  $m_0$  et  $m'_0$  des

deux cercles. On obtiendrait donc, si l'on traçait  $Om_0$  et  $Om'_0$ , les azimuts pour lesquels le mobile passe par son centre d'oscillation.

Nous avons de même en  $\overline{T_0R_0} = \overline{T'_0R'_0}$ , et  $\overline{T_0I_0} = \overline{T'_0I'_0}$ , les avances à l'admission et à l'échappement.

Le découvrement à l'admission s'annule en  $M_1$  et  $M'_1$ . On aurait par suite, en tirant  $OM_1$  et  $OM'_1$ , les azimuts du commencement de la détente dans les deux courses.

Le découvrement à l'échappement s'annule en  $M_2$  et  $M'_2$ . Les rayons  $OM_2$  et  $OM'_2$  fourniront donc les azimuts du commencement de la compression.

De même  $OM_3$  et  $OM'_3$  feront connaître les instants du commencement de l'échappement anticipé; et  $OM_4$ ,  $OM'_4$  les débuts de l'admission anticipée.

Il est important de ne pas oublier que ces divers angles sont envisagés dans le mouvement relatif, c'est-à-dire comptés à contre-sens à partir du rayon  $Ot$ .

On ne saurait méconnaître l'élégance et l'ingéniosité de ce diagramme. Il n'en est malheureusement pas de même de son utilité pratique. En effet, il nécessite le tracé effectif d'un cercle ayant pour rayon la longueur des barres d'excentrique, ce qui suppose une épure de dimensions souvent inadmissibles. En outre, les circonférences se couperont sous des angles très aigus, ce qui sera de nature à jeter une certaine indécision sur la détermination de l'azimut des points d'intersection. Enfin la construction dépend essentiellement du choix de l'angle  $\alpha$  ou du point  $E_0$ . Elle reste donc limitée à l'étude d'une détente fixe, et l'on serait obligé à un grand nombre d'opérations analogues pour une détente variable.

## § 6

### DIAGRAMME DUBOST

**774** — M. F. Dubost a fait connaître une méthode très remarquable (<sup>1</sup>), qui est destinée à relier par une construction fort simple

(<sup>1</sup>) Dubost (Sur la détermination exacte des positions réciproques de l'extrémité de

la situation du piston à celle de la manivelle, en tenant un compte rigoureux de l'obliquité de la bielle, quelque courte que puisse être cette dernière. Elle repose sur un théorème préliminaire qu'il nous faut commencer par établir.

Désignons par  $O$  le centre de rotation de la manivelle (fig. 457),

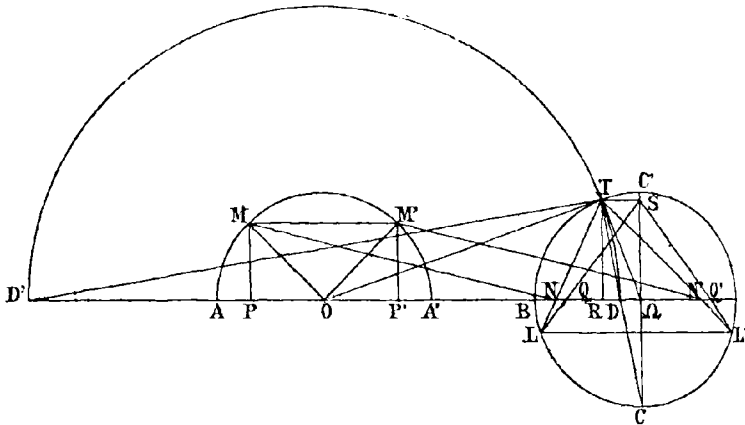


Fig. 457.

$A$  et  $A'$  ses points morts,  $O\Omega$  la longueur de la bielle. Si l'on décrit autour de  $\Omega$  un cercle égal à celui que parcourt le bouton de la manivelle,  $B$ ,  $B'$  figureront les points morts de la course du piston.

Concevons deux positions également inclinées de la manivelle  $OM$ ,  $OM'$ , ainsi que les situations correspondantes de la bielle  $MN$ ,  $M'N'$ , lesquelles seront évidemment parallèles entre elles. Les emplacements correspondants du piston sont reliés par une équation très simple. On a en effet :

la bielle et de la manivelle, et sur une épure de distribution tenant compte de l'obliquité des bielles. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 3 décembre 1888. — Note additionnelle. *Épure de distribution rigoureusement exacte*, grand in-4°. — *Congrès international de mécanique appliquée de 1889*, t. II, p. 185. — Diagramme de M. Dubost. Moyen de tenir compte rigoureusement de l'obliquité des bielles dans les épures de distribution. *Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. XV, p. 40. — Massan. *Annales de l'Association des Ingénieurs sortis des Ecoles spéciales de Gand*, 1889-1890.



$$\begin{aligned}\overline{ON} &= \overline{NP} - \overline{OP}, \\ \overline{ON'} &= \overline{N'P'} + \overline{OP'},\end{aligned}$$

ou identiquement :

$$\overline{ON'} = \overline{NP} + \overline{OP}.$$

Il vient, en multipliant membre à membre :

$$\begin{aligned}\overline{ON} \cdot \overline{ON'} &= \overline{NP}^2 - \overline{OP}^2 \\ &= (\overline{MN}^2 - \overline{MP}^2) - \overline{OP}^2 \\ &= \overline{MN}^2 - (\overline{MP}^2 + \overline{OP}^2) \\ &= \overline{MN}^2 - \overline{MO}^2,\end{aligned}$$

c'est-à-dire finalement, si l'on appelle  $b$  la longueur de la bielle et  $r$  le rayon de la manivelle :

$$(1) \quad \overline{ON} \cdot \overline{ON'} = b^2 - r^2.$$

De là cet énoncé : *Les distances de l'arbre aux positions corrélatives du piston, qui correspondent à des inclinaisons égales et inverses de la manivelle, sont en raison inverse l'une de l'autre.*

**775** — La valeur de ce produit constant est facile à construire. Si en effet nous menons par le point  $O$  une tangente  $OT$  au cercle  $O\Omega$ , l'on aura dans le triangle rectangle  $OT\Omega$  :

$$\overline{OT}^2 = b^2 - r^2.$$

Pour la suite des opérations, nous décrirons avec  $OT$  comme rayon une circonférence  $DD'$ .

On remarquera que le point  $T$  est essentiellement déterminé. Si nous abaissons la perpendiculaire  $TS$  sur  $CC'$ , elle nous fournira un second point  $S$  également déterminé. Leur distance mutuelle a une

valeur très simple. Il vient en effet dans le triangle rectangle  $OT\Omega$  :

$$\overline{OT}^2 = \overline{OR} \cdot \overline{O\Omega} = \overline{TS} \cdot \overline{O\Omega},$$

d'où :

$$\overline{TS} = \frac{r^2}{b}.$$

Ce paramètre, qui va devenir fondamental dans la question, a donc pour valeur la troisième proportionnelle aux longueurs de la manivelle et de la bielle.

Je ferai encore remarquer que la droite qui joint les points T et D passe par l'extrémité C du diamètre perpendiculaire à la direction du mouvement. On a en effet, comme mesure de l'angle formé par une tangente et une corde (en appelant provisoirement  $C_1$  le point de rencontre inconnu de la droite TD avec la circonférence) :

$$\overline{OTC_1} = \frac{\overline{TB} + \overline{BC_1}}{2},$$

et comme mesure de l'angle intérieur à ce cercle :

$$\overline{TDB} = \frac{\overline{TB} + \overline{B'C_1}}{2}.$$

Mais ces deux angles sont égaux dans le triangle isocèle TOD. Il s'ensuit :

$$\overline{BC_1} = \overline{B'C_1},$$

ce qui montre que  $C_1$  coïncide effectivement avec C.

**776** — Ces préliminaires étant établis, je joins le point T aux positions corrélatives N et N' du piston, et je prolonge les droites TN, TN' jusqu'à leur rencontre avec la circonférence en L et L'. Je dis que l'angle formé par ces droites a pour bissectrice la ligne TC. Pour le montrer, désignons provisoirement par  $TN'_1$  le côté inconnu de l'angle  $NTN'_1$  dont TC serait réellement la bissectrice. La ligne TL' en formera la bissectrice extérieure, puisqu'elle est perpendiculaire

sur la précédente (l'angle  $DTD'$  étant inscrit sur une demi-circonférence). On peut donc écrire la proportion :

$$\frac{\overline{ND}}{\overline{N_1D}} = \frac{\overline{ND'}}{\overline{N_1D'}}$$

c'est-à-dire identiquement :

$$\frac{\overline{OD} - \overline{ON}}{\overline{ON'_1} - \overline{OD}} = \frac{\overline{OD'} + \overline{ON}}{\overline{OD'} + \overline{ON'_1}} = \frac{\overline{OD} + \overline{ON}}{\overline{OD} + \overline{ON'_1}}$$

Si l'on fait respectivement la somme et la différence des numérateurs et des dénominateurs, il viendra plus simplement :

$$\frac{\overline{OD}}{\overline{ON'_1}} = \frac{\overline{ON}}{\overline{OD}}$$

On en déduit :

$$\overline{ON} \cdot \overline{ON'_1} = \overline{OD}^2 = \overline{OT}^2 = b^2 - r^2,$$

et d'après l'équation (1) :

$$\begin{aligned} \overline{ON} \cdot \overline{ON'_1} &= \overline{ON} \cdot \overline{ON'}, \\ \overline{ON'_1} &= \overline{ON'}; \end{aligned}$$

ce qu'il fallait démontrer.

\*\*\* — Puisque  $TC$  est la bissectrice de l'angle  $LTL'$ , il s'ensuit :

$$\overline{CL} = \overline{CL'}.$$

La corde  $LL'$  est donc parallèle à  $BB'$ .

Cela posé, je joins  $L$  et  $L'$  au point  $S'$  par les droites  $LS$ ,  $L'S$ , qui rencontrent en  $Q$  et  $Q'$  le diamètre  $BB'$ . Les triangles  $LTL'$  et  $LSL'$  ayant même base et même hauteur, une même parallèle à cette base y intercepte des longueurs égales, car elles sont avec la base commune dans le rapport des distances de ces deux droites au

sommet, laquelle est la même pour les deux triangles. On a d'après cela :

$$\overline{QQ'} = \overline{NN'} = \overline{MM'} = \overline{PP'}.$$

Mais le triangle  $LSL'$  est isocèle. Donc  $\Omega$  est le milieu de  $QQ'$ , de même que  $O$  est celui de  $PP'$ . Par suite les points  $Q$  et  $Q'$  représentent les situations du piston qui correspondraient à l'hypothèse des bielles infinies, puisqu'ils reproduisent pour le second cercle les projections du bouton de manivelle dans le premier. Par conséquent encore  $NQ$  constitue la *correction* qu'il y a lieu de faire subir à cette hypothèse, si l'on veut en déduire la position exacte du piston.

De là cet énoncé : *La correction NQ relative aux diverses positions du piston est la perspective sur la course du piston, pour un point de vue L qui décrit successivement toute la circonférence, de la demi-corde fixe TS parallèle à cette course, et égale à une troisième proportionnelle entre la manivelle et la bielle.*

Tel est le remarquable théorème de M. Dubost. L'auteur en a déduit un procédé complètement rigoureux d'étude de la distribution.

**778** — Représentons par  $BB'$  (fig. 458) la course du piston. Traçons le diamètre perpendiculaire  $CC'$ , et la demi-corde  $ST$  égale à  $\frac{r^2}{b}$ . Si  $M$  représente une position quelconque du bouton de la manivelle, nous construirons sa perspective  $Q$ , nous joindrons  $QS$  pour avoir le point  $L$ , et  $LT$  pour obtenir la vraie position  $N$  du piston qui correspond à celle de la manivelle.

Concevons pour simplifier que l'on ramène par la pensée le rayon d'excentrique du tiroir à la même longueur que la manivelle motrice, de manière à utiliser sous ce double aspect le cercle déjà tracé, en modifiant, bien entendu, dans le même rapport la bielle d'excentrique. Nous déterminerons alors la troisième proportionnelle  $\frac{r^2}{l}$  des deux éléments ainsi transformés. Pour identifier les directions des manivelles, faisons tourner vers la gauche, en sens contraire de la rotation réelle, tout le système du tiroir. La glace



obtenir  $q$ . Élevons la projetante  $MqM_1$  de ce point. Nous aurons en  $\Omega M_1$  et  $\Omega M$  les positions de la manivelle relatives au commencement et à la fin de l'admission. Si nous ne nous attachons ici, pour plus de simplicité, qu'à cette dernière, nous abaisserons la projetante  $MQ$ , nous tirerons  $SQL$  et  $LNT$ , et nous obtiendrons la situation exacte  $N$  du piston qui correspond au commencement de la détente.

### § 7

#### VITESSE DU PISTON

**779** — Nous avons trouvé ci-dessus (p. 289) cette valeur de l'élongation du tiroir :

$$\rho = r \cos \varphi + b - \sqrt{b^2 - r^2 \sin^2 \varphi}.$$

Celle de sa vitesse  $v$  s'en déduira en prenant la dérivée par rapport au temps. Si l'on désigne par  $\omega$  la vitesse angulaire de l'arbre moteur, il viendra ainsi :

$$\frac{v}{r\omega} = -\sin \varphi + \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{\sqrt{\left(\frac{b}{r}\right)^2 - \sin^2 \varphi}},$$

expression qui resterait exacte lors même que  $\omega$  serait variable.

Mais supposons au contraire la rotation uniforme, et cherchons les positions pour lesquelles le piston possède la plus grande rapidité. Il nous faudra pour cela égaler à zéro la dérivée de cette fonction, ce qui donne :

$$-\cos \varphi + \frac{\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi}{\sqrt{\left(\frac{b}{r}\right)^2 - \sin^2 \varphi}} + \frac{\sin^2 \varphi \cos^2 \varphi}{\left[\left(\frac{b}{r}\right)^2 - \sin^2 \varphi\right]^{\frac{3}{2}}} = 0.$$

Si nous faisons pour abrégér :

$$x = \cos^2 \varphi, \quad m = \left(\frac{b}{r}\right)^2 - 1,$$

on pourra écrire :

$$\begin{aligned}\sqrt{x(m+x)^5} &= (2x-1)(m+x) + x(1-x) \\ &= x^2 + 2mx - m.\end{aligned}$$

Élevons au carré, réduisons, et divisons par  $m$ . Il viendra :

$$(1) \quad x^5 + (m-2)x^2 - m(m+4)x + m = 0.$$

Le premier membre de cette équation du troisième degré prend, pour l'hypothèse  $x=1$ , la valeur négative  $-(m+4)^2$ . On obtient donc pour la série de signes qui correspond aux substitutions suivantes :

— $\infty$	—
0	+
1	—
+ $\infty$	+

ce qui montre que les trois racines sont réelles, et qu'une seule d'entre elles peut convenir dans le cas actuel pour représenter  $\cos^2 \varphi$ , comme étant comprise entre zéro et + 1.

Il serait facile d'après cela de résoudre cette équation par la méthode applicable au cas irréductible. Mais il suffira ici d'opérer d'une manière beaucoup plus simple. Si la bielle était infinie, la racine cherchée serait nulle, et l'angle serait droit, ainsi que le montre l'égalité préalablement divisée par  $m^2$ . On aura donc une racine très petite dans les conditions ordinaires de la pratique. Par conséquent les facteurs  $x^2$  et  $x^5$  qui représentent la quatrième et la sixième puissance du cosinus correspondant deviendront négligeables, d'après la remarque qui sert de base à la méthode de Graffe pour la résolution numérique des équations (\*). Nous pouvons en

(\*) Carvallo. *Méthode pratique pour la résolution numérique complète des équations algébriques ou transcendentes*. Thèse in-4°, 1890, p. 2.

conséquence évaluer avec une approximation suffisante la racine cherchée, en réduisant la formule (1) à une équation du premier degré, qui donne :

$$x = \frac{1}{m + 4},$$

c'est-à-dire :

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{b}{r}\right)^2 + 5}}.$$

M. Cornut a effectué la comparaison de cette formule simplifiée avec les résultats de la résolution exacte de l'équation du troisième degré (1). Il a reconnu par exemple que, pour une bielle égale à cinq fois le rayon de la manivelle, l'angle rigoureux est de 79° 6', tandis que la formule réduite indique 79° 6' 24". De là une erreur moindre qu'une demi-minute, quantité absolument insignifiante en pareille matière.

(1) Cornut. Vitesse des pistons dans les machines à vapeur horizontales. *Compte rendu des séances du cinquième congrès des Ingénieurs en chef des associations de propriétaires d'appareils à vapeur*, 1880, p. 105.



## CHAPITRE XLV

### INFLUENCE DE L'OBLIQUITÉ -- COULISSE

#### § 1

#### CENTRE INSTANTANÉ

**780** — Nous avons consacré le chapitre précédent à l'étude de l'influence exercée par l'obliquité des bielles sur la distribution par tiroir unique à détente fixe. Nous envisagerons maintenant au même point de vue l'emploi de la coulisse de Stephenson pour la détente variable.

Phillips a fait connaître une construction fort simple et très élégante du centre instantané de cet organe, dans son mouvement normal <sup>(1)</sup>.

La bielle de suspension ayant une extrémité fixe en B (fig. 459), son articulation S décrit un cercle autour de ce centre. Cette barre constitue donc elle-même la normale de la trajectoire de ce point de la coulisse. Elle contient par conséquent le centre instantané cherché. Désignons-le par  $\Omega$ , en supposant le problème résolu.

Je joins ce point aux extrémités C et C' de la coulisse au moyen des droites  $\Omega K$  et  $\Omega K'$ , qui rencontrent en K, K' les prolongements des excentricités. Traçons, d'autre part, les parallèles  $\Omega L$ ,  $\Omega L'$  à ces

<sup>(1)</sup> Il est bien essentiel de distinguer le mouvement *normal* que la coulisse reçoit de l'arbre tournant pour un cran de détente déterminé, du déplacement absolument différent que lui imprime le levier de relevage, lorsque l'arbre est au repos. Nous avons déjà vu (n° 702) que le centre instantané de ce dernier mouvement se trouve à l'intersection des deux barres d'excentrique.

dernières droites. La similitude des triangles CEK, CΩL nous donnera la proportion :

$$(1) \quad \overline{\Omega L} = \overline{\Omega C} \frac{\overline{KE}}{\overline{KC}}.$$

Si l'on suppose qu'un angle infiniment petit  $\epsilon$  soit décrit par

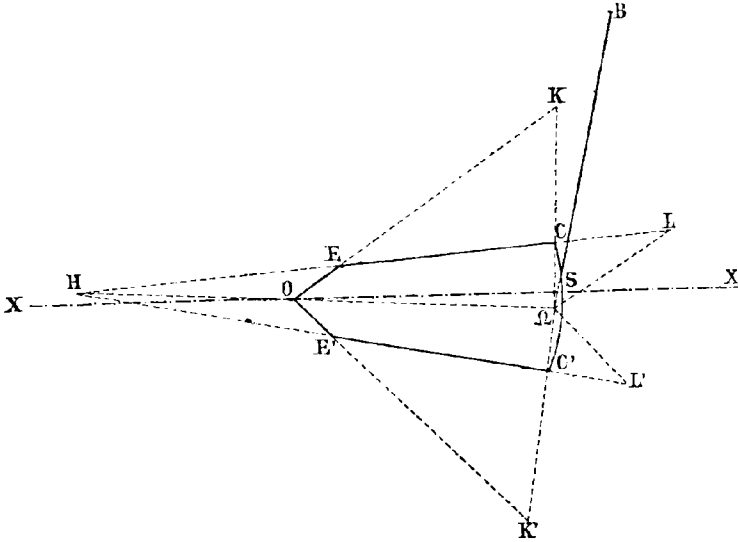


Fig. 439.

la coulisse autour de  $\Omega$ , son extrémité C éprouvera le déplacement :

$$\epsilon \cdot \overline{\Omega C}.$$

Quant à la barre d'excentrique EC, les normales des trajectoires de ses extrémités sont  $\Omega C$  et  $OE$ ; son centre instantané se trouve donc en K, et par suite l'angle de rotation qu'elle décrit autour de ce point a pour valeur :

$$\frac{\epsilon \cdot \overline{\Omega C}}{\overline{KC}}.$$

Le déplacement de son extrémité E aura dès lors comme expression :

$$\frac{\varepsilon \cdot \overline{\Omega C}}{\overline{KC}} \cdot \overline{KE},$$

ou plus simplement, d'après l'égalité (1) :

$$\varepsilon \cdot \overline{\Omega L}.$$

Celui du point E sera de même :

$$\varepsilon \cdot \overline{\Omega L'}.$$

Mais les deux arcs de cercle ainsi parcourus autour de O dans la rotation de l'arbre par des points situés à la même distance du centre sont nécessairement égaux. Il s'ensuit par conséquent :

$$\overline{\Omega L} = \overline{\Omega L'}.$$

Telle est la condition qui devra servir à déterminer, sur la bielle de suspension, le point  $\Omega$ . Elle nous montre que la droite  $H\Omega$  doit être la bissectrice de l'angle formé par les droites  $HEL$ ,  $HE'L'$ .

De là ce théorème fort simple : *Le centre instantané du mouvement normal de la coulisse est fourni par l'intersection de la bielle de suspension avec la bissectrice de l'angle formé par les deux barres d'excentrique.*

## § 2

### ÉQUATION FONDAMENTALE

**781** — Le mouvement de la coulisse de Stephenson présente une telle complication, qu'il convient de se contenter pour son étude de formules approximatives, en se basant à cet égard sur la peti-

tesse des excentricités par rapport à la longueur des barres d'excentrique.

Représentons par  $CC'$  (fig. 460) sa position actuelle. Le coulisseau qui oscille sur la direction de la droite  $OQ$  se trouve en  $K$ , et sa distance à l'arbre moteur constituera pour nous la variable essentielle qu'il s'agit de déterminer. Nous l'appellerons son *abscisse*, en

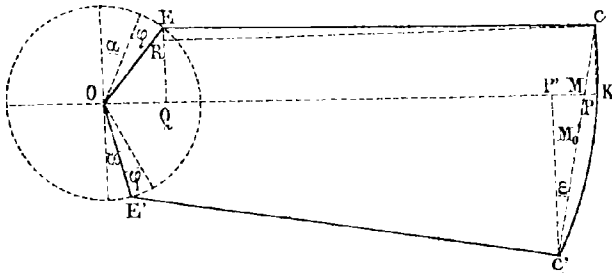


Fig. 460.

réservant l'expression d'*élongation* pour l'écart que subit ce point de part et d'autre de sa position moyenne, ou *centre d'oscillation*. On aura identiquement :

$$(2) \quad \overline{OK} = \overline{OP} - \overline{PM} + \overline{MK}.$$

Il reste à évaluer les trois termes de ce polynôme.

Nous confondrons à cet effet la coulisse avec sa corde, et nous désignerons par  $x$  la distance de son point mort  $M_0$  au coulisseau, actuellement situé en  $M$ . Appelons en même temps  $2a$  la longueur de la coulisse,  $b$  la barre d'excentrique,  $e$  l'excentricité :

$$x = \overline{M_0M}, \quad 2a = \overline{CC'}, \quad b = \overline{EC}, \quad e = \overline{OE}.$$

On a en premier lieu, d'après la similitude des triangles rectangles  $MCP$ ,  $MC'P'$  :

$$\frac{\overline{MP}}{\overline{MP'}} = \frac{\overline{MC}}{\overline{MC'}};$$

d'où :

$$(3) \quad \frac{\overline{MP}}{\overline{MP} + \overline{MP'}} = \frac{\overline{MC}}{\overline{MC} + \overline{MC'}},$$

$$\frac{\overline{MP}}{\overline{MC}} = \frac{\overline{PP'}}{\overline{CC'}},$$

et enfin :

$$(4) \quad \overline{MP} = \frac{a-x}{2a} (\overline{OP} - \overline{OP'}).$$

En second lieu, si nous joignons *par la pensée* le point M au centre de courbure de la coulisse, l'un des segments de ce diamètre différera peu de MK, à cause de la faible inclinaison de CC' sur la verticale. Le second sera donc  $2\rho - \overline{MK}$ ; ou simplement  $2\rho$ , en négligeant la petite quantité MK devant le diamètre  $2\rho$ . Il vient d'après cela, en égalant entre eux les produits des segments formés sur les deux sécantes qui se croisent au point M :

$$\overline{MK} \cdot 2\rho = \overline{MC} \cdot \overline{MC'} = (a+x)(a-x),$$

et par suite :

$$(5) \quad \overline{MK} = \frac{a^2 - x^2}{2\rho}.$$

Si nous reportons les valeurs (4) et (5) dans l'identité (3), elle deviendra :

$$\overline{OK} = \overline{OP} - \frac{a-x}{2a} (\overline{OP} - \overline{OP'}) + \frac{a^2 - x^2}{2\rho},$$

ou en réduisant :

$$\overline{OK} = \frac{\overline{OP}(a+x) + \overline{OP'}(a-x)}{2a} + \frac{a^2 - x^2}{2\rho}.$$

Évaluons actuellement OP et OP'.

**782** — On a pour cela identiquement :

$$\begin{aligned}\overline{OP} &= \overline{OQ} + \overline{QP} \\ &= \overline{OQ} + \overline{CR} \\ &= \overline{OQ} + \sqrt{\overline{CE}^2 - \overline{ER}^2} \\ &= \overline{OQ} + \sqrt{\overline{CE}^2 - (\overline{EQ} - \overline{CM})^2},\end{aligned}$$

si l'on confond QR avec CM, en raison de la faible inclinaison de la coulisse sur la verticale. Nous pouvons donc écrire :

$$\begin{aligned}(6) \quad \overline{OP} &= e \sin(\alpha + \varphi) + \sqrt{b^2 - [e \cos(\alpha + \varphi) - (a - x)]^2} \\ &= e \sin(\alpha + \varphi) + b \sqrt{1 - \left[ \frac{e \cos(\alpha + \varphi) - (a - x)}{b} \right]^2} \\ &= e \sin(\alpha + \varphi) + b \left\{ 1 - \frac{[e \cos(\alpha + \varphi) - (a - x)]^2}{2b^2} \right\},\end{aligned}$$

d'après une approximation déjà employée (n° 746, note 1). Il vient finalement, en développant :

$$(7) \quad \overline{OP} = e \sin(\alpha + \varphi) + b - \frac{(a - x)^2}{2b} - \frac{e^2 \cos^2(\alpha + \varphi)}{2b} + \frac{e(a - x)}{b} \cos(\alpha + \varphi).$$

L'évaluation de  $OP'$  se déduira immédiatement de cette formule, si l'on remarque que la partie inférieure de la figure ne diffère de l'autre que par le changement de  $\alpha + \varphi$  en  $\alpha - \varphi$ , et de  $a - x$  en  $a + x$ . On aura ainsi :

$$(8) \quad \overline{OP'} = e \sin(\alpha - \varphi) + b - \frac{(a + x)^2}{2b} - \frac{e^2 \cos^2(\alpha - \varphi)}{2b} + \frac{e(a + x)}{b} \cos(\alpha - \varphi).$$

Reportons les valeurs (7) et (8) dans celle de OK ; il viendra par là :

$$\begin{aligned}\overline{OK} \cdot 2a &= \frac{a}{\rho} (a^2 - x^2) \\ &+ (a + x) \left[ e \sin(\alpha + \varphi) + b - \frac{(a - x)^2}{2b} - \frac{e^2 \cos^2(\alpha + \varphi)}{2b} + \frac{e(a - x)}{b} \cos(\alpha + \varphi) \right] \\ &+ (a - x) \left[ e \sin(\alpha - \varphi) + b - \frac{(a + x)^2}{2b} - \frac{e^2 \cos^2(\alpha - \varphi)}{2b} + \frac{e(a + x)}{b} \cos(\alpha - \varphi) \right]\end{aligned}$$

et en ordonnant :

$$\begin{aligned} \overline{OK} \cdot 2a &= e [(a+x) \sin(\alpha+\varphi) + (a-x) \sin(\alpha-\varphi)] \\ &+ 2ab - \frac{a}{b} (a^2-x)^2 + \frac{a}{\rho} (a^2-x^2) \\ &- \frac{e^2}{2b} [(a+x) \cos^2(\alpha+\varphi) + (a-x) \cos^2(\alpha-\varphi)] \\ &+ \frac{e(a^2-x^2)}{b} [\cos(\alpha+\varphi) + \cos(\alpha-\varphi)]; \end{aligned}$$

ou encore :

$$\begin{aligned} \overline{OK} \cdot 2a &= 2ab + a(a^2-x^2) \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{b} \right) \\ &+ e(a+x) [\sin(\alpha+\varphi) + \sin(\alpha-\varphi)] + \frac{e(a^2-x^2)}{b} [\cos(\alpha+\varphi) + \cos(\alpha-\varphi)] \\ &- \frac{e^2}{2b} [\cos^2(\alpha+\varphi) + \cos^2(\alpha-\varphi)] - \frac{e^2 x}{2b} [\cos^2(\alpha+\varphi) - \cos^2(\alpha-\varphi)], \end{aligned}$$

et en réduisant :

$$\begin{aligned} \overline{OK} \cdot 2a &= 2ab + a(a^2-x^2) \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{b} \right) \\ &+ 2ea \sin \alpha \cos \varphi + 2ex \cos \alpha \sin \varphi + \frac{2e(a^2-x^2)}{b} \cos \alpha \cos \varphi \\ &- \frac{e^2 a}{b} (\cos^2 \alpha \cos^2 \varphi + \sin^2 \alpha \sin^2 \varphi) + \frac{2e^2 x}{b} \sin \alpha \cos \alpha \sin \varphi \cos \varphi, \end{aligned}$$

c'est-à-dire :

$$\begin{aligned} (9) \quad \overline{OK} &= b + \frac{a^2-x^2}{2} \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{b} \right) \\ &+ e \left( \sin \alpha + \frac{a^2-x^2}{ab} \cos \alpha \right) \cos \varphi + \frac{ex}{a} \cos \alpha \sin \varphi \\ &+ \frac{e^2 x}{4ab} \sin 2\alpha \sin 2\varphi - \frac{e^2}{2b} (\cos^2 \alpha - \cos 2\alpha \sin^2 \varphi). \end{aligned}$$

## § 3

## DISCUSSION

**783** — A l'aide de cette valeur générale de l'abscisse du coulisseau, nous pouvons procéder au réglage du tiroir. Déterminons à cet effet ses deux positions  $K'$ ,  $K''$  relatives aux points morts de la manivelle, ou aux valeurs  $\varphi = 0$ ,  $\varphi = 180$  :

$$\overline{OK'} = b + \frac{a^2 - x^2}{2} \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{b} \right) + e \left( \sin \alpha + \frac{a^2 - x^2}{ab} \right) \cos \alpha - \frac{e^2}{2b} \cos^2 \alpha,$$

$$\overline{OK''} = b + \frac{a^2 - x^2}{2} \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{b} \right) - e \left( \sin \alpha + \frac{a^2 - x^2}{ab} \right) \cos \alpha - \frac{e^2}{2b} \cos^2 \alpha.$$

Le milieu  $K_0$  de leur intervalle a pour abscisse la demi-somme de ces deux valeurs :

$$\overline{OK_0} = b + \frac{a^2 - x^2}{2} \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{b} \right) - \frac{e^2}{2b} \cos^2 \alpha.$$

Une obligation essentielle s'impose évidemment pour la régularité du fonctionnement, à savoir que ce centre d'oscillation reste indépendant du relevage, ou de  $x$ . De là cette condition :

$$\rho = b,$$

qui fournit l'énoncé suivant, remarquable par sa simplicité : *le rayon de courbure de la coulisse doit être égal à la longueur de la barre d'excentrique.*

Si l'on introduit cette hypothèse, l'abscisse du centre d'oscillation devient :

$$\overline{OK_0} = b - \frac{e^2}{2b} \cos^2 \alpha,$$

et celle du coulisseau :



$$\overline{OK} = b + \left( \sin \alpha + \frac{a^2 - x^2}{ab} \cos^2 \alpha \right) \cos \varphi + \frac{ex}{a} \cos \alpha \sin \varphi + \frac{e^2}{4ab} [x \sin 2\alpha \sin 2\varphi - 2a (\cos^2 \alpha - \cos 2\alpha \sin^2 \varphi)].$$

L'élongation  $z$  de ce dernier, par rapport à son centre d'oscillation  $K_0$ , aura donc finalement pour valeur :

$$z = \overline{OK} - \overline{OK}_0,$$

ou en effectuant les réductions :

$$(10) \quad z = e \left( \sin \alpha + \frac{a^2 - x^2}{ab} \cos^2 \alpha \right) \cos \varphi + \frac{ex}{a} \cos \alpha \sin \varphi + \frac{e^2}{4ab} (x \sin 2\alpha \sin 2\varphi + a \cos 2\alpha \sin^2 \varphi).$$

§ 4

**BARRES CROISEES**

**784** — L'analyse précédente se rapporte au cas des barres ouvertes. Celui des barres croisées (fig. 461) nous présente encore

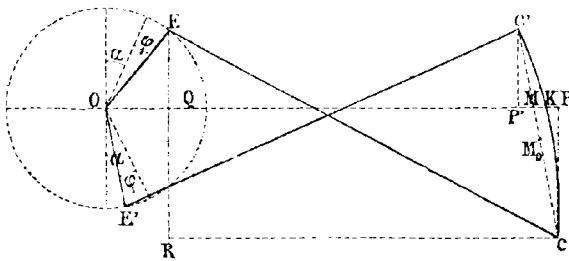


Fig. 461.

l'identité (2) ainsi que la valeur (5) de MK. Quant à celle de PM qui correspond au même point E, ou à l'angle  $\alpha + \varphi$ , elle sera

aussi donnée par l'égalité (3). Mais celle-ci s'interprète alors de la manière suivante :

$$\overline{MP} = \frac{a+x}{2a} (\overline{OP} - \overline{OP'}).$$

Le premier facteur peut être considéré comme dérivant de la fraction correspondante qui figure dans la relation (4), par le simple changement de signe de  $a$ . Il en est de même pour les valeurs de  $OP$  et  $OP'$  (éq. 7 et 8). En effet, nous devons maintenant, dans celle de  $QR$  (5), changer le terme  $-(a-x)$  en  $+(a+x)$ . Il nous suffira par conséquent, pour éviter de reproduire les calculs précédents, d'opérer ce simple changement de signe dans le résultat (10), ce qui donne :

$$(11) \quad z = e \left( \sin \alpha - \frac{a^2 - x^2}{ab} \cos \alpha \right) \cos \varphi - \frac{ex}{a} \cos \alpha \sin \varphi \\ - \frac{e^2}{4ab} (x \sin 2\alpha \sin 2\varphi - a \cos 2\alpha \sin^2 \varphi).$$

Nous pouvons, pour continuer avec plus de facilité cette discussion, comprendre les deux cas dans une formule unique, en y affectant les signes supérieurs au dispositif des barres ouvertes, et les signes inférieurs aux barres croisées :

$$z = e \left( \sin \alpha \pm \frac{a^2 - x^2}{ab} \cos \alpha \right) \cos \varphi \pm \frac{ex}{a} \cos \alpha \sin \varphi \\ + \frac{e^2}{4ab} (a \cos 2\alpha \sin \varphi \pm 2x \sin 2\alpha \cos \varphi) \sin \varphi.$$

**785** — Dans les cas très fréquents où l'on peut convenablement négliger le terme en  $e^2$ , cette expression de l'élongation se réduit à :

$$Z = e \left( \sin \alpha \pm \frac{a^2 - x^2}{ab} \cos \alpha \right) \cos \varphi \pm \frac{ex}{a} \cos \alpha \sin \varphi.$$

On retrouve ainsi la forme :

$$(12) \quad Z = A \cos \varphi + B \sin \varphi,$$

que nous avons obtenue directement pour cette circonstance (n° 701), et dans laquelle nous avons reconnu l'équivalent de la commande directe par un excentrique fictif variable. Mais la question a fait ici un pas de plus, car nous possédons maintenant l'expression explicite des coefficients A et B, en fonction de la position du coulisseau dans la coulisse.

**786** — La quantité :

$$A = e \left( \sin \alpha \pm \frac{a^3 - x^3}{ab} \cos \alpha \right),$$

qui représente la valeur de Z pour  $\varphi = 0$ , nous fournit l'avance à l'admission. On reconnaît qu'avec le signe supérieur cet élément si important décroît quand  $x$  augmente, et qu'il croît au contraire pour le signe inférieur. Il s'ensuit que, *avec le type des barres ouvertes, les avances augmentent lorsque le coulisseau tend à se rapprocher du point mort de la coulisse; tandis qu'elles décroissent pour le système des barres croisées.*

Il peut même arriver dans ce dernier cas que l'avance s'annule, et devienne ensuite négative; l'admission anticipée se trouvant alors remplacée par un *retard à l'admission* très désavantageux. C'est ce qui se produirait pour de trop faibles angles de calage, si l'on avait, pour  $x = 0$  :

$$\tan \alpha < \frac{a}{b}.$$

Nous trouvons dans ces remarques un avantage en faveur du système des barres ouvertes; car il est rationnel d'augmenter les avances pour les grandes vitesses, qui correspondent le plus souvent aux faibles résistances ou aux crans de longue détente, voisins du point mort de la coulisse. Ce type permet en outre une marche convenable au point mort, tandis que celle-ci peut se trouver entravée, et toute admission supprimée, avec le dispositif des barres croisées.

**787** — L'équation (12) nous fournit, pour le diagramme de Zeuner, un cercle dont le centre a pour abscisse  $\frac{A}{2}$  et pour ordonnée  $\frac{B}{2}$  (n° 658). La première a pour valeur :

$$\frac{e}{2} \left( \sin \alpha \pm \frac{a^2 - x^2}{ab} \cos \alpha \right).$$

Lorsque le coulisseau est à son point mort, pour  $x=0$ , cette expression se réduit à :

$$\frac{e}{2} \left( \sin \alpha \pm \frac{a}{b} \cos \alpha \right)$$

En faisant la différence de ces deux quantités, nous obtiendrons l'abscisse  $\xi$  de ce centre, rapportée comme origine au centre du cercle représentatif de la marche au point mort :

$$\xi = \mp \frac{ex^2}{2ab} \cos \alpha.$$

Quant à son ordonnée  $\eta$ , ou  $\frac{B}{2}$ , elle a pour valeur :

$$\eta = \pm \frac{ex}{2a} \cos \alpha.$$

Possédant les deux coordonnées de ce point, et sachant que le cercle passe par le centre de rotation (n° 658), il nous sera facile de le construire, et de discuter les circonstances de la distribution, pour les divers crans de détente qui sont caractérisés par les valeurs successives de  $x$ .

**788** — Si l'on élimine ce paramètre entre les valeurs de  $\xi$  et de  $\eta$ , l'on obtiendra l'équation du lieu géométrique des centres des cercles représentatifs de Zeuner, relatifs aux diverses marches du tiroir fournies par le relevage. Il vient ainsi, en élevant la

seconde égalité au carré, et divisant membre à membre avec la première :

$$\eta^2 = \mp \frac{be \cos \alpha}{2a} \xi,$$

équation d'une parabole rapportée à son sommet et à son axe<sup>(1)</sup>. On voit qu'elle tourne vers l'axe de rotation sa concavité dans le cas des barres ouvertes, et sa convexité pour les barres croisées.

**789** — Le paramètre de cette parabole a pour valeur :

$$p = \frac{be}{4a} \cos \alpha.$$

Si on le porte à son tour en coordonnées polaires, sous des azimuts  $\alpha$  égaux aux divers angles de calage, son extrémité décrit un cercle dont le centre se trouve sur l'axe polaire, à une distance de l'axe de rotation égale à :

$$r_0 = \frac{be}{8a},$$

laquelle fournit le rayon vecteur correspondant à l'absence d'avance angulaire, ou de recouvrement extérieur.

## § 5

### SUSPENSION

**790** — La théorie qui précède suppose essentiellement que le point K de la coulisse est assujéti à décrire la droite sur laquelle s'opère le mouvement du tiroir. Or cette condition ne saurait se trouver remplie rigoureusement dans la pratique<sup>(2)</sup>. On se con-

(1) Je rappellerai que ce lieu est une ligne droite pour les coulisses qui, comme celles de Gooch, de Walschaert, etc., conservent la constance des avances (n<sup>os</sup> 704, 758).

(2) Cependant M. de Landsée a proposé, pour en approcher le plus possible, un appareil spécial (*Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 1868. — Zeuner, *Traité des distributions par tiroirs*. Traduction Debize et Mérijot, p 82). Dans ce

tente d'imposer à l'articulation de la coulisse un mouvement circulaire de faible courbure, en la suspendant à une longue bielle de relevage. On choisit pour jouer ce rôle, soit son point mort, soit le point le plus bas, ou même parfois un point quelconque. Le centre du cercle, c'est-à-dire l'extrémité supérieure de la bielle de suspension, reste lui-même arbitraire, et susceptible de parcourir un autre arc de cercle, d'après la rotation du varlet de relevage autour d'un point fixe (fig. 462).

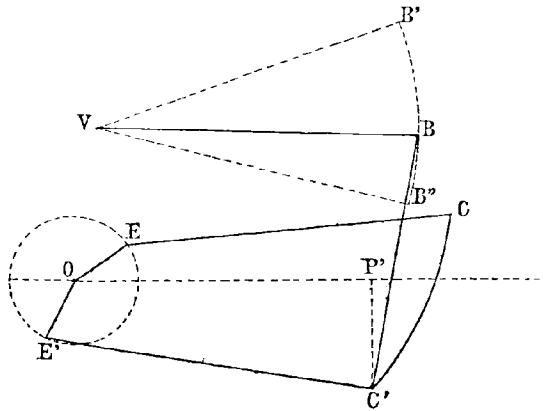


Fig. 462.

Il est naturel de chercher à disposer des éléments arbitraires de la suspension et du relevage, de manière à réduire autant que possible l'influence perturbatrice due à l'écart qui sépare, de la droite des points morts, l'arc de cercle décrit en réalité par le point K. A cet effet, nous assujettirons cet arc à présenter sa corde parallèlement à la droite du mouvement.

Bornons-nous pour cette recherche à considérer, parmi les

dispositif, le point mort de la coulisse est rigoureusement assujéti à se mouvoir en ligne droite. On l'engage pour cela dans une coulisse rectiligne horizontale, qui est perpendiculaire à l'un des montants d'un parallélogramme de Roberval (Blaton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 188). Cet organe sert de mécanisme de relevage, et ses tiges restent rigoureusement parallèles à elles-mêmes dans le mouvement. On peut dès lors admettre que cette condition se conserve avec aussi peu d'altération que possible pour les valeurs de  $x$  différentes de zéro, lorsque le coulisseau s'écarte du point mort.

divers modes d'attache, le cas le plus ordinaire, pour lequel la coulisse est suspendue par son extrémité inférieure  $C$  (fig. 462).

L'abscisse  $OP'$  de ce point nous est fournie par l'équation (8), que nous réduirons pour plus de simplicité à la forme :

$$\overline{OP'} = b - \frac{(a+x)^2}{2b} + e \left[ \sin(\alpha - \varphi) + \frac{a+x}{b} \cos(\alpha - \varphi) \right],$$

en y négligeant le terme qui renferme  $e^2$ .

Ses valeurs relatives aux points morts de la manivelle s'obtiennent par les hypothèses  $\varphi = 0$ ,  $\varphi = 180$  :

$$b - \frac{(a+x)^2}{2b} + e \left( \sin \alpha + \frac{a+x}{b} \cos \alpha \right),$$

$$b - \frac{(a+x)^2}{2b} - e \left( \sin \alpha + \frac{a+x}{b} \cos \alpha \right).$$

Leur moyenne arithmétique :

$$u = b - \frac{(a+x)^2}{2b},$$

représente, pour l'arc dont nous voulons rendre la corde horizontale, l'abscisse du centre de courbure, c'est-à-dire de l'extrémité  $B$  de la bielle de suspension.

Quant à l'ordonnée  $v$  de ce point, elle s'obtient évidemment en retranchant de la longueur  $\beta$  de cette bielle, qui est alors verticale, la valeur que prend à ce moment  $CP'$ . Or nous pouvons, comme dans les calculs précédents, confondre cette dernière droite avec le segment  $a+x$  de la coulisse. Il vient par conséquent :

$$v = \beta - (a+x).$$

**791** — En éliminant entre ces deux expressions la valeur de  $x$ , qui particularise les divers états du relevage, nous obtiendrons l'équation de la trajectoire que doit décrire dans ce mouvement le

point B, pour satisfaire à la condition imposée. Il vient ainsi :

$$(v - \beta)^2 = -2b(u - b).$$

Ce lieu est une parabole, qui a pour paramètre la barre d'excentrique  $b$ , et pour coordonnées de son sommet cette barre elle-même et la bielle de relevage  $\beta$ .

Si l'on confond cette courbe, dans les environs de son sommet, avec son cercle de courbure (qui en est *surosculateur* en ce point spécial), on sait que le rayon de courbure y est égal au paramètre  $b$ , c'est-à-dire à la barre d'excentrique.

Telle est donc la condition à remplir. Malheureusement elle excède ordinairement les possibilités de la pratique. Ces barres sont en effet fort longues, et le varlet deviendrait par là extrêmement encombrant, en même temps que très défavorable au développement de la force du mécanicien.

**792** — Supposons-la cependant remplie, pour achever cette étude. Si nous mettons la coulisse au fond de course inférieur, de telle sorte que son extrémité  $C'$  parvienne jusqu'à la droite  $OP$  dont nous cherchons à ne pas nous éloigner, le segment inférieur  $a + x'$  s'annule alors, et les coordonnées du point de suspension  $B'$  deviennent :

$$u' = b, \quad v' = \beta.$$

On y reconnaît celles du sommet. Dans ce cas, l'arc parabolique effectivement parcouru dans le relevage part donc de ce point.

Plaçons en second lieu la coulisse au fond de course supérieur. C'est maintenant le segment  $a - x''$  qui s'annule, et les coordonnées de  $B''$  deviennent :

$$u'' = b - \frac{2a^2}{b}, \quad v'' = \beta - 2a.$$

Ce sont celles de l'extrémité de l'arc utile de parabole.

On voit par là que les parcours horizontaux et verticaux de



l'articulation qui unit le varlet avec la bielle de relevage ont pour valeurs :

$$u' - u'' = \frac{2a^2}{b}, \quad v' - v'' = 2a,$$

et sont entre eux dans le rapport :

$$\frac{u' - u''}{v' - v''} = \frac{a}{b}$$

Il sera dès lors facile de déterminer le centre V de ce varlet, puisque l'on connaît par leurs coordonnées les deux extrémités de l'arc de cercle B' B'', ainsi que son rayon  $b$ .

## CHAPITRE XLVI

### ROBINETS

—

#### § 1

#### GÉNÉRALITÉS

**793** — Les tiroirs que nous avons étudiés jusqu'ici dérivent du glissement mutuel de deux surfaces cylindriques suivant leurs génératrices (n<sup>os</sup> 618, 688). Un second type fondamental de distributions nous est fourni par le glissement d'une surface de révolution à l'intérieur d'un *boisseau* de forme identique, en vertu d'une rotation autour de l'axe de figure commun à ces deux corps.

Ces appareils présentent, par rapport aux précédents, l'avantage d'être spontanément équilibrés, à la seule condition de leur attribuer une circonférence complète et non un simple fuseau, puisque le fluide élastique baigne alors la totalité de leur périphérie, ce qui supprime pour eux les effets dus à la pression sur le dos du tiroir (n<sup>o</sup> 688).

On désigne cette catégorie de distributeurs sous le nom générique de *robinets* <sup>(1)</sup>. Nous pouvons les classer à deux points de vue dif-

(1) Indépendamment des distributions par robinets auxquelles nous consacrons dans ce chapitre un examen spécial, je mentionnerai encore les suivantes : BÉDE-FARCOT (Buchetti. *Les machines à vapeur actuelles*, p. 83. — UHLAND. *Les nouvelles machines à vapeur*, p. 86. — A. ÉVRARD. *Traité d'exploitation des mines*, t. II, p. 215). — BENCAROLO (UHLAND. *Les nouvelles machines à vapeur*, p. 123. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXIV, p. 147). — CARLILE. UHLAND. *Les nouvelles machines à vapeur*, p. 101. — CAVÉ. Spineux. *De la distribution de la vapeur dans*

férents : 1<sup>o</sup> suivant la nature de la surface employée ; 2<sup>o</sup> d'après le mouvement dont elle est animée.

**794** — En ce qui concerne la surface, nous signalerons d'abord la plus simple de toutes : le plan, animé d'un mouvement de rotation autour d'une de ses normales. Il fournit les *distributions à disque*.

Vient ensuite le cylindre de révolution. Mais son emploi donne lieu à un grave inconvénient : le défaut d'étanchéité, qui a longtemps entravé le développement des distributions à robinets. En effet, la moindre usure de la paroi du cylindre ou de son boisseau laisse alors un jeu, qui détermine des fuites de vapeur.

Pour ce motif, on préfère au cylindre un tronc de cône appuyé longitudinalement contre une *butée* par une pression de vapeur, que l'on s'attache à régler de manière à concilier un degré satisfaisant d'étanchéité avec une douceur suffisante dans le frottement. Lors même que le cône plein vient à s'user, pourvu que ce soit uniformément, sa forme géométrique ne change pas, et le

*les machines*, p. 112. — CHARBONNAUD. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 4<sup>e</sup> série, t. V, p. 113. — DOUGLAS et GRANT (Uhland. *Les machines à vapeur nouvelles*, p. 59. — *Dingler's polytechnisches Journal*, t. XCCIX, 2<sup>e</sup> cahier, 1874). — DUTHIEL (*Portefeuille économique des machines*, février 1889. — *Notes sur les objets exposés par la Compagnie du chemin de fer d'Orléans en 1889*, in-4<sup>e</sup>). — EDWARDS. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXIV, p. 147. — FRIKART (fig. 463). *Engineering*, 6 septembre 1889, p. 277. — HILBECK. Uhland. *Les nouvelles machines à vapeur*, p. 108. — INGLISS (*Ibidem*, p. 45. — Buchetti. *Les machines à vapeur actuelles*, p. 74). — KAISER. *Revue industrielle*, 10 août 1889, p. 316. — LENGACHEZ. *Notice sur les objets exposés par la Compagnie des chemins de fer de Paris à Lyon et à la Méditerranée en 1889*, in-4<sup>e</sup>. — LUSCHKA (Uhland. *Les nouvelles machines à vapeur*, p. 100. — *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure*, 1877. — MARTEJUS. Spineux. *De la distribution de la vapeur dans les machines*, p. 112. — MAUDSLAY. *Ibidem*, p. 111. — MEYER, ZWEIFBRUCKEN et BAVARIA. — MITCHELL. *Scientific American*, 5 septembre 1885, p. 147. — MESIL. *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'Industrie minière de Saint-Étienne*, 1878, p. 64. — PRAFF. *Portefeuille économique des machines*, 1889, p. 29. — PROELL DORFLO. *Ibidem*, février 1889. — VON REICHE. Uhland. *Les nouvelles machines à vapeur*, p. 121. — SCHIVRE (*Ibidem*, p. 79. — *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, 3<sup>e</sup> série, t. IX, p. 83). — SCHWARZKOPF. Uhland. *Les nouvelles machines à vapeur*, p. 98. — SICKLER BOLLINGKX. Dwelshauvers-Dery. *Exposition d'Amsterdam*, groupe VII, classe 42, section A, p. 14. — SPINEUX (Spineux. *De la distribution de la vapeur dans les machines*). — SYPHER. *Scientific American*, 1<sup>er</sup> août 1885, p. 67. — THOMAS WATT. *Engineering*, 9 août 1878, p. 118. — VAESSEN. Spineux. *De la distribution de la vapeur dans les machines*, p. 112. — WILSON (*Ibidem*, p. 112. — Uhland. *Les nouvelles machines à vapeur*, p. 97).

contact subsiste lorsque l'on rapproche le corps suivant son axe par un rattrapage de jeu.

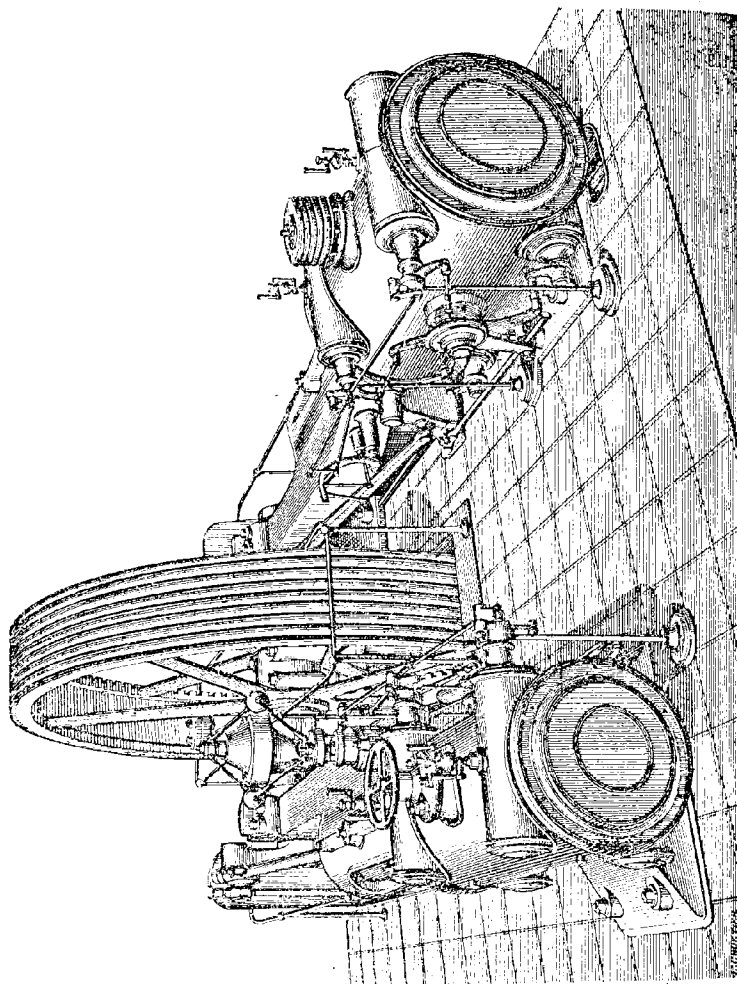


Fig. 403. — Machine Frikart (vue perspective).

**795** — En ce qui concerne le mouvement dont le robinet est animé, celui qui se rapproche le plus du jeu alternatif des tiroirs cylindriques consiste en une oscillation circulaire de part et d'autre d'une position moyenne. On obtient ainsi les *tiroirs-pendules*,

appelés aussi *obturateurs, tiroirs circulaires, tiroirs tournants*.

Dans certains cas <sup>(1)</sup>, on a cherché à réaliser le même mouvement relatif, mais en s'attachant à couper la vapeur avec plus de rapidité. On fait, dans ce but, avancer l'un vers l'autre deux robinets concentriques animés de rotations inverses; dispositif qui rappelle jusqu'à un certain point les distributions à deux tiroirs superposés (chap. XII).

Le *robinet continu* s'éloigne d'une manière beaucoup plus fondamentale du type du tiroir rectiligne alternatif. La rotation procède alors toujours dans le même sens. On réalise par là un jeu périodique, qui remet en rapport, aux mêmes intervalles, les pleins et les vides du corps tournant et de son enveloppe fixe. Ce dispositif convient assez directement, sans que ce soit pourtant d'une manière exclusive, aux moteurs rotatifs dont nous nous occuperons plus loin (n° 847).

Dans ce cas, le robinet exécute ordinairement une révolution pour chaque tour de l'arbre. Cependant on peut profiter de la forme circulaire, pour disposer symétriquement le long de la périphérie une répétition de  $n$  zones semblables <sup>(2)</sup>, de manière à n'avoir besoin, dans les moteurs rapides, que d'une seule révolution du robinet pour  $n$  tours de l'arbre moteur. Si au contraire il s'agit d'une machine lente, on doit se tenir en garde contre la mollesse avec laquelle se feront les démasquements. Il faut alors employer des ouvertures très allongées et multiples, d'après le principe des tiroirs à grille (n° 659).

Citons enfin une combinaison assez bizarre <sup>(3)</sup>, dans laquelle un tiroir plan tourne sur lui-même, tout en restant animé d'un mouvement rectiligne de va-et-vient <sup>(4)</sup>.

<sup>(1)</sup> Distribution RADINGER. *Engineering*, 15 mai 1874. — Distribution PELFRÈNE. *Technologie*, janvier 1881.

<sup>(2)</sup> Distribution MÉGY, quatre tours. Buchetti. *Les machines à vapeur actuelles*, p. 98. — Distribution MEYER, six tours. *Portefeuille économique des machines*, 1889, p. 8.

<sup>(3)</sup> Distribution CHURCH (*Revue industrielle*, 27 février 1884, p. 81. — *The mechanic Magazine*, 4 juin 1886). — Distribution PEYTON et WILSON. *Revue industrielle*, 24 septembre 1885, p. 584.

<sup>(4)</sup> Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 65.

## § 2

## MACHINES DIVERSES

**796** — *Machine Biérix*. — La distribution Biérix <sup>(1)</sup> est fondée sur l'emploi du robinet à mouvement continu, effectuant autant de tours que l'arbre moteur. Ce système a même été adapté à des moteurs compound *en tandem* (n° 820), avec un seul axe tournant pour porter les robinets distributeurs des divers cylindres (fig. 464). On lui imprime le mouvement au moyen d'engrenages hélicoïdaux.

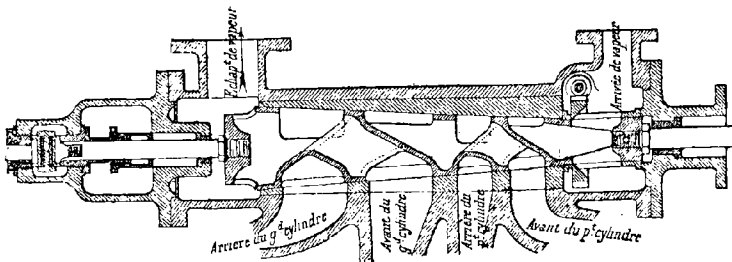


Fig. 464. — Robinet distributeur Biérix (coupe longitudinale).

On substitue ainsi l'emploi d'un organe unique aux *jeux de fer* plus ou moins complexes, qui caractérisent la plupart des machines à robinets.

L'obturateur est tronc-conique. Sa butée est formée de *grains* multiples et facilement réglables. Avec la perfection atteinte aujourd'hui par les procédés de la construction mécanique, l'usure paraît très faible. Le frottement est doux, et permet de faire varier la distribution par le régulateur ou à la main, en modifiant l'orientation du boisseau.

**797** — *Machine Ridder*. — La distribution de Ridder <sup>(2)</sup> dérive de celle de Meyer avec d'intéressantes modifications. Dans cette ma-

<sup>(1)</sup> *Revue industrielle*, 10 août 1889, p. 314. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1889, p. 262. — Buchetti. *Les machines à vapeur actuelles*, p. 91. — *Congrès international de mécanique appliquée de 1889*, p. 69.

<sup>(2)</sup> Buchetti. *Les machines à vapeur actuelles*, p. 1. — Sauvage. *Revue générale des*

chine, ainsi que dans celles qui suivront, le jeu de l'obturateur n'est plus progressif comme pour la précédente; il devient pendulaire.

Les lumières de la glace plane idéale que nous pouvons supposer enroulée sur la surface du boisseau pour en fournir la configuration, ne sont plus rectangulaires comme à l'ordinaire. Elles ont la forme d'un parallélogramme (fig. 465). Le taquet unique de détente présente la forme d'un trapèze isocèle de même angle  $\alpha$ . Pour faire varier la détente, on communique à ce dernier, à l'aide d'une vis et d'un volant-manette, un déplacement suivant la direction de sa médiane, c'est-à-dire perpendiculairement à celle du mouvement de va-et-vient.

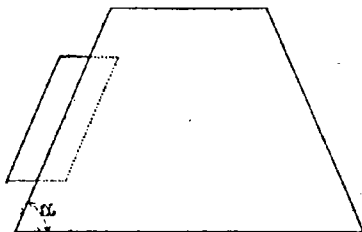


Fig. 465.

Si on le manœuvre ainsi d'une certaine quantité  $a$ , la zone située en regard des lumières se trouve élargie de chaque côté d'une quantité égale à  $a \cotang \alpha$ . On peut donc, en disposant de  $\alpha$ , réaliser des modifications sensibles du régime à l'aide de faibles dérangements.

Enfin le dispositif tournant permet la commande de l'appareil par le régulateur, à laquelle se prête beaucoup plus difficilement le système Meyer. Nous remarquerons d'ailleurs qu'avec cette combinaison, le glissement que doit déterminer l'effort du mécanicien étant perpendiculaire au mouvement d'entraînement, se trouvera disposé obliquement par rapport au mouvement relatif qui en résulte, au lieu d'être, comme à l'ordinaire, dans la direction même de ce dernier. Or le frottement est toujours diamétralement opposé au déplacement relatif. On n'a plus dès lors, pour opérer le glissement transversal, qu'à lutter seulement contre une composante du frottement et non contre cette force elle-même, ce qui facilitera d'autant la manœuvre (<sup>1</sup>).

*chemins de fer*, 1889, t. II, p. 164. — Herdner. *Annales des mines*, juillet-août 1877. — John Fell. *Lecture à l'Institution des Ingénieurs mécaniciens*, Bristol, juillet 1877. — De Quillacq. Détente Ridder appliquée aux machines d'extraction. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1890, p. 271.

(<sup>1</sup>) Haton de la Goupillière. Mouvement louvoyant. *Traité des mécanismes*, p. 391.

**798** — *Machine Corliss*. — Le moteur Corliss <sup>(1)</sup> a beaucoup frappé l'attention au moment de son apparition. Il a créé alors un courant considérable dans les voies de la transformation progressive de la construction mécanique. Si, depuis lors, une certaine réaction s'est produite dans les idées générales, ainsi que dans la pratique de son inventeur lui-même <sup>(2)</sup>, cette machine dans son état actuel n'en reste pas moins une de celles qui méritent le plus sérieux examen (fig. 466).

Le moteur Corliss possède, suivant le principe qui a été introduit par Cavé, quatre obturateurs distincts. Deux d'entre eux déterminent l'admission; les deux autres l'échappement. On obtient par là des températures plus constantes dans la masse métallique, en diminuant d'autant les condensations. Chaque paire de robinets est installée à l'une des extrémités du cylindre horizontal. Sur la génératrice supérieure se trouvent les distributeurs d'admission; ceux d'échappement sont placés à la partie inférieure, ce qui leur permet d'évacuer l'eau de condensation en même temps que la vapeur.

L'étanchéité est obtenue à l'aide d'un simple collet sur l'axe, appuyé contre une partie bien dressée. Les arbres sortent au dehors pour recevoir la commande. Les distributeurs sont indépendants, et remplissent leurs fonctions à des instants arbitraires, exempts des assujettissements qu'entraîne la distribution par tiroir unique.

Les obturateurs d'échappement peuvent être commandés d'une manière géométrique. Ceux de l'introduction de vapeur sont

<sup>(1)</sup> Pichault *Traité des distributions*, p. 316. — Coste et Maniquet. *Traité théorique et pratique des machines à vapeur*, etc. 2<sup>e</sup> édition, p. 121. — Spineux. *De la distribution de la vapeur dans les machines*, p. 100. — Bienaymé. *Les machines marines*, p. 228. — Uhlund. *Les nouvelles machines à vapeur*, p. 1. — De Fréminville. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 3<sup>e</sup> série, t. VII, p. 83. — Tresca. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXXXVIII, p. 465. — Ducos. *Génie civil*, t. III, p. 218. — Biver. *Ibidem*, t. VIII, p. 241. — *Annales industrielles*, 1885, t. I, p. 316. — *Bulletin de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 2<sup>e</sup> série, t. XII, p. 591. — *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1885, p. 112. — *Les Mondes*, t. LI, p. 40. — Proell and Scharowski. Corliss valve diagrams. *Proceedings of civil Engineers*, t. LVI. — Details of horizontal Corliss Engine. *Engineering*, 14 février 1890, p. 167, 170. — *Verhandlungen des Vereins zur Beförderung der Gewerbflleisses*, 1873, p. 102.

<sup>(2)</sup> On ne compte pas moins de huit types successifs bien caractérisés de la machine Corliss. En outre un grand nombre de constructeurs ont gravité autour de cette donnée, pour la plier à leurs propres conceptions.



influencés par un dash-pot. La manœuvre s'opère ainsi avec une

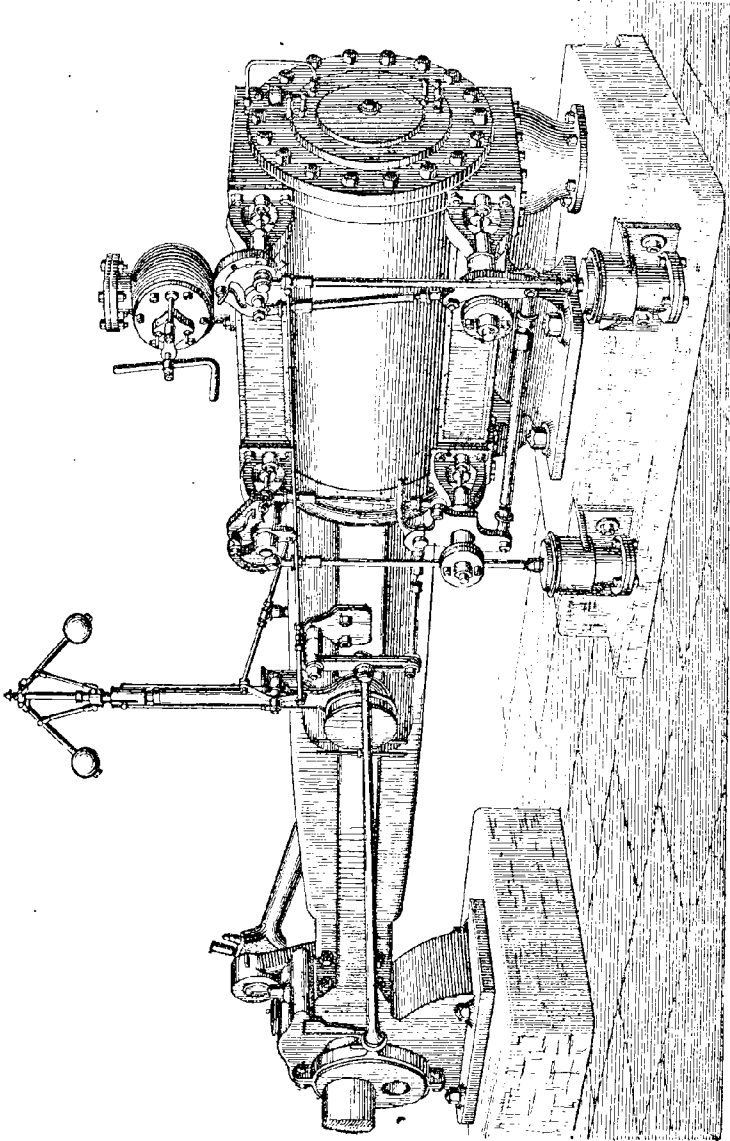


Fig. 465. — Machine de Berger-Audré (type Corliss) (vue perspective)

grande rapidité, lorsqu'une touche vient à déclencher l'obturateur, à un instant déterminé par les variations du régulateur.

Les quatre décliés sont commandés par un disque commun, que manœuvre un excentrique unique (\*). Cette pièce prend d'ailleurs le plus souvent la forme d'un X, sous le nom de *patte d'araignée* (fig. 467).

L'inventeur s'est attaché spécialement à réduire l'espace nuisible, qu'il a réussi en effet à restreindre dans des proportions inusitées

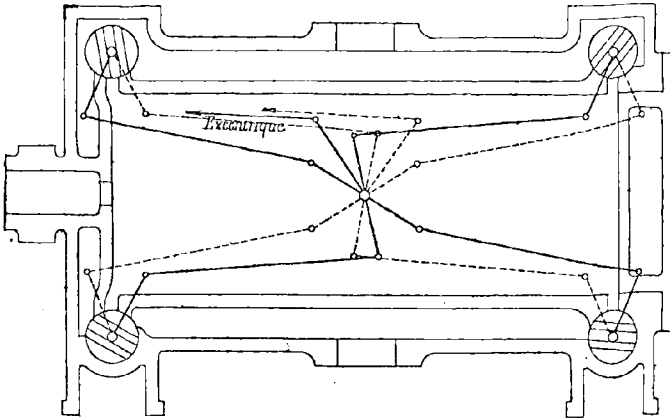


Fig. 467. — Patte d'araignée (figure schématique).

avant lui. La subdivision de la distribution à travers des lumières distinctes pour les diverses fonctions, a cependant pour résultat immédiat de doubler une portion importante de ce volume ; mais l'installation des appareils aux extrémités du cylindre, ordinairement très allongé dans les machines Corliss par rapport à sa section, diminue d'un autre côté la longueur de ces lumières. On a même placé les distributeurs dans les fonds du cylindre de manière

(\*) Quand on envisage ce système au point de vue cinématique dans toute sa généralité, l'emploi d'un secteur ou d'un plateau central oscillant devient équivalent à celui de quadrilatères articulés. Sa théorie complète exige donc l'intervention des fonctions elliptiques (Darboux. De l'emploi des fonctions elliptiques dans la théorie du quadrilatère plan. *Bulletin des sciences mathématiques*, 2<sup>e</sup> série, t. III, p. 109). M. Léauté en a donné une solution approximative très suffisante pour la pratique, en cherchant la valeur des éléments du système qui permettront de communiquer à l'obturateur un mouvement déterminé (Léauté. Sur la distribution dans les machines à quatre tiroirs. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. CVI, p. 336. — *Centenaire de la Société philomathique de Paris*, in-4<sup>o</sup>, p. 43).

à se dégager, aux extrémités des génératrices, de l'influence de l'épaisseur du piston.

M. Corliss supprimait presque complètement dans l'origine la phase de compression, comme conséquence de la réduction de l'espace libre. Toutefois une réaction importante s'est opérée sur ce point, dans le sens des vues qui ont été développées ci-dessus (n° 669).

Ajoutons enfin que ce constructeur a également innové en ce qui concerne le bâti et l'installation de sa machine (n° 558).

**799** — *Machine Stoppani*. — Dans le moteur Corliss ordinaire, le déclenchement ne peut s'opérer que pendant le mouvement direct, et non durant le retour de la clenche; circonstance qui tend à restreindre en pratique l'admission au-dessous de 40 % de la

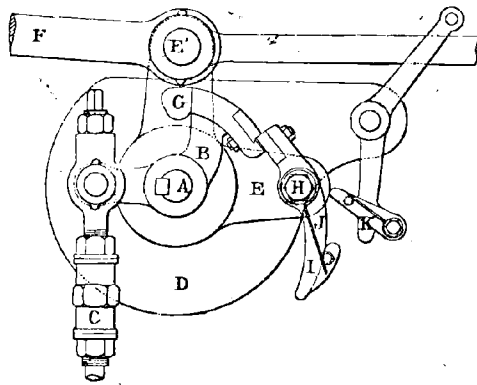


Fig. 468. — Déclie Stoppani-Dickhoff (élévation).

course. A la suite de M. Farcot <sup>(1)</sup>, certains ingénieurs <sup>(2)</sup> ont cherché à écarter cet obstacle, en mettant à profit les deux sens du mouvement. On arrive ainsi à faire varier l'introduction de zéro à 80 %.

<sup>(1)</sup> Hirsch. *Les machines et les appareils de la mécanique générale à l'Exposition de 1878*.

<sup>(2)</sup> Machine STOPPANI (Dwelschauvers-Dery. *Exposition universelle de 1889*, p. 36. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie* 1889, p. 229). — Machine LECOUTEUX et GARNIER (fig. 469) (*Ibidem*, 3<sup>e</sup> série, t. VII, p. 170. — Buchetti. *Les machines à vapeur actuelles*, p. 110. — *Congrès international de mécanique appliquée de 1889*, t. II, p. 46).

Le moteur Stoppani n'a que deux distributeurs, qui sont actionnés par un seul excentrique. L'arbre A porte un toc d'entraînement B, relié par une bielle C à un ressort de rappel, qui a été supprimé sur la figure 468. Cet arbre A est fou à l'intérieur d'une douille portée sur le plateau D du distributeur. Autour de cette dernière, tournée fou également un levier coudé EE', directement actionné par la bielle d'excentrique F. Ce varlet porte un taquet d'entraînement G, ainsi que l'articulation H d'un cliquet I.

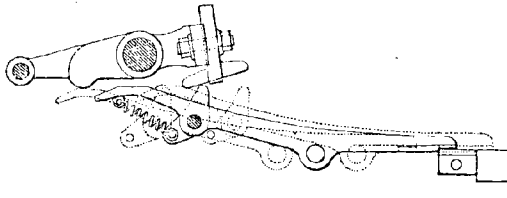


Fig. 469. — Déclie Leconteux et Garnier (élévation).

Lorsque le système passe par sa position moyenne, que représente précisément la figure 468, le levier coudé E entraîne l'obturateur, en raison de l'engrènement du taquet G avec le toc B. En même temps le cliquet I est enclenché par la pression du petit ressort J. Tout l'ensemble est donc solidaire. Il exécute un mouvement d'aller et retour d'un côté de la situation moyenne, et détermine pendant ce temps, comme un tiroir ordinaire, les périodes d'échappement et de compression.

Un déplacement analogue s'effectue ensuite du côté opposé pour produire l'admission ; mais il s'opère alors une modification capitale. A un certain instant, le cliquet I vient rencontrer le butoir K, qui est composé de deux pièces distinctes, projetées l'une sur l'autre dans la figure 468. L'une d'elles peut être rencontrée dans le mouvement direct, et l'autre pendant le retour, selon la position que leur imposent les variations du régulateur. Le déclenchement a lieu, le distributeur redevient libre, et sous l'action du ressort de rappel C, il reprend vivement sa position initiale en coupant la vapeur. Le levier coudé achève seul son oscillation. Il revient à sa situation moyenne, et détermine l'échappement en entraînant l'obturateur par le contact du taquet G avec le toc B.

800 — *Machine Wheelock*. — Le moteur Wheelock <sup>(1)</sup>, que

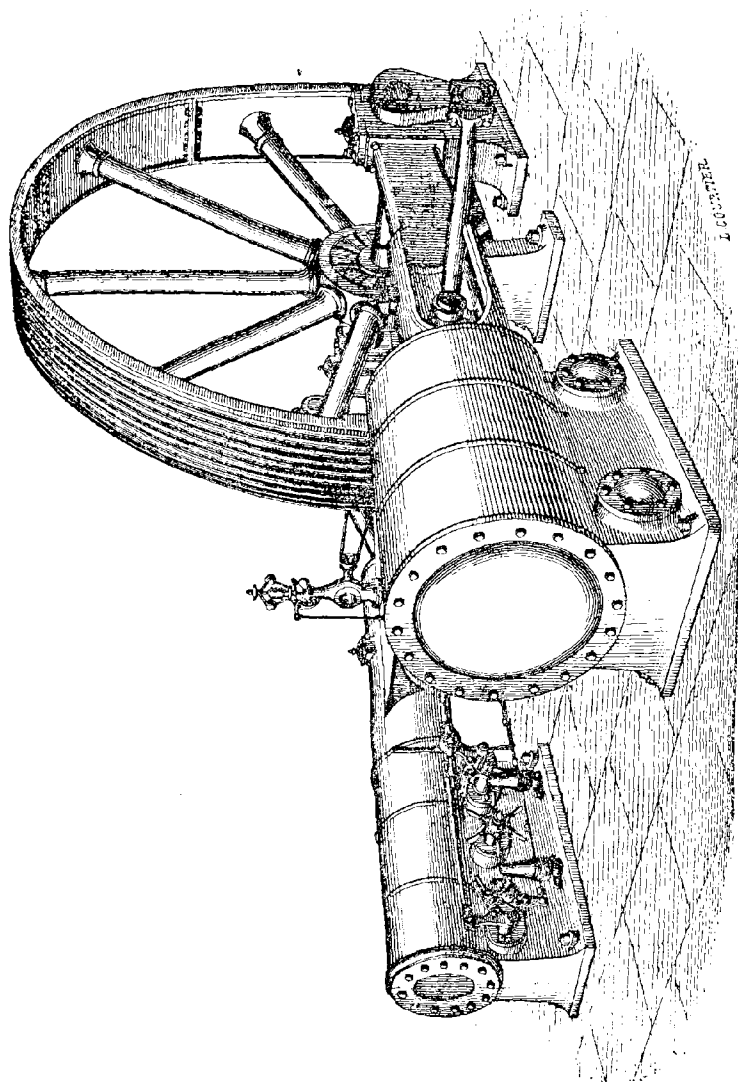


Fig. 470. — Machine de Quillacq (type Wheelock) (vue perspective).

construit en France la maison de Quillacq, est dérivé originaire-

<sup>(1)</sup> Rapport de M. Brull sur la machine Wheelock. *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*, 4<sup>e</sup> série, t. IV, p. 101. — *Génie civil*, 50 mars 1889, p. 551. — *Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 50. — *Revue*

ment du type Corliss ; mais il s'en est, depuis lors, beaucoup écarté par la substitution d'un tiroir plan à genouillère à la place des robinets primitifs, tout en conservant le dispositif d'ensemble de la commande (fig. 470).

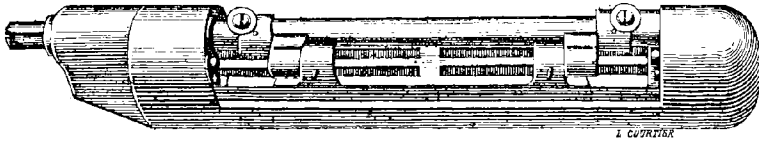


Fig. 471. — Distributeur Wheelock (vue perspective).

Le détail du distributeur est représenté par les figures 471, 472.

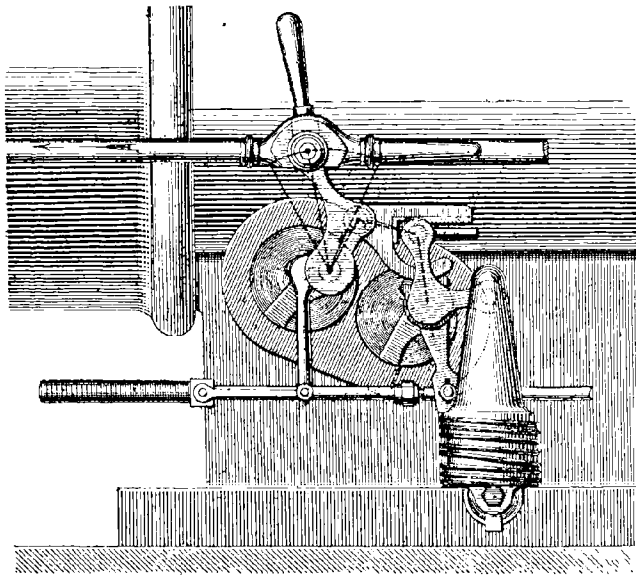


Fig. 472. — Distributeur Wheelock (élévation).

473. Il en existe quatre distincts, qui sont actionnés par une patte

*industrielle*, 15 juillet 1889. — *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1889, p. 93; 1890, p. 102. — *Congrès international de mécanique appliquée* de 1889, p. 98. — *Claeys. Système de détente variable automatique sans déclics, applicable aux machines à vapeur du genre Corliss Wheelock*. 1890, grand in-4°.

d'araignée gouvernée par un excentrique unique. Le tiroir est à grille, avec ouvertures étroites et allongées, en vue de diminuer l'étirage de la vapeur. En outre, l'excentrique est calé de sorte que le tiroir se trouve animé de sa plus grande vitesse, au moment du démasquement ou de la fermeture des orifices.

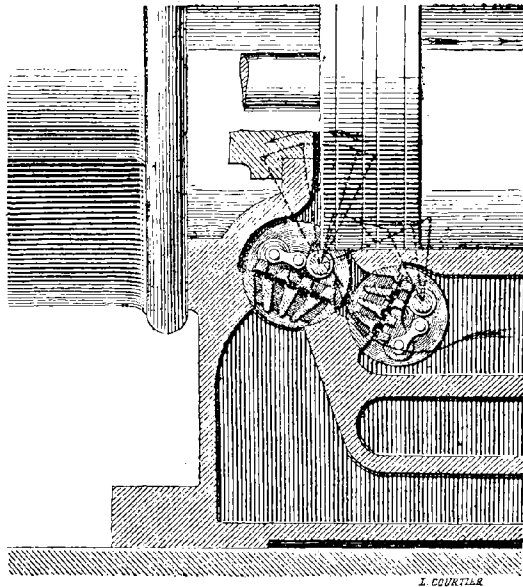


Fig. 473. — Distributeur Wheelock (coupe).

Cet organe ne frotte sur sa glace que le long d'étroites portées encadrant chaque lumière. De cette manière, la vapeur se répand sous la grille du tiroir, dès que celui-ci a exécuté le plus petit mouvement. Elle équilibre la pression dorsale et atténue le frottement. Le distributeur obéit dès lors aisément au régulateur, dont les variations s'emploient à désorienter les touches de déclenchement au moyen d'un secteur. Quant au démarrage du premier moment, il est facilité par cette circonstance que les leviers se trouvent alors vers leurs points morts, et doués par conséquent de leur maximum de puissance.

La glace et le distributeur forment un ensemble qu'on loge dans

la cavité conique des anciens obturateurs placés à l'intérieur des fonds, de manière à réduire à 1,5 % l'espace nuisible. Les joints sont métalliques, sans aucun calfat. Les pièces frottantes étant ainsi amovibles, le corps du cylindre ne supporte aucune usure. On les enfonce dans leur logement d'un coup de maillet. L'enlèvement et la remise en place sont rapides. On peut d'ailleurs, en cas de nécessité, marcher à simple effet pendant la réparation des distributeurs avariés; bien qu'il soit préférable sous ce rapport d'en avoir toujours un de rechange. Pour faciliter ces manœuvres, la barre d'excentrique est ensellée, et peut être aisément déclenchée. On la munit d'une poignée, qui permet au besoin de conduire le système à la main pour opérer la mise en train.



## CHAPITRE XLVII

### SOUPAPES

—

#### § 1

#### GÉNÉRALITÉS

**801** — Les distributions de vapeur fondées sur l'emploi des soupapes <sup>(1)</sup> s'éloignent encore plus que les robinets du mode de fonctionnement des tiroirs. Dans ces deux derniers types, le mouvement de démasquement reste tangentiel. Pour les soupapes, au contraire, il s'effectue suivant la normale à la surface qui leur sert de siège.

L'effort à surmonter pour effectuer ce soulèvement est occasionné par la pression dorsale. Avec les tiroirs, la résultante à vaincre est le produit de cette même force par le coefficient de frottement,

(1) Indépendamment des distributions par soupapes auxquelles nous consacrons dans ce chapitre un examen spécial, je mentionnerai encore les suivantes : ARTIGE. *Bulletin de la Société de l'industrie minérale de Saint-Etienne*, 2<sup>e</sup> série, t. VIII, p. 303. — BERGHOFF. Buchetti. *Les machines à vapeur actuelles*, p. 102. — COLLMANN (fig. 474) *Ibidem*, p. 79. — UHLAND. *Les nouvelles machines à vapeur*, p. 212. — HARTMANN Buchetti. *Les machines à vapeur actuelles*, p. 95. — LELONG. — PROELL. *Ibidem*, p. 102. — REVOLLIER. Armengaud. *Traité des moteurs à vapeur*, t. I, p. 427. — SOGIN. Buchetti. *Les machines à vapeur actuelles*, p. 102. — WALSCHAERT. *Ibidem*, p. 102. — ZIMMERMANN. *Ibidem*, p. 91. — Pompe de Chaillot. Armengaud. *Traité des moteurs à vapeur*, t. II, planches 34, 35. — Machine de Selly Oak. *Engineering*, 1881, t. I, p. 504. — *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Etienne*, 7 octobre 1888. — Riedler. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 2<sup>e</sup> série, t. XX.

Dans certaines machines mixtes, on associe les soupapes pour l'admission, avec des tiroirs pour l'échappement (Machine NOLET. Buchetti. *Les machines à vapeur actuelles*, p. 102).

qui est beaucoup moindre que l'unité. Mais, en revanche, cet obstacle reste permanent, tandis que, dès le premier instant du soulève

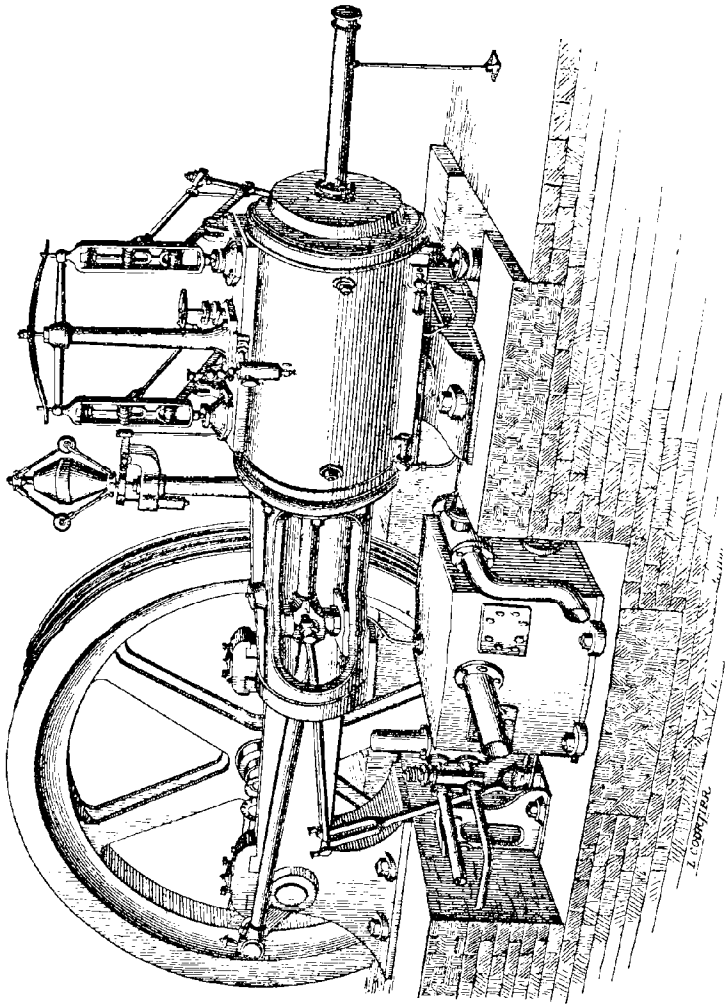


Fig. 474. — Machine d'Esclier, Wyss (type COLLMAN) (vue perspective.)

ment d'une soupape, la pression tend à s'équilibrer par-dessous (\*).

Le mouvement tangentiel des tiroirs présente l'avantage de ba-

(\* Régénérateur Bochkoltz (Haton de la Goupillière. *Cours d'exploitation des mines*. t. II, n° 954).

layer les corps étrangers que le hasard aurait pu amener sur ce point. La soupape au contraire ne fait que les marteler sur place.

La chute de cet organe sur son siège s'accompagne d'un choc assez rude. Dans une matière dépourvue de dureté, cet effet finirait par produire une empreinte plus ou moins inégale, et un défaut d'étanchéité; tandis que le mouvement tangentiel tend à polir les surfaces. Ajoutons pourtant qu'en employant des aciers de qualité supérieure, on arrive à réaliser des durées de plusieurs années d'un bon service.

Pour amortir l'intensité de la retombée, on a soin d'équilibrer presque complètement les clapets. Mais quand on craint de trop affaiblir ainsi l'accélération du retour, que l'on redoute une certaine dureté du mécanisme, ou que le mouvement doit avoir lieu dans le sens horizontal, on emploie des contre-galets qui, au moment voulu, contraignent la soupape à regagner son siège.

En vue de couper brusquement la vapeur, on introduit des poids supplémentaires, des ressorts, ou des dash-pots, qui manœuvrent le distributeur avec rapidité au moment où il se trouve déclenché par un jeu de fer (n° 657).

**802** — On peut également, pour diminuer le laminage du fluide, avoir recours au principe des ouvertures multiples (n° 659). Son application se présente notamment dans la *soupape de Hornblower*, qui est aujourd'hui d'un usage à peu près constant, sous le nom de *soupape à double siège*, ou de *soupape de Cornouailles* <sup>(1)</sup>.

Le chapeau mobile comprend d'abord (fig. 475) une zone latérale pleine, de forme convexe, qui repose par sa base sur un siège tronc-conique. Son bord supérieur

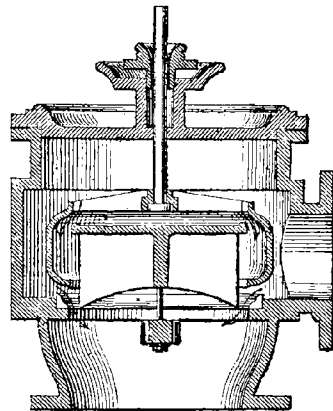


Fig. 475. — Soupape à double siège.  
(Coupe méridienne).

<sup>(1)</sup> Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction de G. Richard, p. 128.

est assemblé à une tige centrale, à l'aide d'un croisillon formé de quatre bras d'une faible largeur, lequel repose sur un disque plein appartenant au siège fixe.

La soupape étant abaissée, le passage se trouve intercepté de toutes parts, latéralement par la joue mobile, et horizontalement par le fond fixe. Mais, pour le moindre soulèvement, la vapeur va s'introduire par une double voie : 1° entre la base de la soupape et son siège tronconique ; 2° entre son bord supérieur et celui du chapeau fixe, en passant entre les bras du croisillon. On aura ainsi, à égalité de déplacement linéaire, procuré au fluide une section d'écoulement deux fois plus grande qu'avec un clapet ordinaire.

## § 2

### MACHINES DE ROTATION

**803** — *Machine Sulzer*. — Le moteur Sulzer <sup>(1)</sup> est représenté par la figure 477. Une soupape d'admission fournit la vapeur, à chaque extrémité de la génératrice supérieure du cylindre horizontal ; deux autres, à la partie inférieure, servent de même à évacuer à la fois la vapeur et l'eau de la condensation.

Un ressort charge la soupape d'admission, dont la chute est influencée par un dash-pot. L'air comprimé s'échappe de ce dernier à travers un orifice que l'on règle avec un bouchon à vis. La manœuvre est déterminée par le moment où la clenche vient échapper une touche, gouvernée par un axe que l'on relie à l'arbre tournant au moyen de roues dentées égales entre elles, de manière à communiquer à tous les deux la même vitesse angulaire. Cet axe est mis en communication avec la touche par un ingénieux jeu de

<sup>(1)</sup> Résal. Machine à détente variable Sulzer. *Annales des mines*, 7<sup>e</sup> série, t. IX, p. 221. — Coste et Maniquet. *Traité théorique et pratique des machines à vapeur*, etc., p. 166. — Buchetti. *Les machines à vapeur actuelles*, p. 87. — Uhland. *Les nouvelles machines à vapeur*, p. 192. — A. Eyraud. *Traité d'exploitation des mines*, t. II, p. 210. — Timmermanns. *Etude sur les machines d'extraction à détente* (fig. 476), — *The Engineer*, 30 août 1878, p. 154.

fer. Celui que représente la figure 478 a été établi par la maison Carels de Gand.

**804** — *Machine Brown.* — Le moteur Brown<sup>(1)</sup> est horizontal et

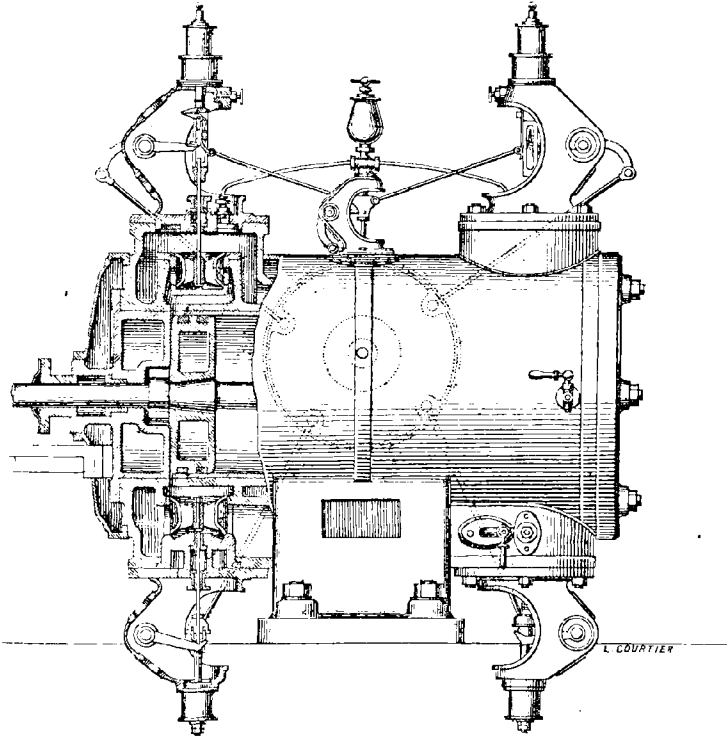


Fig. 476. — Machine à soupapes Timmermanns (coupe verticale).

à un seul cylindre. La distribution est radiale (n° 745). Sa commande est prise sur le milieu de la bielle motrice, qui décrit une sorte

<sup>(1)</sup> Jules Boulvin. Étude sur les distributions sans excentriques. *Annales de l'Association des Ingénieurs sortis des Ecoles spéciales de Gand*, 1884. — Hirsch. *Les machines et les appareils de la mécanique générale à l'Exposition universelle de 1878*, groupe VI, classe 54, p. 214. — Ledoux. *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1878, p. 185. — Buchetti. *Les machines à vapeur actuelles*, p. 95. — Uhland. *Les nouvelles machines à vapeur*, p. 217. — *Engineering*, 14 juillet 1878, p. 475. — *The Engineer*, 24 mai 1878, p. 365.

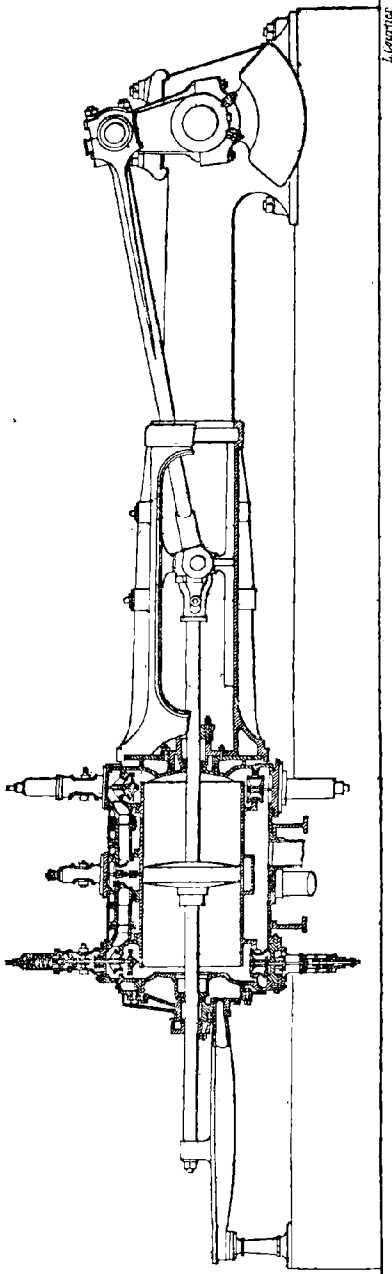


Fig. 477. — Machine Sulzer (coupe longitudinale).

d'ellipse allongée. Un système articulé transforme cette trajectoire en un mouvement rectiligne alternatif, communiqué à une tringle portant deux touches, qui viennent successivement attaquer les deux soupapes d'admission. La détente varie d'après l'inclinaison d'une barre reliée au régulateur à boules. L'avance reste néanmoins constante. Un excentrique spécial manœuvre d'autre part les soupapes d'échappement.

**805 — Machine Meyer.** — M. Meyer a employé une soupape pour la distribution de la vapeur, dans des conditions tout à fait spéciales.

Il s'en sert pour couper la vapeur, non plus, comme dans les cas précédents, à son entrée dans le cylindre, mais avant son introduction dans la boîte même de distribution. On réalise ainsi la détente, mais au prix d'une augmentation considérable de l'espace nuisible, dans lequel se trouve alors rangée

la capacité totale de cette chambre. Cet inconvénient est racheté

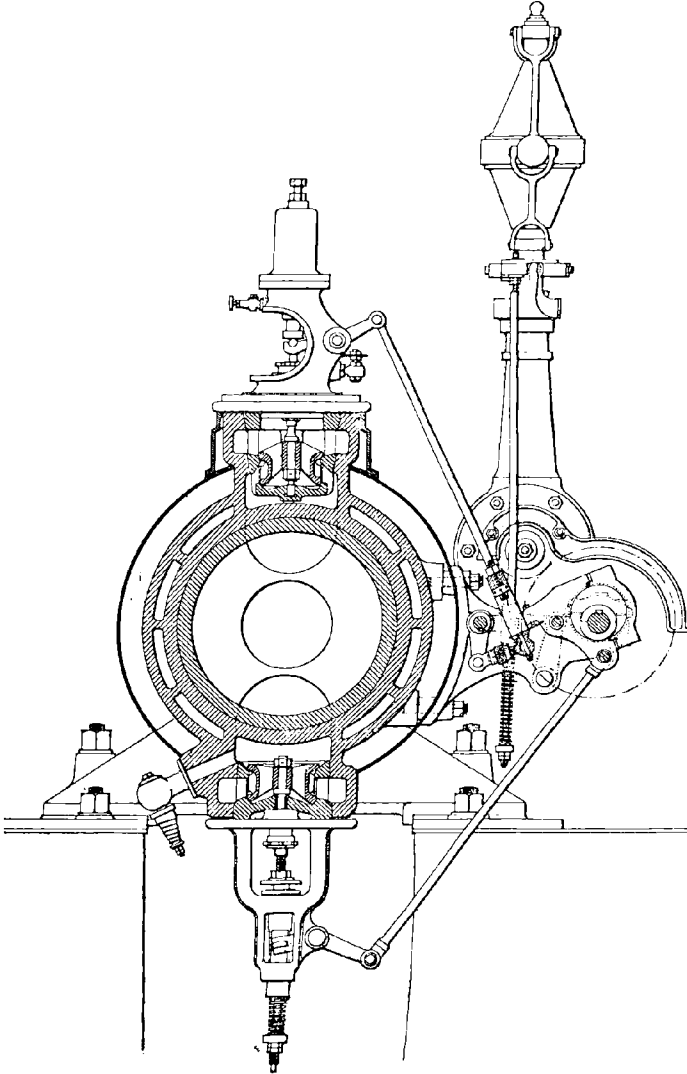


Fig. 478. — Commande de soupapes Carels (coupe transversale).

par la facilité de la manœuvre, qui est fondée sur l'emploi de la *came hélicoïdale* ou *manchon à bosse*.

Cet organe dérive de l'excentrique à ondes<sup>(1)</sup>, que l'on constitue de la manière suivante. Imaginons deux cercles concentriques (fig. 479), ainsi que deux rayons comprenant entre eux un angle arbitraire. On utilise pour le profil effectif l'une des circonférences à l'intérieur de cet angle et l'autre en dehors, en raccordant les passages par des courbes à inflexion qui ne présentent pas trop de raideur. De cette manière, la soupape se trouve soulevée par le passage de la saillie que présente le contour, pendant un temps plus ou moins long, suivant l'ouverture adoptée pour l'angle des rayons.

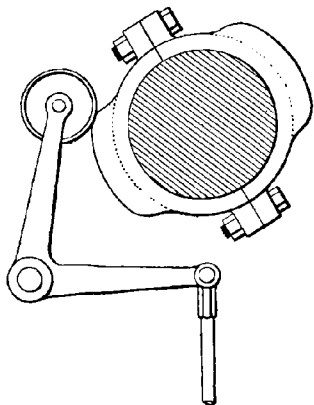


Fig. 479. — Excentrique à ondes.  
(Élévation).

Cela posé, imaginons (fig. 480) une série de semblables excentriques que l'on aurait

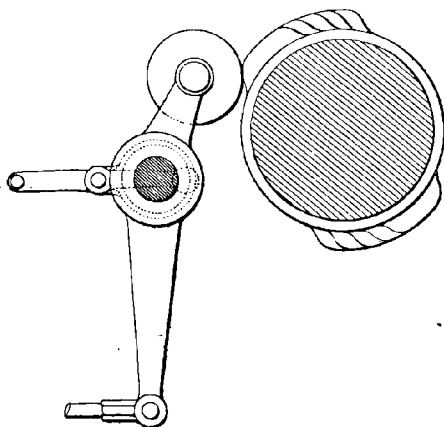


Fig. 480. — Came hélicoïdale (élévation).

construits en employant toute une gamme d'angles variables, et que l'on empilerait comme des pièces de monnaie, avec raccordement des aspérités de cette sorte d'escalier par une surface continue. Si l'on imprime arbitrairement à cette came hélicoïdale un déplacement longitudinal suivant son axe, on mettra ainsi en regard

du galet qui commande la soupape, différentes sections droites de ce corps cylindroïde; ce qui fournira le moyen de couper la

(1) Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 85.



vapeur plus ou moins tôt à la volonté du conducteur de la machine, ou, en d'autres termes, de faire varier la détente.

Lorsque le moteur doit comporter en outre le changement de marche, on associe l'une au bout de l'autre, pour former le manchon à bossés, deux parties symétriques inversement disposées.

**806** — *Machine Audemar.* — M. Audemar <sup>(1)</sup> a employé de deux manières différentes le manchon à bossés pour la conduite des moteurs à soupapes destinés au service de l'extraction des mines.

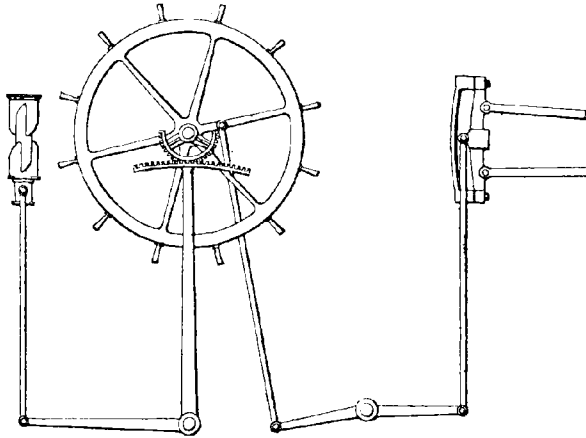


Fig. 481. — Distribution Audemar (élévation).

Dans un premier dispositif (fig. 481), il associe le dispositif Meyer qui vient d'être décrit, avec une coulisse de Stephenson, en vue d'alléger assez l'effort imposé au mécanicien pour que celui-ci reste parfaitement maître de sa machine dans des manœuvres délicates et fréquemment répétées.

Un même levier, ou une roue à poignées, gouverne à la fois les deux organes. Un engrenage multiplicateur de vitesse établit la

<sup>(1)</sup> Audemar (*Bulletin de la Société de l'industrie minière de Saint-Étienne*, 1870, 1878, 2<sup>e</sup> série, t. II, p. 569. — *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minière de Saint-Étienne*, 1876, p. 11). — Coste et Maniquet. *Traité théorique et pratique des machines à vapeur*, etc., p. 183. — A. Évrard. *Traité d'exploitation des mines*, t. II, p. 196. — Haton de la Goupillière. *Cours d'exploitation des mines*, t. II, p. 146.

liaison, de manière qu'un très petit mouvement du levier de commande corresponde à une excursion assez étendue de la came hélicoïdale. Dans ces conditions, le tiroir est peu déplacé par ce mouvement, qui n'exige, par suite, du mécanicien qu'un faible travail pour vaincre celui du frottement. Et cependant la came a couru assez loin suivant son axe pour que la soupape Meyer se trouve influencée d'une manière tout autre, et coupe maintenant la vapeur d'après des périodes très différentes. On arrive donc facilement à faire varier la détente.

Il en sera de même pour renverser la marche. Cependant il faut bien alors en venir à produire une grande excursion du levier et du tiroir, puisque le coulisseau doit maintenant se transporter de l'une à l'autre des régions extrêmes de la coulisse. Mais, dans ce cas, le manchon à bosse atteint très rapidement une région centrale qui ne présente plus de renflement, et pour laquelle, par suite, il ne se produit aucune admission dans la boîte de distribution; la soupape restant plaquée sur son siège. De là une chute complète de la pression exercée sur le dos du tiroir, lequel dès lors n'oppose plus de frottement important, et se prête sans obstacle à la manœuvre du mécanicien.

Aux deux extrémités du manchon, au contraire, le renflement règne sur toute la circonférence. Toute détente est supprimée, et la machine, fonctionnant constamment en pleine pression, se trouve bien en main du machiniste pour faciliter les manœuvres que celui-ci doit exécuter sur les clichages.

**807** — Dans un second dispositif, M. Audemar associe ensemble quatre soupapes destinées à effectuer la distribution directe dans le cylindre, et groupées deux par deux à ses extrémités, pour y produire l'admission et l'échappement d'une manière distincte.

Une même tige, placée à la disposition du mécanicien, porte quatre cames hélicoïdales qui leur correspondent respectivement. Suivant la position que l'on attribue à cette tiraude, on peut faire varier la détente; de même que, par un renversement plus complet, on réalisera le changement de marche.

Il est nécessaire à cet égard de ne pas perdre de vue que

l'ensemble du cylindre et de ses accessoires étant symétrique par rapport à une section transversale menée par le milieu de la longueur, il ne saurait en être de même pour la tiraude et ses quatre cames. En effet, celles-ci obéissent toutes ensemble à un même mouvement longitudinal, et non à deux mouvements opposés l'un à l'autre, comme l'exigerait la symétrie. Il est donc nécessaire que les deux cames de l'un des groupes soient constituées d'une manière inverse du type employé pour l'autre.

## § 5

### MACHINE DE CORNOUAILLES

**808** — *Description.* — La machine de Cornouailles<sup>(1)</sup> diffère profondément de toutes celles que nous avons déjà examinées jusqu'ici, et de celles qui suivront encore. En premier lieu, elle est à *simple effet*; en outre, elle présente dans sa distribution une nouvelle phase fondamentale nommée *période d'équilibre*; enfin elle est *intermittente*. Examinons successivement ces trois points.

Le moteur est à simple effet; c'est-à-dire que la vapeur n'agit que sur une seule face du piston, et durant une des deux courses simples. Cet organe est ensuite ramené pendant la contre-course par une résistance qui, après avoir été vaincue dans la première phase, reprend alors son empire. Cette force est ordinairement la pesanteur, le cylindre étant placé verticalement.

Elle peut alors intervenir de deux manières différentes. Si la machine est à traction directe, la vapeur agit par-dessous le piston, qu'elle force à monter. Celui-ci redescend ensuite en raison de son propre poids, et de celui de l'*attirail* qui en est solidaire<sup>(2)</sup>. Lorsque le moteur est à balancier (n° 836), la vapeur exerce sa pression au-dessus du piston, et tend à l'abaisser, en élevant d'autre part les poids qui sont reliés à l'extrémité opposée du balancier. Ces derniers

<sup>(1)</sup> Armengaud. *Traité des moteurs à vapeur*, t. II, p. 85. — Wickstead. *The cornish pumping Engine*. — Worshead. *Duty of the cornish pumping Engine*. — *Proceedings of civil Engineers*, t. XXIII.

<sup>(2)</sup> Haton de la Goupillière. *Cours d'exploitation des mines*, t. II, p. 287.

relèvent ensuite le piston, quand ils reprennent la prépondérance.

Le simple effet tend à diminuer l'usure, attendu que c'est toujours dans le même sens que le piston frotte avec force, ce qui a pour résultat de polir les surfaces, tandis qu'un effort égal, exercé alternativement des deux côtés dans les moteurs à double effet, tend à désagréger le métal.

**809** — Nous avons dit en second lieu que l'on rencontre dans ces machines une période spéciale d'*équilibre*, qui vient s'ajouter aux phases ordinaires : pleine pression, détente, échappement et compression.

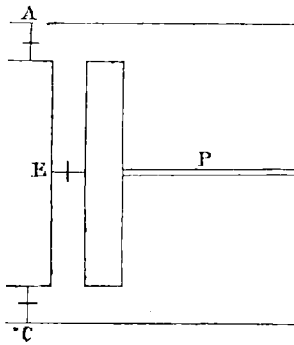


Fig. 482.

On met à cet effet en communication les deux extrémités du cylindre par un conduit latéral, qui porte le nom de tube d'équilibre (fig. 482). Trois soupapes fondamentales interviennent dans la distribution, à savoir : A (soupape d'admission), C (soupape de condensation, appelée aussi soupape d'exhaustion), E (soupape d'équilibre).

Si nous supposons, pour fixer les idées, que le moteur soit à balancier, la vapeur se trouve, par l'ouverture du clapet A, admise au-dessus du piston. La soupape E reste fermée. C est ouverte. Le piston P est sollicité sur sa face supérieure par la pression de la chaudière, tandis que la tension de l'atmosphère, ou celle du condenseur, s'exercent du côté opposé. Il s'abaisse donc en surmontant les résistances.

A la fin de cette phase de pleine pression, A se ferme sans que les autres soupapes changent de position. La détente commence.

Pour une troisième période, C se ferme, tandis que E s'ouvre du même coup, A restant fermée. La vapeur, déjà détendue, se met alors en équilibre sur les deux faces du piston, sur lequel elle perd dès lors toute action propre. Celui-ci continue cependant son mouvement par la vitesse acquise; mais celle-ci va en diminuant par l'influence des résistances, tant utiles que passives.

C'est la phase d'équilibre, pendant la seconde partie de laquelle le piston, ayant fini par s'arrêter en raison de son ralentissement progressif<sup>(1)</sup>, se met ensuite à remonter, sous l'action du poids de l'attirail qui sollicite la queue du balancier.

Pour une quatrième période, vers la fin de cette excursion ascendante, la soupape E se ferme. Dès lors, la vapeur d'équilibre qui se trouve par là isolée au-dessus du piston, sera dorénavant refoulée sur elle-même. C'est la phase de compression.

**810** — Tout se retrouve alors dans les conditions initiales, au moment où l'admission A et la condensation C s'ouvrent de nouveau. Mais cet instant n'arrive pas immédiatement, et, ainsi que nous l'avons dit, la machine de Cornouailles présente le caractère exceptionnel de l'intermittence. Au lieu de se succéder d'une manière continue, comme dans le moteur à double effet, sous l'influence de la rotation ininterrompue de l'arbre et du volant, les diverses courses constituent individuellement des évolutions complètes, nettement détachées les unes des autres. L'intervalle qui les sépare reste variable à volonté, selon le degré d'activité que l'on désire imprimer à la production du travail.

Pendant ce laps de temps, le séjour de la vapeur conserve aux parois du cylindre leur température. C'est seulement lorsque vient le moment de fournir une nouvelle course, que la soupape C s'ouvre pour opérer la condensation de cette cylindrée, en même temps que A pour en fournir une nouvelle.

Cette propriété si caractéristique de l'intermittence s'obtient à l'aide d'un appareil spécial appelé *cataracte*.

**811** — On désigne sous ce nom une petite pompe à eau glycerinée ou à huile (fig. 483, 484). Un conduit latéral permet au liquide de se transporter d'une extrémité à l'autre du cylindre, en raison de la descente progressive d'un piston. Celui-ci est ensuite relevé subitement vers la fin de la course du piston moteur, par l'intermédiaire de la poutrelle de distribution qu'actionne ce dernier.

<sup>(1)</sup> On a soin de disposer un tampon de choc capable d'arrêter dans tous les cas le piston, s'il s'emportait par hasard au delà des limites voulues.

Cette poutrelle continue à glisser le long du levier de la cataracte, une fois qu'elle l'a ramené dans sa position supérieure. Elle remonte

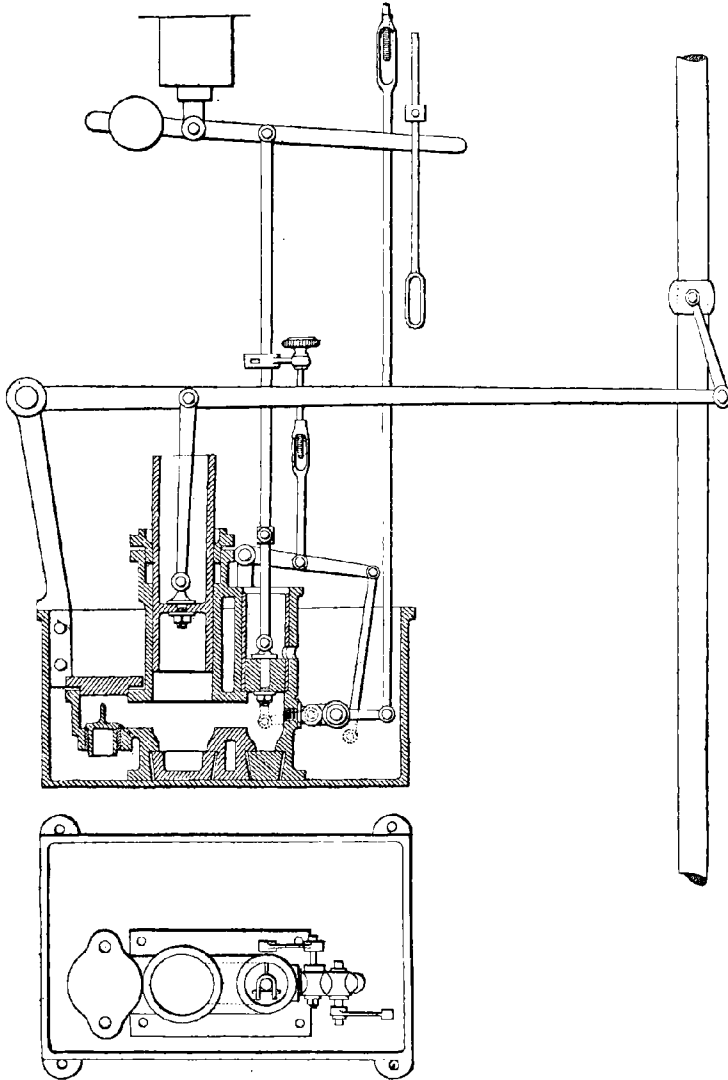


Fig. 485 et 484. — Machine de Cornouailles. Cataracte (plan et coupe).

ensuite avec le piston-moteur, et finit par abandonner à elle-même la cataracte ainsi réamorçée.

Ce n'est que pendant cet intervalle que ce régulateur se trouve placé sous l'empire irrésistible du moteur. A partir de l'instant où la poutrelle l'abandonne, il reste isolé de toute action motrice, et fonctionne pour son propre compte comme une véritable *clepsydre*. Son piston redescend sous l'action de la pesanteur, en imprimant au liquide un déplacement, que l'on ralentit d'ailleurs à volonté par l'étranglement de l'écoulement, au moyen d'une soupape ou d'un robinet modérateurs. On reste ainsi maître de la durée de ce mouvement, et par suite de l'instant où certaines relations que nous allons indiquer, entre le petit piston hydraulique et la soupape d'admission A (fig. 482), détermineront le commencement d'une nouvelle course.

A cet effet, le piston de la cataracte descendant sous l'empire de son propre poids, et surtout d'un contrepoids additionnel (fig. 483), la tige qui est articulée sur son levier remonte doucement. Au moment voulu, elle rencontre un levier à cran (fig. 485), qui tient en respect un secteur armé d'un contrepoids. Celui-ci fait alors chavirer le secteur, par un mouvement brusque qu'une tringle transmet à la soupape, de manière à la soulever vivement de son siège. On évite ainsi le laminage prolongé, que produirait nécessairement une commande directe empruntée au mouvement lent de la tige de la cataracte.

A un instant ultérieur, un tasseau ramènera en place le secteur, et le levier à cran viendra se remettre en prise avec lui, quand la tige de la cataracte se trouvera abaissée par le réamorçage final de cet appareil. Dans ces conditions, la poutrelle, venant à remonter à son tour, pourra sans inconvénient abandonner ce secteur, dorénavant calé par le loquet.

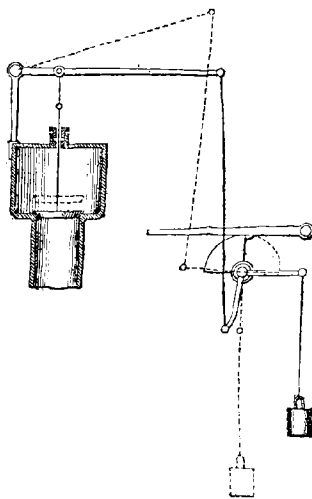


Fig. 483. — Machine de Cornouailles.  
Déclat d'une soupape (élévation).

**812** — *Théorie.* — Les conditions du fonctionnement de la machine à simple effet diffèrent totalement de celles des moteurs de rotation. Pour ceux-ci, un volant puissant uniformise sensiblement la vitesse angulaire. L'allure du piston se confond dès lors presque rigoureusement avec le mouvement sinusoïdal, qui est bien déterminé, et toujours identique à lui-même (n° 575). Ici l'accélération n'est plus définie *a priori*. Elle dépend d'éléments multiples, qui sont indépendants les uns des autres.

Pour nous en rendre compte, envisageons d'abord une machine à traction directe. Appelons  $S$  la section du piston,  $p$  la pression variable du fluide,  $p'$  la tension constante du condenseur,  $M$  la masse qui participe au mouvement de translation du piston,  $\Phi$  l'ensemble des frottements. L'accélération  $\frac{dv}{dt}$  du mouvement rectiligne s'obtient en divisant par la masse  $M$  la somme algébrique des forces extérieures, à savoir l'effort moteur  $(p - p') S$ , diminué du poids  $Mg$  qu'il s'agit de soulever, et du frottement  $\Phi$  :

$$(1) \quad \frac{dv}{dt} = \frac{(p - p') S - Mg - \Phi}{M}.$$

**813** — Considérons, d'autre part, une machine à balancier. Le piston doit alors surmonter la résistance  $F$  que lui oppose cet organe. L'équation différentielle de son mouvement rectiligne devient par conséquent :

$$(2) \quad \frac{dv}{dt} = \frac{(p - p') S + mg - \varphi - F}{m},$$

si  $m$  désigne la masse qui descend avec le piston, et  $\varphi$  la portion des résistances passives qui se rapporte à cette partie de l'appareil.

Envisageons en second lieu le mouvement de rotation du balancier. Je désigne par  $\mu$  sa masse, par  $\rho$  son rayon de giration, et par  $R$  sa demi-longueur. Nous admettrons approximativement que ce dernier paramètre mesure à chaque instant le bras de levier de la



force motrice  $F$  qu'exerce sur lui le piston, ainsi que celui de la résistance  $F'$  que subit l'autre bras de la part du contrepoids. L'accélération angulaire aura d'après cela pour valeur :

$$(3) \quad \frac{d\omega}{dt} = \frac{(F - F') R - \varphi' r}{\mu \rho^2}.$$

si  $\varphi'$  représente le frottement qui se développe tangentiellement au ourillon de rayon  $r$ .

En ce qui concerne enfin le contrepoids, de masse  $m'$ , il se trouve animé à chaque instant de la même vitesse que le piston, d'après l'égalité des deux bras du balancier. Il a donc de son côté pour accélération  $\frac{dv}{dt}$ , ce qui donne pour l'équation de son mouvement rectiligne :

$$(4) \quad \frac{dv}{dt} = \frac{F' - m'g - \varphi''}{m'}.$$

en appelant  $\varphi''$  le frottement relatif à cette partie de l'appareil.

**814** — Remarquons actuellement qu'en raison de la connexion de la tige du piston avec le balancier, on a l'égalité :

$$v = R\omega.$$

Il vient, par suite, en multipliant par  $R$  les deux membres de l'équation (3) :

$$(5) \quad \frac{dv}{dt} = \frac{F - F' - \varphi \frac{r}{R}}{\mu \left(\frac{\rho}{R}\right)^2}.$$

relation qui nous fournit une troisième valeur de  $\frac{dv}{dt}$ .

Nous pouvons en obtenir une quatrième en additionnant terme à terme les trois fractions égales (2), (4) et (5); ce qui donne, en résolvant dans le symbole  $\Phi$  l'ensemble de l'influence des frottements :

$$(6) \quad \frac{dv}{dt} = \frac{(p - p') S - (m' - m) g - \Phi}{m + m' + \mu \left(\frac{\rho}{R}\right)^2}.$$

On voit que les équations différentielles (1) et (6), relatives aux deux types distincts du moteur à simple effet, rentrent l'une et l'autre dans la forme commune :

$$(7) \quad \frac{dv}{dt} = \frac{(p - p') S - N}{M},$$

pour laquelle il nous suffira, par conséquent, d'achever le calcul.

**815** — En multipliant membre à membre cette relation par l'identité :

$$v = \frac{dh}{dt},$$

dans laquelle  $h$  désigne la hauteur parcourue par le piston, il vient :

$$(8) \quad Mvdv = [(p - p') S - N] dh.$$

Mais l'intégration de cette équation prend des formes différentes pour les diverses phases de la distribution.

1° Pendant la période d'admission,  $p$  demeure constant et sensiblement égal à la tension  $p_1$  de la chaudière. Il vient donc, en intégrant depuis la vitesse nulle du début jusqu'à la vitesse finale  $v_1$ , et désignant par  $h_1$  la hauteur, directement connue, qui se trouve parcourue en pleine pression :

$$(9) \quad \frac{1}{2} Mv_1^2 = [(p_1 - p') S - N] h_1.$$

2° A partir du commencement de la détente, la tension  $p$  varie d'après une loi que l'on peut confondre pratiquement avec celle de Mariotte<sup>(1)</sup> :

$$ph = p_1 h_1.$$

(1) Voy. t. I, p. 815, note.

L'équation différentielle (8) devient d'après cela :

$$(10) \quad Mvdv = p_1 h_1 \frac{dh}{h} - (p'S + N) dh.$$

On voit que, au fur et à mesure que  $h$  augmente, l'accélération, qui tout à l'heure était constante, est devenue décroissante. La vitesse s'accroît donc moins rapidement que pendant la phase de pleine pression, pour laquelle le mouvement était uniformément varié.

Elle atteint son maximum à l'instant où l'accélération (7) s'anule, ce qui donne pour la hauteur correspondante  $h_2$  :

$$\left( \frac{p_1 h_1}{h_2} - p' \right) S - N = 0,$$

d'où l'on déduit :

$$(11) \quad h_2 = \frac{p_1}{p'S + N} h_1.$$

La valeur  $v_2$  du maximum sera fournie par l'intégration (4) de l'équation (10) entre les limites  $v_1$ ,  $h_1$  et  $v_2$ ,  $h_2$ , qui nous sont fournies par les relations (9) et (11) :

$$(12) \quad \frac{1}{2} M (v_2^2 - v_1^2) = p_1 h_1 L \frac{h_2}{h_1} - (p'S + N) (h_2 - h_1),$$

ou plus simplement, en ajoutant membre à membre avec la relation (9), et substituant pour  $h_2$  sa valeur (11) :

$$\frac{1}{2} M v_2^2 = p_1 h_1 L \left( \frac{p_1}{p'S + N} \right).$$

5° A partir de cet instant, l'accélération devient négative, et la vitesse décroît jusqu'à l'arrêt. Pour obtenir la hauteur totale d'élévation  $h_3$ , il suffira de remplacer dans l'équation (12), considérée pour un instant comme *intégrale générale*,  $h_2$  par  $h_3$ , et  $v_2$  par zéro :

<sup>1</sup> Effectuée ici avec un logarithme népérien.

ce qui donne :

$$-\frac{1}{2} Mv_1^2 = p_1 h_1 L \frac{h_3}{h_1} - (p'S + N) (h_3 - h_1),$$

ou, en ajoutant avec (9) :

$$(13) \quad p_1 h_1 L \frac{h_3}{h_1} - (p'S + N) h_3 + p_1 h_1 = 0.$$

il ne resterait plus qu'à résoudre, d'après les méthodes connues, cette équation transcendante par rapport à  $h_3$ .

**816** — Mais, tout au contraire, nous devons ici considérer  $h_3$  comme assigné d'avance, et égal à la course extrême que l'on veut permettre au piston. Ce choix arbitraire est en effet ici dans la nature même des choses, puisque la course n'est plus déterminée *a priori* comme avec la machine de rotation, où elle a nécessairement pour valeur le double de la manivelle. On tirera ensuite sans difficulté de l'égalité (13) la valeur de N, ou de la différence  $m - m'$ , qu'il y a lieu d'établir entre la masse motrice et celle du contrepoids; ce qui fournira finalement la valeur de celui-ci.

Cette question des masses est en effet capitale dans la machine à simple effet. Elles y jouent en partie le rôle qui appartient au volant dans les moteurs de rotation. L'attirail doit avoir une certaine importance, en vue de diminuer l'accélération  $\frac{dv}{dt}$ , à laquelle correspond la fatigue élastique des pièces. Or on voit (éq. 6) que  $m$  et  $m'$  figurent par leur différence au numérateur, et dans le dénominateur par leur somme, encore augmentée d'une partie de celle du balancier.

La portion  $m - m'$  qui reste non équilibrée doit elle-même garder une valeur notable, sous peine de voir augmenter la course au delà de ce qu'il serait possible d'admettre comme hauteur du cylindre. En effet, la relation (13) peut se mettre sous la forme :

$$p'S + N = p_1 \left[ \frac{L \left( \frac{h_3}{h_1} \right) + 1}{\frac{h_3}{h_1}} \right].$$

La valeur de  $N$  et celle de  $m' - m$  dépendent donc de la fraction :

$$\frac{L h_3 + (1 - L h_1)}{h_3}.$$

Lorsque l'on y considère  $h_1$  comme une donnée et  $h_3$  comme la variable, la dérivée de cette fonction se réduit à :

$$\frac{1}{h_3^2} L \left( \frac{h_1}{h_3} \right).$$

quantité négative, car  $h_1 < h_3$ . La valeur de  $m' - m$  varie donc en sens inverse de  $h_3$ . Par conséquent, pour limiter la longueur du cylindre, il est nécessaire de développer suffisamment  $m' - m$ .

**817** — Ce rapport  $\frac{h_1}{h_3}$  sert de caractéristique pour le degré de détente. Les expansions les plus prolongées correspondent aux grandes valeurs de  $h_3$ , lorsque l'on considère  $h_1$  comme assigné *a priori* par la condition de dépenser une quantité déterminée de vapeur pour chaque coup de piston, dans un cylindre dont la section est, d'autre part, fournie directement par des considérations de force statique (n° 563).

Si l'on exagère la détente, la partie non équilibrée  $m' - m$  diminue; et comme le poids à élever  $m'$  se trouve déterminé,  $m$  doit augmenter en conséquence. Dès lors l'économie de combustible que peut procurer cette longue expansion, se trouve compensée par l'exagération de l'attirail. Il y aura donc lieu, dans chaque cas, de s'inspirer tout à la fois du prix du combustible, ainsi que de l'intérêt plus ou moins prononcé qui pourra s'attacher à la construction d'une machine plus légère, moins encombrante, et plus rapide, en vue d'accorder à chacune de ces deux influences antagonistes la part qui sera jugée convenable.

## CHAPITRE XLVIII

### MACHINES COMPOUND

—

#### § 1

##### GENÉRALITES

**818** — *Machines compound.* — Nous avons reconnu à diverses reprises contre quelles difficultés ont à lutter les constructeurs, quand ils cherchent à pousser économiquement la détente aussi loin qu'il paraîtrait désirable. Une voie totalement distincte des précédentes leur est encore ouverte à cet égard, et nous consacrerons à son étude le présent chapitre.

Imaginons que l'on se limite d'abord pour la distribution à une détente modérée, mais qu'au lieu de s'en tenir là, en perdant dès ce moment dans l'atmosphère ou dans un condenseur la vapeur encore capable de travailler utilement, on se serve de cette cylindrée comme d'un générateur secondaire, pour alimenter un autre cylindre plus grand que le premier. Quand il remplira cette capacité en y poussant un second piston, le fluide éprouvera une nouvelle expansion, qui sera comme le prolongement de la première détente. On pourra ainsi, à l'aide de ce moyen détourné, parvenir sans obstacle à un degré final de raréfaction qu'il eût été, en général, difficile de réaliser directement dans d'aussi bonnes conditions, par l'exagération des dimensions d'un cylindre unique relativement à la longueur d'introduction, ou pour mieux dire, par la petitesse proportionnelle de l'admission.

De tels moteurs sont appelés *machines à double expansion*, à

*double détente*, ou à deux cylindres successifs <sup>(1)</sup>, par opposition aux moteurs *monocylindriques*. Lorsque la transmission de la vapeur s'opère sans transition du premier cylindre dans le second, on obtient la *machine de Woolf* <sup>(2)</sup>, ou *machine à transvasement*. Mais souvent on rencontrerait de grandes difficultés, ou même une complète impossibilité, à faire cadrer, d'un cylindre à l'autre, les phases d'une distribution directe. On établit alors un réservoir intermédiaire dans lequel se déverseront les premières cylindrées, et où l'on puisera, d'autre part, la vapeur destinée au grand cylindre. Ce type a reçu le nom de *machine compound* <sup>(3)</sup>, ou *machine à réservoir*. Il convient toutefois d'ajouter que, dans le langage courant, ces distinctions précises disparaissent le plus souvent, et que l'on emploie presque exclusivement le mot *compound* pour désigner les machines à double expansion <sup>(4)</sup>.

<sup>(1)</sup> Afin de les distinguer des machines à deux cylindres couplés (n° 567), qui constituent à proprement parler un train, ou une batterie de machines monocylindriques, collaborant ensemble pour actionner un même arbre moteur.

<sup>(2)</sup> La première idée des détentes successives a été brevetée par Hornblower en 1781. La première machine de ce type est sortie, en 1804, des ateliers de Woolf.

<sup>(3)</sup> Composé, composite.

<sup>(4)</sup> De Fréminville (*Études sur les machines compound*, in-4°, Paris, 1878. — Compound et Corliss. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 5<sup>e</sup> série, t. IV, p. 657; t. VII, p. 85). — Garnier. Dispositif des machines compound à distribution interne. *Bulletin de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 2<sup>e</sup> série, t. V, p. 408. — Quéru. Note sur les machines à vapeur à deux cylindres. *Annuaire de la Société des anciens Éèves des Écoles d'arts et métiers*, 1878. — Hallauer (Influence de la compression et de l'espace nuisible dans la machine de Woolf. *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, avril 1875. — Expériences sur les machines de Woolf. *Ibidem*, mars-mai 1877. — Étude expérimentale comparée sur les moteurs à un ou à deux cylindres. *Ibidem*, avril-juin 1878. — Analyses expérimentales comparées sur des machines Woolf. *Ibidem*, mai 1880. — Étude critique sur les essais de moteur compound. *Ibidem*, mai 1881). — Ledieu (*Nouvelle théorie élémentaire des machines à feu, et plus particulièrement des machines à vapeur compound*, grand in-8°. — Raisons formelles de la supériorité économique des machines compound. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXXXVIII, p. 1003). — Mallet. Les machines compound. *Revue technique de l'Exposition universelle de 1889*, n° 14, p. 7. — Hoyaux. Considérations générales sur les machines compound à hélice. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1887, t. I, p. 119. — Sinigaglia. *Traité des machines à vapeur*. Traduction de Billy, p. 58, 65, 87, 148, 169, 267, 279. — Armengaud. *Traité des machines à vapeur*, t. II, p. 57. — Mahistre. *Cours de mécanique appliquée*, p. 222. — Dwelshauvers Dery. Les découvertes récentes relatives à la machine à vapeur. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 2<sup>e</sup> série, t. IV, VII. — Haton de la Goupillière. Revue des progrès récents relatifs à la construction des machines à vapeur. *Annales des mines*, 1879. — Hirn. *Exposition analytique et expérimentale de la théorie mécanique de la chaleur*,

**819** — *Machines à triple expansion.* — Rien n'empêche d'étendre par la pensée cet ingénieux artifice, et de constituer de même des moteurs à triple expansion <sup>(1)</sup>, appelés aussi *tri-compound*. Ces

t. II, p. 33. — Gustave Richard. Notes annexées à sa traduction du *Manuel de la machine à vapeur* de Rankine, p. 711 à 727.

Machine compound BLYTH à grande vitesse. *Génie civil*, t. XV, p. 461. — Machine compound BONJOUR. Buchetti. *Les Machines à vapeur actuelles*, p. 31. — Machine compound HICK. Reulcaux. *Le Constructeur*, p. 1140. — Machine compound OLIV GRAND-DEMANGE. Congrès international de mécanique appliquée de 1889, t. II, p. 94. — Machine compound QUERUEL. Buchetti. *Les Machines à vapeur actuelles*, p. 55. — Machine compound RENNIE. Bienaymé. *Les Machines marines*, p. 190. — Machine compound CORLISS de l'Exposition de Bordeaux. *Génie civil*, 15 mars 1880. — Machine compound CORLISS de l'Exposition d'Anvers. *Ibidem*, 20 février 1886. — Machine compound CORLISS de l'Exposition de Paris. *Engineering*, 14 février 1890.

Thurston (Philosophy of the compound Engines. *American Society of mechanical Engineers*, décembre 1889, p. 463. — Histoire de la machine à vapeur. Traduction de Hirsch, t. II, p. 175). — Richard Bucl. The compound steam Engine. *Van Nostrand's Engineering Magazine*, mai 1884, p. 428. — Robinson. The two cylinder compound Engine. *Ibidem*, octobre 1883, p. 329. — William Dennis Markes. Economy of compound Engines. *Journal of Franklin Institute*, janvier 1884, p. 56. — Van Veen et Van Aadel. Méthode de calcul des machines compound. *L'Ingénieur*, 17 juin 1882, p. 455. — *Engineering*, 9 juin 1882, p. 579. — Emery. On compound Engines. *The New-York Society of practical Engineers*, 1<sup>er</sup> mars 1870. — Rigg. *On compound marine Engines*, 1871. — Rennie. *On the improved Compound Engines as fitted on Board Britton*, 1876. — Mac Dougall. *Relative merits of the simple and compound Engines*. — Sennet. *On some trials of simple and compound Engines*.

Carl (Erting. *Ueber compound Maschinen*. — Schmidt. Ueber Wolf's Maschinen. *Dingler's Journal*, t. CCXXXIV, p. 1. — Schimming. Ueber die Beurtheilung der Dampfmaschinen. *Civil ingénieur*, 1882, 6<sup>e</sup> cahier. — Hrabak. Hilfsbuch für Dampfmaschinen. *Techniker mit einer theoretischen Beilage*, 1883.

Mallet. Étude sur l'utilisation de la vapeur dans les machines locomotives et l'application à ces machines du fonctionnement compound. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, 1878. — G. Richard. Les locomotives compound et les expériences de M. Borodine. *Revue générale des chemins de fer*, décembre 1886, p. 317. — Parrot. Application du principe compound aux locomotives. *Congrès international des chemins de fer*. Troisième session. 2<sup>e</sup> volume. Cahier X, p. 3. — Baudry. Notes sur les locomotives compound du chemin de fer P.-L.-M. *Ibidem*, p. 26. — Landsée. Locomotives du type compound français. *Congrès international de mécanique appliquée de 1889*, t. II, p. 206. — Locomotive compound du type Wordsdell. *Revue générale des chemins de fer*, avril 1887, p. 252. — Locomotive du Nord. *Ibidem* 1888, p. 290. — J. Dunlop. Variable expansion gear for compound locomotives. *Engineering*, 15 février 1871, p. 196.

(1) Demoulin (Étude sur les machines à triple expansion. *Portefeuille économique des machines*, 1885. — Machines à triple expansion à changement de régime. *Génie civil*, t. XVIII, p. 85). — Féraud. Avantages de la triple expansion. *Génie civil*, t. IX, p. 289; XI, 19. — Hoyaux. Étude sur les machines marines à triple expansion. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, décembre 1888, p. 285. — Lisbonne. Machines marines à triple détente, *Génie civil*, 4 septembre 1886, p. 295. — Rebourg. Moteur économique à triple expansion. *Bulletin technologique de la Société des*



appareils, assez rares parmi les machines fixes, ont pris un grand développement dans la marine, surtout en Angleterre et en Amérique, bien que l'auteur de cette innovation dans l'art naval soit l'ingénieur français Benjamin Normand (1).

On rencontre fréquemment des *machines à quadruple expansion* (2). On a même réalisé exceptionnellement le moteur à cinq expansions. Dans l'ordre théorique, certains auteurs ont envisagé le moteur à  $n$  expansions (3), que l'on appelle aussi *machine à détente par échelons* ou *par cascades*, ou encore *machine polycylindrique*.

*anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, 1889, p. 637. — Raffard. *Machines à trois cylindres de Woolf*. Exposition de 1849. — William Willans. Essais sur les conditions économiques d'une machine à vapeur sans condensation fonctionnant comme simple, compound, ou à triple expansion. Traduction Hubert. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 3<sup>e</sup> série, t. V, p. 1; VII, 159. — Haton de la Goupillière. *Revue des travaux scientifiques*, t. VII, p. 422; VIII, 220. — Machine Weyher et Richemond. *Congrès international de mécanique appliquée* de 1889, t. II, p. 118. — Machines à triple expansion. *Génie civil*, t. VI, p. 323. — *Cosmos*, 31 juillet 1887. — Machine J. Boulet. *Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. XV, p. 181.

Reynolds. On triple Expansion Engines. *Proceedings of the Society of mechanical Engineers*, t. XCIX. Traduction par G. Richard. *Annales du Conservatoire des arts et métiers*, 2<sup>e</sup> série, t. II, p. 343. — Robert Willie. On triple expansion marine Engines. *Ibidem*, octobre 1886, p. 473. — Kennedy. Expériences sur les machines à triple expansion. *Ibidem*, mai 1889. — Triple expansion Engines. *The Engineer*, 26 juin 1885, p. 503. — Machine Musgrave à triple expansion (*Chronique industrielle*, 1889, p. 456. — *American machinist*, 21 novembre 1889, p. 4. — *Mechanical Progress*, 30 décembre 1889, p. 89). — Machines diverses à triple expansion. *Engineering*, janvier, juillet 1886; 18, 25 janvier, 1<sup>er</sup> mars, 10 mai, 23 octobre 1889; 7, 23 mars, 2 mai, 27 juin, 18 juillet, 7, 28 novembre, 12 décembre 1890, 2 janvier 1891. — Arnold Samuelson. *Das wahre Gesetz der Dampfexpansion und die Berechnung der dreistufigen Expansions Dampfmaschine*. Leipzig, 1888. — Schröter. *Maschinen Fabrik Augsburg*. *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, t. XXXIV, 1889. — Guido Perelli. Machines à trois cylindres. *Il politecnico*, 1879.

(1) De Comberousse. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 4<sup>e</sup> série, t. V, p. 450.

(2) Adanson. Machines à quadruple expansion (Umland. *Les machines à vapeur nouvelles*, p. 105. — Maurice Demoulin. *Les machines à vapeur à triple et quadruple expansion*, 1890. — Lisbonne. Machines marines à triple et quadruple expansion. *Génie civil*, 25 octobre 1883, p. 345. — Machine Brock à quadruple expansion. *Revue industrielle*, 16 mars 1889. — Machine à quadruple expansion, timbrée à 14 kilogrammes. *Annales industrielles*, 1885, t. II, p. 242. — Disposition en tandem à quatre cylindres. *Génie civil*, t. IX, p. 345. — Machines diverses à quadruple expansion. *Engineering*, avril 1886, 12 octobre 1888, 10 janvier 1890.

(3) Féraud. Note sur les machines à vapeur à expansion totale dans  $n$  cylindres. *Génie civil*, 30 janvier, 4 septembre 1886. — Aimé Witz. Étude théorique et expérimentale sur les machines à vapeur à détentes successives. *Bulletin de la Société industrielle du Nord de la France*, 1890. — Bienaymé. *Les machines marines*, chapitre X, p. 117, machines à détentes successives.

Au sujet de cette dernière expression, il convient de distinguer soigneusement le nombre des cylindres de celui des expansions. On peut, par exemple, employer un premier cylindre à pleine pression, la détente de la vapeur s'opérant uniquement par le passage dans le second cylindre. La machine sera, dans ce cas, à deux cylindres bien qu'à une seule détente, placée à la vérité dans les conditions nouvelles. Plus nettement encore, on rencontre souvent des moteurs dans lesquels un premier cylindre alimente un réservoir, où puisent à la fois deux autres cylindres, couplés à angle droit sur l'arbre de rotation. Dans ces conditions, avec trois cylindres, on n'a, en réalité, que deux expansions, en supposant même que le premier de ces cylindres soit à détente, car s'il fonctionnait à pleine pression, le fluide ne subirait qu'une seule expansion. On rencontre de même des cas de plus en plus complexes à cet égard, surtout dans la marine militaire.

## § 2

### DISPOSITIFS GÉNÉRAUX

**820** — *Machines à double expansion.* — La machine compound (fig. 486) est susceptible de nombreux dispositifs.

Dans le plus simple, les deux cylindres ont la même hauteur, et leurs volumes sont entre eux comme leurs bases, c'est-à-dire dans le rapport des carrés des rayons. Les deux tiges sont réunies par un joug articulé à la bielle.

On peut aussi assembler distinctement les deux tiges à un balancier, à l'aide de parallélogrammes de Watt. Les courses sont alors forcément inégales. Si l'on trouve convenable, sous le rapport de la détente, le rapport des bras de levier d'attache, on peut employer des diamètres égaux ; mais rien n'y oblige, et cette simplification est sans intérêt.

On appelle disposition *en tandem* celle dans laquelle les deux cylindres se trouvent placés en prolongement l'un de l'autre ; une même tige portant les deux pistons. Les deux courses redeviennent alors forcément égales, comme dans le premier cas. On peut dis-

poser les cylindres verticalement; le petit au-dessus du grand (fig. 487, 488). On économise par là l'emplacement, mais au prix d'une certaine instabilité sous les efforts dus à l'obliquité de la bielle. Il est nécessaire de conserver l'intervalle nécessaire pour pouvoir effectuer le remplacement des fonds et les réparations.

Avec la disposition horizontale en tandem, on réalise plus de stabilité, mais au prix d'un grand encombrement (n° 566).

Dans les machines de Mac-Naught, on assemble chaque piston à l'un des bras du balancier, de manière à les animer à chaque instant de mouvements opposés. L'avantage que l'on recherche dans cette combinaison consiste en ce que la pression du croisillon sur les coussinets, au lieu de dépendre, comme à l'ordinaire, de la somme des forces transmises par les tiges, devient fonction de leur différence, d'après les règles

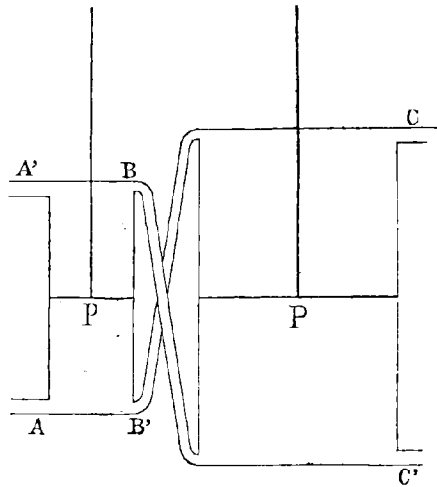


Fig. 486. — Machine de Woolf.  
(Figure schématique.)

de la composition des forces parallèles. La fatigue de ces organes si importants se trouve donc diminuée, et avec elle le frottement, ainsi que l'usure correspondante. En revanche les cylindres sont alors plus éloignés l'un de l'autre, et les communications de vapeur prennent plus de développement.

On peut coupler les deux cylindres d'une compound sur le même arbre, en donnant à l'une des manivelles par rapport à l'autre une certaine avance angulaire (fig. 489). On évite ainsi l'inconvénient des points morts, et l'on réalise une plus grande uniformité du moment moteur, ce qui permet d'alléger d'autant le volant.

Dans les machines de John Elder, on a couplé les tiges sur des



On a parfois<sup>(1)</sup> employé des cylindres concentriques (fig. 490).

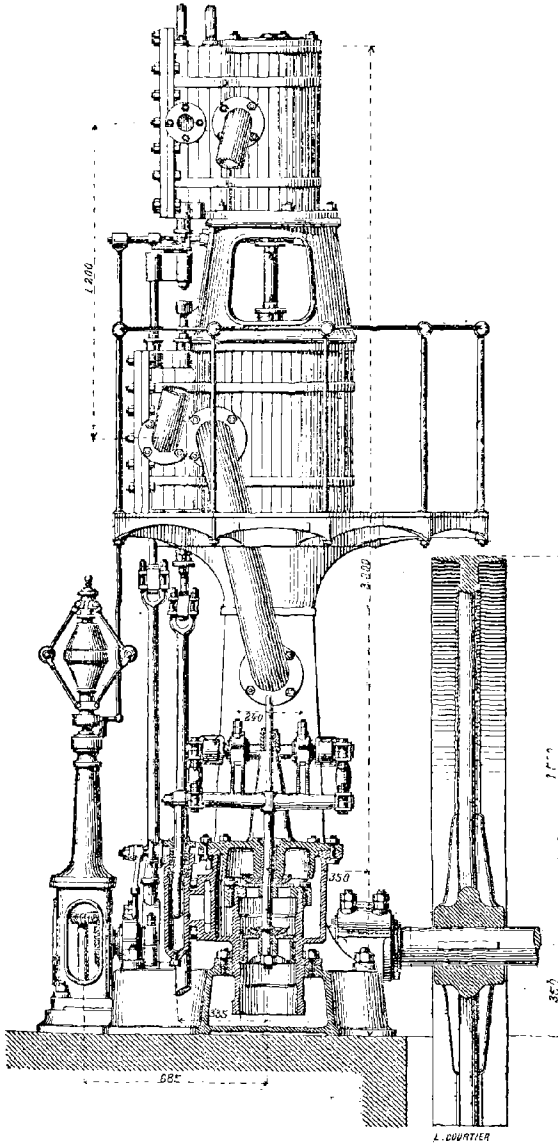


Fig. 488. — Machine-pilon compound de Marguet (élévation latérale).

<sup>(1)</sup> Machines d'épuisement du lac de Harlem. — Machine CLAUDE JOBERT. *L'aéro-*  
II.

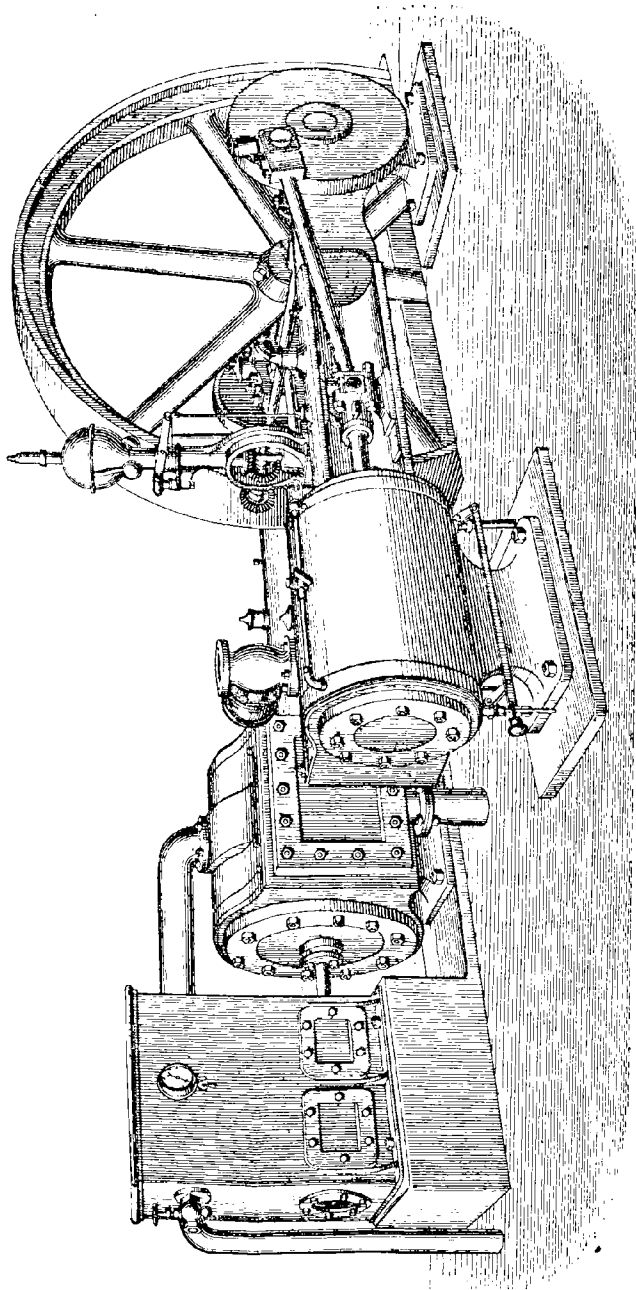


Fig. 489. — Machine horizontale de Davy et Paxman (vue perspective).  
J. COURTISER

Le piston annulaire est alors armé d'une série de tiges, disposées suivant les sommets d'un polygone régulier. On tombe à la vérité par là dans l'inconvénient d'exagérer le nombre des garnitures.

Dans la machine Muller (\*), on adapte au piston une tige creuse

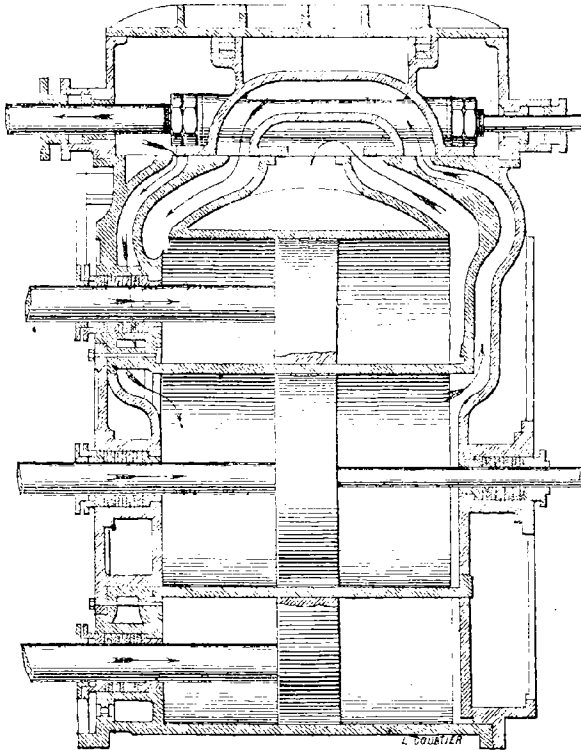


Fig. 490. — Machine compound à cylindres concentriques (coupe méridienne).

en forme de gaine ou de fourreau. Durant la descente, elle ne laisse libre qu'une couronne dans laquelle la vapeur fonctionne à simple effet et à pleine pression. Pendant le mouvement ascendant, on supprime l'admission. La vapeur déjà introduite repasse en dessous du piston, en agissant alors sur la totalité de la section. Elle se détend

*naute*, juin 1879, p. 152. — Machine Rowan, Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction Richard, p. 529.

(\* Armengaud. *Traité des moteurs à vapeur*, t. II, p. 80.

donc suivant le principe compound. Cette combinaison expose à des refroidissements importants par la surface intérieure du fourreau, et elle exige, en raison de la grande circonférence de ce dernier, une garniture d'une exécution délicate et d'un entretien difficile.

Un type très compliqué a été proposé par M. Max Westphal, et exécuté dans les ateliers Hoppe (1). Le cylindre est *unique*, mais il renferme trois pistons que je désignerai par A, B, C, dans l'ordre où ils se présentent consécutivement. Les deux extrêmes A et C sont manœuvrés par une tige unique  $\alpha$ , qui pénètre à travers le fond  $a$ , pour s'attacher au piston A. En même temps, elle se bifurque au dehors, contourne le cylindre en forme de cadre évidé, et y rentre par le fond opposé  $c$  sous forme d'une tige *creuse*  $\gamma$ , pour s'adapter à C. Les pistons A et C marchent ainsi d'une manière solidaire, sous l'influence de cette tige  $\alpha\gamma$ . Quant à B, il s'attache à une tige *pleine*  $\beta$ , engagée à l'intérieur de  $\gamma$  qui lui sert de fourreau. Les tiges  $\alpha\gamma$  et  $\beta$  commandent des manivelles distinctes, et la distribution s'opère à l'aide d'excentriques convenablement calés. La pleine pression, ainsi qu'une première détente, se développent entre le fond  $a$  et le piston A (ou bien, suivant les deux périodes du double effet, entre  $c$  et C). L'expansion complémentaire s'effectue par le passage de la vapeur dans l'espace compris entre A et B (ou entre C et B). Ce dernier volume se modifie en raison de la somme des vitesses de ces pistons, ce qui permet une plus grande rapidité *cinématique* de la variation de l'étendue offerte à la détente, sans y employer pourtant d'aussi grandes vitesses *dynamiques* des masses, avec les inconvénients qui s'y attachent. Tel paraît être le but de cette création bien compliquée.

On appelle *compound mixtes* (2) des appareils dans lesquels une sorte de commutateur permet, à volonté, d'associer les cylindres de manière à constituer une machine à expansions successives, ou de les rendre indépendants, et de les faire fonctionner comme des moteurs distincts.

(1) Westphal. *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure*, 1878, p. 54. — Daniel Adamson. *Journal of iron and steel Institute*, août, septembre, octobre 1875. — *Journal des mines*, 1878, p. 261.

(2) *The Engineer*, 1876, t. II, p. 255, 272.



**821** — *Machines à triple et à quadruple expansions.* — La machine à triple expansion présente le plus souvent trois cylindres

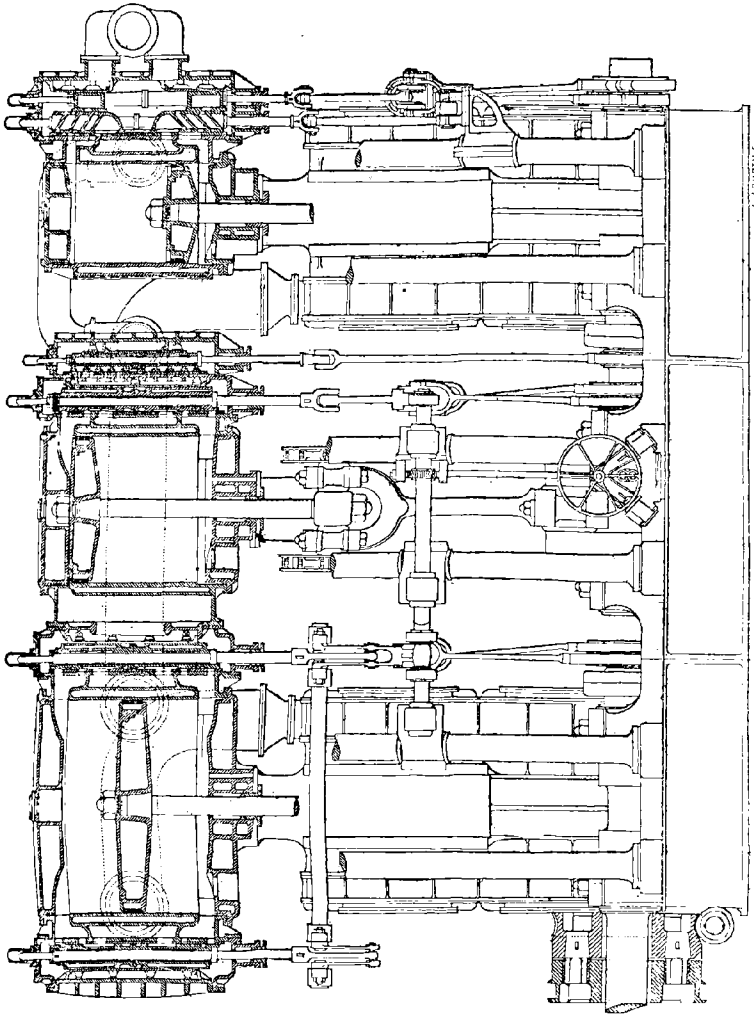


Fig. 491. — Machine à triple expansion du Portugal (coupe verticale).

placés côte à côte (fig. 491, 492), avec des manivelles couplées à 120 degrés de distance sur l'arbre moteur, de manière à obtenir beaucoup de douceur dans la rotation.

On rencontre également un type dans lequel le petit corps de

pompe est placé en tandem au-dessus du cylindre de moyenne pression, tandis que le grand se trouve à côté d'eux.

Le moteur Willans (fig. 495) présente trois cylindres disposés

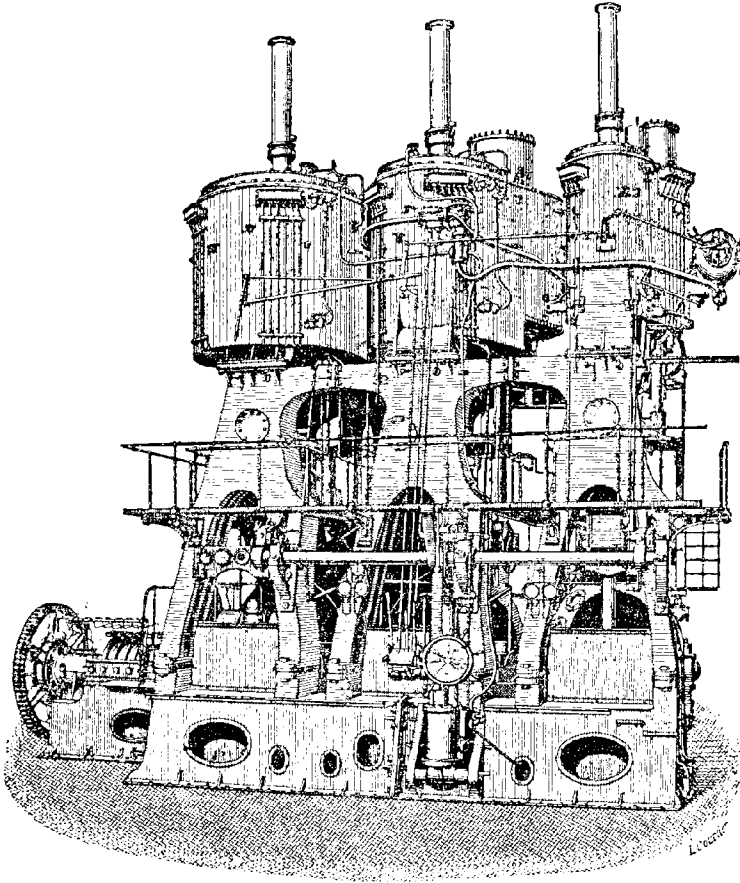


Fig. 492. — Machine à triple expansion du *Glyde* (vue perspective).

verticalement en tandem. Nous reviendrons plus loin (n° 840) sur cette intéressante machine, qui fonctionne à simple effet.

Citons encore le type étoilé de Higginson, de Schmid et Mason, de Wilson <sup>(1)</sup>, dans lequel les trois cylindres sont disposés horizon-

<sup>(1)</sup> *Revue industrielle*, 1877, p. 455. — *Engineering*, 1890, t. I, p. 99, 206.

talement suivant trois rayons régulièrement espacés sous des angles

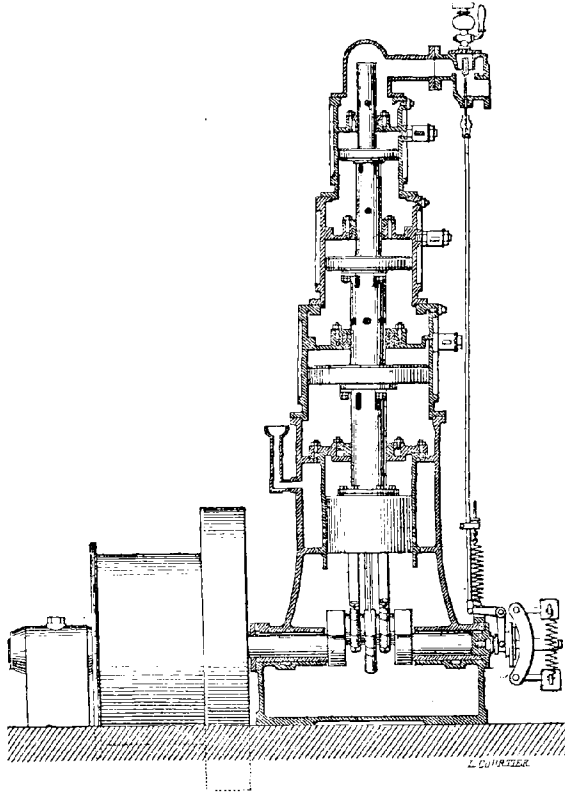


Fig. 493. — Machine Willans à simple effet et à triple expansion (coupe longitudinale).

de 120 degrés. Chaque tiroir est manœuvré par la manivelle précédente, qui fonctionne dans ces conditions comme un excentrique calé avec une avance angulaire de 50 degrés.

La maison Carels a construit, d'après le type Sulzer (n° 805), une machine à triple expansion dont les trois cylindres sont traversés par une même tige, ainsi

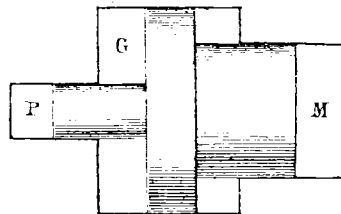


Fig. 494. — Piston du moteur Carels à triple expansion (figure schématique).

que le montre la figure schématique 494. La vapeur est fournie par

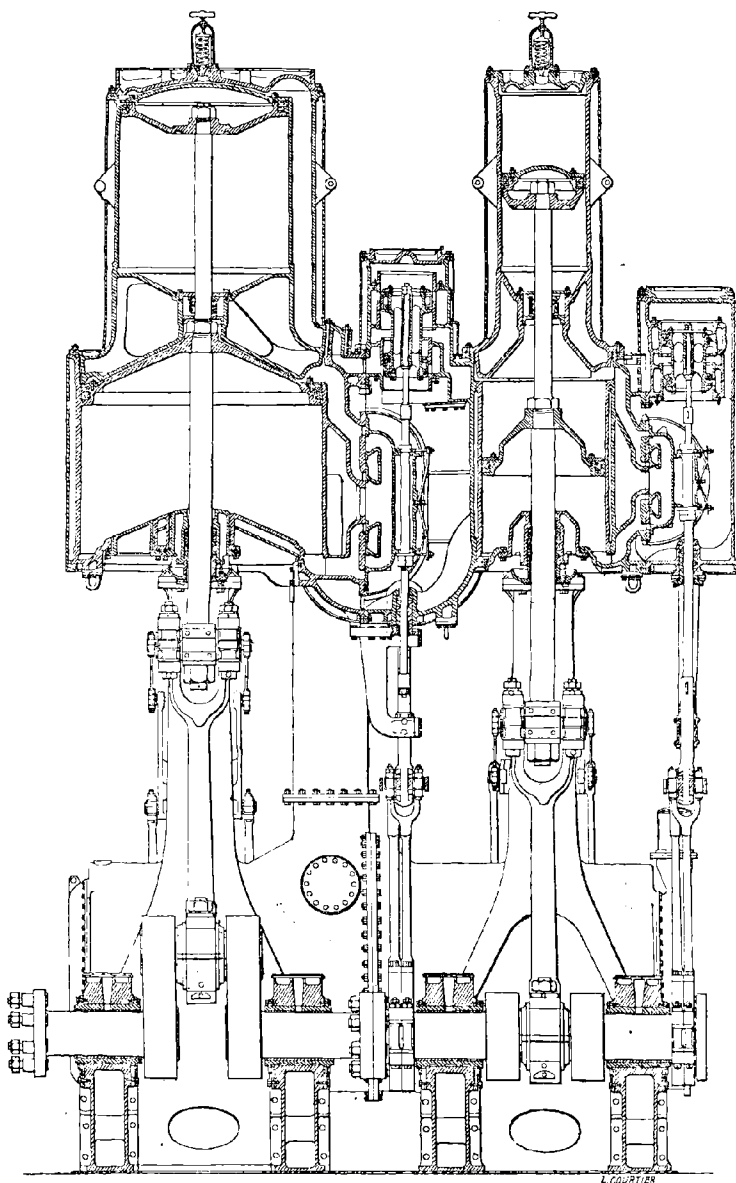


Fig. 495. — Machine à quadruple expansion du *Buenos-Ayres* (coupe verticale)

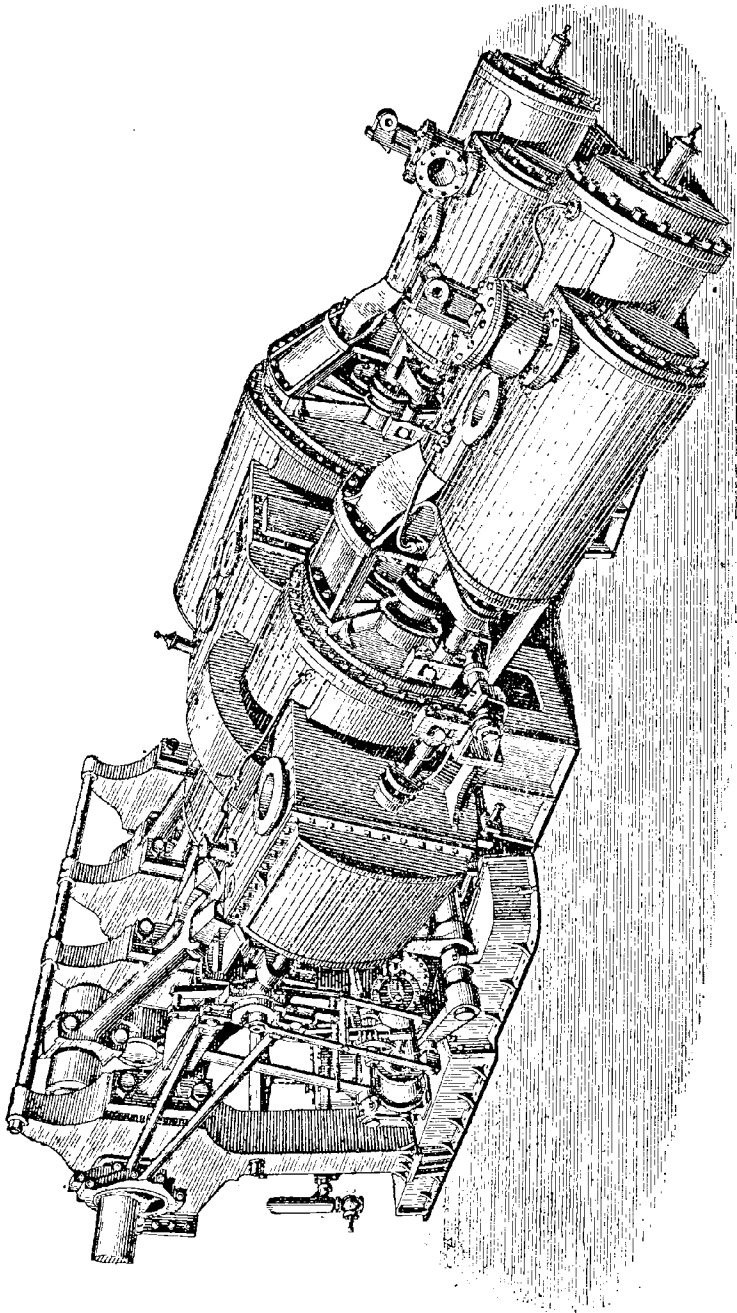


Fig. 496. — Machine à triple expansion et à quatre cylindres de l'Hygie (vue perspective).

le générateur au petit cylindre P, pour passer de là au cylindre moyen M, puis au grand C, et enfin au condenseur.

Dans la machine à quadruple expansion (fig. 495), on place ordinairement les cylindres en tandem deux à deux, de manière à ce qu'ils forment deux piles l'une à côté de l'autre.

Ces divers types peuvent se compliquer encore davantage (fig. 496) par l'emploi d'un nombre de cylindres supérieur à celui des expansions (n° 819), principalement dans les installations de la marine militaire, en raison du défaut d'espace qui les rend particulièrement difficiles.

## § 5

### DÉTAILS DU DISPOSITIF

**822** — *Distribution.* — Le jeu théorique de la machine à double expansion est facile à concevoir. Sur la figure 486, les diverses lettres représentent autant d'organes de distribution, d'une nature d'ailleurs quelconque : tiroirs, robinets, ou soupapes; tiroirs simples, ou tiroirs doubles, etc. Ils sont manœuvrés en temps opportun par des mécanismes choisis à volonté dans la nombreuse série de moyens mécaniques que nous présentent à cet égard les chapitres précédents.

Au commencement, les distributeurs A, B, C sont ouverts, A', B', C' sont fermés. La vapeur de la chaudière s'introduit par l'orifice A sous le petit piston *p*, et le sollicite à monter. La cylindrée précédente, logée au-dessus de ce dernier, est en train de passer par B dans le grand cylindre. Elle oppose une résistance au premier piston, et exerce une action impulsive sous le second P. Mais comme la tension agit de ce côté sur une surface prépondérante, la résultante de ces deux actions est ascendante. La vapeur de la cylindrée qui avait précédé cette dernière, s'échappe par le distributeur C dans l'atmosphère ou dans le condenseur.

Lorsque les pistons ont parcouru la longueur des cylindres, tous les organes de distribution changent de sens, et une course inverse s'établit dans des conditions identiques.

Ajoutons toutefois qu'une telle symétrie ne se rencontre pas dans la pratique. En vue de réaliser dans le cylindre à haute pression la détente ou l'admission anticipée, et dans le grand la compression ou l'échappement anticipé, l'on manœuvre les divers distributeurs à des instants intermédiaires, et non pas tous à la fois au fond de course, comme nous l'avons supposé pour plus de simplicité dans l'explication précédente.

On peut dire, d'une manière générale, que la distribution est plutôt facilitée que rendue plus malaisée par le principe compound, attendu que les expansions successives permettent d'éviter l'extrême brièveté des introductions.

Pour réaliser la détente variable dans une machine à transvasement, il en faut établir le mécanisme sur le premier cylindre, car les expansions ultérieures résultent alors uniquement des rapports des volumes successifs, lesquels sont complètement déterminés.

**823** — *Chemise de vapeur.* — L'utilité de la chemise de vapeur est moins accusée dans les compound qu'avec les moteurs monocylindriques, chez lesquels chaque élément de paroi se trouve exposé à des vicissitudes de température plus étendues. Pour le même motif, elle est encore moindre avec les machines à triple expansion. Toutefois on ne manque pas, en général, d'introduire dans ces moteurs, ordinairement très soignés, un secours aussi efficace. Seulement les opinions des constructeurs sont loin d'être arrêtées d'une manière uniforme quant au détail de l'exécution.

Il est bon, lorsque rien ne s'y oppose, de mettre une double enveloppe au petit cylindre; mais c'est surtout utile pour le second, où la vapeur travaille encore, en même temps que les parois se trouvent plus profondément refroidies par la communication avec le condenseur, dont le premier se trouve exempt.

Le réservoir intermédiaire doit être lui-même environné d'une chemise de vapeur. Benjamin Normand établissait dans la boîte à fumée de ses machines, un réchauffeur tubulaire parcouru par la vapeur d'échappement du premier cylindre.

Le point essentiel est d'éviter que l'enveloppe atteigne jamais une température inférieure à celle de la vapeur qu'elle protège;

comme si, par exemple, on enveloppait le cylindre de haute pression dans le réservoir intermédiaire.

Dans les compound Merlin, le petit cylindre est environné de vapeur vierge. Cette enceinte est elle-même plongée dans le réservoir intermédiaire, qu'elle échauffe par l'intérieur; et celui-ci s'étend autour du grand cylindre pour le réchauffer à son tour. On réalise ainsi, dans l'atmosphère protectrice, une décroissance de température corrélative de celle que subit, sur son trajet, le fluide moteur.

**824** — *Réservoir*. — Le réservoir intermédiaire, ou *receiver*, doit offrir une capacité suffisante pour que le déversement de l'échappement du premier cylindre, ainsi que l'alimentation du second, n'y occasionnent pas des oscillations trop sensibles de la pression, qui entraîneraient comme conséquence une irrégularité inadmissible du fonctionnement dans l'une et l'autre de ces deux enceintes.

Toutefois, il y a une limite à observer à cet égard, et l'exagération du volume du réservoir rend la machine beaucoup moins sensible à l'action du régulateur; ce récipient renfermant une provision formée dans les conditions de l'ancienne allure, dont l'influence pèsera pendant quelque temps sur la nouvelle.

La chute brusque de pression du petit cylindre au réservoir occasionne une disparition de travail, à laquelle on a souvent attaché beaucoup d'importance<sup>(1)</sup>. Il ne serait cependant pas exact de la considérer comme intégralement perdue. Une partie au moins se retrouve dans la vapeur sous la forme calorifique.

**825** — On peut du reste éviter théoriquement cette différence. Appelons en effet  $p_1$  la pression de la chaudière et  $p_2$  celle de la fin de la détente, que l'on veut faire coïncider avec la tension du réservoir et de la phase d'introduction dans le grand cylindre. Si  $\frac{1}{n}$  désigne la fraction de pleine pression dans le premier, on aura,

(1) De Fréminville. *Étude sur les machines compound*, in-4°, 1878, p. 27.



en admettant la loi de Mariotte <sup>(1)</sup> :

$$p_2 = \frac{p_1}{n}.$$

Il faut ensuite que le grand cylindre V reçoive, pendant la période d'admission  $\frac{1}{N}$ , la totalité de la cylindrée  $v$  à la tension commune  $p_2$ . Par conséquent nous devons poser :

$$v = \frac{V}{N},$$

d'où :

$$\frac{1}{N} = \frac{v}{V}.$$

Le rapport d'introduction au second cylindre doit donc être celui des deux volumes.

On voit par suite que si l'on était porté à exagérer le rapport de ces capacités, on s'exposerait à la nécessité de courtes introductions pour le grand cylindre, ce qui est précisément le genre de difficultés que le principe compound est destiné à écarter. Il faudra donc en cela se limiter, ou bien accepter une certaine chute de pression. Il n'y a pas du reste un grand inconvénient à redouter à cet égard, car Hallauer a montré expérimentalement que le degré de détente totale le plus économique ne se modifie que lentement, lorsque le rapport des deux cylindres vient à varier. M. Sinigaglia <sup>(2)</sup> recommande de tenir ce dernier entre 4 et 5.

<sup>(1)</sup> Voy. t. I, p. 815, note.

<sup>(2)</sup> Sinigaglia. *Traité des machines à vapeur*. Traduction de Billy, p. 66.

Dans la marine militaire, où l'on ne peut se rendre esclave du point de vue des consommations, étant obligé de satisfaire en même temps à d'autres exigences, on arrive aux rapports 2 et 3.

## § 4

## AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS

**826** — *Avantages.* — L'extrême engouement dont les compound ont été l'objet, et auquel on apporte maintenant quelque tempérament et plus de discussion <sup>(1)</sup>, repose incontestablement sur un ensemble remarquable d'avantages importants.

Nous devons, dans cet ordre d'idées, mentionner en première ligne la facilité que ce type apporte à l'extension pratique de la détente (n° 818).

Rappelons également que l'influence des fuites s'y trouve atténuée, ainsi qu'il a été expliqué ci-dessus <sup>(2)</sup>. Or, ce point de vue présente d'autant plus d'intérêt que les fuites ne se décèlent pas immédiatement dans une marche courante. Il est donc particulièrement utile de trouver *a priori* une garantie contre elles dans la constitution même de l'appareil.

L'élasticité des tiges de transmission se trouve mieux ménagée. D'abord elles deviennent multiples, pour se répartir l'effort impulsif. En outre il s'opère entre elles une certaine compensation, en ce que la grande pression est appliquée à la moindre surface, et la plus faible au grand piston.

On obtient une plus grande régularité du moment moteur; et, comme conséquence, il devient possible d'alléger d'autant l'importance du volant. En effet, avec une tige unique, l'intensité de la transmission varie depuis la pression de la chaudière jusqu'à celle du condenseur. Dans les compound au contraire, elle résulte de deux forces dont chacune ne se modifie pour son propre compte qu'entre des limites plus restreintes <sup>(3)</sup>.

<sup>(1)</sup> Bour. *Compte rendu du 15<sup>e</sup> congrès des Ingénieurs en chef des Associations de propriétaires d'appareils à vapeur*, novembre 1888, p. 423. — *Congrès international de mécanique appliquée de 1889*, t. II, p. 50. — Hallauer. Étude expérimentale comparée sur les moteurs à un ou à deux cylindres. *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 30 décembre 1878.

<sup>(2)</sup> Tome I, p. 497.

<sup>(3)</sup> On peut donner de ce résultat une expression algébrique. Pour plus de simpli-

Cette influence s'accuse de plus en plus à mesure qu'augmente

cité dans cet aperçu, nous supposons que le premier cylindre fonctionne à pleine pression, et en second lieu que les tiges s'attachent directement au balancier par des parallélogrammes de Watt.

Au commencement de la course, le petit piston supporte encore de la part de l'espace libre la pression  $p_1$  de la chaudière, sur celle de ses faces qui achève alors son rôle moteur. Comme d'ailleurs on admet à ce moment cette même tension sur l'autre face, il y a équilibre pour le début. Quant au grand piston, l'on met sa face motrice en communication avec la pression  $p_1$  du petit cylindre. Sur l'autre se trouve celle du condenseur, que nous confondrons ici avec le vide absolu. Si donc  $s$  et  $S$  désignent les sections,  $b$  et  $B$  les bras du balancier compris entre son axe d'oscillation et les points d'attache, l'effort résultant devient  $p_1S$ , et le moment moteur  $p_1BS$ .

A la fin de la course, le petit piston n'a pas cessé de subir sur sa face motrice la tension  $p_1$  du générateur. Sur l'autre, on n'a plus que la pression  $p_2$  de la détente; d'où le moment partiel  $(p_1 - p_2)bs$ . Le grand piston reçoit sur sa face motrice la pression  $p_2$ ; sur l'autre se trouve le vide. On a donc comme second moment partiel  $p_2BS$ .

Par conséquent, le rapport des deux valeurs, initiale et finale, du moment moteur a pour expression :

$$\frac{p_1BS}{(p_1 - p_2)bs + p_2BS},$$

c'est-à-dire :

$$\frac{p_1}{p_2 + \frac{bs}{BS}(p_1 - p_2)}.$$

Admettons pour la détente la loi de Mariotte. Il viendra, en appelant  $h$  et  $H$  les hauteurs des cylindres :

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{sh}{SH} = \frac{bs}{BS}.$$

Le rapport devient ainsi :

$$\frac{p_1^2}{p_2(2p_1 - p_2)}.$$

Avec une machine monocylindrique, il aurait pour valeur .

$$\frac{p_1}{p_2}.$$

Le rapport :

$$\frac{p_1}{2p_1 - p_2},$$

de ces deux fractions caractéristiques se trouve à l'avantage du type compound, attendu que :

$$p_2 < p_1.$$

On peut d'ailleurs lui donner cette dernière forme :

$$\frac{1}{2 - \frac{bs}{BS}},$$

qui ne renferme plus que les éléments géométriques du moteur\*.

le nombre des cylindres. Il conviendrait en effet théoriquement que, pendant que la pression diminue par la détente, la section du cylindre augmentât en raison inverse, comme dans une sorte de cône dont un piston extensible ne cesserait, pendant son mouvement, de rejoindre les parois. De cette manière l'effort moteur resterait constant. Or, cette fiction se trouve en partie réalisée par l'emploi d'une série de cylindres, que l'on peut concevoir comme inscrits dans le cône en question.

On doit rattacher à cette amélioration de la régularité de l'allure une diminution de l'usure, qui a été constatée par les praticiens, et qui peut exercer une influence financière sur les calculs d'amortissement.

**827** — Le principe des expansions successives réalise une meilleure adiabaticité, et diminue les condensations intérieures. En effet le condenseur ne se trouve jamais en relation avec le petit cylindre, et l'abaissement extrême de température n'y dépasse pas celui que produit la première détente.

Cette remarque est très importante, car on pourrait être tenté d'objecter contre le type compound qu'il présente beaucoup plus de surface au refroidissement. Mais ce n'est pas précisément la valeur intrinsèque de la surface qu'il faut envisager, au point de vue des échanges de chaleur. C'est l'intégrale du produit de chaque élément superficiel par la différence de température entre la vapeur et le métal en ce point. Si le fluide se trouvait partout au contact d'une paroi de température égale à la sienne, il ne s'opérerait aucun échange thermique, quelque grande que fût la surface (1). Or le système des expansions successives a pour résultat d'isoler chaque enceinte entre des limites thermométriques plus restreintes qu'avec le type monocylindrique. Il constitue donc un acheminement vers cet idéal, et un état de choses préférable au système ordinaire, dans lequel un cylindre unique se trouve alternativement en rapport avec les deux températures les plus extrêmes : celles de la chaudière et du condenseur.

(1) On retrouve la trace de ce *desideratum* dans la conception de la *machine-bouteille* de Siemens, dont nous nous occuperons plus loin (n° 856).

L'influence des *fuites de chaleur*, dont la considération a été introduite par Hirn sous le nom de refroidissement au condenseur (n° 590), est atténuée par le système compound. En effet, il n'y a plus alors à faire entrer en ligne de compte, comme perte, que les échanges effectués entre cette enceinte et le dernier cylindre. Tous les autres, qui s'opèrent d'une manière analogue entre les corps de pompe successifs, restent utiles, car ils portent sur de la vapeur qui travaille encore. Il est bien vrai que, comme superficie, ce dernier cylindre constitue l'équivalent de la machine monocylindrique à laquelle pourrait être substitué le moteur compound, puisqu'il détermine le volume final de la vapeur, c'est-à-dire le degré de détente; mais si la surface reste la même, la différence de température est très atténuée.

La chemise de vapeur du petit cylindre présente plus d'efficacité, à poids de vapeur égal, car elle n'agit que sur du fluide travaillant, au lieu d'échauffer également, comme dans le mode ordinaire, celui qui se rend au condenseur. Il s'ensuit, pour l'ensemble de la vapeur consommée dans les enveloppes, un certain bénéfice.

**828** — Le principe des machines polycylindriques procure théoriquement une certaine amélioration sur le régime de l'espace libre<sup>(1)</sup>; considération qui a son importance, car, en grandeur absolue, ces espaces y deviennent souvent notables, si l'on ne prend pas à cet égard les soins nécessaires. Pour l'expliquer avec plus de simplicité, je supposerai l'absence complète de compression, de manière à rendre cet espace aussi nuisible que possible (n° 664). La vérité sera, dans la pratique, intermédiaire entre ce cas et celui de la compression parfaite, pour lequel l'espace libre cesse d'exercer aucune mauvaise influence.

Rappelons que le travail de pleine pression de la vapeur employée à remplir l'espace libre est seul directement perdu (n° 664); car ce fluide travaille ensuite pour son propre compte pendant la détente, conjointement avec la cylindrée proprement dite. La perte est

<sup>1)</sup> Hallauer. Influence de la compression et de l'espace nuisible dans les machines de Woolf. *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, avril 1875.

done proportionnelle tout à la fois au volume et à la pression *effective* de remplissage.

Appelons  $p_1$  la pression de la chaudière,  $p_2$  celle de la détente dans le petit cylindre,  $p_3$  celle de la détente finale dans le grand. Les espaces neutres se trouvent respectivement, par rapport au fluide qui est appelé à les remplir, aux pressions effectives  $p_1 - p_2$  et  $p_2 - p_3$ . Nous admettons d'ailleurs, comme l'hypothèse la plus naturelle, que leurs volumes sont proportionnels à ceux des cylindres correspondants. Si en outre nous supposons que la détente suit la loi de Mariotte, ces dernières capacités seront entre elles en raison inverse de  $p_2$  et de  $p_3$ .

La valeur du travail perdu est donc finalement en raison de l'expression :

$$(p_1 - p_2) p_3 + (p_2 - p_3) p_2.$$

Si au contraire la vapeur fonctionnait directement dans la machine monocylindrique équivalente, qui est représentée par le grand cylindre, et que l'on dût remplir son espace nuisible à la pression  $p_1$ , au lieu de  $p_2$ , le produit proportionnel deviendrait :

$$(p_1 - p_3) p_2.$$

Le gain absolu correspond donc à la différence de ces deux fonctions; laquelle peut se mettre sous la forme :

$$(p_1 - p_2)(p_2 - p_3).$$

Le gain *proportionnel* aura dès lors pour valeur :

$$\frac{(p_1 - p_2)(p_2 - p_3)}{(p_1 - p_3) p_2}.$$

Supposons par exemple que l'échappement se fasse à l'air libre, avec une détente à moitié dans le petit cylindre; et encore à

moitié comme seconde expansion. On aura proportionnellement :

$$p_3 = 1, \quad p_2 = 2, \quad p_1 = 4.$$

La fraction devient alors égale à  $\frac{1}{3}$ , et par conséquent on aura, dans ces conditions, réduit aux  $\frac{2}{3}$  l'influence de l'espace nuisible.

**829** — *Inconvénients*. — A côté d'une aussi remarquable série de qualités que présentent les machines compound, on a formulé certaines critiques.

C'est d'abord leur prix de revient plus élevé, en raison de la complexité du mécanisme; l'augmentation des frottements avec celui du nombre des organes; celle du graissage; l'encombrement. Sous ce dernier rapport, nous avons vu que la comparaison d'une compound avec un moteur monocylindrique équivalent s'établit par le dernier cylindre. Tous les autres viennent en sus, et c'est leur ensemble qui constitue à proprement parler l'encombrement.

Une certaine perte s'attache à cette circonstance que, dans l'état dynamique, la contre-pression que subit la face d'aval d'un piston est nécessairement supérieure à la pression motrice qui s'exerce, de la part de la même atmosphère, contre la surface fuyante du piston consécutif; tandis que les aperçus théoriques les supposent égales, comme dans l'état statique (1).

Quand il s'agit de machines à manœuvres fréquemment répétées (comme pour les moteurs d'extraction des mines, ou pour ceux des bateaux à escales très rapprochées) on reproche aux compound d'être moins bien en main que le type monocylindrique. On n'a en effet, avec ce dernier, que deux cylindrées en présence, sur l'une et l'autre face du piston. Dans les machines à plusieurs cylindres, il en existe un plus grand nombre, qui se trouvent engagées entre les pistons successifs. L'ensemble du phénomène

(1) Il s'ensuit que les diagrammes des divers cylindres, quand on les superpose au-dessus de la même portion de l'axe des volumes, laissent entre eux des zones vides, représentatives de cette différence.

est donc moins simple. Le moteur présente en même temps moins d'élasticité, pour se plier aux variations de la résistance. En particulier, on ne peut plus, pour les machines d'extraction, se mettre, quand on le juge à propos, en pleine pression rigoureusement constante, comme le permettent facilement certains artifices avec l'emploi d'un cylindre unique <sup>(1)</sup>. Dans le cas actuel, une ou plusieurs cylindrées se détendent forcément pendant la course.

(1) Haton de la Goupillière. *Cours d'exploitation des mines*, t. II, p. 145.



## CHAPITRE XLIX

### DISPOSITIFS GÉNÉRAUX

#### § 1

#### MACHINES A DOUBLE EFFET

**830** — *Généralités.* — Bien que l'imagination des constructeurs puisse en apparence, pour la composition d'une machine, se mouvoir librement au milieu des innombrables ressources que mettent à leur disposition les organes que nous avons étudiés jusqu'ici, certains groupements s'établissent cependant alors spontanément, en raison d'affinités mutuelles, et de relations qui s'imposent à l'arbitraire par la force même des choses.

Plusieurs de ces organismes présentent un rapport tellement étroit avec l'objet industriel auquel ils sont destinés, qu'il est presque impossible d'en séparer la description des considérations générales qui sont relatives au but poursuivi. En même temps le champ de cette application devient alors tellement vaste, qu'il y faut des traités spéciaux. Tels sont les cas des *locomotives*, des *machines marines*, ou, dans un domaine plus limité quoique encore très vaste, ceux des *locomobiles*, des *moteurs d'extraction* des mines, ou des *machines d'épuisement* <sup>(1)</sup>. Nous écarterons ces classes spéciales d'appareils de notre étude, afin de lui conserver le caractère de la mécanique générale.

<sup>(1)</sup> J'ai traité ailleurs ces deux derniers sujets (Haton de la Goupillière. *Cours d'exploitation des mines*, t. II. p. 152, 278).

Lors même que l'on reste placé à ce point de vue, le répertoire des ateliers présente certaines machines d'une physionomie tout à fait saisissante, qui les sépare absolument des types ordinaires. Nous les examinerons un peu plus loin. Ce sont les *machines oscillantes* (§ 5), les *machines rotatives* (§ 8), les *turbines à vapeur* (§ 5).

En nous maintenant pour le moment dans la donnée fondamentale du cylindre fixe avec piston doué d'un mouvement alternatif, je rappellerai que nous avons déjà esquissé à cet égard quelques modèles concrets, relatifs à l'emploi des distributions par robinets <sup>(1)</sup> ou par soupapes <sup>(2)</sup>.

Je continuerai ces aperçus dans le domaine des distributions par tiroirs, en décrivant ici brièvement certains exemples classiques, dont le nom seul suffit pour évoquer, dans le souvenir d'un ingénieur expérimenté, un ensemble harmonieux et bien conçu dans ses grandes lignes comme dans le détail de son fonctionnement <sup>(3)</sup>.

**831** — *Machine Farcot*. — La machine horizontale constitue un bon moteur d'atelier, de force moyenne. Mais on peut également la pousser aux plus grandes puissances. M. J. Farcot <sup>(4)</sup> lui a imprimé un caractère de majestueuse simplicité, dans le spécimen qu'il a présenté à l'Exposition universelle de 1889, avec une puissance de mille chevaux (fig. 497, 498).

Le cylindre est unique, afin d'offrir une moindre étendue de

<sup>(1)</sup> Machines Corliss (n° 798), Wheelock (n° 800), Stoppani (n° 799), Biétreix (n° 796).

<sup>(2)</sup> Machine Sulzer (n° 803), machine Audemar (n° 806), machine de Cornouailles (n° 808).

<sup>(3)</sup> Dans ce Traité, où nous nous sommes placé essentiellement au point de vue analytique, en divisant les questions pour accorder successivement à chacune d'elles les développements qu'elle nous paraissait comporter, ces aperçus, d'un caractère synthétique, ne sauraient tenir qu'une place restreinte, et réclament comme le plus utile complément l'étude directe des ouvrages, de plus en plus nombreux, que l'on publie de nos jours avec de magnifiques albums, en vue de décrire diverses catégories d'industrie, des Expositions universelles, etc. Nous en avons cité ci-dessus un certain nombre (n° 558, note).

<sup>(4)</sup> *Génie civil*, t. XVI, p. 149. — *Revue industrielle*, 16 novembre 1881. — *Congrès international de mécanique appliquée de 1889*, t. II, p. 52. — *Engineering*, 5 janvier 1890.

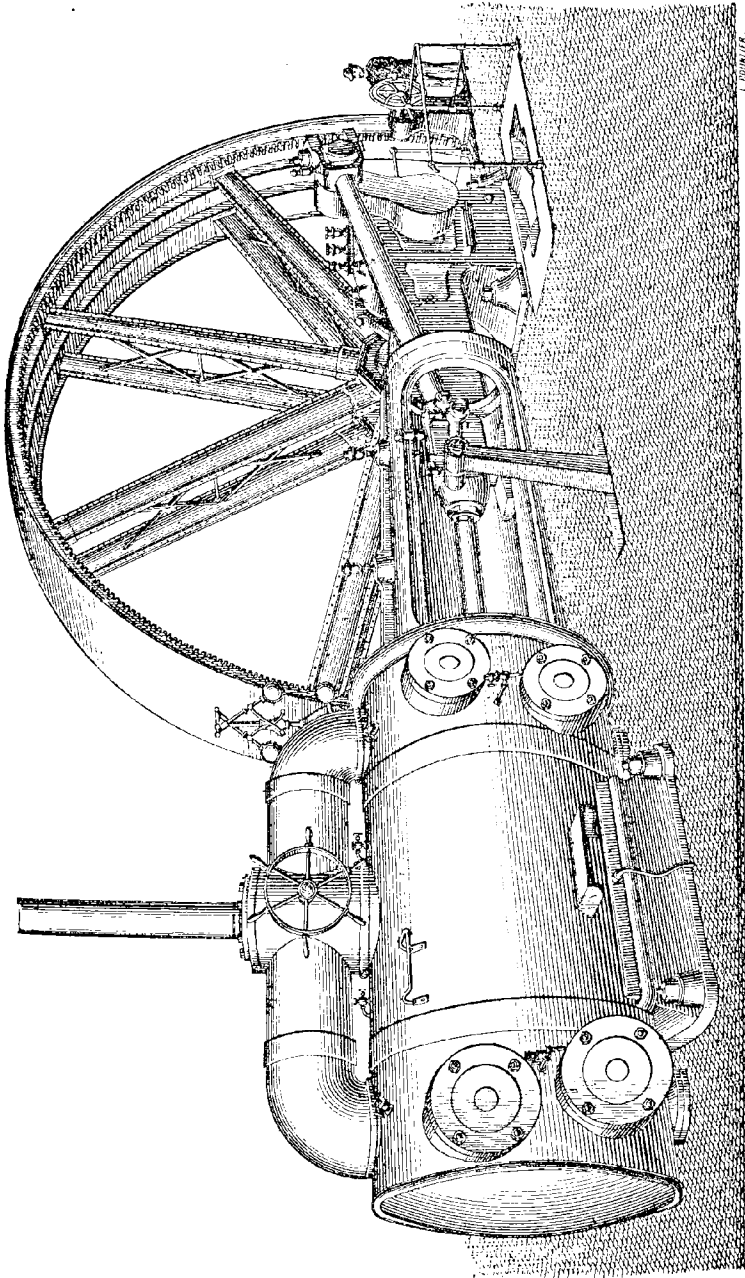


Fig. 427. — Machine Faircut à quatre tiroirs (vue perspective).

parois pour un même volume. La double enveloppe est rapportée, dans le but de prévenir les ruptures que peuvent entraîner des dilatations inégales. Elle est alimentée directement par un tuyau de grande section. Chaque fois que se ferme l'admission, le courant intercepté se précipite dans cette enceinte en tourbillonnant, de manière à renouveler les contacts. Ce fluide reste d'ailleurs complètement isolé du cylindre. Les fonds eux-mêmes sont enveloppés de vapeur vierge.

On y a logé les quatre tiroirs de distribution pour diminuer autant que possible l'espace nuisible, qui se trouve par là réduit au centième de la cylindrée. Ces distributeurs fournissent directement l'admission à la partie supérieure du cylindre, et l'échappement en dessous. L'ouverture et la fermeture des tiroirs sont accélérées par l'interposition d'un plateau, qui oscille sous l'empire d'un excentrique unique. On utilise pour le déclenchement le mouvement de retour, aussi bien que l'oscillation directe; mais le doigt inverse ne frotte pas continuellement. Il reste soulevé, quand il n'est pas appelé à fournir lui-même la manœuvre. On obtient ainsi des introductions variables de 0 à 80 % de la course. La distribution est influencée par un régulateur à bras croisés (n° 868). La machine ne peut s'emporter sans fermer d'elle-même toute admission.

La régularité de l'allure est assurée par un volant puissant, de 10 mètres de diamètre et 1 m. 50 de largeur, dont la jante pèse à elle seule 21 tonnes. Seize bras en tôle rivée, de section elliptique variable, réunissent le tourteau à la circonférence. Une denture règne sur toute la périphérie, pour permettre le démarrage sous l'action d'un treuil-vireur, qui se débraye de lui-même par le seul fait de l'entrée en mouvement de la machine. Ce volant est en fonte nervée, fondu d'un seul jet, et séparé ensuite en quatre morceaux.

Les pièces de transmission sont en acier trempé, venues à la forge. Le manneton et les axes ont été emmanchés à la presse hydraulique. Les coussinets, les bagues sont en bronze phosphoreux. Le palier à serrage peut être réglé au vingtième de millimètre. La crosse est à rattrapage de jeu, grâce à un collier conique que

l'on peut serrer lui-même plus ou moins, et qui est placé entre

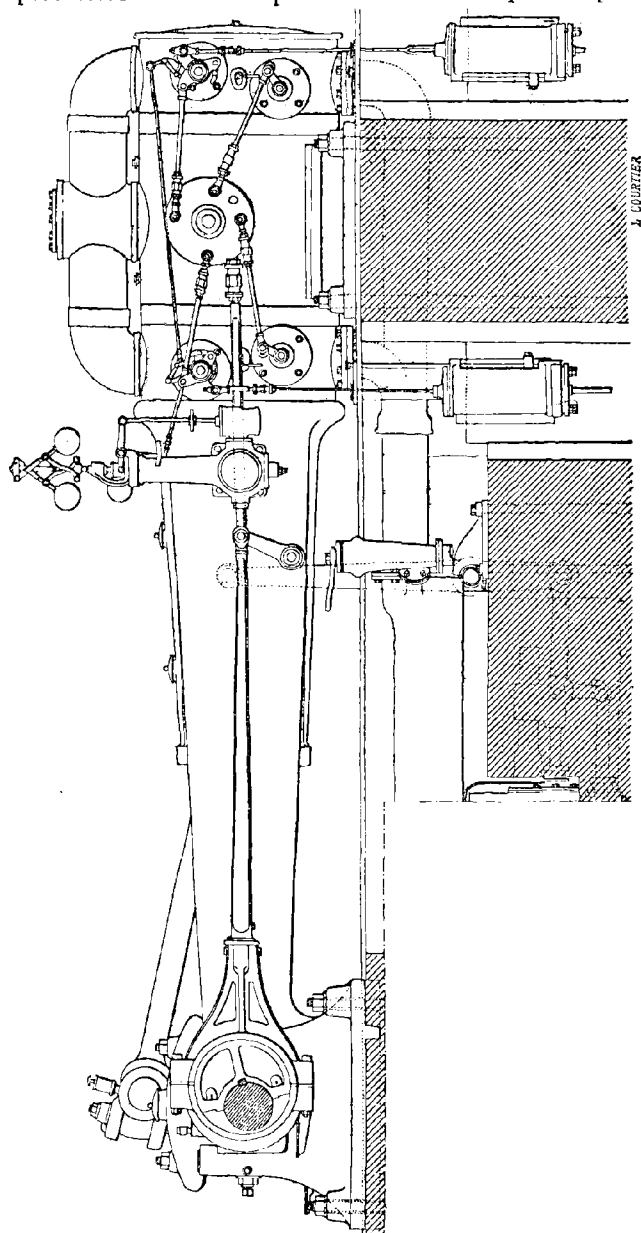


Fig 498. — Machine Farcot à quatre tiroirs (élévation).

la crosse et le patin, engagé dans une glissière cylindrique du

bâti, qui est coulé d'une seule pièce et pèse 19 tonnes. Le graissage se fait à l'oléomètre Bourdon (n° 935). Les têtes de bielle sont lubrifiées avec l'appareil mobile de Leneveu.

Ce remarquable moteur, composé d'un très petit nombre d'organes compacts, simples et robustes, assure, avec des consommations très satisfaisantes au point de vue de l'économie, un service régulier et de longue durée.

**832** — *Machine Porter-Allan*. — Cet atelier<sup>(1)</sup> a été en Amérique le promoteur des machines horizontales à grande vitesse et à double effet, destinées à conduire directement des dynamos. Ses produits se distinguent par la correction et la pureté des lignes, par la simplicité des mouvements. Le bâti a la forme d'une boîte creuse, portant à l'avant un palier solidement établi, et à l'arrière le support du cylindre. L'arbre est placé à une faible hauteur. La fixation en porte-à-faux du cylindre à l'arrière de la plaque de fondation assure une liaison parfaite, et permet la dilatation. Le piston massif et très épais est muni de deux segments aux extrémités de sa génératrice. Il est très légèrement ovalisé à la partie supérieure, en vue d'éviter le coincement, en ne permettant pas à cet organe de porter à la fois par deux points à l'extrémité d'un même diamètre. La distribution se fait par quatre tiroirs, dont deux pour l'admission et deux pour l'échappement. Leurs quatre commandes sont gouvernées par une seule came à coulisse. L'influence de cette dernière équivaut à celle d'une série d'excentriques, qui auraient à la fois des courses croissantes et des avances angulaires décroissantes. La variation de détente est fournie par un régulateur Porter (n° 862).

**833** — *Machine straight-line*. — Le professeur Sweet<sup>(2)</sup> a donné ce nom caractéristique (*machine ligne droite*) à un moteur qu'il s'est attaché à rendre économique, simple, rigide, résistant aux

(1) Gustave Richard. *La lumière électrique*, 15 mars 1884, p. 465.

(2) Buchetti. *Les machines à vapeur actuelles à l'Exposition de 1889*, p. 69. — Dwelshauvers Dery. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1889, p. 256. — *Revue industrielle*, 31 mai 1890, p. 209. — *The electrical World*, t. XIV, p. 152. — *Praktische Constructeur*, janvier 1888, p. 15.

vibrations et à l'usure, bien équilibré aux plus grandes vitesses (fig. 499). Les surfaces de frottement sont larges et formées d'excellents matériaux. L'ajustage très précis est contrôlé à l'aide d'instruments délicats.

Le bâti fondu avec le cylindre présente la forme d'un V reposant sur trois points, de manière à éviter les défauts d'appui. Le cylindre possède une boîte à vapeur de chaque côté, ce qui lui

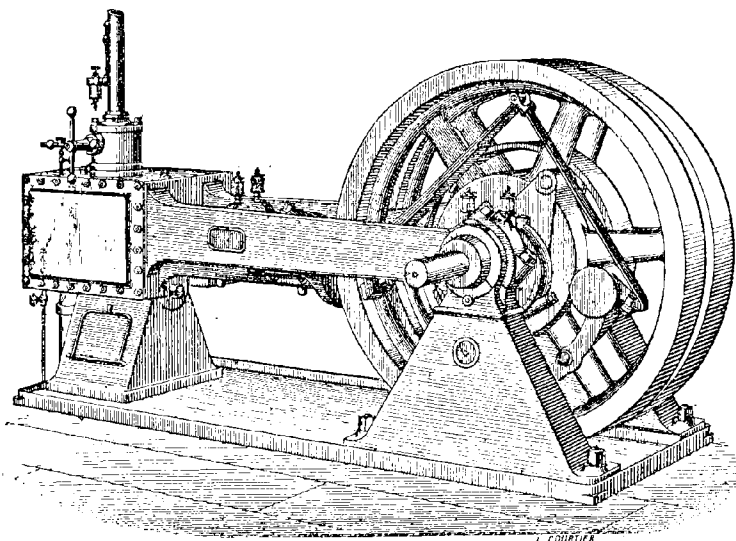


Fig. 499. — Machine straight-line (vue perspective).

donne l'aspect d'une caisse carrée. Les tiroirs d'admission et d'échappement se meuvent sur des tables distinctes, venues de fonte d'un seul jet. Chacun d'eux est actionné par un excentrique spécial. Ils sont équilibrés. Le tiroir d'admission est à détente variable. Il en est de même pour l'avance à l'admission. Quant au tiroir d'évacuation, il procure l'avance à l'échappement et la compression fixes. Le régulateur est logé dans l'un des deux volants que présente la machine pour la symétrie, et qui ne sont autres que les plateaux-manivelles, suffisamment agrandis pour acquérir un moment d'inertie capable d'effectuer la régularisation. Le piston est très long, en vue d'assurer une étanchéité parfaite. Sa garniture

est formée de quatre cercles en fonte. Un manche long et léger

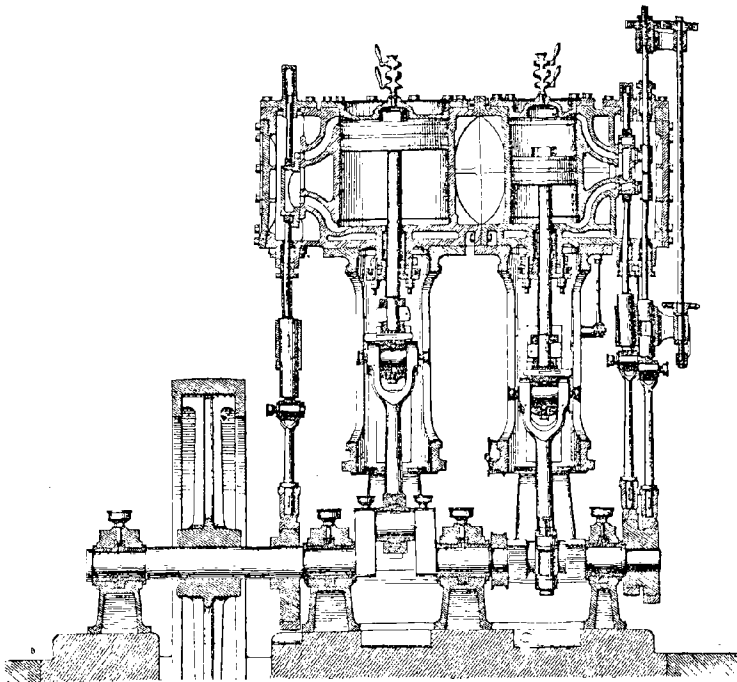


Fig. 500. — Machine-pilon compound de Jean et Peyrusson (coupe longitudinale).

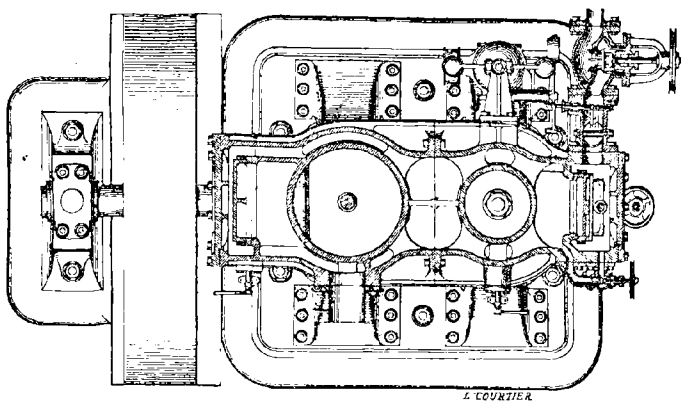


Fig. 501. — Machine-pilon compound de Jean et Peyrusson (plan).

en métal doux passe à frottement facile sur la tige. Une partie



sphérique assure la liberté de son mouvement. On a évité de même l'emploi du presse-étoupes pour les boîtes à vapeur. La lubrification se fait dans la vapeur elle-même, au moyen d'un compteur à gouttes visibles (n° 935).

**834** — *Machine-pilon*. — La machine verticale prend souvent la forme à laquelle on a donné le nom de *type-pilon*. Les

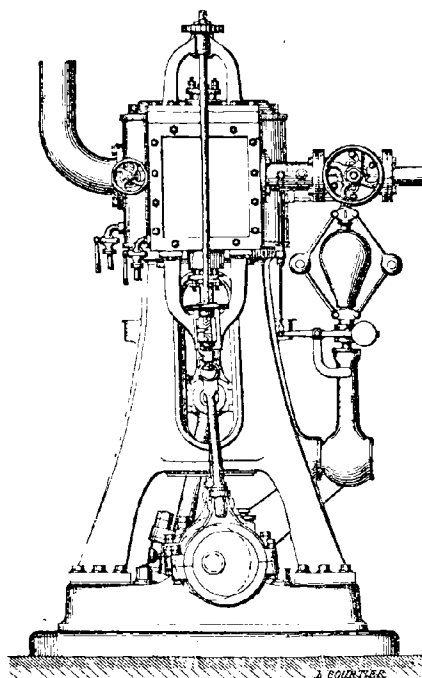


Fig. 502. — Machine-pilon compound de Jean et Peyrusson (élévation latérale).

figures 487, 488 représentent le moteur compound Marguet-Toulet <sup>(1)</sup> établi dans ce système. On a disposé une plate-forme pour la visite des parties élevées. Le mouvement vertical est assuré par un guidage très complet, qui tend à diminuer l'usure. Le bâti est venu d'une seule pièce avec les glissières et le palier principal de l'arbre moteur, qui est à manivelle unique. Le

<sup>(1)</sup> Armengaud. *Publication industrielle*, 1885, p. 538.

condenseur est logé dans un de ses jambages. Sur le socle sont également fixés le corps de la pompe à air, et la colonne du régulateur qui actionne une détente Meyer. Les cylindres sont environnés de chemises de vapeur.

Les figures 500, 501, 502 nous montrent la machine-pilon, système compound à cylindres accolés, de Jean et Peyrusson.

**835** — *Machine à balancier*. — Ce type remonte à Watt, dont il porte encore le nom dans l'usage. Ce dernier l'avait amené à un

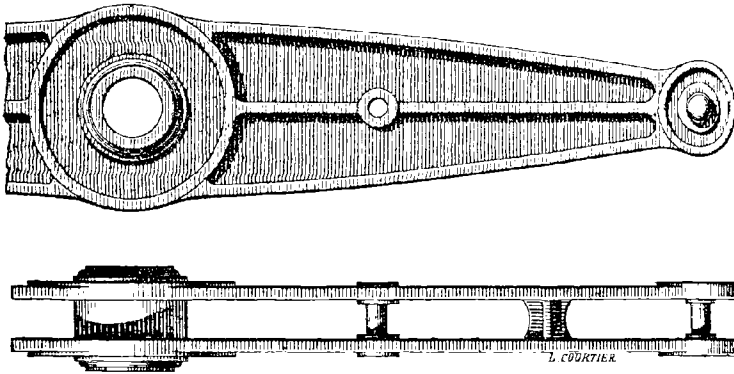


Fig. 503 et 504. — Balancier.

harmonieux équilibre dont on s'est peu départi (fig. 503 à 507). Cette machine est souvent critiquée au nom du progrès, et représente le passé vis-à-vis des errements nouveaux. On la trouve chère, lente et encombrante. Toutefois certaines industries, certaines régions géographiques continuent à goûter ce type qui, en raison de ses formes amples et développées, procure une certitude de rendement et une tranquillité d'allures, que ne garantissent pas toujours certaines tentatives plus modernes.

La figure 505 représente la belle machine qui a été mise par MM. Jean et Peyrusson à l'Exposition de 1889. Le balancier exige un point d'appui solide, ordinairement fourni par une forte colonne, ou par un beffroi de colonnes en fonte isolées des murs de l'atelier. Aux chapiteaux se relie un entablement, qui porte les

points d'attache du parallélogramme de Watt (\*). Ces organes

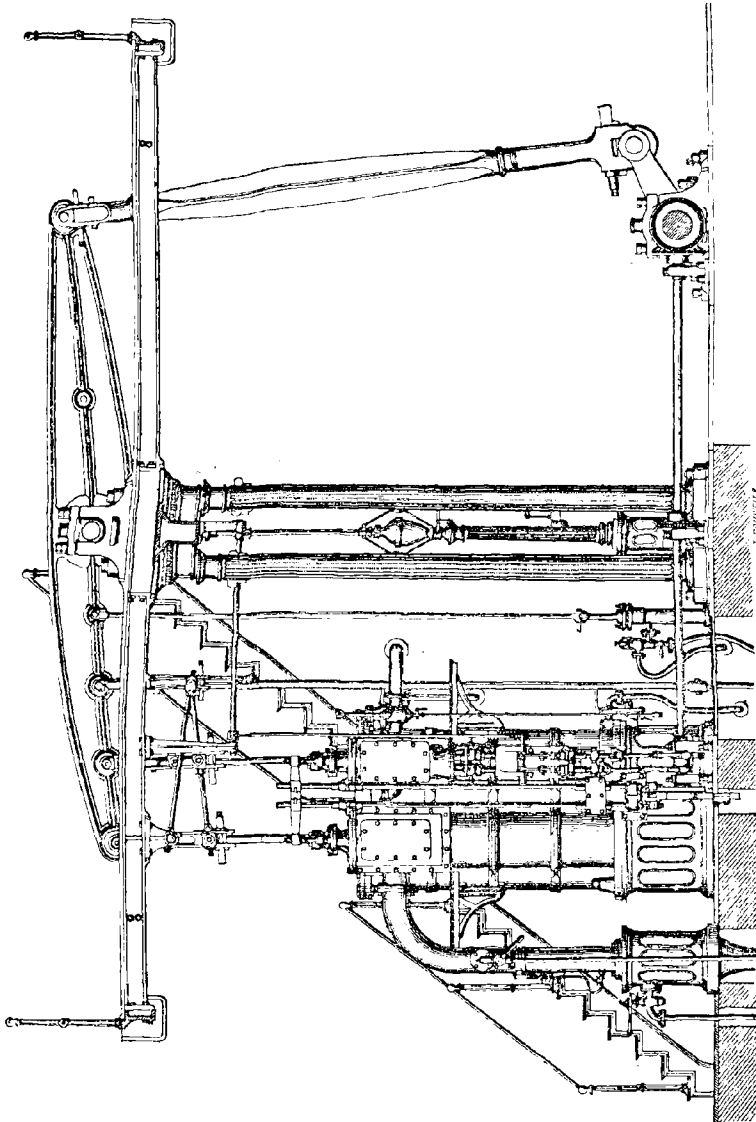


Fig. 505. — Machine à balancier supérieur (élévation).

reclament une marche lente, qui procure du reste une grande

(\* Haton de la Goupillière, *Traité des mécanismes*, p. 195.

sûreté, avec peu d'usure. Le condenseur est suspendu à la plaque de fondation.

**836** — *Machine mi-fixe.* — On appelle *machines demi-fixes*

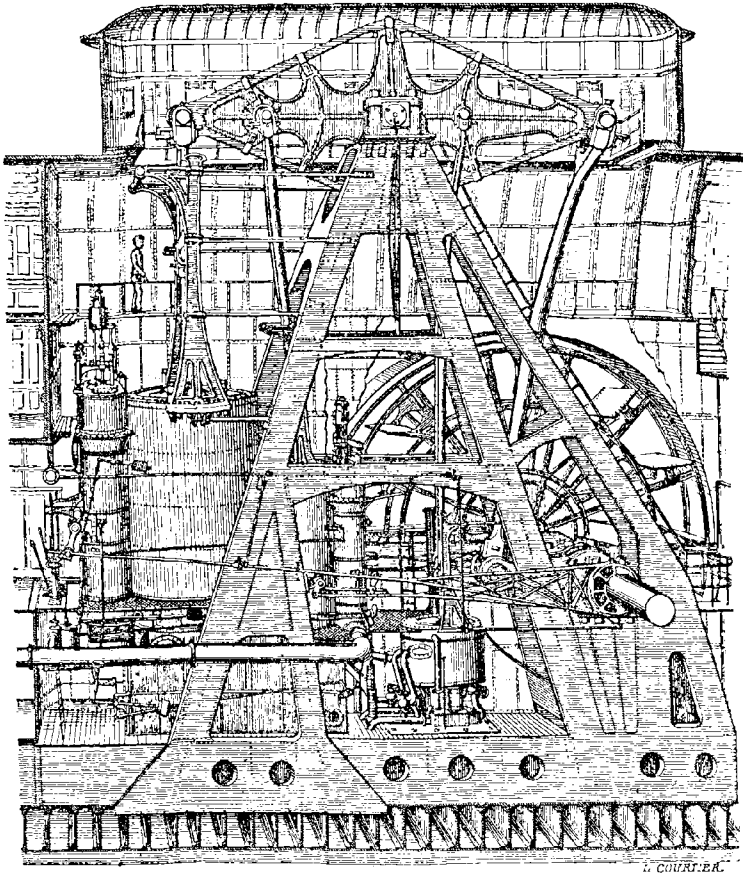


Fig. 506. — Machine à balancier du *Puritain* (élévation).

(fig. 508, 509, 510) une classe spéciale de moteurs qui font corps avec leur générateur de vapeur sur la même plaque de fondation. On évite ainsi pour ce dernier des installations spéciales, coûteuses et encombrantes. Ce type exige peu de fondations. Sa mise en place peut être effectuée par des monteurs ordinaires.

On peut, dans ces conditions, suivre avec moins de pertes les développements d'une industrie appelée à progresser d'une manière rapide, quoique incertaine au début. A défaut de ce moyen, ses accroissements obligeraient à démolir les installations fixes, et à mettre à la ferraille la machine elle-même, encore utilisable cependant pour quelque autre établissement, si elle ne présentait une connexion trop étroite avec les parties que l'on a dû détruire.

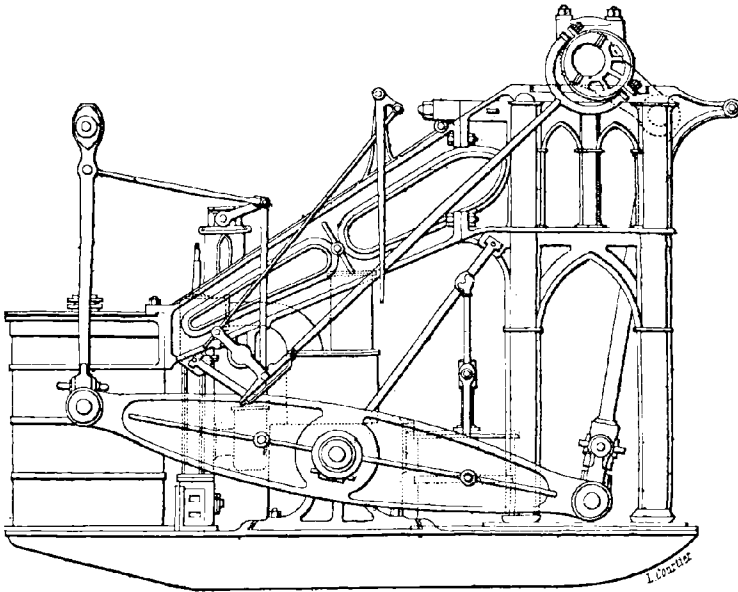


Fig. 307. — Machine à balancier inférieur (élévation).

Ce système se recommande encore particulièrement, lorsque des motifs quelconques viennent réclamer de temps en temps le déplacement de la force motrice, suivant les nécessités du moment. On les emploie dans les mines, pour des opérations d'une durée limitée. Elles servent également aux épuisements, à la submersion des vignes phylloxérées, etc.

A la vérité ces avantages se payent la plupart du temps par un supplément de consommations, et une limitation plus étroite de la puissance que permet d'atteindre ce genre de moteurs.

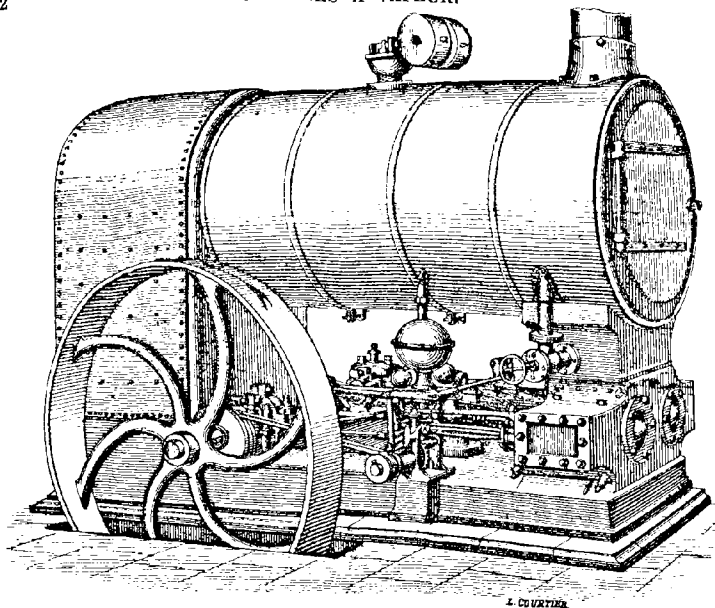


Fig. 508. — Machine mi-fixe horizontale de Davey-Paxmann à chaudière supérieure.  
(Vue perspective).

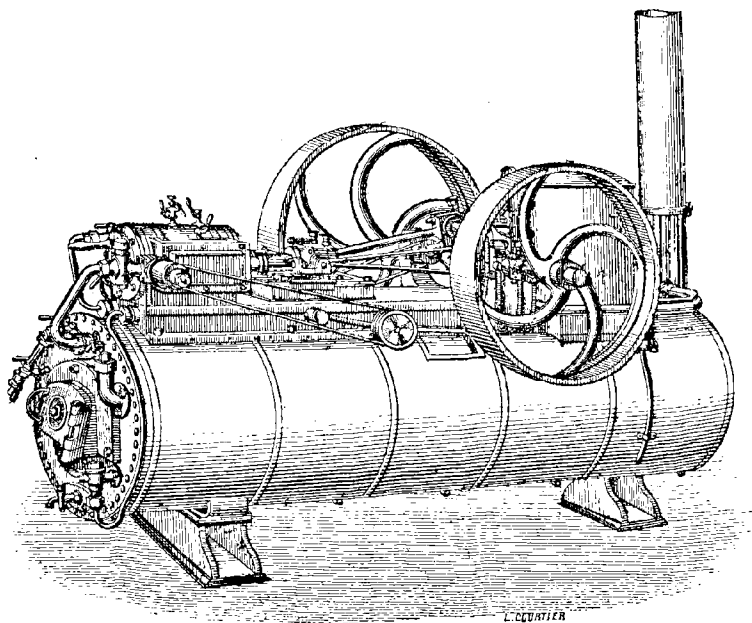


Fig. 509. — Machine mi-fixe horizontale de Damecy à chaudière inférieure.  
(Vue perspective).

Une distinction s'est encore établie parmi les machines mi-fixes, suivant que le moteur et son générateur sont étroitement confon-

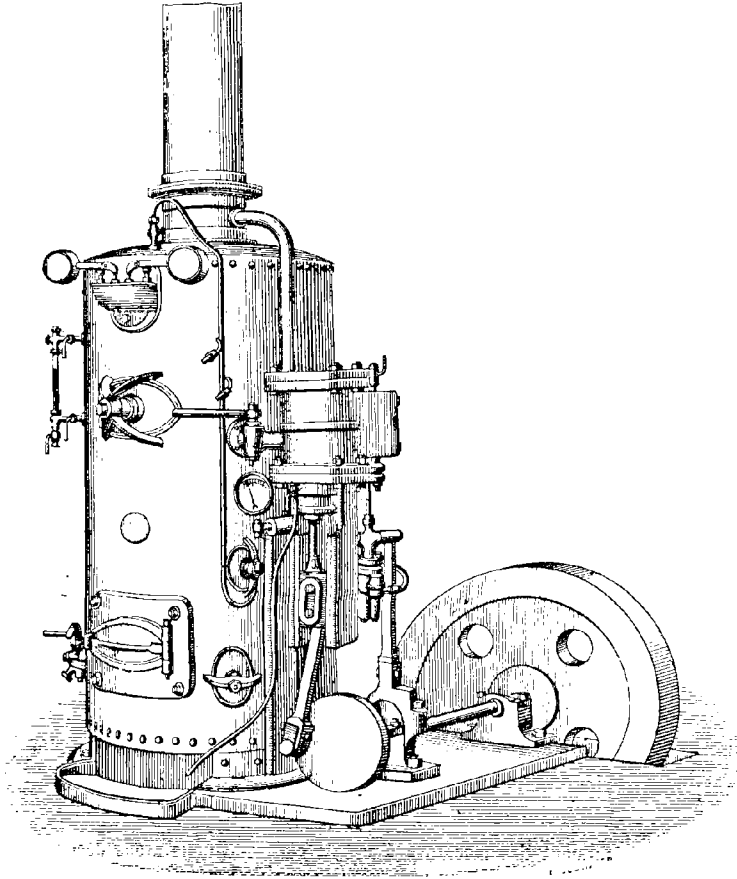


Fig. 510. — Machine mi-fixe verticale de Boulet (vue perspective).

nus, en formant sur le bâti un tout inséparable, ou bien que la chaudière reste plus nettement distincte et devient amovible, le cas échéant, en vue de répondre à des besoins spéciaux.

## § 2

## MACHINES A SIMPLE EFFET

**837** — *Généralités.* — Nous avons déjà rencontré le principe du simple effet dans la machine de Cornouailles (n° 808). Mais il s'y associe à deux autres propriétés spéciales : la phase d'équilibre et l'intermittence, qui font de cet appareil un moteur tout à fait à part. Le simple effet a encore été employé, sous une forme plus moderne et de plus en plus répandue, pour des machines continues et exceptionnellement rapides, destinées à la commande directe des dynamos (<sup>1</sup>).

On trouve à ce système l'avantage de supprimer les chocs que déterminerait le moindre jeu dans les machines à double effet, à chaque changement de sens de l'action motrice. Or cette influence devient particulièrement destructive avec les grandes vitesses.

L'usure est diminuée, attendu que le frottement sous pression s'exerce toujours dans le même sens, ce qui tend à produire plutôt une sorte de polissage que la désorganisation des surfaces.

La bielle devient libre, au lieu d'avoir son articulation emprisonnée. Elle reste néanmoins toujours appuyée pendant le mouvement de retour, pourvu que la force d'inertie ne soit pas trop grande. Une compression suffisante permet au besoin de la contenir en fin de contre-course.

(<sup>1</sup>) Indépendamment des machines à simple effet que nous avons décrites ici, je mentionnerai encore les suivantes :

ANSLOW. — BLYTH. *The Steamship*, 2 septembre 1889, p. 98. — BROWN. *Revue industrielle*, 8 février 1890, p. 53. — BURNHAM. *Scientific American*, 27 mars 1885, p. 193. — CASTLE (*Revue industrielle*, 1<sup>er</sup> décembre 1887, p. 473. — *American machinist*, 21 mai 1887, p. 7. — *The electrical World*, 5 août 1889, p. 73). — CHANDLER. *Mechanical progress*, novembre 1887, p. 44. — COWDREY. — EHRINGER et KLEINSCH. *Chronique industrielle*, 31 janvier 1886, p. 54. — EICHERSHOFF. — FLOYD. — GOODFELLOW et MATTHEWS. *Revue industrielle*, 29 juillet 1886, p. 301. — HEAD. — JACOMY. *Revue industrielle*, 25 juin 1885, p. 254. — JONSON. *The Railroad and Engineering Journal*, mai 1889, p. 242. — JOY. — KASELOWSKI. — KENNEDY. — KRIEDEL. *The electrical World*, t. XIV, p. 200. — LOWRIE. — MÉGY. — METCALFE. *American machinist*, 11 février 1888, p. 5. — RICHARD. *Mechanical Progress*, 15 août 1885, p. 117. — RIGG. — SELLERS. — WELDFORD. *Revue industrielle*, 2 janvier 1884, p. 1.



**838** — *Machine Westinghouse.* — La machine de Westinghouse<sup>(1)</sup> comprend deux cylindres moteurs verticaux (fig. 511, 512), disposés de part et d'autre d'un cylindre de distribution. Ouverts par en bas, ils sont forcés à la partie supérieure. Mais on ménage dans les fonds des plaques de sûreté, calculées de manière à se briser si, par suite d'une négligence à manœuvrer les purgeurs, la pression vient à dépasser une limite déterminée, qui est ordinairement égale à 14 kilogrammes par centimètre carré. Cette précaution permet de réduire sans crainte l'espace libre.

Les pistons sont très allongés, plus longs même que leur course, d'un quart environ. Ils sont creux, et munis d'un double fond pour éviter les condensations que produirait sans cela le contact permanent de l'atmosphère. Cette forme ingénieuse évite l'emploi de presse-étoupes et de glissières, en même temps qu'elle favorise l'étanchéité. La garniture est formée de quatre segments.

Un distributeur unique à piston se meut dans le cylindre central. Il est sensible à l'action du régulateur, par l'intermédiaire d'un excentrique à calage variable qui agit non seulement sur la détente, mais sur la compression. La vapeur arrive dans un espace annulaire ménagé autour du tiroir à piston, et se rend à la partie supérieure de l'un ou l'autre des deux cylindres moteurs. Ce tiroir parfaitement équilibré est constitué par cinq pièces reliées au moyen d'un boulon qui forme tige. Les lumières sont très larges, et débouchent directement dans le cylindre, ou à l'air libre. Leur section est de 8 % de celle du piston-moteur pour l'admission, et, pour l'échappement, de 15 %. L'indépendance de ces deux fonctions, ainsi que la disposition annulaire, permettent de donner aux conduits une aussi grande section sans augmenter la course du tiroir.

Les deux tiges attaquent des manivelles équilibrées et distantes de 180 degrés. On emploie pour leur construction l'acier fondu sous pression. L'axe est excentré, afin que l'obliquité de la bielle influence inégalement les deux courses. De cette manière, en lui

<sup>(1)</sup> Gustave Richard. *La lumière électrique*, avril 1884, p. 97. — E. Martin. *Bulletin technique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, juin 1886, p. 327. — *Congrès international de mécanique appliquée de 1889*, t. II, p. 125.

donnant une dimension égale à cinq fois la manivelle, on obtient la même régularité que pour une longueur double qui serait employée dans les conditions ordinaires. Ces bielles creuses, avec nervures, n'ont à résister qu'à la compression. On arrive ainsi

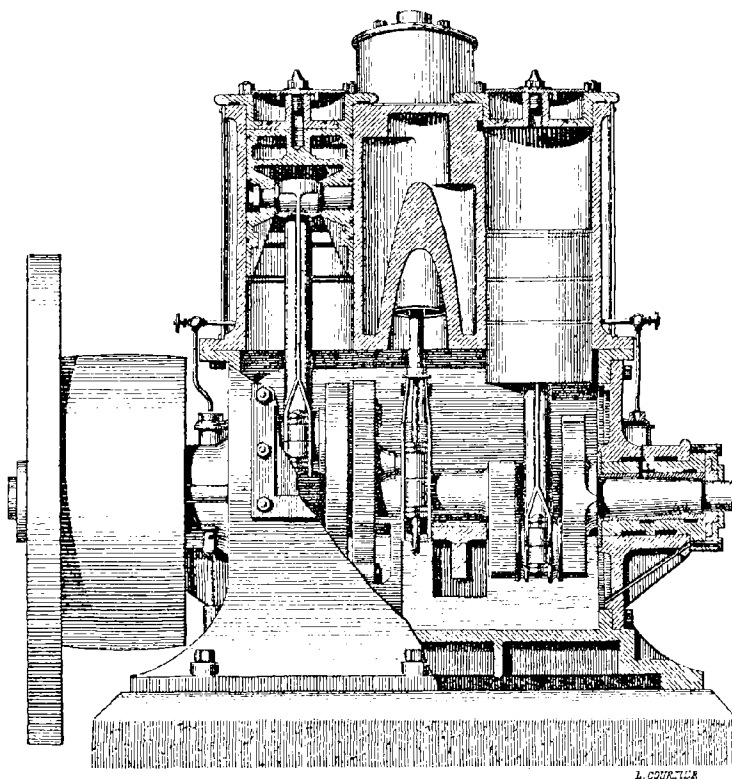


Fig. 511. — Machine Westinghouse à simple effet (coupe longitudinale).

à réaliser des vitesses vertigineuses dépassant 1000 tours, et atteignant parfois près de 3000 révolutions par minute. Un graissage exceptionnel est pour cela nécessaire. L'arbre et ses coudes, l'excentrique et les têtes de bielle (fig. 512) plongent dans un bain d'huile.

Telle est cette machine pour laquelle, en faisant un sacrifice du côté des consommations <sup>(1)</sup>, le constructeur a conçu la pensée

<sup>(1)</sup> Cette machine exige environ 15 kilogrammes de vapeur, par cheval-heure.

de racheter ce défaut d'économie par le soin de l'exécution, la précision de l'ajustage et la simplicité du jeu qui, en présence de vitesses aussi exceptionnelles, évitent un entretien et des chômages dispendieux.

**839** — *Machine Brotherhood*. — Le type Brotherhood <sup>(1)</sup> s'est

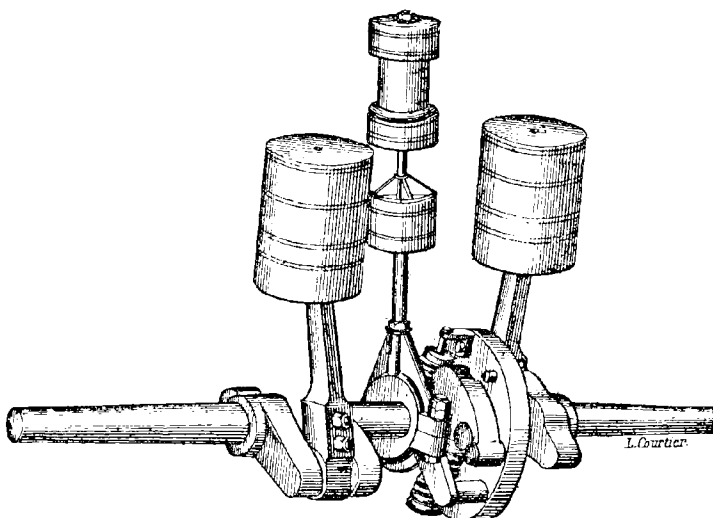


Fig. 512. — Machine Westinghouse à simple effet. Partie mobile (vue perspective).

beaucoup répandu dès son apparition, et a été incessamment perfectionné par son auteur (fig. 513, 514).

Il comprend trois cylindres disposés suivant des rayons espacés de 120 degrés. La vapeur est admise au fond de ces corps de pompe, et s'échappe par le centre dans l'atmosphère. Les fractions motrices des diverses courses se superposent en partie, puis-

(<sup>1</sup>) Peter Brotherhood's Works, in-4°. — Buchetti. *Les machines à vapeur actuelles*, p. 154. — Hirsch. *La mécanique générale à l'Exposition de 1878*, p. 265. — Gustave Richard. *La Lumière électrique*, avril, mai 1884. — Uhland. *Les nouvelles machines à vapeur*, p. 118. — Correy. *Bulletin de la Société industrielle de Rouen*, 1878. — Meurgey. *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, février 1877, p. 25. — *Annales industrielles*, 1883, t. 1, p. 59. — *Revue industrielle*, 29 octobre 1885, p. 434. — *La Nature*, 28 janvier 1882, p. 131.

que le jeu d'une cylindrée dure pendant un demi-tour. On obtient ainsi un moment de torsion remarquablement constant, avec une détente d'environ moitié, et une compression élevée.

Le tiroir unique est équilibré. Il est conduit par une sorte de tournevis, dont les bras sont pris dans la cloison qui sépare la chambre d'admission de celle d'échappement, avec un jeu suffisant pour assurer au tiroir un rodage parfait. Le régulateur agit sur la

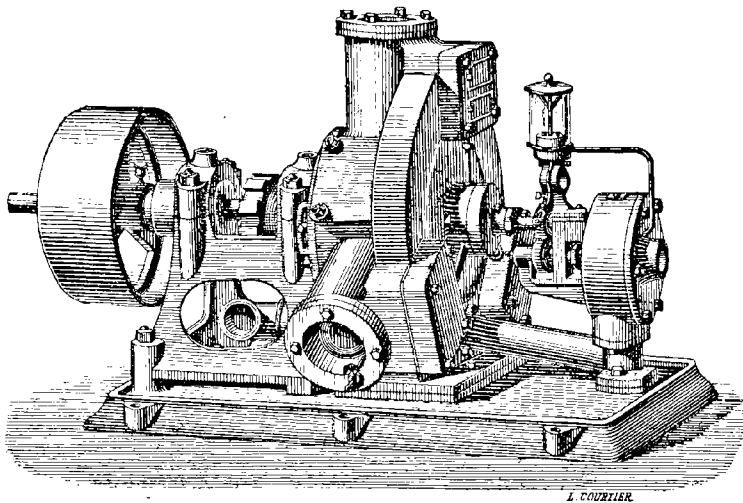


Fig. 513. — Machine Brotherhood (vue perspective).

valve d'admission. Dans les machines puissantes, on remplace également le distributeur unique par trois tiroirs à piston creux. On réalise par là des ouvertures plus promptes et mieux dégagées aux grandes détentes. De petits orifices supplémentaires permettent une introduction directe de vapeur pour le démarrage, quand aucune des trois lumières ne se trouve démasquée.

Les bielles, construites en acier, n'agissent jamais que par compression. Il suffit par suite de les appuyer sur la portée de l'arbre à l'aide de butées cylindriques en bronze, reliées par des frettes en acier. On obtient une allure très stable, même au régime de 2000 tours, destiné à la conduite des dynamos. Les consomma-

tions sont élevées et sensiblement égales à celles de l'exemple précédent.

**840** — *Machine Willans.* — La *central valve Engine* de M. William Willans <sup>(1)</sup> a beaucoup occupé l'attention par elle-même, ainsi que pour les expériences dont elle a été l'objet de la part de son auteur (fig. 495).

Elle appartient au type compound à trois cylindres disposés verticalement en tandem, avec réservoir intermédiaire et faible détente.

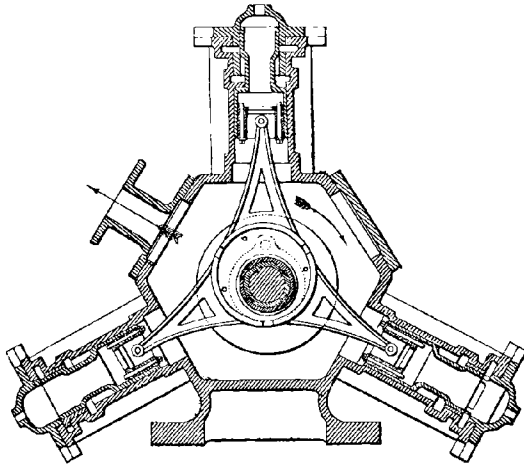


Fig. 514. — Machine Brotherhood (coupe).

Une même tige actionnée par un excentrique les traverse de part en part; portant à la fois les pistons récepteurs et les distributeurs. Un amortisseur permet d'équilibrer le mouvement alternatif par une compression d'air, qui reste invariable pour une même vitesse, quelle que soit la puissance développée par le moteur; condition que l'on ne réaliserait pas de même par la phase de compression de vapeur. La tension est de 10 kilogrammes.

<sup>(1)</sup> Sinigaglia (*Traité des machines à vapeur*. Traduction de Billy, p. 279. — *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 15 mai 1890, p. 263). — Gustave Richard. *La Lumière électrique*, 25 avril 1884, p. 175; 20 mars 1886, p. 559; 9 mars 1889, p. 456. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1889, p. 60. — *Congrès international de mécanique appliquée de 1889*, t. II, p. 109.

L'exécution atteint un haut degré de perfection. La marche est silencieuse, régulière, très douce. Les diagrammes sont beaux, avec des départs de détente nettement accusés. Cette machine fait convenablement 400 tours, et peut aller à 700; ce qui constitue une allure rapide, quoique moins excessive que les précédentes. Aussi la consommation est-elle plus satisfaisante. Elle ne dépasse pas 12 kilogrammes de vapeur par cheval-heure. On l'a même abaissée au-dessous de 9 kilogrammes. La machine est sans condensation ni double enveloppe. Chaque cylindre est muni d'une soupape de sûreté, en vue des coups d'eau.

**841** — *Machines à pistons conjugués*. — Nous avons déjà rencontré<sup>(1)</sup> divers exemples de moteurs associés de telle sorte que chacun d'eux soit chargé de fournir la commande de l'autre; ce qui établit entre eux un lien plus étroit que l'accouplement ordinaire de machines dont chacune forme un tout complet, à tel point que l'on peut, théoriquement tout au moins, marcher avec une seule d'entre elles, si l'autre se trouve momentanément entravée.

On a été plus loin dans cette voie, et l'on a construit, soit à simple, soit à double effet, des machines à plusieurs pistons conjugués, dont chacun conduit l'autre directement, de telle sorte que le même organe joue à la fois le rôle de récepteur et de distributeur. Tels sont par exemple le moteur Clough à trois cylindres, et la *machine-tombeau* de Hicks à quatre cylindres<sup>(2)</sup>.

La machine Bonjour<sup>(3)</sup> comprend un premier piston allongé suivant ses génératrices, dont l'intérieur est aménagé de manière à constituer un autre cylindre perpendiculaire au premier. Un second piston s'y meut de son côté. Il se trouve donc animé dans l'espace de deux mouvements rectangulaires, dont on dispose de manière à faire décrire un cercle par l'un de ses points, que l'on prendra pour bouton de la manivelle. On arrive ainsi, avec très peu d'organes, à réaliser des vitesses de 800 tours.

(1) Locomotive à distribution elliptique (n° 761); locomotive Belpaire (n° 739); machine Higginson (n° 821); pompe Worthington, etc.

(2) Spineux. *De la distribution de la vapeur par tiroirs*, p. 107.

(3) *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1888, p. 200.

La machine West<sup>(1)</sup> possède six pistons parallèles, qui viennent solliciter l'un après l'autre, aux sommets successifs d'un hexagone régulier, un disque susceptible d'un mouvement conique. On en détermine par là le mouvement de rotation, qu'un engrenage d'angle transmet à l'arbre moteur.

Le moteur Bûrgin ne possède qu'un seul cylindre, ouvert aux deux bouts. On y engage deux pistons, qui sont articulés respectivement à des manivelles diamétralement opposées. L'un d'eux s'y relie directement, à la manière ordinaire; l'autre, au moyen d'un cadre qui contourne le cylindre. La vapeur est admise dans l'intervalle compris entre les pistons, et y accomplit ses fonctions, corrélativement avec les variations cinématiques que subit ce volume en raison des liaisons.

Ces combinaisons sont ingénieuses. Mais il est permis de penser que de telles voies sont un peu stériles, et que l'on y poursuit une simplicité plus apparente que réelle. On doit redouter d'imposer à l'ensemble un caractère un peu précaire, par la suppression, laborieusement obtenue, de quelque organe classique, dont l'économie cesse, dans de telles conditions, de constituer un avantage.

## § 5

### MACHINES OSCILLANTES

**842** — *Généralités.* — Dans tout ce qui précède, il a toujours été entendu que le cylindre est essentiellement immobile. Il en résulte immédiatement qu'entre la tige du piston, dont tous les points se meuvent en ligne droite, et la manivelle dont chaque point décrit un cercle, un assemblage direct est impossible, et l'emploi d'un organe intermédiaire inévitable. C'est la bielle. Nous avons vu quels inconvénients elle entraîne, et il était naturel par suite de rechercher sa suppression.

Murdock paraît en avoir eu, en 1785, la première idée, en renon-

<sup>(1)</sup> *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1877, p. 5. — *Engineering*, 1875, t. I, p. 28.

çant, comme conséquence forcée, à la fixité du cylindre. Quant au choix du mouvement à imprimer à ce dernier, le plus simple était évidemment une rotation alternative. Dans ces conditions, il devenait possible d'assembler directement la tige du piston avec le bouton de la manivelle; le cylindre prenant de son côté un mouvement pendulaire, pour accompagner cette dernière dans sa rotation <sup>(1)</sup>.

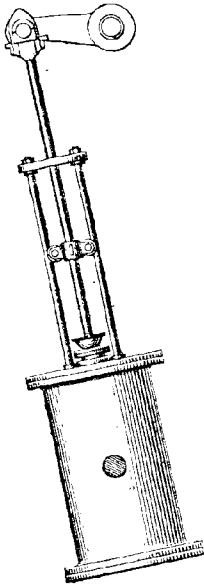


Fig. 515. — Machine oscillante de Cavé. (Élévation).

Dans les débuts, on avait adopté comme centre de basculement le pied de l'axe du cylindre; d'où le nom de *machines à rotule*. Mais un tel choix était évidemment mal inspiré, car la pesanteur intervient alors dans l'oscillation, d'une manière rapprochée, quoique inverse, de l'action qu'elle exerce sur le pendule, et d'autant plus malheureuse qu'on ralentit ainsi la première partie du mouvement, pour en accélérer la terminaison. Aussi cette tentative est-elle restée sans succès <sup>(2)</sup>.

Le constructeur François Cavé a repris en 1825 la même idée, mais en adoptant comme centre de rotation, pour supprimer l'intervention de la pesanteur, le centre de gravité du système mobile, ou plus simplement, et avec une approximation bien suffisante, le point de concours des diagonales du rectangle qui constitue la projection du cylindre. Il assujettissait la tige entre des guides que représente la figure 515, et que l'on est arrivé depuis lors à supprimer, les jugeant inutiles, au risque de fatiguer le stuffing-box. Ces moteurs se sont rapidement

<sup>(1)</sup> Ed. Bour a indiqué la nature de la trajectoire que suit alors le centre du piston. La tige de ce dernier peut être considérée comme un rayon vecteur, dont la direction passe incessamment par le centre de rotation. Une longueur constante, qui est celle de cette tige elle-même, sépare le point en question de l'extrémité qui décrit un cercle. La trajectoire cherchée est donc une *conchoïde de cercle*, ou *limaçon de Pascal*.

<sup>(2)</sup> Bien qu'elle ait été depuis reprise par Faivre (Armengaud. *Publication industrielle*, t. I); par Leloup (Armengaud. *Traité des moteurs à vapeur*, t. II, p. 146); et par Farcot (Armengaud. *Publication industrielle*, t. I).



répandus sous le nom de *machines oscillantes* (1). Si l'engouement des premiers temps s'est beaucoup ralenti, ce type n'a pas cependant disparu de la pratique. Ces moteurs sont robustes et assez simples, quoique peu économiques, sauf le cas des forges dans lesquelles on disposerait de flammes perdues permettant de produire la vapeur à bon marché. Ils offrent pour la marine (fig. 516, 517, 518), ou dans des ateliers très encombrés dont le terrain est cher, l'avantage caractéristique de la suppression de la bielle, avec le grand développement en longueur qu'elle entraîne nécessairement.

**843** — *Distribution*. — La distribution y présente tout d'abord une difficulté spéciale. Pour établir une relation entre le cylindre qui est mobile, et la tuyauterie nécessairement fixe qui aboutit à la chaudière, on ne peut placer l'insertion de cette dernière qu'au seul point immobile que présente le cylindre, à savoir l'un de ses tourillons, malgré l'inconvénient d'échauffer ce dernier, et de l'exposer au grippement. On réserve l'autre tourillon pour la communication analogue à établir avec le condenseur.

Ce premier point fixé, l'on a mis en avant divers modes de distribution. On peut remarquer tout d'abord que l'emploi des robinets fournit (toute réserve faite des difficultés d'exécution et d'entretien) une solution fort simple en principe, puisque l'organe d'accès de la vapeur se trouve lui-même animé d'un mouvement de rotation. Ce système a notamment été appliqué par Stolz (2).

On a également employé, dans la même donnée, un tiroir

(1) Spineux. *De la distribution de la vapeur dans les machines*, p. 120. — Bienaymé. *Machines marines*, p. 252. — Mégy. Petit moteur oscillant. Armengaud. *Publication industrielle*, 2<sup>e</sup> série, t. VIII, p. 590. — Moteur oscillant Fournier et Levet. *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1878, p. 265; 1879, p. 52. — Scott Russel. Machine oscillante à trois cylindres. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1<sup>re</sup> série, t. VI, p. 293. — Raffard. Machine compound oscillante à cylindres concentriques. *Annuaire de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, 1871, p. 72. — Machine Murdock. Murhead. *Inventions of Watt*, t. III, pl. 54. — Moteurs oscillants Boyer, Fauconnier, Frey, Jolly, Tamisier, Armengaud. *Traité des moteurs à vapeur*, t. II, p. 140. — *Engineering*, t. LXII, p. 459; 4 mai 1877, p. 544; 4 mars 1884, p. 219; 19 mars 1886, p. 267. — *The Engineer*, 7 novembre 1890, p. 371. — *American machinist*, 11 décembre 1890, p. 51. — *Iron*, 12 novembre 1880, p. 362.

(2) Armengaud. *Traité des moteurs à vapeur*, t. II, p. 142.

normal fixe<sup>(1)</sup>, en faisant frotter la bande du cylindre contre une

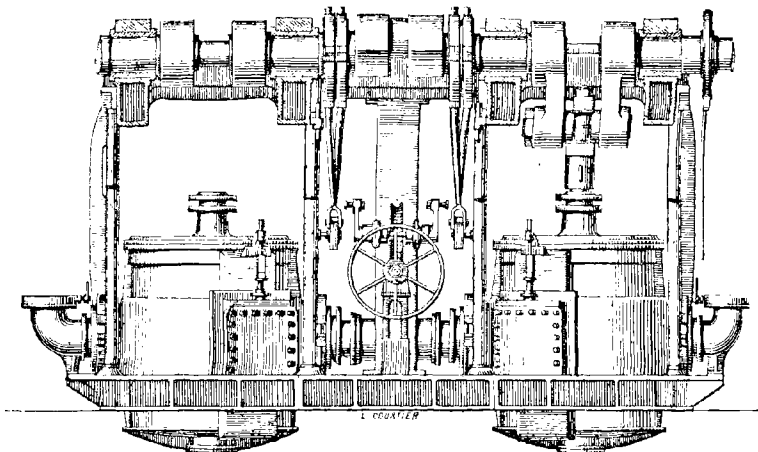


Fig. 516. — Machine oscillante des steamers du Bosphore (élévation longitudinale).

surface concentrique aux tourillons, percée d'ouvertures conve-

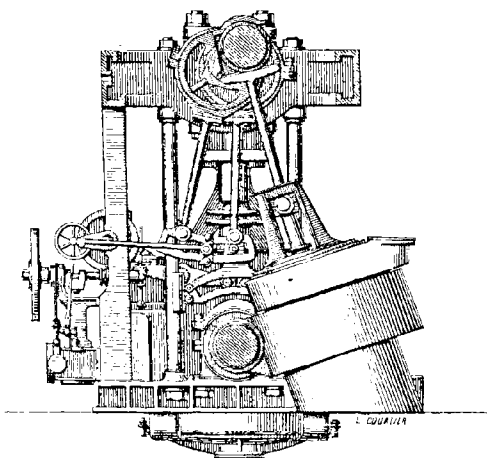


Fig. 517. — Machine oscillante des steamers du Bosphore (élévation latérale).

nables pour distribuer aux instants voulus. Mais l'absence de détente rend ce mode plus indiqué pour les machines oscillantes

(1) Navire Onondaga. Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 216.

à pression hydraulique<sup>(1)</sup>, que pour les moteurs à vapeur. Elle s'y adapte du reste d'une manière très naturelle, car le distributeur se trouve toujours au milieu de sa course aux moments où le pis-

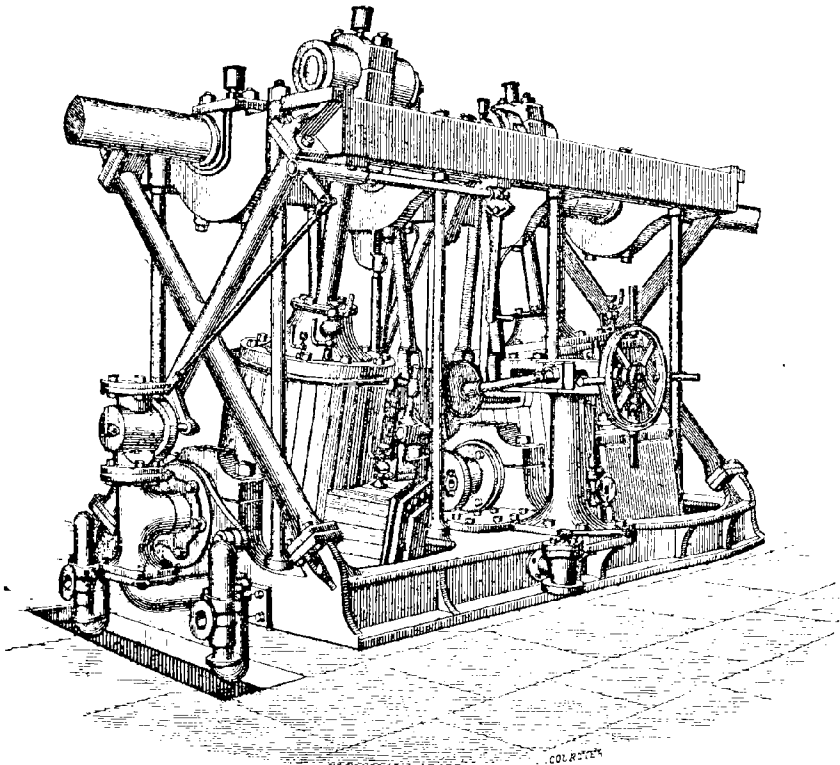


Fig. 318. — Machine marine oscillante (vue perspective).

ton termine la sienne, puisque l'amplitude de l'oscillation du cylindre est partagée symétriquement par la ligne des points morts.

**844** — J'indiquerai de même un second principe général que l'on peut suivre pour résoudre ce problème. Disposons par la pensée le piston dans la série de positions spéciales, pour lesquelles on veut établir la transition d'une phase à l'autre du fonctionnement de

<sup>(1)</sup> Voy. t. I, p. 327.

la vapeur. Le cylindre se trouve, par cela seul, amené dans les directions correspondantes. Plaçons également, à l'intérieur de la boîte à vapeur, le tiroir dans les situations voulues pour que les changements en question s'opèrent; et marquons dans l'espace les points où se trouve alors l'extrémité de sa tige. Quand nous aurons ainsi repéré toutes les positions qui nous intéressent, il suffira de réunir par un trait continu les points ainsi obtenus, et d'en former le profil d'une coulisse dans laquelle sera engagé, en genre de coulisseau, le bouton qui termine la tige du tiroir. Il est évident qu'avec un tel dispositif, lorsque le cylindre exécutera ultérieurement ses oscillations, le tiroir occupera nécessairement sur la glace, aux instants considérés, les positions que l'on aura eu l'intention de lui assigner. Cette solution a été appliquée par Kientzy (<sup>1</sup>).

Il est facile d'ailleurs d'améliorer pour la pratique ce mode un peu dur de transmission. En effet, l'on pourra ordinairement se contenter de s'attacher à trois positions, pour déterminer suffisamment le fonctionnement de la vapeur. Dès lors il suffit d'adopter comme trajectoire de l'articulation l'arc de cercle qui passe par les trois points correspondants. Par suite, au lieu de la réaliser sous la forme de coulisse à frottement, on se contentera de relier au centre de courbure, au moyen d'un balancier oscillant, le bouton de la tige du tiroir. Il pourra se faire, à la vérité, que le choix arbitraire des données conduise parfois à certains résultats qui seraient inacceptables dans l'application. On cherchera en pareil cas, à l'aide de tâtonnements convenablement dirigés, à rentrer dans des conditions réalisables.

**845** — On peut encore obtenir une solution approximative fondée sur l'emploi d'un excentrique (fig. 519). Imaginons que le bouton de la tige du tiroir d'une machine fixe soit engagé dans une coulisse animée d'une translation rectiligne, et ayant pour rayon de courbure la distance qui sépare, à un instant considéré, ce point de l'axe d'oscillation du cylindre. Ce bouton pourra dès lors être détaché de sa situation actuelle, et amené à celle qu'il doit occuper

(<sup>1</sup>) Armengaud. *Traité des moteurs à vapeur*, p. 140.

dans la machine oscillante, sans que le tiroir ait pour cela changé de position par rapport à la glace, qui est assemblée sur le flanc du cylindre. Les circonstances de la distribution resteront donc, pour cet instant en particulier, exactement ce que l'on avait voulu.

La seule difficulté sera que le rayon de courbure dépend, pour ce raisonnement, d'un instant qui est loin d'être le seul à considérer

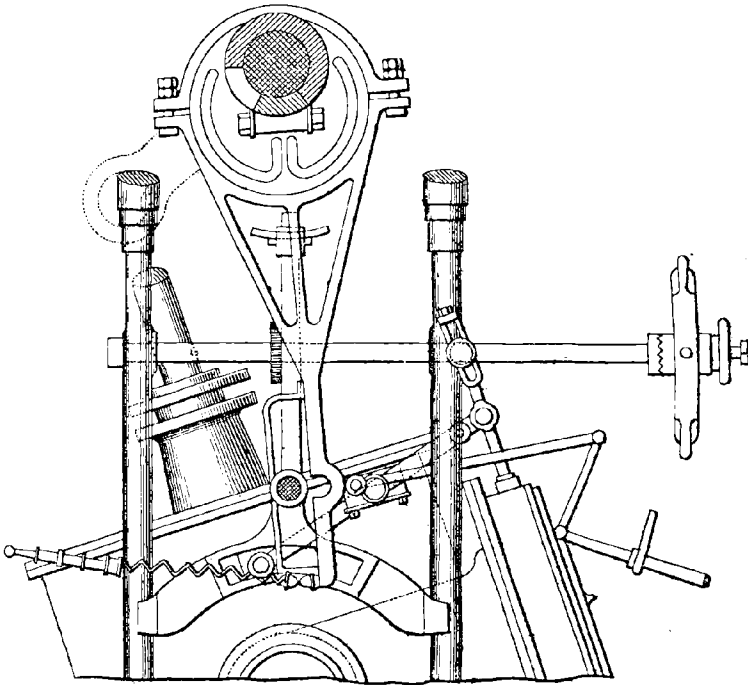


Fig. 519. — Distribution par excentrique d'une machine oscillante (élévation).

dans la question, et doit être envisagé comme variable, tandis que le rayon de la coulisse ne peut être au contraire que bien déterminé. Il y a donc contradiction dans les termes de l'explication qui précède.

On y obvie en se contentant d'une approximation. On envisage la position moyenne du cylindre et ses deux situations extrêmes, ainsi que celles que l'on veut attribuer au bouton du tiroir pour ces instants. On décrit l'arc de cercle qui les joint. Il n'aura plus,

comme l'exigeait la rigueur du raisonnement précédent, son centre sur l'axe de rotation. Ce point se trouvera un peu en dehors, sur le rayon moyen, en raison de la symétrie de l'oscillation du cylindre. Mais la réalité différera d'autant moins du résultat voulu, que la coulisse sera plus courte et plus éloignée de ce centre.

Ajoutons que, dans beaucoup de machines oscillantes, le bouton de l'arc est simplement pris dans une coulisse de Stephenson à deux excentriques.

### § 4

#### MACHINES ROTATIVES

**846** — *Généralités.* — Nous venons de voir que l'idée de communiquer au cylindre un mouvement d'oscillation a permis la suppression de la bielle. Les constructeurs ont poursuivi, dans la même voie, une simplification du mécanisme plus radicale encore, qui a donné lieu à l'invention des *machines rotatives* (<sup>1</sup>).

(<sup>1</sup>) Indépendamment des machines rotatives que nous avons décrites ici, je mentionnerai encore les suivantes :

AUDEMAR. — BEALE DALGETY. Bataille et Julien. *Machines à vapeur*, t. I, p. 444. — BEAUCHAMP TOWER (Kennedy. *The mechanics of machinery*, p. 518. — Heenan. *Proceedings of Institution of mechanical Engineers*, 1885. — *La Lumière électrique*, 1884, p. 255. — *La Nature*, 28 juin 1884, p. 55. — *Revue industrielle*, 1<sup>er</sup> janvier 1885, p. 2. — *The Engineer*, 10 août 1885, p. 116). — BELT. *Scientific American*, 14 août 1886, p. 98. — BENNISON. *The Engineer*, 25 décembre 1885, p. 487. — BISHOP ET RENNIE. Disc-engine (Leduc. *Nouvelles machines marines*, t. I, p. 552. — Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction Richard, p. 531. — Armengaud. *Traité des moteurs à vapeur*, t. II, p. 169. — Armengaud. *Publication industrielle*, t. XVI, pl. 19. — Sonnet. *Dictionnaire de mathématiques appliquées*, p. 735). — BOMPARU. Armengaud. *Génie industriel*, t. XXXIV, p. 179. — BORNET. — BORYE. — BRACONNIER (Buchetti. *Machines à vapeur actuelles*, p. 157. — Armengaud. *Publication industrielle*, t. XXV, pl. 44). — BRAMAH. Laboulaye. *Cinématique*, p. 776. — BRIGHT MAC NEAL. *Chronique industrielle*, 11 mars 1888, p. 126. — BROSSARD. *Revue industrielle*, 7 juin 1881, p. 225. — CASSOT. Buchetti. *Machines à vapeur actuelles*, p. 158. — CLARK. *Engineering*, 28 mars 1890, p. 401. — COCHRANE (Reuleaux. *Cinématique*, p. 585. — *Propagation industrielle*, t. IV, p. 180). — DARE. *Scientific American*, 19 janvier 1889, p. 34. — DAVIES (Reuleaux. *Cinématique*, p. 585, 408. — *Propagation industrielle*, t. IV, p. 276). — DÉLANGER. *Chronique industrielle*, 7 mars 1886, p. 115. — DEBLON. — DECK. — DEXTER. *Engineering*, 7 avril 1882, p. 325. — DOLGONOUK. — DUCLOS. Reuleaux. *Cinématique*, p. 409. — DUDGON. — DUNCAN. Clark's *Table of mechanical motions*, n<sup>os</sup> 61 et 62. — DUNDONALD. Bataille et Julien. *Machines à vapeur*, t. I.

L'enceinte dans laquelle se produit le travail y présente encore la forme d'un cylindre de révolution. Mais les conditions du fonctionnement y sont totalement changées. Tandis qu'à l'ordinaire cette surface est engendrée par la translation d'un piston circulaire parallèlement à lui-même, elle l'est maintenant par la rotation d'un piston rectangulaire autour d'un de ses côtés (\*). Les avantages

p. 445. — EVE. — FEDELER. *Scientific American*, 9 août 1890, p. 82. — FLETCHER. Reuleaux. *Cinématique*, p. 590. — *La France* — GALLOWAY. — GALEY CAZALAT. ARMENGAUD. *Traité des moteurs à vapeur*, t. II, p. 168. — GEISS. *Propagation industrielle*, t. V, p. 152. — GOTTAGE. *Ibidem*, t. III, p. 246. — GRAFF. — GRAY (ARMENGAUD. *Traité des moteurs à vapeur*, t. II, p. 162. — *Schweizerische polytechnische Zeitschrift*, t. I, 1856, p. 140). — HALL. *Propagation industrielle*, t. IV, p. 340. — HALLY. THURSTON. *Histoire de la machine à vapeur*. Traduction de Hirsch, t. II, p. 143. — HARRINGTON. *Electrical Review*, 3 janvier 1885, p. 5. — HEENAN. — HICK LECHAT. *Génie industriel*, t. XXXII, p. 27. — HUDSON. *La Nature*, juillet 1882, p. 117. — HOLT et KINNEY. *Scientific American*, 4 octobre 1890, p. 210. — HUDSON. *Revue industrielle*, 1881, p. 60. — JENSEN. — KAULBACH. — KIEHL MEYER et GRANT. *The electrical World*, 12 avril 1890, p. 255. — KINGDON. *Scientific American Supplement*, 11 septembre 1886, p. 8906. — KNEBEL. — KUSTER. Reuleaux. *Cinématique*, p. 409. — LAKE. — LAMB. *Repertory of Patent Inventions*, 1845, p. 98. — LARIVIERE et BRAITHWAITE. Reuleaux. *Cinématique*, p. 409. — LEITCH. *The universal Engineer*, 19 juin 1886, p. 226. — MARTIN (Buchetti. *Les machines à vapeur actuelles*, p. 158. — Hirsch. *La mécanique à l'Exposition de 1878*, p. 268. — *La Lumière électrique*, 1884, p. 255). — MASSAY. — MENAY. — MINARY. *Mémoires de la Société d'émulation du Doubs*, 1889. — MOLARD (TRESCA. *Bulletin de la Société d'encouragement*, t. XIX, p. 49. — Reuleaux. *Cinématique*, p. 406. — Jury international de l'Exposition de 1868, t. IX, p. 82). — MONTRICHARD. Machine à piston captant (ARMENGAUD. *Publication industrielle*, t. XXXII. — *Portefeuille économique des machines*, janvier 1890). — MURDOCK. — MYERS. — NAPIER. Reuleaux. *Cinématique*, p. 576. — OLIVIER. *Les Mondes*, t. XXXVIII, p. 15. — ORTLIEB. *London Journal of arts*, 1857, t. VI, p. 9. — PÉROU. ARMENGAUD. *Traité des moteurs à vapeur*, t. II, p. 165. — PÉTAU. — PINCHBECK (*The Engineer*, 25 décembre 1885, p. 487. — *Scientific American Supplement*, 4 octobre 1884, p. 7296). — SERRIS BALIAN (TRESCA. *Annales du Conservatoire*, janvier 1865. — *Génie industriel*, t. XXIX, p. 203). — SHAFI. *Scientific American* 15 février 1886. — SIMPSON et SHIPTON. *London Journal of arts*, 1850, p. 207. — SMYTH. *Practical mechanical Journal*, t. XVII, p. 261. — SNEVELY. *Scientific American*, 12 mai 1888, p. 290. — STOCKER. *Bayerisches Industrie und Gewerbeblatt*, 1872, p. 167. — SEDLOW. — SWALWEL. — TAVERDON. Hirsch. *La mécanique à l'Exposition de 1878*, p. 267. — THOMAS JESUPREI. — THOMPSON. Machine différentielle (*Les Mondes*, t. XIV, p. 759. — ARMENGAUD. *Les progrès de l'industrie*, t. I, pl. 15). — UHLER. ARMENGAUD. *Traité des moteurs à vapeur*, t. II, p. 165. — VILANY. *Bulletin des arts et de l'industrie*, novembre 1884, p. 972. — WATT. *Inventions of Watt*. — WEST (Buchetti. *Les machines à vapeur actuelles*, p. 137. — *Engineering*, 9 juillet 1875, p. 28). — WHITLEY. Buchetti. *Les machines à vapeur actuelles*, p. 137. — WHITT. *Severin's Abhandlungen*, 1826, p. 62. — WOOD. Bataille et Julien. *Machines à vapeur*, t. I, p. 447. — WOODCOCK. Reuleaux. *Cinématique*, p. 396. — YULE (Bataille et Julien. *Machines à vapeur*, t. I, p. 449. — Reuleaux. *Cinématique*, p. 375. — *Berliner Verhandlungen*, 1839, p. 235. — *Génie industriel*, t. XXXV, p. 82).

(\*) M. de Polignac a proposé, sous le nom de *piston-pendule*, une machine qui reste

que l'on peut espérer de cette transformation sont nombreux et importants.

En premier lieu, le mécanisme se trouve tellement réduit qu'il s'est pour ainsi dire évanoui. Il ne subsiste plus que l'arbre tournant, et le piston lui-même, directement monté sur cet axe qui traverse les deux fonds du cylindre dans des colliers étanches. La tige, la bielle, la manivelle ont disparu.

On évite donc les effets refroidissants produits dans les conditions ordinaires par la sortie et la rentrée alternative de cette tige, ainsi que les condensations correspondantes.

On atténue les vibrations, bien plus accusées avec le mouvement de va-et-vient que pour une rotation continue.

On supprime les points morts, et les inconvénients qu'ils entraînent au point de vue du démarrage. En effet, le point mort résulte ordinairement de la superposition en ligne droite de la tige, de la bielle et de la manivelle, qui sont absentes toutes les trois de la nouvelle combinaison.

Le système est, de lui-même, complètement équilibré, lorsqu'il se trouve établi autour d'un axe vertical.

On obtient, pendant la pleine pression, une constance absolue du moment moteur; et sa valeur ne se modifie que par la détente et l'échappement, ce qui est inévitable dans n'importe quel système. Avec les machines ordinaires, au contraire, il s'adjoint aux variations de la force celles du bras de levier, qui croît à partir de zéro jusqu'à un maximum égal au rayon de la manivelle.

Les machines rotatives sont essentiellement à simple effet, et peuvent, à ce titre, prétendre aux avantages que nous avons reconnus à cette donnée (n° 837). Elles permettent, en raison de leur grande vitesse, de concentrer une grande puissance sous un faible volume.

comme celles des moteurs ordinaires, à mouvement alternatif, mais dont le piston est animé d'un déplacement circulaire autour d'un axe fixe. Il est difficile d'apercevoir les avantages de cette complication, avec laquelle on perd les qualités des machines rotatives, tout en introduisant dans le type habituel des difficultés spéciales d'exécution. (Armengaud. *Traité des moteurs à vapeur*, t. II, p. 398). — Une machine analogue est due à M. Deyraud (Reuleaux. *Cinématique*, p. 397. — *Berliner Verhandlungen*, 1872, p. 248).



**847** — Il est regrettable qu'un aussi remarquable programme ait été jusqu'ici à peu près frappé de stérilité par des défauts, en apparence accessoires, tels que l'action des parois, les fuites et les frottements. Ou bien les machines perdent, ou les frottements deviennent trop intenses, quand on veut, par le serrage, assurer l'étanchéité (1).

En réalité quelques rotatives ont eu leur moment d'engouement; mais on les a vues à peu près toutes disparaître successivement de la pratique. Il n'en est pas moins fort intéressant d'étudier ici ce sujet, qui reste à l'ordre du jour auprès de nombreux chercheurs, et qui a donné lieu à certaines combinaisons cinématiques extrêmement ingénieuses (2).

**848** — *Machine Pecqueur*. — L'une des plus simples parmi les machines rotatives, et l'une de celles qui ont eu le plus de succès, est le moteur Pecqueur (3). On pratique dans la paroi du cylindre deux logements diamétralement opposés (fig. 520). Des cloisons peuvent y rentrer, quand elles se trouvent refoulées par le passage du piston; mais des ressorts placés au fond de ces cavités les repoussent ensuite à l'extérieur. Il y en a donc toujours au moins une au contact de l'arbre, lors de l'arrivée du piston dans leur plan; et toutes les deux s'y appuient à la fois, en dehors de cet instant précis.

La capacité du cylindre se trouve d'après cela partagée par les cloisons en deux hémicycles. L'un de ces derniers est à son tour divisé par le piston en deux compartiments: deux conduits pénètrent suivant l'axe de rotation, et se coudent pour déboucher en *a* et *b*. L'un d'eux établit la relation avec la chaudière, l'autre avec

(1) On en a eu parfois des exemples frappants. A l'Exposition de Philadelphie, quelques expériences effectuées sur diverses rotatives ont montré que la meilleure d'entre elles consommait 45 kilogrammes de vapeur par cheval-heure, et la plus mauvaise 180. On peut assurément en appeler de pareils chiffres, en faveur de certains types; mais aucun cependant n'a encore réussi à conquérir une place durable dans l'industrie.

(2) M. Reuleaux, dans sa *Cinématique* (Traduction Debize, chez Savy, 1877), a donné une classification de ces mécanismes, dont il a décrit un grand nombre d'exemples.

(3) Armengaud. *Traité des moteurs à vapeur*, t. II, p. 158. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, t. XXXIX.

l'échappement. L'une des chambres se trouve donc pleine de vapeur et la seconde vide. Dès lors la pression différentielle pousse le piston. Quand il approche du plan médiant, il refoule la cloison, et le conduit d'évacuation pénètre dans l'autre hémicycle, qui était resté jusque-là plein de vapeur. Le vide s'y produit au-devant du piston, et le conduit d'alimentation continue à y fournir le fluide à l'arrière de cet organe.

La détente s'obtient à l'aide d'une soupape qui coupe la vapeur

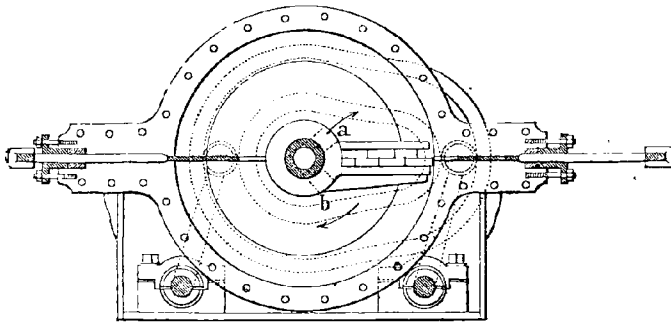


Fig. 520. — Machine rotative Pecqueur (coupe transversale).

avant son entrée dans le tourillon. On peut la faire varier en conduisant cette soupape à l'aide d'un manchon à bosses (n° 805). Le renversement de la marche est réalisé au moyen d'un commutateur, qui échange entre les deux conduits *a* et *b* les fonctions de l'admission et de l'échappement.

**849** — *Machine Behrens*. — Le moteur Behrens <sup>(1)</sup> est également un de ceux qui ont eu le plus de vogue. Il est destiné à faire marcher des pompes rotatives. Les deux appareils, hydraulique et à vapeur, sont montés sur les mêmes arbres, que l'on place bout à bout dans deux enceintes distinctes et presque contiguës. L'intervalle qui les sépare est occupé par un train de roues dentées égales entre elles, qui assurent aux deux axes des vitesses angulaires iden-

<sup>(1)</sup> Ledieu (*La machine Behrens et la stabilité des machines marines. — La machine rotative américaine Behrens, in-4°*).

tiques et de sens contraires. La figure 521 représente une coupe transversale de la machine motrice pour une première position des roues à vapeur, et les figures simplifiées 522 à 525 nous les montrent dans quatre phases subséquentes de la même demi-révolution.

L'enceinte en question se compose de deux cylindres mordant l'un sur l'autre, mais réduits, comme espace engendré par le mouvement des pistons, à des couronnes circulaires, en raison de la présence de noyaux intérieurs. Ceux-ci sont eux-mêmes échan-crés en forme de *plat à barbe*, pour permettre les mouvements respectifs. Des conduits fixes A et B établissent la communication avec la chaudière et avec le condenseur, suivant le sens marqué par les flèches.

Les deux roues s'évitent mutuellement dans leurs rotations opposées. A chaque instant, l'une d'elles est motrice, subissant sur une de ses faces la tension du générateur, et sur l'autre celle de l'échappement. Pendant ce temps la seconde est équilibrée, ayant ses deux faces à la même pression : soit celle de la chaudière, soit celle du condenseur. Mais les rôles s'échangent alternativement, d'une demi-révolution à la suivante. La communication établie par les roues dentées transmet d'ailleurs d'une manière incessante l'effort moteur. Aussi ce changement périodique de fonctions exige-t-il dans les engrenages une grande précision, pour éviter les à-coups.

**850** — Sur la figure 521, la roue  $M_1N_1$  est motrice, subissant en  $M_1$  la pression de la chaudière, et en  $N_1$  celle de l'échappement;  $P_1Q_1$  est équilibrée par la libre communication de ses deux faces avec le générateur.

Le piston  $M_2N_2$  (fig. 522) continue à être moteur, et  $P_2Q_2$  à être équilibré, avec cette différence toutefois que, depuis que P a dépassé l'angle de A, la communication n'existe plus avec le générateur, mais la vapeur confinée entre  $P_2$  et  $Q_2$  continue à exercer des efforts égaux entre eux.

Sur la figure 525,  $M_3N_3$  est toujours moteur et  $P_3Q_3$  équilibré, mais dans des conditions encore différentes. Depuis que Q a dépassé l'angle de B, l'échappement s'est produit, et c'est la

tension du condenseur qui s'exerce également sur  $P_3$  et sur  $Q_3$ .

La roue  $M_1N_1$  (fig. 524) continue à être motrice, par la libre communication de  $M_1$  avec la chaudière, et l'emprisonnement, sur la face  $N_1$ , d'une atmosphère raréfiée à la pression du condenseur, depuis que  $N$  a dépassé l'angle de l'échancrure du noyau central inférieur.

Sur la figure 525, les rôles sont dorénavant intervertis. L'organe  $P_3Q_3$  est devenu moteur, depuis que  $Q$  a échappé l'angle de l'échan-

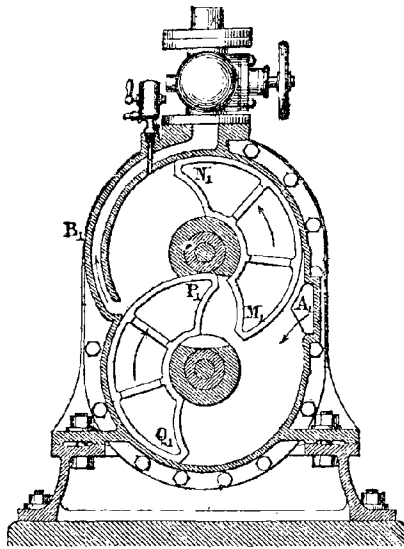


Fig. 521. — Machine rotative Behrens (coupe transversale).

crure du noyau central supérieur. Cette face subit maintenant en effet la pression du générateur, tandis que  $P_3$  continue à être en relation avec le condenseur. Au contraire  $M_3N_3$  est maintenant équilibré, depuis le même instant qui a mis ses deux faces en communication l'une avec l'autre.

A partir de ce moment, une phase identique à la précédente se développe, sauf cette interversion, durant la seconde demi-révolution, jusqu'à ce que les deux roues reprennent respectivement, pendant le tour suivant, les mêmes fonctions.

**851** — *Machine Fielding et Platt.* — La rotative de Fielding <sup>(1)</sup> fonctionne dans le système compound. Sa distribution se fait à l'aide de robinets. Elle est fondée sur le principe du *joint univer-*

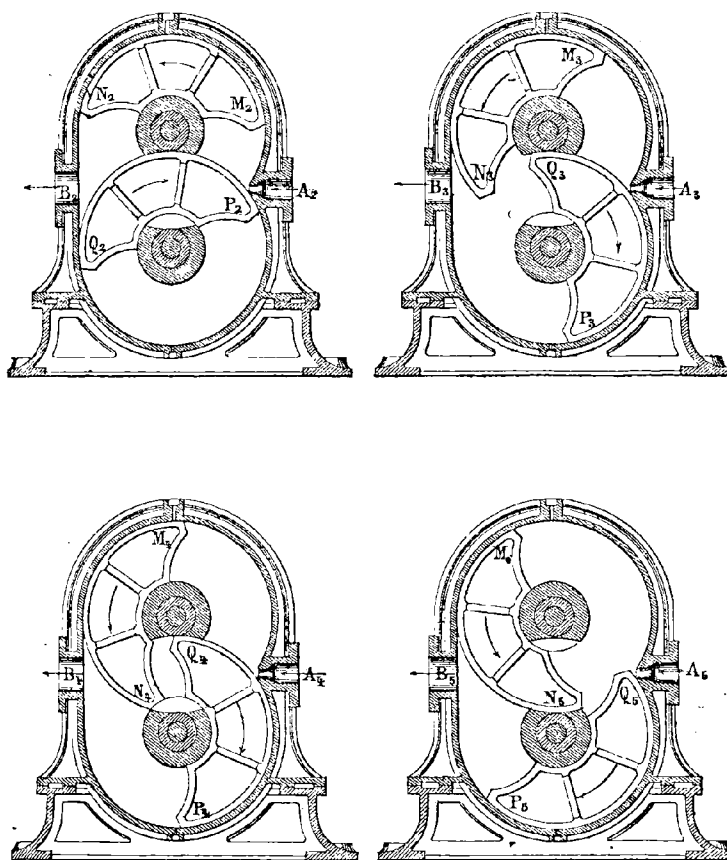


Fig. 522 à 525. — Machine rotative Behrens (coupes transversales).

*sel* <sup>(2)</sup>. Le croisillon de ce joint (fig. 526) est formé par l'ensemble de quatre pistons, et ses bras par leurs cylindres circulaires. Les

<sup>(1)</sup> Richard. *La Lumière électrique*, 25 juillet 1885, p. 166. — Kennedy. *The mechanics of Machinery*, p. 518. — *Engineering*, juillet 1885. — *The Engineer*, janvier 1885.

<sup>(2)</sup> Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 205.

deux arbres comprennent un angle de 157 degrés, ce qui entraîne

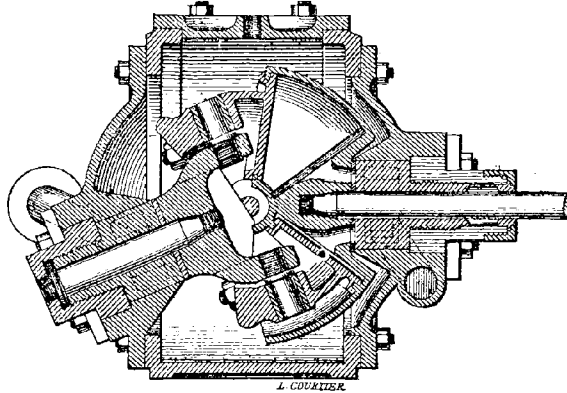


Fig. 526. — Machine rotative Fielding et Platt (coupe).

pour la transmission une irrégularité d'environ 13 %. Tous les organes sont enveloppés dans une chambre cylindrique.

## § 5

### TURBINES A VAPEUR

**852** — *Généralités.* — Au milieu des transformations radicales à travers lesquelles nous venons de suivre la machine à vapeur, nous avons vu s'évanouir successivement la bielle, la tige et la manivelle. Le piston subsistait seul. Dans les *turbines à vapeur* il disparaît à son tour <sup>(1)</sup>. Bien entendu il n'en faut pas moins, pour

(1) D'autres tentatives ont été faites à diverses époques pour la suppression du piston, mais aucune n'est devenue industrielle. On peut citer notamment les suivantes :

BRANCA. Roue à choc (Delaunay. *Cours élémentaire de mécanique*, 1851, p. 615).

BOURDON. Machine à tube manométrique flexible (Haton de la Goupillière. *Annales des mines*, juillet-août 1879, p. 163).

REGGE. Pendule à vapeur d'alcool (*Bulletin de la Société d'encouragement*, 3<sup>e</sup> série, t. V, p. 407).

HALL. Pulsomètre (Haton de la Goupillière. *Cours d'exploitation des mines*, t. II, p. 326). — Cet engin, dans lequel aucun piston solide ne reçoit l'action de l

recueillir le travail, qu'il subsiste dans le système quelque surface mobile contre laquelle la vapeur vienne exercer son action. Mais c'est actuellement l'enceinte elle-même qui vient jouer ici ce rôle. Elle est autant cylindre que piston; ou, pour mieux dire, il n'y a plus ici ni l'un ni l'autre, et le fonctionnement de l'ancien *moteur à pression* se trouve définitivement dénaturé. Il a cédé la place à la *machine à réaction*. C'est la même différence que celle qui sépare, dans le domaine de l'hydraulique, la machine à colonne d'eau <sup>(1)</sup> de la turbine <sup>(2)</sup>.

Il a suffi pour cela de revenir à deux mille ans en arrière, et de remonter à la première tentative que l'histoire ait enregistrée pour l'utilisation de la force de la vapeur. Je veux parler de l'éolypile de Héron d'Alexandrie <sup>(3)</sup>, dont l'invention est restée sans imitateurs pendant ce long intervalle, et à juste titre, car il fallait, pour la rendre industrielle, tout à la fois la perfection de l'outillage actuel et le besoin des énormes vitesses destinées à la commande directe des dynamos.

Nous avons vu en effet <sup>(4)</sup> que des pressions notables produisent pour la vapeur des vitesses d'écoulement gigantesques; et d'un autre côté <sup>(5)</sup> que, pour utiliser convenablement la force vive du fluide qui circule dans une turbine, il faut communiquer à celle-ci des vitesses du même ordre. Cette propriété des turbines à vapeur constitue pour la pratique leur véritable raison d'être <sup>(6)</sup>.

vapeur, rend de bons services, bien qu'il soit peu économique, mais uniquement pour un objet spécial : l'élévation de l'eau.

<sup>(1)</sup> Voy. t. I, p. 314.

<sup>(2)</sup> Voy. t. I, p. 280.

<sup>(3)</sup> Héron d'Alexandrie. *Les Pneumatiques*. Traduction de A. de Rochas. *Bulletin de la Société de statistique, des sciences naturelles et des arts industriels de l'Isère*, 5<sup>e</sup> série, t. XI, 1882. — Ilaton de la Goupillière (*Bulletin des sociétés savantes*, t. IV, p. 158. — *Revue des cours scientifiques*, 27 juin 1866, p. 144). — Thurston. *Histoire de la machine à vapeur*. Traduction de Hirsch, t. I, p. 4.

<sup>(4)</sup> Voy. t. I, p. 805.

<sup>(5)</sup> Voy. t. I, p. 305, équation 406. Cette formule ne peut d'ailleurs être prise ici que comme un simple aperçu. La théorie des turbines hydrauliques ne saurait en effet convenir au cas de la vapeur, en raison de la dilatation que subit cette dernière, par opposition à l'incompressibilité de l'eau.

<sup>(6)</sup> Indépendamment des turbines à vapeur que nous avons décrites ici, je mentionnerai encore les suivantes : ALLAIRE et GAUTHIER. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, octobre 1890. — AVERSENG. *Journal*

Le mouvement continu de ces appareils présente en outre l'avantage de ne donner aucune prise aux condensations si nuisibles, qui sont dues essentiellement au mouvement alternatif des moteurs ordinaires (n° 589). On réalise également la constance absolue du moment moteur; l'action exercée toujours dans le même sens; la suppression de l'espace nuisible; et celle du laminage, les passages restant perpétuellement ouverts en grand.

On peut reprocher à ce système la délicatesse des organes; l'énormité des forces centrifuges, qui croissent plus rapidement avec la vitesse qu'avec le rayon; des consommations élevées; enfin la difficulté d'appliquer à leur fonctionnement l'emploi du condenseur. Les grandes vitesses du fluide déterminent contre les parois des frottements intenses; toutefois l'énergie disparue se transforme, au moins en partie, en calorique, qui tend à contrebalancer le refroidissement par l'air extérieur.

**853** — *Turbine Dumoulin*. — La turbine Dumoulin <sup>(1)</sup> est formée d'une enveloppe calée sur l'arbre mobile (fig. 527), et divisée en quatre secteurs par les conduits d'admission et d'échappement. Dans chacun d'eux, la vapeur passe successivement du disque fixe à la couronne de l'enveloppe mobile, pour revenir de celle-ci au disque par de nouveaux passages. Elle parvient à l'échappement après avoir épuisé son action en huit impulsions successives sur les aubes de la couronne, et s'y être détendue presque jusqu'à la pression atmosphérique.

**854** — *Turbo-moteur Parsons*. — L'attention est surtout fixée en ce moment sur la turbine à vapeur de Parsons <sup>(2)</sup>, que construisent les ateliers Weyher et Richmond (fig. 528).

*des Mines*, 1878, p. 261. — BURDIN. — GIRARD. — WILLIAM GORMAN. Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction Richard, p. 565. — INVRAY. *La Lumière électrique*, 1<sup>er</sup> juillet 1885. — LAST. — RUTWEEN. — TOURNAIRE (*Dictionnaire des arts et manufactures*, 1877. — RATEAU. *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1890, p. 50).

<sup>(1)</sup> Gustave Richard. *La Lumière électrique*, 6 janvier 1885, p. 27; 3 avril 1886, p. 15.

<sup>(2)</sup> Sauvage. *Annales des mines*, 8<sup>e</sup> série, t. XVII, p. 550. — Limousin. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 10 janvier 1890. — RATEAU. *Compte rendu mensuel des*



Cette machine est au fond à expansions successives très multi-

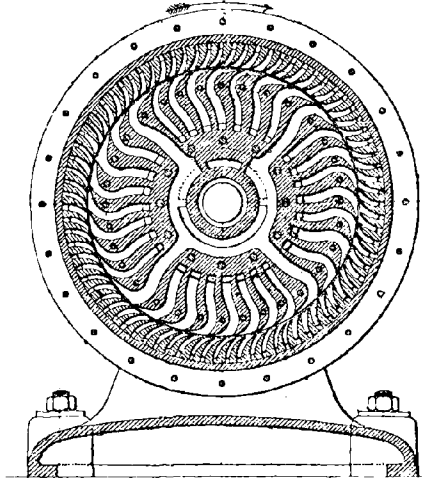


Fig. 527. — Turbine à vapeur Dumoulin (coupe).

pliées, car la vapeur y traverse des capacités de plus en plus

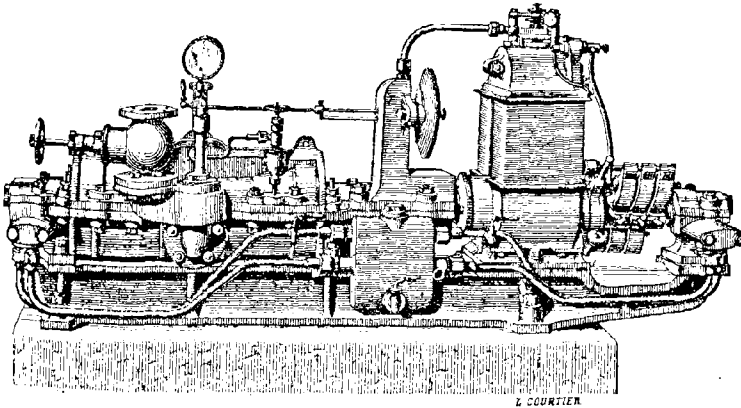


Fig. 528. — Turbo-moteur Parsons (vue perspective).

grandes, de manière à y accomplir sa détente. Le moteur et la dy-

*séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne, 1890, p. 29, 75. — G. Richard. La Lumière électrique, 12 août 1884; 25 avril, 2 mai, juin 1885; 19 juin*

namo qu'il conduit reposent sur le même bâti. L'appareil consiste en une centaine de disques fixes et autant de couronnes mobiles intercalées, formés chacun d'aubes ou de contre-aubes, et parcourus de proche en proche par le fluide. Celui-ci est lancé par les contre-aubes fixes sur les aubes mobiles, après quoi il rentre dans une nouvelle couronne directrice. Cette série de disques est montée sur l'arbre moteur à l'intérieur d'un long cylindre horizontal.

On a soin de diviser dès l'origine le courant de vapeur en deux ramifications distinctes, qui agissent respectivement sur des tur-

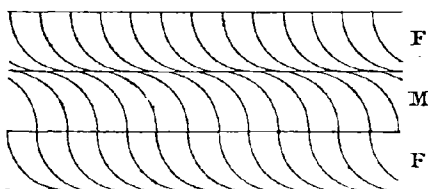


Fig. 529. — Turbo-moteur (figure schématique).

bines disposées dans des sens inverses (fig. 529). De cette manière, on équilibre les efforts sur l'arbre, en le laissant libre sous l'action de son poids, qui seul contribue à déterminer la valeur du frottement.

En sortant par de larges conduits de chaque couple de disques, après l'échange d'énergie dû au principe des roues à réaction, la vapeur se trouve à peu près dépouillée de sa vitesse, en raison de la décroissance très graduée de la pression à travers ces cent couples. Elle reprend un élan nouveau en passant par des buses étroites, pour agir sur la roue suivante. Toutefois ces alternatives se succèdent avec la plus grande rapidité. Un cinquantième de seconde suffit au fluide pour traverser l'appareil dans toute sa longueur. L'allure est couramment de 10 000 tours par minute. On l'a poussée parfois à 20 000, et l'on a cité des essais de 50 000 (1) révolutions.

Pour réaliser de telles vitesses, il était évidemment nécessaire d'apporter des soins minutieux au centrage des pièces, et de les

1886; 9 mars 1889; 17 janvier 1891. — Hirsch. *La mécanique générale à l'Exposition de 1889*. Conférence, p. 454. — *Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 54. — *Bulletin de la Société internationale des électriciens*, décembre 1888. — Loukine. *La Lumière électrique*, t. XXXVI, p. 524, 576. — *Électricité russe*, 1890, n<sup>o</sup> 7. — *Institution of mechanical Engineers*, octobre 1888. — *Engineering*, 1<sup>er</sup> mai 1885, p. 449; 1888, t. II, p. 478. — *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, 1889, p. 606.

(1) On les mesure d'après la tonalité du son émis, ou à l'aide du compteur Deschiens.

équilibrer exactement afin d'éviter des battements destructeurs. La construction des coussinets a exigé des artifices spéciaux (fig. 530). L'arbre tourne dans une douille en bronze doux, qui n'est liée au bâti d'une manière invariable que sur une très faible longueur, à savoir l'épaisseur d'une première bague en acier. D'autres bagues se succèdent, au nombre de 28, sur 1,0 à 1,5 millimètres d'épaisseur. Un ressort en comprime l'ensemble, et permet plus ou moins d'élasticité. Ce coussinet sert d'intermédiaire entre l'arbre et la douille en bronze adhérente au bâti. Les frottements de ces bagues entre elles servent à éteindre les chocs et les vibrations. Ils sont

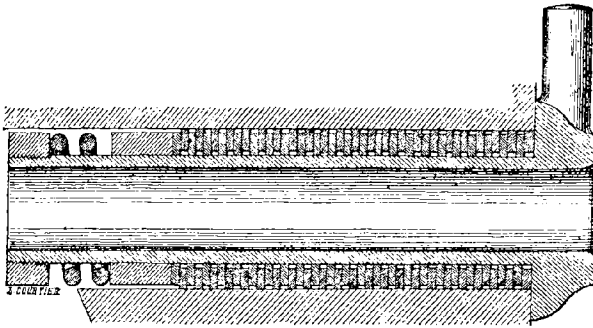


Fig. 530. — Palier du turbo-moteur (coupe longitudinale).

adoucis par la présence d'un bain d'huile permanent, qui est incessamment renouvelé sous l'influence d'une petite vis d'Archimède. La consommation du lubrifiant dans ces conditions n'est que le tiers de celle d'une machine ordinaire. Un régulateur analogue à celui de Larivière (n° 897) sert à garantir contre les affollements de l'allure.

Indépendamment de la réalisation des plus grandes vitesses connues, et des avantages généraux qui correspondent au principe des turbines (n° 852), on attend du turbo-moteur Parsons une puissance élevée sous un faible volume ; beaucoup de légèreté <sup>(1)</sup> ; la diminution du frottement, si ingénieusement équilibré ; la sup-

(1) Une turbine Weyher et sa dynamo, suffisante pour 350 lampes de 16 bougies, tiennent dans un parallélépipède de 3<sup>m</sup>,20 sur 0<sup>m</sup>,45 et 0<sup>m</sup>,90. Elle pèse 900 kilogrammes.

pression du danger, tous les organes étant enfermés et mis dans l'impossibilité de saisir un ouvrier. La consommation a pu déjà être abaissée de 30 à 15 kilogrammes de vapeur par cheval-heure.

**855** — *Turbine Dow*. — Une nouvelle turbine a été présentée par M. Dow <sup>(1)</sup>. Ce constructeur adopte le type centrifuge, substitué au principe parallèle <sup>(2)</sup>. Il attend de ce dispositif plus d'efficacité. Il annonce une vitesse de 2 000 tours, ou d'environ 150 mètres par seconde à la circonférence.

**856** — *Moteur-bouteille Siemens*. — A côté de la brillante réalisation industrielle que présente la turbine Parsons, nous donnerons ici un souvenir à une conception originale qui avait été présentée par Siemens à l'Exposition universelle de Vienne, beaucoup moins sans doute en vue de l'exploitation effective de ce moteur, que pour fixer l'attention sur des vues fort justes relatives à l'adiabaticité. Cette *machine-bouteille* <sup>(3)</sup>, ainsi nommée à cause de sa forme extérieure, constitue au fond une turbine à vapeur, dont la trajectoire est continue au lieu d'être morcelée, et gauche au lieu d'être plane.

L'auteur s'était attaché essentiellement à réaliser, sur tout le trajet qu'accomplit la vapeur à travers la machine, un équilibre de température aussi parfait que possible entre elle et la paroi; afin de réagir contre les pertes considérables qui sont dues, dans les moteurs ordinaires, aux effets de contact. Il en avait cherché naturellement la solution dans la substitution du régime permanent à l'allure alternative qui caractérise les moteurs à piston, et même les machines rotatives.

En outre, il supprimait les pertes de chaleur emportées au

<sup>(1)</sup> Sauvage. *Annales des mines*, 8<sup>e</sup> série, t. XVII, p. 552. — Bateau. *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1890, p. 74. — *The Engineer*, 14 mars 1890. — *Rail Road Gazette*, 24 juin 1890.

<sup>(2)</sup> Voy. t. I, p. 280. — Tout récemment M. Parsons a établi son appareil dans le type centripète.

<sup>(3)</sup> *Revue industrielle*, 4 février 1874, p. 9. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXXV, p. 1.

dehors par l'eau que l'on rejette après son fonctionnement; et, pour cela, il enfermait ce liquide une fois pour toutes dans l'appareil, à l'intérieur duquel une provision, toujours la même, accomplissait indéfiniment un cycle fermé. On introduit cette eau par un orifice. On la porte à l'ébullition pour chasser l'air, on bouche l'ouverture, et le liquide se trouve dès lors confiné dans l'appareil pour y exécuter son évolution.

Le moteur se compose d'une enveloppe en tôle A (fig. 551), inclinée à l'horizon, et susceptible de tourner sur un axe B qui lui est assemblé à ses deux extrémités, mais sans se prolonger dans l'intérieur. Cet espace est occupé par un organe hélicoïdal C, dont le

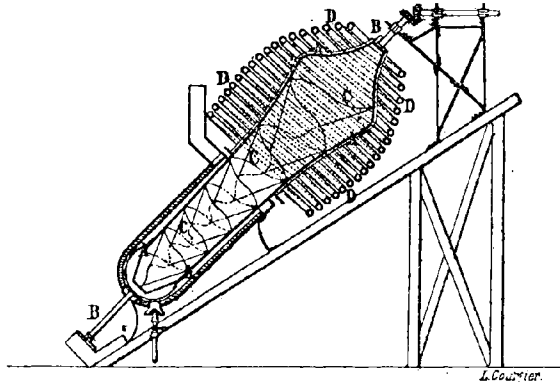


Fig. 551. — Moteur-bouteille Siemens (figure schématique).

pas est croissant du bas vers le haut. Le noyau axial est vide, et d'un diamètre qui croît proportionnellement à celui de la bouteille, dont il forme environ le quart. A la partie supérieure, cet hélicoïde communique avec un serpentin D, destiné à présenter une grande surface de contact avec l'air extérieur.

L'eau se rassemble par son poids à la base de ce système, qui est préservé par une enveloppe réfractaire, et soumis à l'action d'un foyer. La vapeur se forme, s'élève en agissant sur l'hélicoïde, dont elle détermine la rotation, et en subissant progressivement une détente prononcée, d'après l'amplification du volume des spires. Elle s'engage dans le serpentin, s'y condense, et reprend la forme

d'eau liquide, laquelle, remontée par la rotation jusqu'au goulot d'après le sens des spires, redescend de là au pied de la bouteille. En raison de la continuité, le système tend vers un état stable de températures, aussi rapproché que possible de l'accord cherché entre celles du fluide et de la paroi.

## CHAPITRE L

### RÉGULATEURS A FORCE CENTRIFUGE

—

#### § 1

#### PENDULE CONIQUE

**857** — Watt a eu, le premier, l'idée d'adapter à la machine à vapeur un *gouverneur*. Il désignait sous ce nom, auquel l'usage a substitué celui de *régulateur* ou de *modérateur*, un appareil très ingénieux destiné à régler à chaque instant la dépense de puissance motrice d'après la variation que peut éprouver la résistance. Sans cela, en effet, la déséquilibration de ces deux influences provoquerait des accélérations ou des ralentissements, nuisibles à la bonne exécution de la besogne industrielle que l'on a en vue.

Un appareil de cette nature comprend d'abord un *organe directement sensible* aux variations de la marche, et capable de se déformer sous leur influence; en second lieu, une *connexion* destinée à manœuvrer, comme conséquence de cette déformation, les éléments de la distribution. Nous reviendrons ultérieurement sur cette seconde partie (n° 912), en nous attachant tout d'abord à l'appareil déformable.

**858** — Le point de départ de ces recherches se trouve dans le *pendule conique* de Watt (fig. 552). Ce système comprend deux boules (\*) B, B' (fig. 553), emmanchées à l'extrémité des

(\*) Auxquelles on donne parfois la forme lenticulaire, pour diminuer la résistance de l'air.

tiges  $OB$ ,  $OB'$  qui sont articulées à un point  $O$  de l'axe de rotation, et susceptibles de s'en écarter plus ou moins sous un angle  $\alpha$ . Les tringles  $MA$ ,  $MA'$  relient ces tiges au manchon  $M$ , dont les déplacements le long de l'axe  $OM$  sont utilisés pour la réglementation de la distribution <sup>(1)</sup>.

L'appareil étant symétrique, il nous suffit d'en envisager ici la moitié. Nous commencerons, pour plus de simplicité, par réduire la boule  $B$  à un simple point matériel, en négligeant, d'autre part, la masse de toutes les autres pièces. Si nous rapportons le

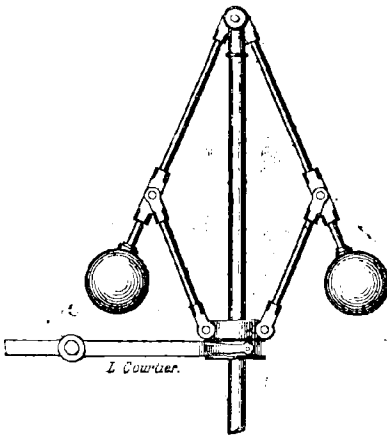


Fig. 532. — Gouverneur de Watt (élévation).

mobile à un système de comparaison tournant uniformément avec la même vitesse angulaire  $\omega$ , nous devons le considérer comme en repos relatif, et exprimer pour cela l'équilibre entre les forces réelles et la force centrifuge. Les premières comprennent le poids  $mg$  de la boule; une certaine réaction  $N$  exercée par la tige suivant sa propre longueur, qui est normale au cercle d'écartement; et enfin une force  $F$ , que l'on peut tou-

jours supposer tangentielle à ce cercle, et à laquelle on attribuera précisément l'intensité nécessaire pour maintenir le système à sa forme actuelle. Cette force sera nulle dans les positions d'équilibre spontané, et prendra, pour un écartement quelconque  $\alpha$ , une valeur variable avec cet angle. Quant à la force centrifuge, elle est égale à  $m\omega^2 l \sin \alpha$ , puisque  $l \sin \alpha$  mesure le rayon de rotation.

Le système étant à liaison complète, une seule relation est nécessaire et suffisante pour son équilibre. C'est celle qui annule l'ensemble des travaux virtuels relatifs au seul déplacement com-

<sup>(1)</sup> On doit recommander de placer la zone de rotation des boules hors de la portée du public qui peut fréquenter l'atelier, ou de l'environner d'un grillage de protection.



patible avec les liaisons, à savoir le mouvement d'écartement. Comme d'ailleurs nous n'attribuons de masse qu'à l'unique point B, cette condition se réduit à l'équation de projection, sur la tangente au cercle, des forces qui le sollicitent.

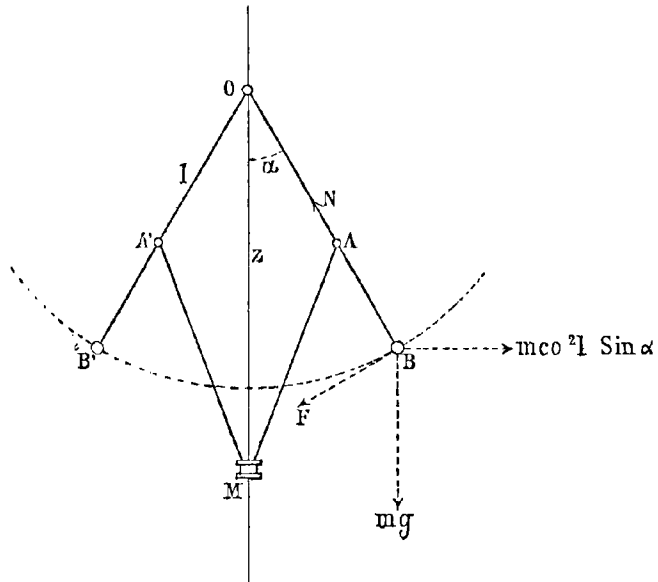


Fig. 355

Il vient par là :

$$F + mg \sin \alpha - m\omega^2 l \sin \alpha \cdot \cos \alpha = 0,$$

et l'on en déduit :

$$(1) \quad F = m \sin \alpha (\omega^2 l \cos \alpha - g).$$

**859** — La position d'équilibre spontané correspond à l'hypothèse  $F = 0$ . Nous voyons que ce résultat peut s'obtenir de deux manières différentes, selon que l'on pose l'une ou l'autre des deux conditions suivantes :

$$\sin \alpha = 0, \quad \omega^2 l \cos \alpha - g = 0.$$

On déduit de là ces trois solutions :

$$(2) \quad \cos \alpha_1 = \frac{g}{\omega^2 l}, \quad \alpha_2 = 0, \quad \alpha_3 = \pi.$$

Cette dernière ne saurait être prise en considération, puisque le système articulé ne permet pas le renversement qui serait nécessaire pour atteindre cette position culminante. Les deux autres peuvent se rencontrer, mais dans des conditions bien distinctes qu'il faut analyser attentivement.

La position  $\alpha_1$  est *stable*; c'est-à-dire que si le système subit à partir de là un dérangement suffisamment petit, il tend à rentrer dans cette situation. Imaginons en effet que l'on veuille maintenir la boule sous un angle  $\alpha$  légèrement supérieur à  $\alpha_1$ , on aura identiquement :

$$\cos \alpha < \cos \alpha_1 < \frac{g}{\omega^2 l},$$

d'où :

$$\omega^2 l \cos \alpha - g < 0.$$

La valeur (1) de la force  $F$  capable de conserver l'écart supplémentaire  $\alpha - \alpha_1$  sera donc négative, c'est-à-dire dirigée vers le haut; preuve manifeste que si l'on abandonne la boule à elle-même, elle reviendra vers le bas, en se rapprochant de la position  $B_1$ . On reconnaîtrait de la même manière que si l'on refoule la boule au-dessous de  $B_1$ , elle aura d'elle-même tendance à remonter vers ce point.

Cette situation stable n'existe pas toujours. Il faut en effet, pour la réalité de l'angle  $\alpha_1$ , que l'on ait :

$$(3) \quad \cos \alpha_1 < 1, \quad \omega > \sqrt{\frac{g}{l}}.$$

Si la vitesse angulaire décroît progressivement en tendant vers cette limite,  $\alpha_1$  s'abaisse peu à peu jusqu'à zéro, et la boule retombe sur l'axe. Au-dessous, la valeur de  $\alpha_1$  cesse d'exister, mais  $\alpha_1$  prend alors sa place avec la valeur (2) qui est également nulle; et

le pendule reste inerte suivant la verticale, quelle que soit alors la valeur de la vitesse angulaire.

Cette situation est devenue stable dans ces conditions. Si en effet on écarte la boule sous un petit angle  $\alpha$ , l'hypothèse :

$$\omega < \sqrt{\frac{g}{l}},$$

donne :

$$\omega^2 l < g,$$

et *a fortiori* :

$$\begin{aligned} \omega^2 l \cos \alpha &< g, \\ \omega^2 l \cos \alpha - g &< 0, \\ F &< 0; \end{aligned}$$

ce qui indique, comme ci-dessus, une tendance de la boule à redescendre vers le point le plus bas.

Mais cette stabilité n'appartient plus à la solution  $\alpha_3$ , lorsque la vitesse est supérieure à la limite (3). Il existe en effet dans ce cas une valeur  $\alpha_1$ , et nous avons reconnu qu'alors la tendance est ascendante pour tous les angles compris entre elle et zéro; ce qui tend à éloigner de plus en plus la boule de la situation verticale  $\alpha_1 = 0$ , pour le moindre dérangement.

Concluons donc qu'il existe toujours une position stable et une seule, laquelle reste verticale pour les vitesses inférieures à la limite (3), et s'en écarte ensuite progressivement suivant la formule (2). Il est bon de remarquer d'ailleurs que l'on reste maître de cette limite en disposant de la longueur  $l$  de la tige (\*).

(\*) Pour en donner une idée effective, appelons  $n$  le nombre de tours que le système décrit par minute autour de l'axe vertical. On aura :

$$\omega = \frac{2n\pi}{60},$$

et par suite :

$$l = \frac{900g}{n^2\pi^2}.$$

## § 2

## RÉGULATEUR A BOULES

**860** — L'analyse précédente ne constitue qu'une première approximation, dans laquelle nous avons supposé le pendule conique abandonné à lui-même, indépendamment de la réaction qu'oppose en réalité sur le manchon le mécanisme de distribution placé sous son influence. Il y a lieu maintenant d'envisager, dans les conditions de la pratique, le même système, que nous continuerons à réduire à l'une de ses moitiés, en raison de la symétrie (<sup>1</sup>).

Nous établirons encore la condition d'équilibre entre les forces réelles et les forces centrifuges des diverses parties, en égalant à zéro les sommes de leurs travaux virtuels, évalués par rapport au mouvement d'écartement qui seul est compatible avec les liaisons.

En ce qui concerne la réduction de l'ensemble des forces centrifuges à leur plus simple expression, il est permis de supposer la masse de la lentille concentrée en son centre de figure. Pour le montrer, envisageons une tranche infinitésimale comprise entre deux plans horizontaux. A un élément matériel  $m$  correspond une force

c'est-à-dire :

$$l = \frac{894,45}{n^2}.$$

Si par exemple le système exécute un tour par seconde, ce qui suppose  $n = 60$ , il vient  $l = 0^m,2484$  ou environ  $0^m,25$ ; longueur très acceptable.

On a d'ailleurs, pour les allures trop lentes de la machine, la ressource de multiplier la vitesse de l'arbre moteur, à l'aide du train de roues d'angle qui est chargé de la transmettre à l'axe vertical du modérateur.

(<sup>1</sup>) Poncelet. *Cours autographié de l'École de Metz*, 1826, section 2, p. 13. — Dwelshauvers-Dery (*Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, t. LIX, p. 42. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1872, p. 211. — *Musée de l'industrie*, 1869). — Tresca. *Feuilles autographiées du Cours de l'École centrale*, 1869, p. 398. — Résal. *Traité de mécanique générale*, t. III, p. 194. — Buchetti. *Les machines à vapeur actuelles*, p. 219. — Farey. *Histoire de la machine à vapeur*, p. 465. — Mahistre. *Cours de mécanique appliquée*, p. 178. — Sinigaglia. *Traité des machines à vapeur*. Traduction de Billy, p. 224.

centrifuge  $m\omega^2 r$ , que l'on peut considérer comme appliquée au point où le rayon  $r$  rencontre l'axe de rotation, en l'y décomposant en deux autres suivant deux axes rectangulaires. Ces dernières seront  $m\omega^2 x$  et  $m\omega^2 y$ . On pourra par suite, pour tout l'ensemble de la tranche, les réunir en deux sommes, qui seront respectivement  $\omega^2 \Sigma mx$  et  $\omega^2 \Sigma my$ , c'est-à-dire  $\omega^2 MX$  et  $\omega^2 MY$ , si X et Y désignent les coordonnées du centre de gravité de la tranche.

Le résultat est donc le même que si l'on condensait par la pensée les masses de ces diverses tranches en leurs centres respectifs, tous situés évidemment sur une parallèle à l'axe de rotation. Si l'on opère ainsi, les forces centrifuges des divers produits de ces condensations se trouveront toutes comprises dans le même plan méridien, parallèles entre elles et proportionnelles aux masses; réductibles par suite à une seule appliquée en leur centre de gravité, qui n'est autre que celui de la lentille. La résultante finale aura donc pour valeur :

$$(4) \quad M\omega^2 l \sin \alpha.$$

**861** — Quant à la tige OB, nous ferons abstraction de la petite moulure qui accompagne son insertion dans la boule, et, comme compensation, nous prolongerons par la pensée la tige jusqu'au centre de cette dernière. Les forces centrifuges des divers éléments de la masse  $m$  de cette droite sont proportionnelles aux distances de ces derniers à l'axe. Leurs valeurs respectives sont donc représentées par les zones successives du triangle rectangle qui a pour hypoténuse la tige  $l$ . Le résultat de la composition de ces forces sera par conséquent égal à la force centrifuge de l'aire totale, représentée par la moitié de cette hypoténuse :

$$\frac{1}{2} m\omega^2 l \sin \alpha.$$

En outre, cette force passera par le centre de gravité de ce triangle, c'est-à-dire au tiers de la longueur de la tige à partir du centre de la lentille.

Cette résultante peut être à son tour décomposée d'après la règle des forces parallèles en deux autres appliquées l'une en O, l'autre en B. La première n'aura pas à figurer dans l'équation des travaux virtuels, puisqu'elle agit sur un point fixe. La seconde sera égale aux  $\frac{2}{5}$  de la résultante, c'est-à-dire à :

$$(5) \quad \frac{1}{5} m \omega^2 l \sin \alpha.$$

En raisonnant de la même manière pour la tige MA, de masse  $\mu$ , l'on réduira finalement l'ensemble de ses forces centrifuges (sauf une composante agissant sur le point fixe M) à une force appliquée en A, et égale à :

$$\frac{1}{5} \mu \omega^2 l' \sin \alpha,$$

si  $l'$  désigne la portion OA de la longueur  $l$ . Cet effort se décompose à son tour en une force appliquée au point fixe O, et une seconde en B, ayant pour valeur :

$$(6) \quad \frac{1}{5} \mu \omega^2 \frac{l'^2}{l} \sin \alpha.$$

En résumé donc, si l'on écarte les composantes qui n'ont pas de travail virtuel comme agissant sur des points invariables, l'ensemble des forces centrifuges peut être remplacé par une résultante unique  $f$ , qui serait appliquée horizontalement en B, et qui réunirait dans son intensité les trois composantes (4), (5), (6) que nous venons d'évaluer successivement :

$$(7) \quad f = \frac{1}{5} \omega^2 l \sin \alpha \left( 3M + m + \mu \frac{l'^2}{l^2} \right).$$

**862** — En ce qui concerne en second lieu les forces réelles, nous rencontrons d'abord le poids  $Mg$  de la boule, qui est appliqué en B.

En second lieu, celui  $mg$  de la tige. Il agit sur son milieu ; et

nous le décomposerons en deux forces égales chacune à sa moitié  $\frac{1}{2}mg$ , affectées, la première au point fixe O, la seconde à l'extrémité B.

Le poids  $\mu g$  de la tringle MA se remplace également par deux forces  $\frac{1}{2}\mu g$  sollicitant, l'une le manchon M, l'autre le point A.

Enfin cette dernière se décompose à son tour en une force appliquée au point fixe O, et une autre  $\frac{1}{2}\mu g \cdot \frac{v}{l}$  agissant en B.

En résumé l'action de la pesanteur peut être représentée au point de vue de son travail virtuel, par deux forces à savoir : un effort  $f_1$  appliqué à la boule B :

$$(8) \quad f_1 = \left( 2M + m + \mu \frac{v}{l} \right) \frac{g}{2},$$

et un autre  $f_2$  sur le manchon M :

$$(9) \quad f_2 = \frac{1}{2} (mg + p + \Phi),$$

si  $p$  désigne le propre poids de cet organe, qui atteint quelquefois une valeur très considérable, comme dans le régulateur Porter (<sup>1</sup>) (fig. 554), et  $\Phi$  la force extérieure qui lui résiste lorsqu'il attaque la distribution. La moitié seulement de ces deux dernières forces doit d'ailleurs entrer dans l'expression de  $f_2$ , qui est destinée à l'équation d'équilibre d'une des deux parties de l'appareil.

**863** — Il est maintenant facile de poser cette relation entre

(<sup>1</sup>) Tresca. *Études sur l'Exposition de 1862*. — Worms de Romilly. *Annales des mines*, 7<sup>e</sup> série, t. I, p. 50. — Spineux. *De la distribution de la vapeur dans les machines*, p. 252. — Dwelshauvers-Dery. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXXV, p. 54. — V. Lebeau. *Des régulateurs appliqués aux machines à vapeur*, Liège, 1890, p. 30. — *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1879, p. 457. — *Engineering*, 28 février 1879. — *The Engineer*, 25 octobre 1878, p. 299. — Sinigaglia. *Traité des machines à vapeur*. Traduction de Billy, p. 226.

les trois forces  $f$ ,  $f_1$ ,  $f_2$ . Appelons  $z$  la distance qui sépare le manchon de l'articulation supérieure. Pour un écartement virtuel  $dz$

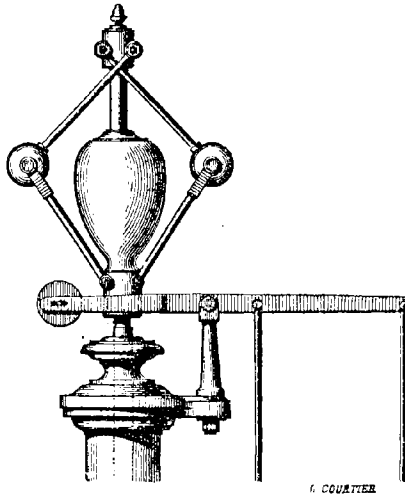


Fig. 554. — Régulateur Porter (élévation).

imprimé à la tige, cet organe s'élèvera le long de l'axe d'une quantité  $-dz$ . On a donc comme expression de la somme des travaux virtuels :

$$f l d\alpha \cos \alpha - f_1 l d\alpha \sin \alpha - f_2 dz = 0.$$

Pour en éliminer le rapport des vitesses virtuelles, nous emploierons l'égalité :

$$z = l \cos \alpha + \sqrt{\lambda^2 - l'^2 \sin^2 \alpha},$$

dans laquelle  $\lambda$  désigne la longueur de la tringle MA. Il vient en la différentiant :

$$-dz = \left( l' \sin \alpha + \frac{l'^2 \sin \alpha \cos \alpha}{\sqrt{\lambda^2 - l'^2 \sin^2 \alpha}} \right) d\alpha;$$

ce qui transforme ainsi l'équation précédente



$$fl \cos \alpha - f_1 l \sin \alpha - f_2 l' \sin \alpha \left( 1 + \frac{\cos \alpha}{\sqrt{\lambda^2 - l'^2 \sin^2 \alpha}} \right) = 0.$$

Lorsque nous y substituerons les valeurs (7), (8), (9), cette condition se décomposera en deux autres, car  $f$  renferme dans son expression (7) le facteur  $\sin \alpha$ , qui devient dès lors commun à tous les termes. Nous poserons donc d'une part :

$$\sin \alpha = 0,$$

et de l'autre :

$$(10) \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{5} \omega^2 l^2 \cos \alpha \left( 5M + m + \mu \frac{l^2}{l^2} \right) - \left( 2M + m + \mu \frac{l'}{l} \right) \frac{lg}{2} \\ - \frac{l'}{2} (mg + p + \Phi) \left( 1 + \frac{\cos \alpha}{\sqrt{\lambda^2 - l'^2 \sin^2 \alpha}} \right) = 0. \end{array} \right.$$

La première reproduit les solutions (2) :

$$\alpha_2 = 0, \quad \alpha_3 = \pi,$$

que nous avons déjà rencontrées pour l'équilibre spontané, et qui ne jouent plus d'ailleurs ici qu'un rôle purement théorique, puisque avec l'appareil réel tel que nous le considérons maintenant, le diamètre des boules et les autres épaisseurs empêchent les centres de parvenir jusqu'à l'axe de rotation.

**864** — La véritable solution de la question est donc fournie par la formule (10). Pour connaître la situation dans laquelle le système se tient de lui-même en équilibre, on y fera  $\Phi = 0$ , et l'on tirera la valeur correspondante de  $\cos \alpha$  d'une équation du quatrième degré.

On peut opérer inversement, en supposant directement évaluée d'après le dispositif du moteur, quand il sera spécifié dans chaque cas, la résistance  $\Phi$  qu'il est nécessaire de vaincre pour ébranler le mécanisme de distribution, de manière à y faire varier la détente. Son expression sera une fonction de l'écart  $\alpha$ , à partir duquel on

veut faire exécuter par le régulateur ce démarrage. L'équation (10 bis) ainsi transformée fournira immédiatement la valeur  $\omega'$  de la vitesse angulaire capable d'opérer cette mise en action.

Pour déterminer le mouvement inverse, une vitesse  $\omega''$  sera de même nécessaire. On la déduira de l'équation (10 ter), dans laquelle on aurait changé le signe de  $\Phi$ , et substitué de même l'expression de cette force.

Cela posé, si l'on admet qu'une vitesse  $\Omega$  placée en dehors des limites  $\omega'$ ,  $\omega''$  vienne à prendre subitement naissance, le système commencera à s'ébranler à partir de l'angle  $\alpha$  auquel elles se rapportent. La déformation se développera progressivement; et il y a lieu de se demander jusqu'où elle s'étendra. Pour connaître la nouvelle situation qui laisse l'influence de  $\Omega$  hors d'état de continuer à traîner la distribution, en surmontant la force  $\Phi$  (<sup>1</sup>), l'on reprendra la relation (10 bis), ou (10 ter), suivant le sens du mouvement considéré, et l'on y remplacera le symbole général  $\omega$  par sa valeur spéciale  $\Omega$ . Il suffira ensuite de résoudre cette équation du quatrième degré en  $\alpha$ .

## § 5

### ISOCHRONISME

**865** — *Généralités.* — La véritable destination du régulateur est de maintenir la constance de l'allure du moteur. Or sa forme dépend de la vitesse, et ce ne peut être cependant que par sa déformation qu'il sera capable d'agir sur la distribution, comme de maintenir à chaque instant l'équivalence entre la puissance motrice et la résistance dont on prévoit la variabilité. Il semble d'après cela y avoir contradiction dans les termes mêmes d'un problème ainsi posé.

Et en effet le régulateur de Watt, tel que nous venons de le considérer, présente un défaut fondamental. Si la résistance vient à diminuer, la vitesse augmente, les boules s'écartent, le mau-

(<sup>1</sup>) Nous écartons pour le moment la considération du *lancé*, ou de la force vive acquise par l'appareil, nous réservant de revenir sur ce point (n° 885).

clion monte, et il ne cessera de raccourcir progressivement l'admission que lorsque la production du travail moteur se sera abaissée au point de redevenir égale à la nouvelle valeur du travail résistant. Mais à ce moment nous n'avons que le choix de deux manières d'être : ou bien le modérateur redescendra dans la seule position qui soit compatible avec la vitesse voulue, et dès lors la compensation qui vient d'être atteinte disparaissant, tout sera à recommencer ; ou bien, pour conserver ce résultat, et par conséquent garder l'écartement que l'on vient d'obtenir, il faudra continuer de marcher avec une vitesse supérieure à la première, comme seule capable de maintenir le nouvel état de choses dans le régulateur. Or c'est précisément le contraire de la constance demandée.

**866** — On s'est trouvé conduit, pour sortir de cette difficulté, à modifier le dispositif et les propriétés du système, en vue de s'affranchir de cette dépendance forcée entre la vitesse et l'angle d'écart, qui constitue l'obstacle. On cherche alors à réaliser un double but, et à faire en sorte : 1° que l'appareil puisse se tenir indifféremment dans n'importe quelle situation, lorsque la vitesse possède la valeur voulue ; 2° qu'il lui soit impossible d'en conserver aucune d'une manière permanente, pour toute autre allure que celle-là.

Supposons réalisées ces conditions, et reprenons l'hypothèse précédente. La diminution de la résistance déterminera une accélération. Le régulateur ne pouvant plus dès lors rester en place, va s'écarter et raccourcir progressivement l'admission, jusqu'à ce que l'excédent anormal de vitesse ait disparu. L'allure étant ainsi redevenue la même, et toute position étant dans ce cas une situation d'équilibre, le modérateur n'aura plus de motif de quitter celle à laquelle il vient de parvenir, et par conséquent la distribution restera de son côté dans l'état où il vient de l'amener.

Un tel régulateur est appelé *isochrone* <sup>(1)</sup>, ou *astatique* <sup>(2)</sup>. La

(1) Parce qu'il tourne toujours dans le même temps, n'étant compatible qu'avec une seule vitesse.

(2) Par opposition aux régulateurs *statiques*, qui comportent une équation nécessaire d'équilibre entre  $\alpha$  et  $\omega$ .

première tentative faite dans ce sens est due à Charbonnier <sup>(1)</sup>. Nous pouvons nous rattacher à cet égard à l'analyse du § 1, dans laquelle le mobile avait été réduit par la pensée à un simple point matériel.

**867** — *Régulateur parabolique*. — Il est bien clair que la courbe que ce corps doit être assujéti à décrire ne saurait plus être comme ci-dessus un cercle ayant son centre sur l'axe, puisque nous venons de reconnaître l'incompatibilité de ce mode de liaison avec le but poursuivi. Il doit exister une autre courbe, pour le moment inconnue, dont la condition voulue constitue précisément la définition, qu'il s'agit seulement de dégager d'une manière explicite.

En quelque point que le corps s'y trouve à chaque instant, on peut lui appliquer les raisonnements précédents (n° 858), en appelant  $l$  la portion de sa normale qui est comprise entre la courbe et l'axe, et par suite  $l \cos \alpha$  sa *sous-normale*. L'équation d'équilibre (1) ainsi obtenue :

$$l \cos \alpha = \frac{g}{\omega^2},$$

exige donc que la sous-normale de cette ligne soit constante, puisque  $\omega$  doit rester immuable. On voit par là que le profil dont tous les points procurent, dans ces conditions, le repos relatif n'est autre que la parabole.

De là le nom du *régulateur parabolique* qui a fourni la première solution de l'isochronisme, et qui a été réalisé par plusieurs constructeurs <sup>(2)</sup>.

<sup>(1)</sup> Charbonnier (*Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 1842, n° 85. — *Détermination du volant et du régulateur à boules*, in-8°, 1864). — Tresca. *Feuilles autographiées du Cours de l'École centrale des arts et manufactures*, 1869, p. 402. — Dwelshauvers-Dery. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXXI, 1872, p. 224.

<sup>(2)</sup> Régulateur parabolique de FRANKE (*Le Technologiste*, t. IX, 1848. — Résal. *Mécanique générale*, t. III, p. 202. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1<sup>re</sup> série, t. II, p. 104). — Régulateur parabolique de BARTOANT. Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 297. — Régulateur parabolique de SMYTH et JACKSON. Spineux. *De la distribution de la vapeur dans les machines*, p. 264. — Régulateur parabolique de GARNETT (*Ibidem*, p. 268. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1<sup>re</sup> série, t. II, p. 105). — Régulateur parabolique à tiges flexibles (Callon.

**868** — *Régulateur à bras croisés.* — Farcot père a doté la pratique d'un dispositif remarquable que nous pouvons, au point de vue théorique, rattacher ici comme une solution approximative de l'aperçu qui précède (1). Il est connu sous le nom de régulateur à bras croisés (2).

Remplaçons par la pensée, à partir de son sommet, l'arc de parabole par le cercle osculateur de l'un de ses points intermédiaires, et assujettissons la boule, comme dans le gouverneur de Watt, au moyen d'une tige de pendule dont on placera la charnière au centre de courbure de ce cercle. Nous savons que cette moitié de parabole a pour développée une branche de parabole semi-cubique située au delà de son axe. C'est donc dans cette région qu'il faudra installer, à l'extrémité d'une potence, l'articulation de la tige; ce qui donne au système l'aspect représenté par la figure 535.

Pour réaliser le plus complètement possible les conditions théoriques auxquelles nous nous sommes réduits dans la recherche précédente, il convient d'équilibrer l'ensemble formé par la chape et par les pièces placées sous sa dépendance. On y parvient à l'aide d'un ressort, assez long pour que sa tension puisse être regardée

*Cours de machines*, t. II, p. 270. — Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction Richard, p. 589). — Dwelshauvers-Dery. *Régulateur parabolique*. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXXI, 1872, p. 250. — Guyesse. *Régulateur parabolique*. *Journal de l'École polytechnique*, 54<sup>e</sup> cahier, 1884, p. 157. — Régulateur à courbe d'équilibre. *Bulletin de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, t. IV, p. 195.

M. Marcel Deprez a également imaginé une élégante combinaison cinématique, fondée sur l'emploi d'une roue planétaire, dont le centre décrit rigoureusement une parabole.

(1) Approximation bien suffisante, car cette théorie elle-même est établie en négligeant beaucoup d'éléments.

(2) Hinn. *Théorie des régulateurs marins isochrones à bras croisés de Farcot*, in-8<sup>e</sup>, p. 17. — Linglin. *Nouvelle théorie élémentaire du régulateur à force centrifuge*, in-8<sup>e</sup>. — Tresca (*Bulletin de la Société d'encouragement*, 1<sup>er</sup> août 1860. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1867). — Armengaud. *Publication industrielle*, t. XIII, p. 35. — Mahistre. *Cours de mécanique appliquée*, p. 200. — Georges Marié. *Annales des mines*, 7<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 476. — Callon. *Cours de machines*, t. II, p. 271. — Résal. *Mécanique générale*, t. III, p. 205. — Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 553. — Dwelshauvers-Dery. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXXI, 1872, p. 252. — *Portefeuille économique des machines*, septembre 1881, p. 155. — Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 505.

comme constante. On emploie également une fourchette qui soutient la chape, et est elle-même portée par un levier, dont la queue se

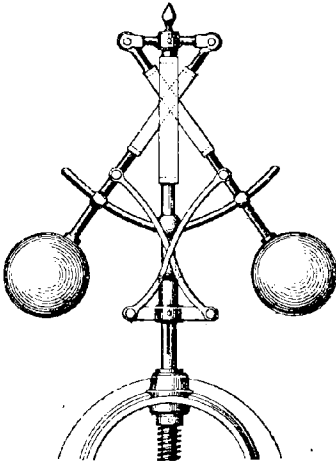


Fig. 553. — Régulateur Farcot à bras croisés (élévation).

trouve sollicitée par un contre-poids convenable. L'inventeur s'est même préoccupé de l'influence exercée par le passage d'un côté à l'autre de l'axe d'une partie des tiges dans le soulèvement des boules, qui aurait sans cela pour effet de modifier le jeu des forces centrifuges. Il en a encore trouvé la compensation dans le ressort dont nous avons parlé, et que l'on détermine en conséquence.

Il est facile d'exprimer la vitesse d'isochronisme que procurera un tel régulateur, en fonction des deux éléments essentiels de sa construction : la potence  $a$  et la longueur  $l$  du bras. Nous avons trouvé comme valeur de la sous-normale  $h$  de la courbe d'équilibre :

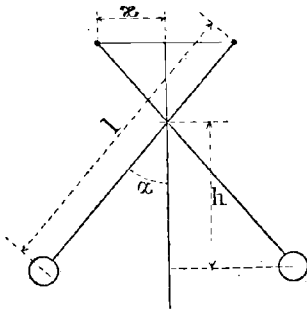


Fig. 556.

$$h = \frac{g}{\omega^2},$$

d'où :

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{h}}.$$

Or on a d'après les liaisons actuelles (fig. 556) :

$$h = \cos \alpha - a \cotang \alpha.$$

Pour que cet élément reste sensiblement constant, comme l'exige sa relation avec  $\omega$ , nous égalons à zéro sa dérivée :

$$-l \sin \alpha + \frac{a}{\sin^2 \alpha} = 0,$$

ce qui donne :

$$\sin \alpha = \sqrt[5]{\frac{a}{l}},$$

et en substituant :

$$\omega = \sqrt{\frac{l}{l \sqrt{1 - \left(\frac{a}{l}\right)^{\frac{2}{5}}} - a \sqrt{\left(\frac{l}{a}\right)^{\frac{2}{5}} - 1}}}$$

Des dispositions plus ou moins analogues se rencontrent dans les régulateurs à bras croisés de Galloway <sup>(1)</sup>, de Lautsheer <sup>(2)</sup>, de Proell <sup>(3)</sup>, de Tchebitchef <sup>(4)</sup>.

**869** — *Régulateur Girard*. — On doit à Girard <sup>(5)</sup> une solution toute différente (fig. 537), qui mérite d'être signalée pour son principe, bien qu'elle ne se soit pas répandue dans l'application.

Une tige oscillant sur un axe A (fig. 538) porte deux lentilles opposées B, b, ainsi qu'un secteur denté C, qui engrène avec une crémaillère D. Une pièce AB<sub>1</sub>b<sub>1</sub>C<sub>1</sub>, indépendante de la première engène de même avec D<sub>1</sub>. La fourchette qui porte ces deux crémaillères en présente également une troisième D'; celle-ci commande le secteur denté C', dont le rayon primitif est exactement la moitié de celui de C. Il se trouve à l'extrémité d'une tige qui oscille sur le centre de courbure A' du secteur, et dont l'extrémité filetée traverse une boule B'.

<sup>(1)</sup> Dwelshauvers-Dery. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXXV, p. 43. — *Revue industrielle*, 20 février 1884, p. 79.

<sup>(2)</sup> Spineux. *De la distribution de la vapeur dans les machines*, p. 269.

<sup>(3)</sup> Résal. *Mécanique générale*, t. III, p. 208. — Buchetti. *Les machines à vapeur actuelles*, p. 224. — Dwelshauvers-Dery (*Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, t. LIX, p. 51. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXXV, p. 41, 50). — *Génie civil*, 15 août 1882. — Kennedy. *The mechanics of machinery*, p. 384.

<sup>(4)</sup> Résal. *Mécanique générale*, t. III, p. 208. — Hirsch. *La mécanique à l'Exposition de 1878*, p. 280. — Dwelshauvers-Dery. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXXV, p. 54, 100. — *Revue industrielle*, 25 août 1887, p. 334. — *Les Mondes* t. XXXI, p. 27. — 5 juillet 1882, p. 261).

<sup>(5)</sup> Tresca. *Cours autographié de l'École centrale des arts et manufactures*, 1869, p. 404.

La pièce  $BbC$  est exactement centrée sur son axe  $A$ , et se trouve par là soustraite à l'action de la pesanteur.

La force centrifuge est, pour chaque lentille :  $M\omega^2 l \sin \alpha$  ; son bras de levier par rapport à la charnière  $A$  s'exprime par  $l \cos \alpha$ . La somme des moments est donc, pour l'ensemble des deux boules, en négligeant le reste du solide :

$$2M\omega^2 l^2 \sin \alpha \cos \alpha.$$

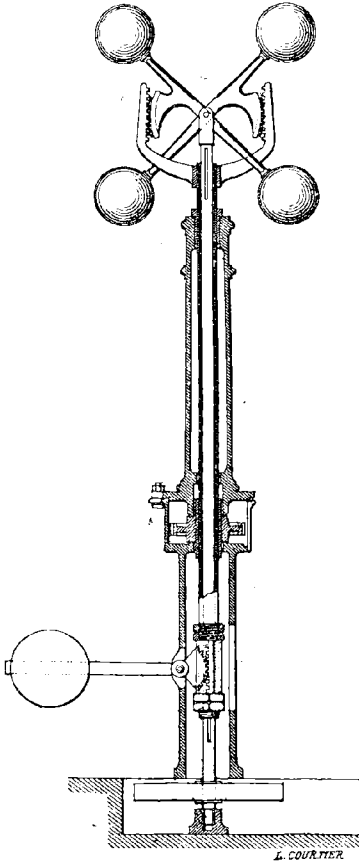


Fig. 537. — Régulateur Girard (élévation).

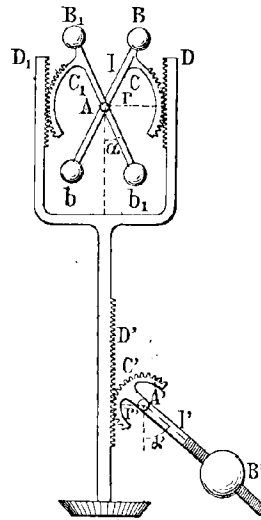


Fig. 538. — Régulateur Girard. (Figure schématique).

D'autre part, la résistance  $F$  exercée par la tige fourchue se partage en deux moitiés, dont l'une agit sur la crémaillère  $D$ , avec le bras de levier  $r$ , et le moment  $\frac{Fr}{2}$ .

Nous avons donc finalement comme équation d'équilibre relatif de la pièce  $BbC$  :

$$\frac{Fr}{2} = 2M\omega^2 l^2 \sin \alpha \cos \alpha.$$



Considérons d'autre part le corps qui pivote sur le point A'. La force F qui lui est imprimée par la crémaillère a pour bras de levier  $r' = \frac{r}{2}$ , et par suite pour moment  $\frac{Fr}{2}$ .

Le poids  $M'g$  de la boule B' admet comme bras de levier  $l' \sin \alpha'$ . On a d'ailleurs  $\alpha' = 2\alpha$ , car les arcs dentés  $r\alpha$  et  $r'\alpha'$  qui sont mis en communication par la même crémaillère, ont nécessairement des longueurs égales. Le moment devient donc  $M'gl' \sin 2\alpha$ , et l'équation d'équilibre prend la forme :

$$\frac{Fr}{2} = 2M'gl' \sin \alpha \cos \alpha.$$

En égalant entre eux les seconds membres de ces deux relations, pour éliminer l'inconnue F, on voit disparaître en même temps l'angle  $\alpha$ ; ce qui montre que la condition d'équilibre est indépendante de l'écartement, ou, en d'autres termes, que le régulateur est isochrone, à la seule condition que ses éléments satisfassent à la condition :

$$M\omega^2 l^2 = M'gl'.$$

Je ferai remarquer que l'on reste maître de la valeur  $\omega$  de la vitesse de régime que l'on veut maintenir d'une manière constante. On peut en effet la régler à volonté, en disposant de la longueur  $l'$ , et déplaçant à cet effet la boule B' le long de la tige filetée.

**870** — *Régulateur Rolland*. — Rolland<sup>(1)</sup> a proposé une série de régulateurs isochrones<sup>(2)</sup> fondés sur l'emploi d'un organe élé-

(1) Rolland (Mémoire sur l'établissement des régulateurs de vitesse. *Journal de l'Ecole polytechnique*, t. XXVI, p. 55, 44, 52, 53. — Sur la théorie dynamique des régulateurs. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 14 août 1876, p. 418. — Sur les effets des variations du travail et les moyens de les régulariser. *Ibidem*, 8 janvier 1872, p. 99). — Résal. *Mécanique générale*, t. III, p. 211. — Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 505.

(2) Indépendamment des régulateurs à force centrifuge que nous avons déjà passés en revue, je mentionnerai encore les suivants :

ABADIÉ. *Mémoire sur un nouveau régulateur à toupie*, 1868, in-8°. — ABAGUER. — ACME. — AGEE. *Scientific American*, 7 septembre 1889, p. 147. — D'ADRIA (*Revue*

mentaire, qui est formé de deux boules portées par les bras rectan-

*industrielle*, 17 novembre 1880, p. 455. — *Journal de Franklin*, avril 1880, p. 266). — DE BANGE. Worms de Romilly. *Annales des mines*, 7<sup>e</sup> série, t. I, p. 44. — BEER. (Hirsch. *La mécanique à l'Exposition de 1878*, p. 277. — Victor Lebeau. *Des régulateurs appliqués aux machines à vapeur*, 1890, p. 56. — *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, t. LIX, p. 54. — Buchetti. *Les machines à vapeur actuelles*, p. 251. — *Engineering*, décembre 1875, p. 432). — BIÉTRIX. — BIGGART et LONDON. Régulateur à action différentielle. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1<sup>re</sup> série, t. II, p. 446. — BONJOUR. — BÖTICHER. *Ibidem*, 1<sup>re</sup> série, t. VI, p. 326. — BOURDILLAT. — BROWN (Buchetti. *Les machines à vapeur actuelles*, p. 253. — *Scientific American*, 28 septembre 1889, p. 194). — CLAYTON et SHUTTLEWORTH (*American machinist*, 26 septembre 1885, p. 4. — *Engineering*, 8 mars 1889, p. 241). — DEMAN. — DEZEWIECKI. — ELWELL. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1<sup>re</sup> série, t. VI, p. 326. — FRIEDRICH. *Ibidem*, t. XXXV, p. 45. — GAND et GUILLOTEAUX. — GARDNER. *American machinist*, 20 septembre 1884, p. 1. — GEORGES (*Chronique industrielle*, février 1887, p. 66. — *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minière de Saint-Étienne*, 1885, p. 218). — GRANDMANGE. Dwelshauvers-Dery. *Exposition de 1889*, p. 50. — GROSSMANN. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXXI, p. 228; XXXV, p. 57. — HALL et WINDSOR. Marié. *Annales des mines*, 7<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 504. — HEWER. *La Lumière électrique*, 1883, p. 456. — HUNTOON. *Les Mondes*, t. XX, p. 495. — JACOBI. Spineux. *De la distribution de la vapeur dans les machines*, p. 272. — JOEFFROY. Coste et Maniquet. *Traité des machines à vapeur*, pl. 13, 24, 26, 27. — KESSELMAYER et NAKE. *Revue des sociétés savantes*, 8<sup>e</sup> série, t. IV, p. 378. — KING. *La Lumière électrique*, 1885, p. 456. — LAWRENCE. *American machinist*, 8 avril 1882, p. 7; 17 mai 1885. — LEFFEL. *La Lumière électrique*, 1885, p. 456. — LIEDER. *Engineering*, Janvier 1886, p. 4. — LUDE. *Revue industrielle*, 15 mars 1886, p. 193. — MAC-FARLANE. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Ecoles d'arts et métiers*, juillet 1887, p. 457. — MARSHALL. Dwelshauvers-Dery. Exposition d'Amsterdam. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, p. 47. — MAS. Régulateur différentiel (*Bulletin de la Société des anciens Élèves des Ecoles d'arts et métiers*, octobre 1875, p. 185. — *Revue industrielle*, 24 octobre 1883, p. 425). — MEYER. Résal. *Mécanique générale*, t. III, p. 206. — MULLARD. Buchetti. *Les machines à vapeur actuelles*, p. 252. — NEWTON. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1<sup>re</sup> série, t. VI, p. 326. — NOEL. Hirsch. *La mécanique générale à l'Exposition de 1878*, p. 980. — PAXMAN. — PICHAUT. *Génie civil*, t. I, p. 202. — PREMIER *Scientific American Supplement*, 4 août 1883, p. 6515. — RADINGER. *Engineering*, 15 mai 1874. — RANKINE (Dwelshauvers-Dery. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXXI, p. 245. — Dwelshauvers-Dery. *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, t. LIX, p. 59, 54. — Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction Richard, p. 595). — RERGERS. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXV-XXVI, p. 451. — REULEAUX. — RIGG. *Ibidem*, t. XXXV, p. 33. — RIGGAT. — SAFETY. — SCHÖFFER et BUDENBERG (*Revue industrielle*, 16 janvier 1884, p. 21; 12 novembre 1885, p. 455. — *American machinist*, 22 août 1885, p. 4). — SHANKS. *Annales industrielles*, 1885, t. I, p. 517. — SIMMONS. *Engineering*, 15 décembre 1871, p. 398. — SOMMART. Hirsch. *La mécanique à l'Exposition de 1878*, p. 280. — TAEON. *American machinist*, 13 septembre 1884, p. 1. — TANGYE. — THELEN et WEYDEMEYER. Buchetti. *Les machines à vapeur actuelles*, p. 253. — TRANCHANT. Spineux. *De la distribution de la vapeur dans les machines*, p. 248. — TREPPEY. Buchetti. *Les machines à vapeur actuelles*, p. 252. — TULPIN. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1871, t. XVIII, p. 52. — WITBY. — WISCHNEGRADSKI. *Revue industrielle*, 1876, p. 326. — WRIGHT et HASTINGS. *American machinist*, 5 décembre 1881, p. 5.

gulaires d'un varlet indéformable oscillant autour de son sommet. Je choisirai parmi eux, pour l'étudier ici, celui que l'auteur lui-même considèrerait comme le plus satisfaisant.

La figure schématique 539 représente le système élémentaire, que l'on doit supposer reproduit  $n$  fois, dans  $n$  plans méridiens symétriquement espacés au-

tour de l'axe de rotation  $AA'A''$ ; le nombre  $n$  étant tout au moins égal à 2. Une articulation fixe  $O$  est assemblée à cet axe par une potence  $OA$  de longueur  $a$ . En  $O'$  et  $O''$  se trouvent des articulations mobiles. Les potences qui les portent  $O'A'$ ,  $O''A''$  sont implantées sur des manchons  $A'$ ,  $A''$  susceptibles d'un glissement longitudinal. Deux losanges articulés  $OBB_1O'$ ,  $OCC_1O''$  sont constitués par les varlets rectangulaires indéformables  $BOC$ ,  $B_1OC_1$ . Leurs huit côtés ont la même longueur  $l$ , et le même

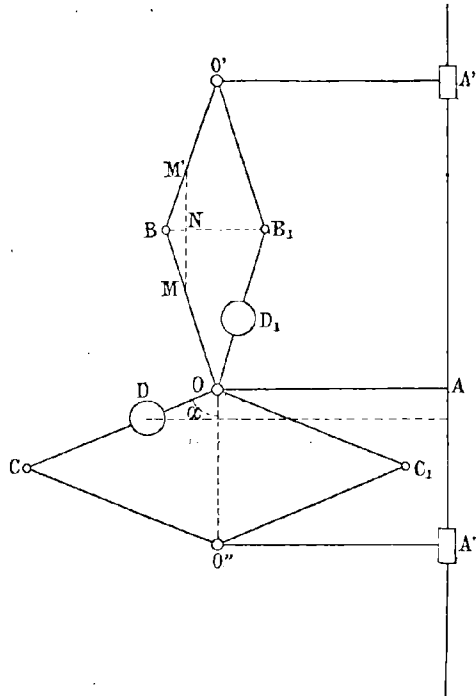


Fig. 539. — Régulateur Rolland (figure schématique).

poids  $p$ . Sur les tiges  $OC$ ,  $OB_1$  sont montées deux boules  $D$ ,  $D_1$  ayant pour poids  $P$ ,  $P_1$ , et comme distances à la charnière  $\lambda$ ,  $\lambda_1$ . Nous désignerons par  $\alpha$  l'angle que fait  $OC$  avec la verticale, et enfin par  $Q'$ ,  $Q''$  la  $n^{\text{e}}$  partie des poids des manchons  $A'$ ,  $A''$  avec leurs surcharges.

Proposons-nous d'établir l'équation du travail virtuel relatif au déplacement compatible avec les liaisons. Nous envisagerons d'abord les forces centrifuges, et en premier lieu celles des deux lentilles.

**871** — La masse de la boule D peut être condensée en son centre (n° 860). Sa force centrifuge totale est donc :

$$\frac{P}{g} \omega^2 (a + \lambda \sin \alpha).$$

Un déplacement virtuel élémentaire  $\lambda dx$  a pour projection sur la direction de cette force  $\lambda dx \cdot \cos \alpha$ . Le travail virtuel est par conséquent pour ce premier solide :

$$\frac{P}{g} \lambda \omega^2 (a + \lambda \sin \alpha) \cos \alpha dx.$$

On aura de même pour la boule  $D_1$ , dont le bras est perpendiculaire au précédent :

$$-\frac{P_1}{g} \lambda_1 \omega^2 (a - \lambda_1 \cos \alpha) \sin \alpha dx;$$

et finalement pour l'ensemble des deux :

$$\frac{\omega^2 dx}{g} [Pa \lambda \cos \alpha + P_1 a \lambda_1 \sin \alpha + (P \lambda^2 - P_1 \lambda_1^2) \sin \alpha \cos \alpha].$$

Je ferai remarquer dès à présent que, lorsque l'équation des travaux virtuels sera complète, il faudra pour l'isochronisme que l'équilibre reste possible sous toutes les inclinaisons, et par suite que cette égalité ait lieu quel que soit  $\alpha$ . Le coefficient de  $\sin \alpha \cos \alpha$  devra dès lors être annulé à part. Or, aucune autre force n'introduira plus dans l'égalité de termes de cette nature. Nous poserons donc de suite :

$$P \lambda^2 - P_1 \lambda_1^2 = 0.$$

De là une première condition imposée aux poids et aux bras de levier des boules. On y peut évidemment satisfaire d'une infinité de manière; mais la plus simple consiste à prendre :

$$P = P_1, \quad \lambda = \lambda_1.$$

Nous supposons que l'on ait adopté cette solution, qui réduit le travail virtuel des forces centrifuges des deux corps à l'expression :

$$\frac{P\alpha\lambda\omega^2}{g} (\sin \alpha + \cos \alpha) d\alpha.$$

**872** — Considérons en second lieu, au point de vue des forces centrifuges, l'ensemble des huit tiges. Nous remarquerons d'abord que la moitié supérieure du losange  $OO'$ , si on la réunit par la pensée à la partie inférieure du losange  $OO''$ , donne avec elle, en raison de la symétrie, le même résultat que le faisceau des quatre branches concourantes :  $OB$ ,  $OB_1$ ,  $OC$ ,  $OC_1$ . Or, je dis que ce dernier fournit un total nul. Il en sera dès lors de même pour tout l'ensemble.

Considérons en effet la tige  $OC$ . Si  $\varpi$  désigne son poids par unité de longueur,  $\frac{\varpi dx}{g}$  sera la masse d'un élément  $dx$  situé à la distance  $x$  de l'articulation  $O$ . Il a pour rayon de rotation  $a + x \sin \alpha$ , et comme force centrifuge :

$$\frac{\varpi dx}{g} \omega^2 (a + x \sin \alpha).$$

Le déplacement virtuel étant  $x dx$ , sa projection sur la direction de la force est  $x dx \cdot \cos \alpha$ , et par suite le travail virtuel :

$$\frac{\varpi dx}{g} \omega^2 (a + x \sin \alpha) x \cos \alpha dx,$$

ce qui donne pour la tige entière :

$$\frac{\varpi \omega^2 \cos \alpha}{g} dx \int_0^l (a + x \sin \alpha) x dx,$$

ou en effectuant :

$$\frac{\varpi \omega^2 \cos \alpha}{g} \left( \frac{al^2}{2} + \frac{l^3}{3} \sin \alpha \right).$$

Quant à la tringle  $OC_1$ , les inclinaisons sont les mêmes, mais le rayon de rotation a pour valeur  $a - x \sin \alpha$ . En outre, la projection du chemin virtuel devient négative, car elle est dirigée vers l'axe de rotation. Le résultat sera donc, si l'on opère ces divers changements dans l'expression précédente :

$$- \frac{\omega^2 \cos \alpha}{g} \left( \frac{al^2}{2} - \frac{l^3}{3} \sin \alpha \right),$$

d'où il résulte pour l'ensemble des tiges  $OC$  et  $OC_1$  :

$$\frac{2\omega^2 l^3}{3g} \sin \alpha \cos \alpha.$$

Pour passer de là au groupe  $OB, OB_1$ , il nous faut changer  $\alpha$  en  $90 - \alpha$ , ce qui n'altère pas le produit  $\sin \alpha \cos \alpha$ . Mais les signes des déplacements virtuels se trouveront respectivement intervertis; car, dans la rotation que subit le varlet rectangulaire,  $OC$  s'écarte de l'axe, tandis que  $OD$  s'en rapproche; et l'inverse a lieu pour  $OC_1, OD_1$ . Le résultat sera donc égal et de signe contraire au précédent; ce qui donne zéro pour l'ensemble des quatre branches courantes, et finalement pour celui des deux losanges.

**873** — Arrivons maintenant au travail virtuel de la pesanteur. Le poids  $P$  de la boule  $D$  a pour travail virtuel :

$$- P\lambda \sin \alpha d\alpha,$$

et celui de  $D_1$  :

$$- P\lambda \cos \alpha dz.$$

Lé manchon  $A'$ , auquel est appliqué la force  $Q'$ , éprouve un déplacement vertical double de celui du point  $B$ . Il donne donc lieu au travail :

$$- 2Q'l \sin \alpha d\alpha.$$

On a de même pour  $A''$  :

$$- 2Q''l \cos \alpha d\alpha.$$

Quant aux côtés des losanges articulés, si nous réunissons par la pensée les deux éléments égaux qui sont situés en M et M', nous pouvons en condenser la masse au milieu N de la distance qui les sépare. Ce point s'élève de la quantité  $-l \cos \alpha dx$ . Si donc  $p$  désigne le poids effectif de l'une des tiges, nous aurons pour tout l'ensemble du parallélogramme supérieur :

$$- 4pl \cos \alpha dx.$$

Le losange inférieur donnera de même :

$$- 4pl \sin \alpha dx.$$

**874** — Finalement l'équation des travaux virtuels devient par la réunion des divers résultats précédents, et la suppression du facteur commun  $dx$  :

$$(11) \left\{ \begin{array}{l} \frac{Pn\lambda\omega^2}{g} (\sin \alpha + \cos \alpha) = \\ (P\lambda + 2Q'l + 4pl) \sin \alpha + (P\lambda + 2Q''l + 4pl) \cos \alpha. \end{array} \right.$$

Pour réaliser l'isochronisme, nous devons égaliser séparément à zéro les coefficients de  $\sin \alpha$  et  $\cos \alpha$ , ce qui fournit les deux égalités :

$$\frac{Pa\lambda\omega^2}{g} = P\lambda + 2l(Q' + 2p) = P\lambda + 2l(Q'' + 2p),$$

ou sous une autre forme :

$$(12) \quad Q' = Q'' = P \frac{\lambda}{2l} \left( \frac{a\omega^2}{g} - 1 \right) - 2p.$$

Nous obtenons ainsi les valeurs égales  $nQ', nQ''$  qu'il faudra donner au poids des manchons accompagnés de leurs surcharges, pour réaliser la vitesse constante  $\omega$ .

Il suffira, si l'on veut pouvoir la régler à volonté, de se ménager un moyen de modifier les surcharges.

## § 4

## THÉORIE GÉNÉRALE

**875** — *Théorie générale.* — On peut généraliser la question<sup>(1)</sup>, et montrer que l'isochronisme est réalisable avec une masse unique convenablement déterminée. La figure schématique 540

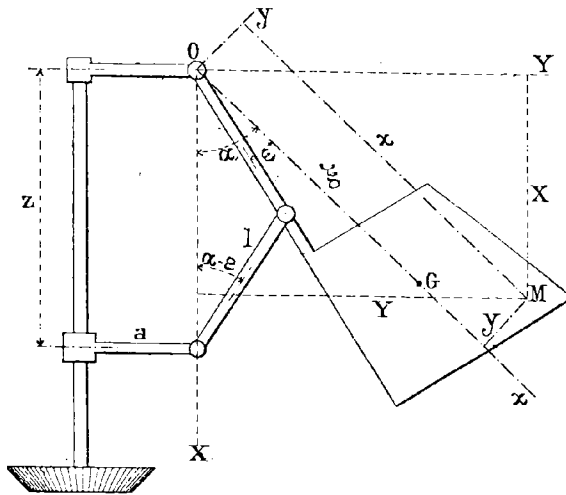


Fig. 540.

représente la moitié de l'appareil, que nous supposons symétrique par rapport à l'axe de rotation. Aux deux potences que l'on monte, l'une sur cet axe lui-même, l'autre sur le manchon mobile, sont articulées deux tiges de longueur  $l$ , formant la moitié d'un

<sup>(1)</sup> Yvon Villarceau (*Exposé concernant les régulateurs isochrones à ailettes*, in-8°, Vendôme. — *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 3 et 10 juin 1872). — Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Notes de M. Gustave Richard, p. 592. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 3<sup>e</sup> série, t. II, p. 687. — *Génie civil*, t. IV, p. 356. — Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 299. — *La Lumière électrique*, t. IX, p. 67. — *Revue industrielle*, 1876, p. 145. — *La Nature*, 19 février 1876, p. 187. — *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXXIV, p. 1457. — *Revue des Sociétés savantes*, 2<sup>e</sup> série, t. IV, 1869.



losange articulé. La branche supérieure, qui oscille sur la charnière O, se termine par un solide de forme quelconque. Nous représenterons par  $\alpha - \varepsilon$  l'écart qui la sépare de la verticale, en marquant par  $\varepsilon$  l'angle fixe que fait cette branche avec la droite Ox, tirée de la charnière O au centre de gravité G de l'ailette.

Nous rapporterons les divers points matériels de ce corps au système de coordonnées mobiles  $xOy$ . Nous emploierons en même temps un système fixe de coordonnées XOY dirigées suivant l'horizontale et la verticale. On passera des unes aux autres au moyen des formules :

$$X = x \cos \alpha - y \sin \alpha,$$

$$Y = x \sin \alpha + y \cos \alpha.$$

Occupons-nous d'écrire l'équation d'équilibre relatif entre les forces centrifuges et les forces réelles, qui sont ici le poids Q de l'ailette, appliqué en G, et celui P du manchon mobile avec sa surcharge.

**876** — Nous réduirons les forces centrifuges à celles de l'ailette, en négligeant pour plus de simplicité la branche inférieure du losange. Leur travail virtuel est le produit du déplacement angulaire  $d\alpha$  par la somme de leurs moments relatifs à la charnière O. Pour évaluer ces derniers, il est permis de raisonner comme si tout le système était aplati dans le plan de la figure.

Le rayon de rotation de la masse élémentaire  $m$  d'un point quelconque M est  $Y + a$ , sa force centrifuge  $m\omega^2(Y + a)$ , et le bras de levier de cette dernière X. Le moment sera donc :

$$m\omega^2 X (Y + a).$$

En ajoutant ces expressions pour tout l'ensemble du corps, et substituant pour X et Y leurs valeurs, il vient :

$$\omega^2 \sum m (x \cos \alpha - y \sin \alpha) (x \sin \alpha + y \cos \alpha + a),$$

ou en développant :

$$\omega^2 \left[ \begin{array}{c} a (\cos \alpha \Sigma mx - \sin \alpha \Sigma my) \\ + \sin \alpha \cos \alpha \Sigma m (x^2 - y^2) + (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) \Sigma mxy \end{array} \right].$$

Or on a identiquement :

$$\Sigma mx = M\xi, \quad \Sigma my = 0,$$

en désignant par  $\xi$  la distance OG du centre de la gravité à la charnière.

D'un autre côté, le travail de la pesanteur n'introduira pas de nouveaux termes du second degré en  $\sin \alpha$  et  $\cos \alpha$ ; et comme, pour l'isochronisme, ceux-ci doivent s'évanouir identiquement, il nous faut poser séparément :

$$(15) \quad \Sigma mxy = 0, \quad \Sigma mx^2 = \Sigma my^2.$$

Telles sont les conditions nécessaires de constitution auxquelles doit préalablement satisfaire le corps<sup>(4)</sup>; ce qui sera d'ailleurs facile d'une infinité de manières au gré du constructeur.

En les supposant remplies, le moment des forces centrifuges se réduit à  $M\omega^2 a \xi \cos \alpha$ , ce qui donne pour leur travail virtuel :

$$(14) \quad M\omega^2 a \xi \cos \alpha d\alpha.$$

**877** — Le poids  $Mg$  de l'ailette, appliqué en G, a pour bras de levier  $\xi \sin \alpha$ . Son moment est de signe contraire au précédent. Son travail virtuel a donc pour valeur :

$$(15) \quad - Mg \xi \sin \alpha d\alpha.$$

(4) Haton de la Goupillière. Mémoire sur une théorie nouvelle de la géométrie des masses. *Journal de l'École Polytechnique*, t. XXI, 37<sup>e</sup> cahier, p. 35.

Quant au poids  $P$  du manchon et de la surcharge, nous n'en devons rattacher que la moitié à la partie de l'appareil sur laquelle portent nos raisonnements. Si  $z$  marque la distance de ce corps à l'articulation supérieure, le travail virtuel aura pour expression :

$$- \frac{P}{2} dz.$$

Nous invoquerons, pour éliminer cette variable, l'identité :

$$\begin{aligned} z &= 2l \cos(\alpha - \epsilon), \\ dz &= -2l \sin(\alpha - \epsilon) d\alpha, \end{aligned}$$

ce qui donne pour l'expression du travail :

$$Pl(\sin \alpha \cos \epsilon - \cos \alpha \sin \epsilon) d\alpha.$$

**878** — Quand on égale à zéro la somme de ces divers termes,  $dz$  disparaît de lui-même, et il reste :

$$(16) \quad (M\omega^2 a\xi + Pl \sin \epsilon) \cos \alpha - (Mg\xi + Pl \cos \epsilon) \sin \alpha = 0.$$

Pour que ce résultat conduise à une identité, indépendamment de la valeur de  $\alpha$ , il nous faut poser :

$$(17) \quad Pl \sin \epsilon = - M\omega^2 a\xi,$$

$$(18) \quad Pl \cos \epsilon = - Mg\xi.$$

Cette dernière égalité exprime une nouvelle condition de constitution que doit remplir le corps, pour être capable de procurer l'isochronisme. La première fait alors connaître la vitesse de ce régime, en fonction des divers éléments du système. Elle permettra par suite de disposer de l'un de ceux-ci, en vue de régler à volonté l'allure.

**879** — *Régulateur Cosinus.* — On doit à M. Buss <sup>(1)</sup> un appa-

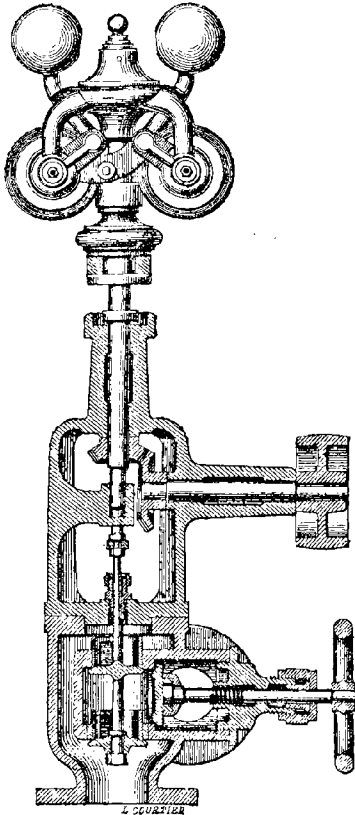


Fig. 541. — Régulateur Buss.  
(Coupe verticale).

reil qui est très répandu sous le nom de *régulateur Cosinus* <sup>(2)</sup>. Il réalise théoriquement le type précédent (fig. 541) au moyen d'un varlet à boules égales et à tiges de même longueur, qui satisfait évidemment aux conditions (13). On peut également associer ensemble deux varlets dissymétriques, mais inverses, dont les influences se compenseront mutuellement, pour satisfaire à ces relations. Un bras agit sur un coulisseau pour soulever le manchon avec sa surcharge; et l'on a soin de l'établir conformément à l'équation (18), de manière à réaliser une vitesse angulaire  $\omega$  qui reste liée aux éléments du mécanisme par la formule (17).

<sup>(1)</sup> Buchetti. *Les machines à vapeur actuelles*, p. 227. — Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Notes de G. Richard, p. 591. — Dwelshauvers-Dery (*Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, t. LIX,

p. 58 et 58. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXXI, 1872, p. 237).

<sup>(2)</sup> Cette expression, qui pourrait d'ailleurs tout aussi bien convenir à un grand nombre d'autres régulateurs isochrones, provient de ce qu'après qu'on a satisfait aux conditions (13), le travail virtuel des forces centrifuges (14) reste proportionnel au cosinus de l'écart; et qu'il en est aussi de même de la totalité des travaux virtuels (16), quand on a rempli en outre la condition (18).

## § 5

## PUISSANCE ET SENSIBILITE

**880 — Puissance.** — Un régulateur doit posséder la puissance nécessaire pour mouvoir efficacement la distribution au moment voulu. Il lui est à cet effet nécessaire d'y affecter un travail réel d'une certaine importance. On trouvera ce dernier dans l'excès de la force centrifuge nouvelle sur son ancienne valeur, c'est-à-dire dans la fonction  $\Omega^2 - \omega^2$  ou  $(\Omega - \omega)(\Omega + \omega)$ . Mais puisque, parmi les deux facteurs de ce produit, l'on désire restreindre le plus possible la variation d'allure  $\Omega - \omega$ , il faut amplifier en sens inverse la vitesse moyenne  $\frac{\Omega + \omega}{2}$ , et comme conséquence la force centrifuge du régime normal.

Il s'ensuit que, pour tenir en équilibre d'une manière permanente une force de cette importance, il est nécessaire de disposer d'un grand travail virtuel de la part du poids du manchon. Il faut donc lui attribuer, dans la constitution du système, ou bien une grande masse, ou un grand déplacement. C'est ordinairement le premier moyen que l'on adopte, et pour ce motif on voit dans certains régulateurs d'énormes poids. Toutefois nous rencontrerons plus loin (n° 901) une tentative qui a été faite précisément en se plaçant au second point de vue.

**881 — Sensibilité, stabilité.** — Supposons que le régulateur ait été mis en état de surmonter efficacement l'effort  $\Phi$  que lui opposent les résistances passives et les forces d'inertie du mécanisme de distribution, ainsi que de la connexion qui les relie. Dans l'établissement d'un projet de machine, on peut former *a priori* une expression, approximative tout au moins, de cette résultante en fonction de l'écartement variable  $\alpha$ . Pour un moteur déjà construit et en fonctionnement, il existerait également des moyens de la mesurer expérimentalement. Supposons donc connue la valeur de cette

force, et cherchons à reconnaître son influence sur la sensibilité du régulateur.

Je reprendrai, pour faciliter ces explications en fixant les idées, l'exemple du régulateur de Rolland. Nous devons, pour la partie de l'appareil sur laquelle ont porté nos raisonnements du n° 870, adjoindre la force  $\frac{\Phi}{n}$  au poids  $Q''$  de la charge  $A''$  qui est chargée d'actionner le distributeur. Il faudra donc changer dans l'équation (11)  $Q''$  en  $Q'' \pm \frac{\Phi}{n}$ ; le double signe étant destiné à nous permettre d'embrasser dans un seul calcul le cas de la manœuvre montante (pour laquelle la résistance est dirigée vers le bas), ainsi que l'hypothèse inverse.

Si, dans ces conditions, nous appelons  $\Omega$  la vitesse angulaire, pour la distinguer de celle  $\omega$  qui correspond à l'isochronisme sans résistance, cette relation deviendra par là :

$$\begin{aligned} & \frac{Pa\lambda\Omega^2}{g} (\sin \alpha + \cos \alpha) \\ = & (P\lambda + 2Q'l + 4pl) \sin \alpha + \left( P\lambda + 2Q''l \pm 2\frac{\Phi}{n}l + 4pl \right) \cos \alpha; \end{aligned}$$

ce qui donne, en retranchant membre à membre avec l'égalité (11) :

$$\frac{Pa\lambda}{g} (\Omega^2 - \omega^2) (\sin \alpha + \cos \alpha) = \pm \frac{\Phi}{n} l \cos \alpha.$$

On en tire :

$$\Omega^2 = \omega^2 \pm \frac{2lg}{nP\lambda a} \cdot \frac{\Phi}{1 + \tan \alpha},$$

c'est-à-dire :

$$\Omega = \omega \sqrt{1 \pm \frac{2lg}{nP\lambda a\omega^2} \cdot \frac{\Phi}{1 + \tan \alpha}},$$

ou en extrayant approximativement la racine carrée<sup>(1)</sup>, et formulant

(1) D'après la remarque du n° 746, note 1.

séparément ses deux valeurs :

$$\Omega' = \omega \left( 1 + \frac{lg}{nP\lambda a\omega^2} \cdot \frac{\Phi}{1 + \operatorname{tang} \alpha} \right),$$

$$\Omega'' = \omega \left( 1 - \frac{lg}{nP\lambda a\omega^2} \cdot \frac{\Phi}{1 + \operatorname{tang} \alpha} \right).$$

Nous sommes en effet autorisés, pour cette approximation, à regarder comme une faible quantité celle qui, sous le radical, se trouve précédée du double signe; car s'il en était autrement, ce serait l'indice que l'appareil aurait été établi dans des conditions détestables; le produit de ce terme par  $2\omega$  représentant la différence des deux vitesses de démarrage  $\Omega'$  et  $\Omega''$  vers le haut ou vers le bas, écart qui doit rester peu considérable.

**882** — On mesure précisément ce que l'on appelle la *sensibilité* du régulateur par le rapport de cette quantité  $\Omega' - \Omega''$  à la moyenne arithmétique de ces deux vitesses, ou plus simplement à leur somme  $\Omega + \Omega''$  :

$$\frac{\Omega' - \Omega''}{\Omega' + \Omega''} = \frac{lg}{nP\lambda a\omega^2} \cdot \frac{\Phi}{1 + \operatorname{tang} \alpha}.$$

On voit que cette valeur varie avec l'angle  $\alpha$ . Pour obtenir, comme il est désirable, une caractéristique fixe, on envisage l'écart spécial  $\alpha_0$  qui correspond au maximum  $\Phi_0$  de la résistance opposée par la distribution à sa manœuvre par le régulateur. C'est alors à cette situation, la plus défavorable de toutes, que l'on s'attache pour l'appréciation qui nous occupe, en posant :

$$(19) \quad \left( \frac{\Omega' - \Omega''}{\Omega' + \Omega''} \right)_0 = \frac{lg}{nP\lambda a\omega^2} \cdot \frac{\Phi_0}{1 + \operatorname{tang} \alpha_0}$$

Nous voyons, d'après cette expression, que l'on a intérêt à augmenter le nombre  $n$  des appareils élémentaires, qui sont associés dans des plans équidistants pour constituer l'ensemble du régulateur. Cet artifice permet en même temps de diminuer individuellement l'importance des boules capables d'un effort déterminé;

par suite aussi le diamètre des articulations qui les supportent, et enfin le travail des frottements correspondants, c'est-à-dire la valeur de  $\Phi_0$ .

Il sera également avantageux d'augmenter la longueur  $a$  de la potence, et de diminuer le côté  $l$  des losanges; double condition qui favorise d'ailleurs l'installation des  $n$  systèmes élémentaires dans le voisinage de l'axe.

**883** — En ce qui concerne les boules, la sensibilité sera d'autant plus satisfaisante que leur poids  $P$  et leur bras de levier  $\lambda$  seront plus notables. L'accroissement de ce dernier n'entraîne aucun inconvénient. On peut, au contraire, en trouver au premier abord à augmenter le poids, attendu qu'on développe ainsi les frottements, et par suite la valeur de  $\Phi_0$ . Toutefois cette influence indirecte restera peu importante, et nous devons au contraire en signaler d'autres, qui tendent à recommander l'emploi des lentilles massives.

Tout d'abord on y trouve l'avantage de concilier, dans une certaine mesure, la *stabilité* avec la *sensibilité*. Cette dernière, en effet, pour constituer une qualité vraiment précieuse, ne doit pas être confondue avec l'*affollement* du régulateur sous les moindres influences (1). La masse des boules qui entre comme facteur dans l'expression de leur force centrifuge est destinée à fournir la puissance motrice capable de surmonter les résistances qui s'opposent au mouvement de la distribution. Si, à force de s'attacher à diminuer ces divers obstacles, on arrivait à se contenter de masses très réduites, les moindres perturbations leur deviendraient comparables, et la sensibilité entrerait en jeu d'une manière incessante. Lorsque, au contraire, la résistance à vaincre reste notable, le modérateur recouvre une certaine stabilité. On a parfois, d'après ces vues, amélioré des régulateurs désordonnés en y créant un supplément de frottement, par le serrage d'une articulation. Ce remède

(1) Léauté. Sur la théorie des régulateurs. *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 30 octobre 1890, p. 625. — Hirsch. *La mécanique à l'Exposition de 1878*, p. 235. — Sauvage. *Annales des mines*, 8<sup>e</sup> série, t. XVII, p. 497. — Pichault. *Généralité*, t. I, p. 9.



singulier réussissait à ramener une allure normale. Quelquefois aussi, on introduit la résistance permanente d'un frein à huile.

D'autres motifs encore doivent faire éviter l'emploi des régulateurs ultra-sensibles, qui jouent à l'occasion des plus faibles variations. Il convient, en effet, de laisser au volant sa part normale d'action pour éteindre l'effet de ces influences légères pendant le cours de la période du mouvement de rotation, et de se rappeler que la principale fonction du régulateur est bien plutôt d'équilibrer, de révolution en révolution, le total de la production de puissance motrice avec la résistance. Si le volant était insuffisant, le régulateur ne pourrait convenablement le remplacer. Par exemple, quand ce dernier vient à fonctionner lorsque la vapeur est coupée, son effet reste nul, et ne peut se faire sentir qu'à la course suivante. Pendant ce temps, la vitesse a le temps de varier d'une manière sensible; tandis que le rôle du volant est incessant et sans intermittence.

**884** — *Oscillations à longue période.* — Nous nous sommes, dans les calculs précédents, placé uniquement au point de vue du repos relatif, tandis que l'action utile du régulateur ne se développe précisément que par le mouvement relatif qui résulte de sa déformation, pour se communiquer au mécanisme de distribution. Examinons maintenant de plus près ce côté de la question.

Supposons que, l'appareil ayant pris son équilibre relatif pour la vitesse réglementaire  $\omega$  sous un écart  $\alpha$ , on vienne à supprimer subitement une partie de la résistance industrielle que l'on était en train de surmonter. La vitesse de rotation va, comme conséquence, acquérir des valeurs  $\Omega$  progressivement croissantes à partir de  $\omega$ , avec une accélération angulaire  $\frac{d\Omega}{dt}$  d'ailleurs atténuée par l'effet du volant. Les forces centrifuges, qui sont fonction de  $\Omega$ , croissent en même temps. Le mouvement relatif d'écartement des boules se développe avec une vitesse angulaire propre  $\frac{d\alpha}{dt}$  (qu'il ne faut pas confondre avec  $\Omega$ , ou  $\frac{d\varphi}{dt}$ ), et une accélération angulaire  $\frac{d^2\alpha}{dt^2}$ .

Si le système se réduisait à un solide unique tournant sur une charnière, cette accélération serait en raison inverse du moment d'inertie de ce corps. Dans la réalité, le dénominateur de son expression sera plus ou moins compliqué par l'influence des autres pièces du régulateur et de la distribution. Tenons-nous-en cependant, pour plus de simplicité, à la première conception, et distinguons deux cas, selon que la valeur de ce moment d'inertie est très faible, ou au contraire d'une grande importance.

**885** — Dans la première hypothèse, l'accélération  $\frac{d^2\alpha}{dt^2}$  sera intense. La vitesse d'écartement  $\frac{d\alpha}{dt}$  atteindra rapidement une grande valeur, et l'écart  $\alpha$  arrivera en très peu de temps à l'angle d'équilibre  $\alpha_1$ , qui est compatible avec le changement apporté dans la distribution du travail moteur par le déplacement  $\alpha_1 - \alpha$ .

Dans un aussi bref délai, la vitesse  $\Omega$ , qui est proportionnelle à celle de l'arbre du volant, n'a pu s'accroître que fort peu au delà de  $\omega$ . Les forces centrifuges, sans être précisément celles qui sont capables de l'équilibre relatif pour la position  $\alpha_1$ , lequel exigerait rigoureusement la vitesse  $\omega$ , en seront cependant peu différentes. Cette nuance suffira néanmoins pour faire dépasser légèrement la position  $\alpha_1$ , jusqu'à une autre  $\alpha_2$ . On aura par là trop diminué l'admission; ce qui laisse maintenant le travail moteur en déficit, et non en équilibre.

Il s'opérera par suite inévitablement une réaction en sens inverse, de  $\Omega$  vers  $\omega$ , avec ralentissement général, et rétrogradation de  $\alpha_2$  vers  $\alpha_1$ . Pour les mêmes motifs, ce retour en sens contraire s'effectuera dans un laps de temps fort court. On dépassera donc très peu la position  $\alpha_1$  pour en atteindre une autre  $\alpha_3$ , et continuer ainsi alternativement. A travers des oscillations aussi faibles, et bientôt éteintes, le régime voulu finira par se trouver rétabli.

**886** — Mais il en sera tout autrement si nous supposons un moment d'inertie considérable. L'accélération  $\frac{d^2\alpha}{dt^2}$  est alors peu im-

portante, et l'écart varie lentement. Lorsque la valeur  $\alpha_1$  est atteinte, l'effet de la diminution préalable de la résistance a eu le temps d'emmagasiner une quantité appréciable de force vive dans le volant. La vitesse  $\Omega$  est devenue notablement supérieure à  $\omega$ . Les forces centrifuges sont dès lors beaucoup trop grandes pour l'équilibre, et leur excès conduira le système jusqu'à une position  $\alpha'_1$ , sensiblement plus éloignée que celle  $\alpha_1$  qui correspondait au cas précédent. Elle ira même la plupart du temps jusqu'à la butée qui est destinée à mettre une limite aux excursions excessives.

A son tour le recul s'opérera avec lenteur, pour la même raison ; et l'on dépassera beaucoup la position  $\alpha_1$ , en  $\alpha'_1$ , sans doute même jusqu'à la butée opposée. Les oscillations seront donc, dans ce cas, d'une grande amplitude et d'une lenteur caractéristique ; de telle sorte qu'avant que l'on puisse réaliser le rétablissement du régime normal, on aura le temps de voir naître quelque autre incident qui remettra tout en question. On arrive ainsi à une marche absolument incohérente<sup>(1)</sup>.

Ce défaut des longues oscillations a été reconnu par les praticiens, avant même que la théorie eût entrepris d'en rendre compte<sup>(1)</sup>. Nous venons de voir que le moyen d'y remédier consiste à diminuer le moment d'inertie  $P\lambda^2$ . Pour un degré déterminé de sensibilité, c'est-à-dire pour une même valeur du moment  $P\lambda$  (éq. 19, p. 467), ce moment d'inertie reste proportionnel à  $\lambda$ . Nous sommes donc conduits à diminuer ce bras de levier, et par conséquent, pour conserver la constance du produit  $P\lambda$ , à augmenter en raison inverse le poids  $P$ . De là un nouveau motif d'employer de grosses boules, à l'extrémité de courts bras de levier.

(1) Les effets de cette nature ne se produisent pas avec les régulateurs statiques, tels que le gouverneur de Watt. Pour ceux-ci, l'écart est fonction de la vitesse angulaire. L'angle  $\alpha$  croît alors en même temps que  $\omega$ . Il finit par atteindre un maximum, ce qui suppose à ce moment la condition  $\frac{d\alpha}{dt} = 0$ , laquelle entraîne également  $\frac{d\omega}{dt} = 0$ .

La vitesse  $\omega$  ne s'accroît pas non plus au delà, et ne donne pas lieu aux oscillations inhérentes aux régulateurs isochrones, pour lesquels il n'existe, à l'inverse du cas actuel, aucune liaison entre  $\alpha$  et  $\omega$ . Dans le cas du régulateur statique, la vitesse conserve sans alternatives la valeur qu'elle vient d'atteindre. Malheureusement ce n'est plus la vitesse voulue, et tel est l'écueil qui nous a engagé ci-dessus dans la recherche de l'isochronisme (n° 865).

**887** — *Régulateurs quasi-isochrones*. — Le défaut essentiel des régulateurs astatiques sur lequel nous venons d'insister a fini par déterminer chez les constructeurs une tendance à désertir le terrain de la rigueur, pour se contenter *d'un degré déterminé d'isochronisme*, que l'on cherche à concilier avec une suffisante stabilité <sup>(1)</sup> en laissant à la différence  $\Omega' - \Omega''$  (éq. 19, p. 467) une certaine marge <sup>(2)</sup>.

Quant à fixer d'une manière générale le degré de l'une et de l'autre de ces deux qualités qu'il convient d'allier ensemble, ce n'est pas une question que la théorie semble pouvoir trancher *a priori* d'une manière générale. On peut dire jusqu'à un certain point que le régulateur et le moteur sont faits l'un pour l'autre. Ils s'influencent mutuellement dans leurs propriétés; et tel modérateur, parfaitement adapté à une machine déterminée, ne donnera plus les mêmes résultats si on l'installe sur un autre moteur, ou avec un volant d'importance différente <sup>(3)</sup>.

**888** — *Régulateur Andrade*. — On doit à M. Andrade <sup>(4)</sup>, ingé-

<sup>(1)</sup> Léauté (Mémoire sur les oscillations à longue période. *Journal de l'École Polytechnique*, 55<sup>e</sup> cahier. — *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. C, p. 154). — Bérard et Léauté. Sur les moyens de réduire les accroissements de vitesse. *Mémorial des poudres et salpêtres*, t. II. — Worms de Romilly. *Annales des mines*, 7<sup>e</sup> série, t. I, p. 55. — Rolland (Sur les effets des variations du travail et les moyens de les régulariser. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 8 janvier 1872, p. 99. — Sur la théorie dynamique des régulateurs. *Ibidem*, 14 août 1876, p. 418). — Hirsch. *Cours de machines à vapeur* de l'École des ponts et chaussées, feuilles autographiées. — Leduc. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 293. — Marié. *Annales des mines*, 7<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 450; 8<sup>e</sup>, XII, 195. — Wischnegradski (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 51 juillet 1876, p. 518. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. IV, p. 1; V, 192).

<sup>(2)</sup> Léauté (Isochronisme à un degré déterminé, se rapprochant plus ou moins de l'isochronisme rigoureux. *Revue des travaux scientifiques*, septembre 1881, p. 758. — Sur un procédé permettant d'obtenir un degré donné d'isochronisme. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 25 août 1878, 1<sup>er</sup> septembre 1879. — Sur un perfectionnement applicable à tous les régulateurs à force centrifuge. *Journal de l'École Polytechnique*, 47<sup>e</sup> cahier. — Note sur les régulateurs. *Éléments de construction de machines* par Unwin. Traduction de Bocquet. — *Génie civil*, t. X, p. 96). — Pichault. Étude sur les régulateurs de vitesse et sur un nouveau régulateur à boules et à isochronisme approprié. *Génie civil*, 1881, p. 202, 253, 265, 286, 345, 385, 400. — Régulateur Pichault. Victor Lebeau. *Des régulateurs appliqués aux machines*, 1890, p. 64. — Haton de la Goupillière. *Revue des travaux scientifiques*, t. II, p. 249.

<sup>(3)</sup> Hirsch. *La Mécanique à l'Exposition de 1878*, p. 281.

<sup>(4)</sup> Résal. *Annales des mines*, 7<sup>e</sup> série, t. XIII. — Marié. *Ibidem*, 7<sup>e</sup> série, t. XIV,

nier du Corps des constructions navales, un régulateur compris dans la catégorie de ceux que l'on peut à volonté rapprocher de l'isochronisme, sans que toutefois il y rentre rigoureusement par son principe.

Il se compose (fig. 542) d'un double pendule de Watt BOB', de longueur  $l$ , auquel on adapte un losange articulé LMNN'. Un des sommets L de cet organe caractéristique est fixé sur l'axe de rotation, à une distance OL du sommet égale au côté  $a$  du losange. Le second M est adapté au manchon mobile, qui actionne la distribution au moyen

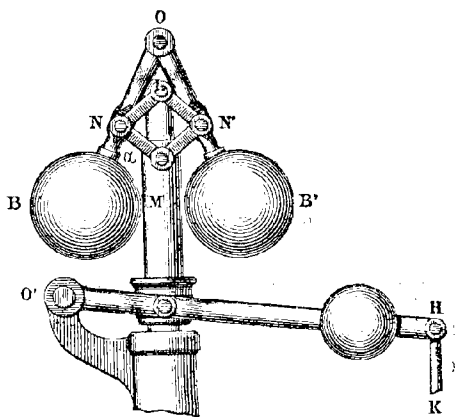


Fig. 542. -- Régulateur Andrade (élévation).

du levier O'H et de la tringle HK. Les deux autres N et N' sont portés par des coulisseaux engagés dans des rainures pratiquées longitudinalement sur les bras du pendule.

Si P désigne le poids de l'une des lentilles, le travail virtuel des forces centrifuges sera pour l'ensemble de ces deux boules (n° 860 et 865) :

$$2 \frac{P}{g} \omega^2 l^2 \sin \alpha \cos \alpha d\alpha,$$

et celui de leur poids (n° 865) :

$$- 2Pl \sin \alpha d\alpha.$$

Appelons Q l'ensemble du poids du manchon avec sa surcharge et de

p. 482. — Lebeau. *Des Régulateurs appliqués aux machines à vapeur*, 1890, p. 48. — Buchetti. *Les Machines à vapeur actuelles*, p. 223. — Uhlend. *Les Nouvelles Machines à vapeur*, p. 94. — *Revue industrielle*, 1876, p. 165. — *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, t. LIX, p. 55. — *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Etienne*, septembre 1878, p. 494. — *Les Mondes*, t. XXXIX, p. 655.

la résistance que lui oppose la distribution, réduite d'après le rapport des bras de levier, de manière à être appliquée par la pensée en M. Le travail virtuel de cette force sera (n° 863) :

$$Qdz,$$

en appelant  $z$  la distance MO, qui a pour valeur :

$$\begin{aligned} z &= a + 2a \cos 2\alpha, \\ dz &= -4a \sin 2\alpha d\alpha = -8a \sin \alpha \cos \alpha d\alpha. \end{aligned}$$

L'équation d'équilibre sera d'après cela, en la débarrassant de suite du facteur commun  $2 \sin \alpha d\alpha$ , dont nous écartons comme ci-dessus les racines  $\alpha_2$  et  $\alpha_3$  (n° 859) :

$$\frac{P}{g} \omega^2 l^2 \cos \alpha - Pl - 4Qa \cos \alpha = 0.$$

On en déduit :

$$\omega^2 = \frac{4Qag}{Pl^2} + \frac{g}{l \cos \alpha}.$$

La valeur de la vitesse angulaire n'est donc pas indépendante de  $\alpha$ . Aussi le modérateur Andrade ne rentre-t-il pas théoriquement dans la catégorie des régulateurs rigoureusement isochrones. Mais il dépend du constructeur de l'y rattacher au degré voulu, que nous devons d'ailleurs (n° 887) laisser à dessein limité. Il suffit à cet effet de disposer arbitrairement de l'un des éléments de l'appareil, de manière à imposer la valeur que l'on jugera convenable au rapport :

$$\frac{1}{4} \frac{Qa}{Pl} \cos \alpha_0,$$

du terme constant de l'expression précédente au maximum du terme variable, lequel correspond au plus grand écart  $\alpha_0$  que la butée permette au pendule.

**889** — *Méthode graphique de M. Dwelshauvers-Dery.* — M. Dwelshauvers Dery a imaginé une méthode graphique fort intéressante<sup>(1)</sup> pour *ausculter*, suivant son expression, les divers types de régulateurs, au moyen d'un tracé graphique représentant toute l'étendue de leur allure réelle. Il s'est proposé notamment de tenir un compte effectif de la résistance opposée au jeu du modérateur par la connexion qui le réunit à la distribution, et par ce dernier organisme lui-même.

A l'inverse de la pesanteur et de la force centrifuge, qui agissent toujours dans le même sens, les résistances passives se retournent diamétralement, suivant que le manchon tend à monter ou à descendre pour manœuvrer la distribution dans un sens ou dans l'autre. De là deux vitesses extrêmes d'équilibre, relatives à chaque situation du manchon, que nous avons désignées ci-dessus par  $\Omega'$  et  $\Omega''$ , et entre lesquelles l'allure reste libre de varier sans arriver à faire jouer le régulateur. De là, en un mot, un intervalle d'*insensibilité* ou de *stabilité*; lequel d'ailleurs, pourvu qu'on le renferme dans de justes limites, doit, ainsi que nous l'avons déjà dit, être considéré comme avantageux, en vue d'éviter l'affolement de l'appareil sous les plus minimes influences.

Pour construire son double graphique, de montée et de descente, l'auteur porte en abscisses les vitesses angulaires, et en ordonnées les hauteurs du manchon<sup>(2)</sup>. Dans ces conditions, un régulateur rigoureusement isochrone fournirait un diagramme purement vertical; puisque le mobile peut alors occuper toutes les positions pour une seule et même vitesse, lorsque l'on suppose nulle la résistance. Mais nous avons reconnu (n° 882) que cette dernière ne doit pas en réalité, sous peine de fausser le fonctionnement, descendre

(1) Dwelshauvers-Dery (Une nouvelle méthode pour l'étude des régulateurs. *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, t. LIX, p. 33. — *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 15 septembre 1890. — *Proceedings of the Institution of civil Engineers*, 1877). — Victor Lebeau. Des régulateurs. *Formules pratiques déduites de la théorie de MM. Beer et Dwelshauvers-Dery*, Liège, 1890, in-8°. — Sinigaglia. *Traité des machines à vapeur*. Traduction de Billy, p. 228. — Haton de la Goupillière. *Revue des travaux scientifiques*, t. IX, p. 494.

(2) M. Sinigaglia a construit également des *diagrammes polaires*. Les angles d'écart sont alors portés en azimut, et les rayons vecteurs sont proportionnels aux vitesses angulaires (*Traité des machines à vapeur*. Traduction de Billy, p. 257).

au-dessous d'un certain degré, et nous venons de rappeler qu'il faut apporter à l'isochronisme un certain tempérament. M. Dwelshauvers Dery s'attache donc spécialement à la considération du régulateur quasi-isochrone, qui permet au moteur d'exécuter un travail variable entre zéro et le maximum que l'on s'est fixé, sans que la vitesse de régime puisse sortir de l'intervalle des deux limites assignées d'avance.

A la clarté de ce procédé graphique, l'auteur étudie en particulier un certain nombre des principaux régulateurs de l'industrie, avec d'intéressants développements dans lesquels nous ne saurions le suivre ici.



## CHAPITRE LI

### RÉGULATEURS DIVERS

#### § 1

#### RÉGULATEURS A FORCE CENTRIFUGE ET A RESSORT

**890** — Les théories du chapitre précédent sont fondées sur l'opposition de la force centrifuge et de la gravité. Il existe une autre catégorie de régulateurs dans lesquels, après avoir éliminé l'influence de la pesanteur, on lui substitue l'emploi des ressorts pour la réalisation d'un semblable antagonisme.

Les conditions sont par là profondément changées, attendu que le poids constituait une force immuable, tandis que l'élasticité varie avec la déformation, tout comme la force centrifuge elle-même.

**891** — *Régulateur Foucault.* — Le premier exemple de régulateur isochrone à ressort a été imaginé par Foucault (1). Cet appareil est symétrique par rapport à l'axe de rotation, et il nous suffit de considérer l'une de ses moitiés (fig. 545). Son aspect présente au

(1) Foucault. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 14 août 1865. — Résal. *Mécanique générale*, t. III, p. 210. — Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 518, 535. — Spineux. *De la distribution de la vapeur dans les Machines*, p. 259. — Worms de Romilly. *Annales des mines*, 7<sup>e</sup> série, t. I, p. 58, 56. — Marié. *Ibidem.* 7<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 454. — Du Moncel. *Lumière électrique*, t. IX, p. 66. — Dwelshauvers-Déry. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1872, t. XXXI, p. 240. — *Les Mondes*, 2 février 1865, 4<sup>re</sup> mai 1866, 20 juin 1867. — Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 503.



et les vitesses des points M et B sont en raison de ces droites, ou de BF et MF. Si donc on considère la boule B comme sollicitée à parcourir sa trajectoire par une force que représente la distance BF de ce point à l'articulation fixe F, celle que transmettra le manchon à la distribution, le sera de son côté par la distance MF de cet organe à la même articulation. En effet, les forces qui agissent aux extrémités de la barre MB doivent, pour son équilibre, être dans le rapport inverse des vitesses virtuelles de leurs points d'application.

**892** — *Régulateur Deprez à ressort.* — M. Marcel Deprez a proposé un régulateur qu'il a cherché à mettre en mesure d'amortir de lui-même les longues oscillations inhérentes à l'isochronisme.

Sur l'articulation A (fig. 544) jouent deux systèmes symétriques par rapport à l'axe de rotation, et dont un seul a été ici représenté. Cette moitié est formée d'un varlet rectangulaire, dont l'une des branches porte la boule B. Nous supposons cette tringle assez longue pour que la lentille puisse être envisagée comme se mouvant horizontalement, et soustraite par conséquent à l'action de la pesanteur <sup>(1)</sup>. L'autre branche, beaucoup plus courte, s'articule en C à une bielle CD, assez longue elle-même pour que nous puissions la considérer comme sensiblement verticale dans toutes les positions du système. Sous l'influence de

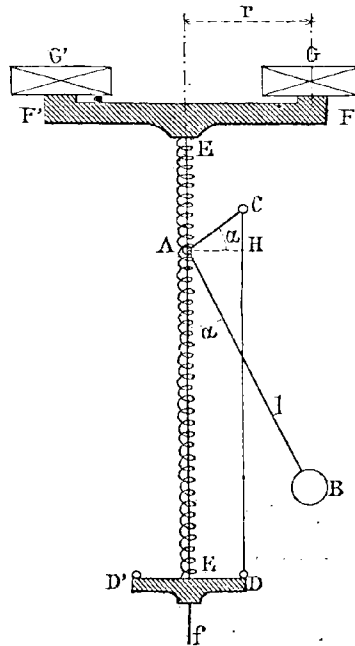


Fig. 544. — Régulateur Deprez à ressort.

<sup>(1)</sup> De telles approximations sont d'autant plus justifiées, que nous savons (n° 887), qu'un certain écart par rapport à l'isochronisme rigoureux est *désirable* dans la pratique.

l'écartement des boules, les bielles soulèvent le plateau DD', qui coulisse sur l'axe  $f$ . Ce mouvement a pour effet de comprimer un ressort EE contre le plateau FF', qui participe à la rotation. Ce dernier frotte contre le disque fixe GG', avec une intensité qui croît comme la tension du ressort.

Pour établir l'isochronisme de ce régulateur, écrivons l'équilibre relatif des forces qui sollicitent le varlet, en égalant à zéro la somme de leurs moments par rapport à la charnière A. La force centrifuge  $\frac{p}{g} \omega^2 l \sin \alpha$  de la boule B a pour bras de levier  $l \cos \alpha$ , et pour moment  $\frac{p}{g} \omega^2 l^2 \sin \alpha \cos \alpha$ .

Le ressort est disposé de manière à se trouver sans tension lorsque la boule est à bas, et que l'articulation C arrive sur l'horizontale AH. Le raccourcissement qu'il a subi est donc égal à CH, ou  $\lambda \sin \alpha$ ; et sa tension peut être mise sous la forme  $e\lambda \sin \alpha$ . Le bras de levier de cette force est  $\lambda \cos \alpha$ , et son moment  $e\lambda^2 \sin \alpha \cos \alpha$ ; mais la moitié seulement  $\frac{1}{2} e\lambda^2 \sin \alpha \cos \alpha$  doit être équilibrée par celle des deux lentilles que nous avons considérée, à l'exclusion de l'autre.

On voit que les deux moments renferment le même facteur  $\sin \alpha \cos \alpha$ , qui disparaît de l'équation en assurant l'isochronisme. Il reste seulement comme condition à remplir, dans l'établissement du système :

$$p\omega^2 l^2 = 2ge\lambda^2.$$

**893** — Montrons en second lieu que le frottement du plateau agit comme un frein puissant, pour amortir rapidement les oscillations inséparables de l'isochronisme.

Le travail ainsi détruit par seconde est le produit du chemin  $2N\pi r$  <sup>(1)</sup>, que décrit en une seconde la couronne frottante de rayon moyen  $r$ , par le coefficient de frottement  $f$ , et par la force du

(1) Nous désignons ici par  $N$  le nombre de tours par seconde de l'axe du régulateur, qu'il ne faut pas confondre avec le nombre  $n$  de tours par minute de l'arbre du moteur. Ces deux nombres, dont le dernier nous sert habituellement de caractéristique, restent proportionnels l'un à l'autre dans toutes les variations de l'allure.

ressort  $e\lambda \sin \alpha$ . En divisant cette valeur par 75, nous l'exprimerons en chevaux :

$$\frac{2 N \pi f e r \lambda \sin \alpha}{75}$$

Mais on déduit de l'équation précédente :

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \frac{p}{g} (2N\pi)^2 \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2 = \frac{2N^2 \pi^2 p l^2}{g \lambda^2}$$

La puissance retardatrice devient par là :

$$\frac{4 \pi^5}{75 g} \cdot f \cdot \frac{N^5 p r l^2}{\lambda} \cdot \sin \alpha,$$

ou en effectuant :

$$0,1684 f \frac{N^5 p r l^2}{\lambda} \sin \alpha.$$

Si l'on admet la valeur 0,15 pour le coefficient  $f$  (que l'on n'a pas, comme à l'ordinaire, intérêt à diminuer dans le cas actuel), il viendra définitivement :

$$0,0252 \frac{N^5 p r l^2}{\lambda} \sin \alpha.$$

Pour nous faire une idée effective de ce résultat, envisageons les hypothèses suivantes :

$$N = 5; \quad p = 5^{kg}; \quad r = 0^m,5; \quad l = 0^m,5; \quad \lambda = 0^m,05.$$

On trouve alors :

$$59 \sin \alpha.$$

En admettant par exemple que le pendule se tienne dans les environs de 30 degrés, la puissance retardatrice serait de 20 chevaux, c'est-à-dire très considérable.

Un certain nombre d'autres dispositions ont encore été imaginées

par divers inventeurs, pour opposer l'action d'un ressort à la force centrifuge d'un appareil à boules (4).

**894** — *Régulateur Duvoir*. — On a en outre proposé pour les masses tournantes des formes très différentes des boules et des lentilles.

Je citerai par exemple le régulateur à anneau de Saturne de Duvoir (5). Un tore métallique, dont un diamètre est assemblé perpendiculairement à l'axe de rotation, et qui, étant centré, se trouve soustrait à l'action de la pesanteur, est susceptible de se coucher sur cet axe sous l'action d'un ressort, ou de se redresser par l'influence de la force centrifuge. Ce système est doué de propriétés fort curieuses au point de vue théorique (6). Il semble toutefois avoir disparu de la pratique.

On en peut dire autant de quelques autres régulateurs *gyroscopiques* (4).

**895** — *Régulateur Armington et Sims*. — Un principe qui paraît au contraire jouir d'une grande faveur est celui des régulateurs *directs*. Les masses tournantes présentent alors une figure

(4) Je mentionnerai notamment les suivantes : LE CREUSOT. Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 355. — DAMEY. Hirsch. *La mécanique à l'Exposition de 1878*, p. 278. — ERICSON. Spineux. *De la distribution de la vapeur dans les machines*, p. 257. — FARCOT. Hinn. *Théorie des régulateurs marins isochrones de Farcot*, in-8°. — FRIMOT. Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 305. — GÉRIN. Spineux. *De la distribution de la vapeur dans les machines*, p. 254, 262. — JENKIN. *Ibidem*, p. 239, 256. — JENSEN. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1<sup>re</sup> série, t. VI, p. 326. — PICKERING (*Ibidem*, 1872, t. XXXI, p. 221. — Spineux. *De la distribution de la vapeur dans les machines*, p. 253). — ROOT. *Ibidem*, p. 257. — SILVER. (Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 285. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1<sup>re</sup> série, t. I, p. 191). — WATT (*Ibidem*, t. XXXI, p. 212. — Gallon. *Cours de machines*, t. II, p. 274).

(5) Armengaud. *Publication industrielle*, t. XIII, p. 470.

(6) Haton de la Goupillière (*Annales des Mines*, 5<sup>e</sup> série, t. XVIII, p. 575. — *Traité des mécanismes*, p. 305).

(4) Je mentionnerai notamment les suivants : ANDERSON. Spineux. *De la distribution de la vapeur dans les machines*, p. 271. — BROTHERHOOD et HARDINGHAM. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXXV, p. 45. — DAVIES JONAH. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, 1853, t. VI, p. 296. — SCHRADER. — GEORGE de TIPTON. — Régulateur sphérique de BOURNE. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXIX, p. 250.

à peu près quelconque. Elles sont, avec leurs articulations et leurs ressorts, logées à l'intérieur du volant. Ce type est essentiellement destiné aux machines douées d'une grande vitesse. On dispose alors d'une force centrifuge très intense sous un volume restreint. L'action est puissante et simple; sans danger pour les imprudents.

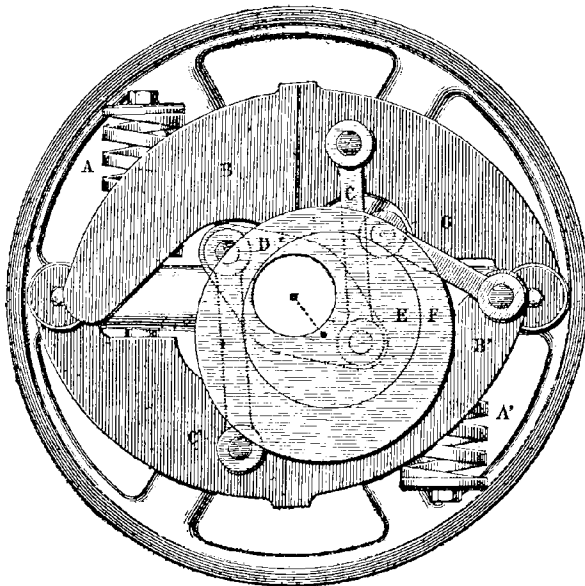


Fig. 545. — Régulateur Armington et Sims (élévation).

Je décrirai comme exemple le *régulateur d'Armington et Sims*<sup>(1)</sup>. Les ressorts A et A' (fig. 545) travaillent par compression pour résister à la force centrifuge des masses B, B'. Ces dernières actionnent, à l'aide de bielles C, C', la pièce D qui fait corps avec un premier excentrique E. Mais celui-ci est enveloppé d'un second anneau excentrique F (n° 754), qu'une bride G met lui-même en relation avec la masse B'.

<sup>1)</sup> Martin. *Bulletin technologique de la Société des anciens Elèves des Ecoles d'arts et métiers*, juin 1886, p. 317. — Buchetti. *Les machines à vapeur actuelles*, supplément, p. 29. — Dwelshauvers Dery. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 3<sup>e</sup> série, t. VII, p. 173. — *Congrès international de mécanique appliquée de 1889*. t. II, p. 52.

Suivant que les ressorts cèdent plus ou moins à la force centrifuge, l'excentrique E change d'orientation et d'angle de calage. Il suffirait donc déjà qu'il commandât directement la distribution pour faire varier la détente. Mais on ménage encore, par l'intermédiaire de la bielle G, une certaine action de la force centrifuge, en interposant l'excentrique annulaire F, qui peut tourner sur le noyau E, et obéir pour son propre compte aux influences

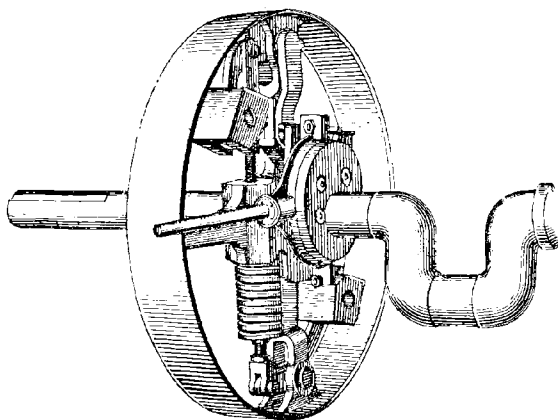


Fig. 546. — Régulateur Turner-Hartnell (vue perspective).

variables qui le sollicitent. On s'attache empiriquement, dans la construction, à combiner ces divers éléments de manière à réaliser des avances sensiblement constantes.

On rencontre un type analogue dans le *régulateur Turner-Hartnell et Guthrie*<sup>(1)</sup>, que représente la figure 546. Il en existe également un certain nombre d'autres<sup>(2)</sup>.

(1) Richard. *La lumière électrique*, t. XXXI, p. 252. — *Revue industrielle*, 22 octobre 1884, p. 425. — *Journal de la meunerie*, juin 1889, p. 226. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXXV, p. 53; 1875, p. 166, 169. — Kennedy. *The mechanics of machinery*, p. 382. — *Proceedings of the Institution of mechanical Engineers*, août 1882, p. 407. — Buchetti. *Les machines à vapeur actuelles*, supplément.

(2) Je mentionnerai notamment les suivants : BAATE. — BERGER et NOEL. *Scientific American*, 13 avril 1889, p. 250. — BOULER (Buchetti. *Les machines à vapeur actuelles*, supplément, p. 31. — *Revue annuelle des mines et de la métallurgie*, 5<sup>e</sup> série, t. VII, p. 178). — BRULÉ. *La lumière électrique*, 2 mai 1889, p. 407. — BUCHEYE. — DANIEL. —



## § 2

## RÉGULATEURS A RESSORT

**896** — *Régulateur Poncelet.* — Nous abandonnons ici le terrain de la force centrifuge, pour envisager certains régulateurs dans lesquels l'élasticité entre seule en jeu. On peut faire intervenir à cet égard celle des solides ou celle des gaz.

Poncelet <sup>(1)</sup> a proposé un modérateur fondé sur l'emploi d'un ressort d'acier <sup>(2)</sup>.

Sur un même arbre (fig. 547) sont montés deux pignons, l'un calé C, l'autre fou F. Ils engrènent respectivement avec deux roues C', F', la première calée, la seconde folle sur un arbre parallèle au premier. La force motrice se transmet de C à F par l'intermédiaire de C' et F'. Mais, entre ces deux dernières, il n'y a de communication qu'au moyen d'une lame élastique, dont la flexion accuse l'intensité

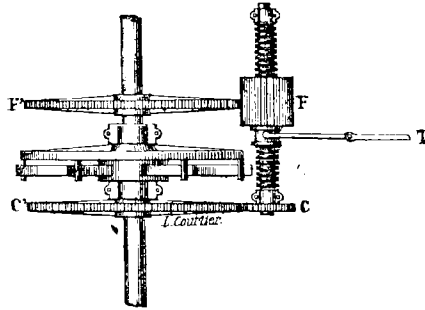


Fig. 547. — Régulateur Poncelet (plan).

DONFEL. Buchetti. *Les machines à vapeur actuelles*, supplément, p. 31. — GRIST. *American machinist*, 13 octobre 1883, p. 5. — HADLEY. — HOFFMANN. *Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. XV, p. 50. — LECOUTEUX et GARNIER (Dwelshauvers-Bery. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 3<sup>e</sup> série, t. VII, p. 176. — *Congrès international de mécanique appliquée de 1889*, t. II, p. 32). — MOLARD. — (ERLIKON. — PERRINE. *La lumière électrique*, t. XXXI, p. 254. — LE PHOENIX. *Ibidem*, 25 février 1889, p. 361. — STURTEVANT. *American machinist*, 20 octobre 1888, p. 8. — TAILOR. — WESTINGHOUSE. — YDE.

<sup>(1)</sup> Poncelet. *Cours de mécanique appliquée aux machines*, publié par Kretz, p. 410. — Marié. *Annales des Mines*, 7<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 513. — Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 253. — Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 308.

<sup>(2)</sup> Je mentionnerai encore dans le même ordre d'idées les régulateurs suivants : FRAYSSINES et TOURTAY. *La lumière électrique*, 25 décembre 1886, p. 67. — MAC GEORGES. Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction Richard, p. 595. — MILLER et KNILLS. Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 254.

de l'effort transmis. Si la résistance vient à augmenter, ce ressort se bande davantage. De là un retard angulaire plus prononcé qu'auparavant entre  $C'$  et  $F'$ , et par suite entre  $C$  et  $F$ . Mais la roue  $F$ , au lieu de tourner folle purement et simplement, est montée à vis sur son arbre. La désorientation qu'elle subit s'accompagne donc d'une translation longitudinale. Pour ce motif, on a soin de lui donner la forme d'un *long pignon*, afin qu'elle ne cesse pas, malgré ce déplacement latéral, d'engrener avec  $F'$ . C'est précisément ce mouvement rectiligne de  $F$ , variable avec l'intensité de la force transmise, que l'on utilise à l'aide d'un levier  $T$  pour agir sur le distributeur.

**897** — *Régulateur Larivière*. — On doit à Larivière (\*) un modérateur fondé sur l'emploi d'un ressort gazeux.

Une petite pompe pneumatique, mue directement par la machine, extrait l'air d'un récipient cylindrique, avec une activité proportionnelle à la vitesse de ce moteur. Un orifice laisse, d'autre part, s'opérer une rentrée de l'atmosphère extérieure, dont le débit varie peu avec l'état de la pression intérieure. Il s'opère donc dans le cylindre, en cas d'accélération du moteur, un degré de raréfaction qui suit de près les variations de l'allure, et qui est capable de mouvoir un piston en partie équilibré, dont les déplacements se transmettent à la distribution.

On reste maître de modifier la sensibilité de l'appareil en réglant, au moyen d'une petite vanne, la section du sifflet de rentrée, qui permet dès lors à l'air de venir plus ou moins promptement combler le déficit de la tension intérieure.

**898** — Dans quelques types analogues (\*\*), on a substitué la

(\*) Rézal (*Annales des Mines*, 7<sup>e</sup> série, tome II, 1872. — *Mécanique générale*, t. III, p. 213). — Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 256. — Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 308.

(\*\*) Je mentionnerai notamment les régulateurs : BRANCHE. — CUNLIFFE et DUNLOP (Ledieu. *Les nouvelles machines marines* . II, p. 258. — Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction Richard, p. 595. — *Proceedings of the Institution of mechanical Engineers*, août 1879, p. 406). — MOLINIÉ (Spineux. *De la distribution de la vapeur dans les machines*, p. 275. — Ledieu. *Les nouvelles machines marines*, t. II, p. 257).

compression à la raréfaction de l'air. Le fonctionnement de l'appareil reste d'ailleurs le même en principe.

## § 5

## RÉGULATEURS A LIQUIDE

**899** — *Régulateur hydraulique.* — Il convient de rapprocher du modérateur Larivière le *régulateur hydraulique*, qui fonctionne d'une manière toute semblable, avec la substitution de la pression de l'eau à l'élasticité de l'air <sup>(1)</sup>.

Une petite pompe mue directement par la machine remonte l'eau dans un bief supérieur, avec une activité proportionnelle à celle de ce moteur. Un orifice laisse redescendre librement le liquide. Comme le débit de cet écoulement ne sera que peu influencé par les variations du niveau, un flotteur traduira fidèlement les alternatives de la puissance motrice, et il suffira de le faire agir sur la distribution. Un semblable appareil entrerait difficilement dans la composition d'une machine à vapeur, mais il peut rendre des services pour certains moteurs hydrauliques.

**900** — Ce principe a été modifié par Bourdon d'une manière élégante. Au lieu du jeu alternatif et compliqué d'une pompe, on a recours à la force centrifuge pour relever, d'une manière variable avec la vitesse, le niveau du liquide dans un branchement implanté latéralement sur le vase tournant qui renferme ce dernier. La forme d'équilibre relatif est dans ce cas un paraboloïde de révolution, qui a pour paramètre  $\frac{g}{\omega^2}$  <sup>(2)</sup>. La parabole méridienne se repliant d'après

<sup>(1)</sup> Poncelet. *Cours de mécanique appliquée aux machines*, publié par Kretz, p. 75. — Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 509.

<sup>(2)</sup> Le profil méridien de cette surface de révolution n'est autre en effet que la courbe d'équilibre le long de laquelle un point matériel peut se maintenir, sous l'action combinée de la gravité et de la force centrifuge. En d'autres termes, il ne diffère pas de la courbe d'isochronisme que nous avons trouvée (n° 867), et qui n'est autre que la parabole de paramètre  $\frac{g}{\omega^2}$ .

cela plus ou moins sur elle-même suivant les variations de  $\omega$ , rencontrera le tube latéral en des points plus ou moins élevés (1).

**901** — *Régulateur Deprez à air*. — L'action des fluides a encore été utilisée d'une autre manière pour la régularisation des machines. Au lieu du rôle en quelque sorte statique qu'ils jouent par leur pression dans les exemples précédents, on fait intervenir l'influence nettement dynamique qui est connue sous le nom de *résistance des milieux*, et l'on fait battre par une roue à palettes, soit l'air de l'atmosphère, soit l'huile enfermée dans une boîte (2).

J'indiquerai d'abord à ce point de vue le *régulateur à air de M. Marcel Deprez* (3). A la vérité son emploi ne s'est pas répandu dans la pratique, mais l'analyse de son principe nous permettra de jeter un certain jour sur cette question délicate et importante.

Nous avons vu (n° 880) que la puissance du régulateur est ordinairement puisée dans l'emploi de masses importantes, mais que cependant il existe à cet égard une autre voie, consistant à douer les pièces de grands déplacements. Il est vrai que cette explication a été présentée ci-dessus pour les régulateurs à force centrifuge. Mais l'assimilation est ici permise pour l'emploi de la résistance de l'air, puisque ces influences sont l'une et l'autre proportionnelles au carré de la vitesse.

C'est précisément à ce dernier point de vue que s'est placé

(1) Indépendamment des régulateurs à liquide que nous décrivons ici, je mentionnerai encore les suivants : BELL et FULLER. *Scientific American*, 21 juin 1886, p. 537. — BILLORET. — CHURCHILL. *Engineering*, 17 janvier 1890, p. 74. — COIGNET. Régulateur à mercure. *Revue industrielle*, 17 mars 1880, p. 401. — CORBERON. Spineux. *De la distribution de la vapeur dans les machines*, p. 249. — COUTTS et ADAMSON. — GRÉCOIRE. *Ibidem*, p. 226. — Régulateur ISOMÉTRIQUE. *Scientific American*, 10 mars 1885, p. 147. — MAZELINE. Leducq. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 259. — MOUCAIEFF. — ROSAYE. Tachymètre-régulateur à liquide. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Ecoles d'arts et métiers*, janvier 1888, p. 695. — SMITH et PICKENEY.

(2) Outre les exemples que nous décrivons ici, je mentionnerai encore les suivants : HICK. Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction Richard, p. 66. — LE ROUX. *Annales du Conservatoire des Arts et Métiers*, t. VII. — MOISON. Spineux. *De la distribution de la vapeur dans les machines*, p. 270. — SILVER. Leducq. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 260. — SMITH. Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction Richard, p. 66.

(3) Hirsch. *La mécanique à l'Exposition de 1878*, p. 288.

M. Marcel Deprez. Il y trouve l'avantage d'alléger les poids, et de diminuer par suite les frottements. Il a du reste, pour cette réalisation, abandonné la force centrifuge, pour s'attacher de préférence à la résistance des milieux.

**902** — La figure schématique 548 indique en A, A' deux poulies fixes, dont la première se trouve directement en communication avec l'arbre moteur. Au-dessous d'elles se trouvent deux poulies mobiles B, B' qui portent, suspendus à leurs chapes, des poids P, P'. Une chaîne sans fin de Gall les embrasse toutes les quatre, en passant en outre sur l'arbre C d'un volant à ailettes.

Ce dernier ne se trouve donc pas en rapport *direct* avec le moteur, qui sans cela lui imposerait ses propres accélérations. Il n'est sollicité que par les tensions des brins  $\alpha$ ,  $\alpha'$  de la chaîne. Ces deux forces, dans un mouvement rigoureusement uniforme, seraient égales aux poids, et par suite constantes. Nous pouvons pour le moment, sauf à revenir plus loin sur ce point (n° 903), admettre qu'elles ne seront que peu affectées par l'influence des accélérations subies par les poids, et faire abstraction de cette perturbation. L'allure du volant à ailettes sera par suite uniforme.

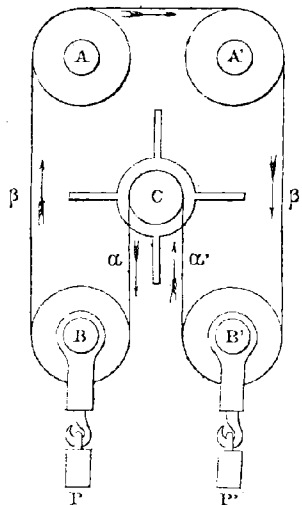


Fig. 548.  
Régulateur à palettes Deprez.  
(Figure schématique).

Si donc la poulie A, qui est immédiatement commandée par le moteur, vient à prendre une accélération subite, les brins  $\beta$ ,  $\beta'$  y participent nécessairement, tandis que  $\alpha$  et  $\alpha'$  conservent au contraire la vitesse tangentielle invariable de l'arbre C. Il s'ensuit que l'axe B doit s'élever, tandis que B' descendra. C'est ce mouvement qui est utilisé pour agir sur la distribution.

Le système se ralentit dès lors sous cette influence, et reprend, sans avoir besoin de changer de nouveau de position, un régime

uniforme, qui ne peut être que celui de l'isochronisme, car l'équilibre ne saurait exister que pour une seule et même vitesse entre la résistance de l'air et la différence des tensions, redevenue rigoureusement égale à la différence des poids.

On reste d'ailleurs maître de la valeur de cette vitesse, en établissant sur l'un des poids une surcharge arbitraire, pour modifier la différence de tension qui est équilibrée par la résistance du milieu.

Ainsi que nous l'avons annoncé, l'on peut, avec ce dispositif, communiquer aux poids  $P$ ,  $P'$  de très grands déplacements, puisque l'on dispose à volonté des rayons des poulies.

**903** — Il est intéressant de faire remarquer que non seulement l'isochronisme s'obtient dans le régime permanent, mais qu'il serait possible, si cela présentait de l'intérêt, de le maintenir pendant la phase même de déformation. Il en sera ainsi en effet, pourvu que l'on adjoigne au système un régulateur Foucault à ailettes pour gouverner son arbre  $C$ .

Imaginons que l'on ait effectué une telle addition, en remplaçant les boules du modérateur Foucault (n° 890) par des ailettes situées dans le plan méridien. L'arbre moteur  $A$  venant à prendre une accélération subite, le poids  $P$  s'élève au prix d'une augmentation de la tension du brin  $\beta$ . Comme celle-ci se répercute en partie sur  $\alpha$  (circonstance que nous avons négligée tout à l'heure), le treuil  $C$  commence en réalité à ressentir une certaine accélération, et sa vitesse  $\omega$  va devenir  $\omega + d\omega$ . Mais une telle altération est incompatible avec l'isochronisme du régulateur Foucault, qui participe à son mouvement. Celui-ci se déforme donc, et ses ailettes ne cesseront de s'écarter tant que subsistera la tendance en question, et que la vitesse angulaire ne sera pas rentrée rigoureusement dans sa valeur  $\omega$ .

Or la vitesse circonférentielle des ailettes est proportionnelle à leur rayon d'écartement. La résistance de l'air l'est de son côté au carré de cette vitesse. Son moment sera par conséquent en raison du cube de ce rayon, et augmentera avec une extrême rapidité. Il fournit ainsi, pour l'arbre  $C$ , un supplément de résistance qui

équilibre presque instantanément l'augmentation de tension du brin  $\alpha$  (<sup>1</sup>). Aussi peut-on admettre que cet axe conservera, pendant la phase même de déformation, une constance d'allure véritablement complète.

**904** — *Régulateur Deprez à huile.* — Le type précédent serait fort encombrant, en raison même du but qu'on s'y était proposé, à

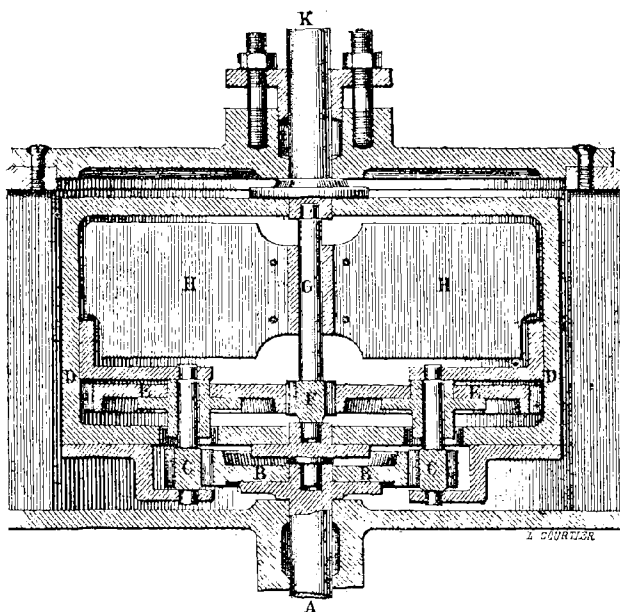


Fig. 549. — Régulateur Deprez à huile (coupe méridienne).

savoir le grand développement des espaces parcourus. En conservant son principe essentiel, M. Marcel Deprez l'a transformé par la substitution de l'huile à l'air, comme milieu résistant. L'action devient par là beaucoup plus efficace sous un petit volume.

Un arbre A (fig. 549) mis en communication directe avec celui

(<sup>1</sup>) Il suffirait par exemple que le rayon de rotation des ailettes du modérateur Foucault vint à doubler, pour que le moment devint 8 fois plus grand; ce qui permettrait, tout en continuant à équilibrer la tension du brin  $\alpha$ , de disposer en outre de 7 fois sa valeur pour contrebalancer un accroissement égal de cette tension: prévision qui est en dehors de toutes les probabilités.

de la machine, pénètre, à travers une garniture, dans la boîte qui renferme le liquide. Il commande par un engrenage B deux roues C, C, dont les axes sont montés sur un cadre mobile D. Ces arbres portent eux-mêmes des roues dentées E, E, engrenant avec un pignon F, qui est calé sur un arbre G, distinct du premier, et portant des ailettes H. Enfin un axe K, fixé au cadre D, sort de la boîte à travers un second presse-étoupe. Sur cet arbre K, passe une chaîne supportant un poids.

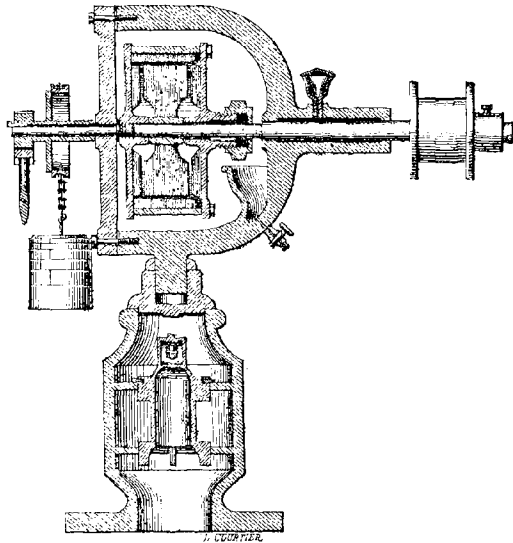


Fig. 550. — Régulateur Allau (coupe longitudinale).

**905** — La rotation de l'arbre A entraîne celle de B, C, E, F, G. L'arbre G, ainsi forcé de tourner, tend à déplacer l'huile, dont des diaphragmes gênent les tourbillonnements. Si ce milieu était sans résistance, le cadre n'aurait aucune raison de changer de place. Si au contraire on lui attribue par la pensée une résistance infinie, les palettes H, ainsi butées contre un obstacle infranchissable, transmettront en sens contraire des réactions jusqu'aux pivots C, C implantés dans le cadre D, que rien n'empêche de leur obéir.

La vérité se trouve entre ces deux hypothèses trop absolues; et



le cadre D, avec son axe K, prendra un certain déplacement sous l'empire d'une force due à la résistance effective du liquide, c'est-à-dire proportionnelle au carré de la vitesse de l'arbre G. C'est précisément cette force que l'on équilibre au moyen du poids suspendu à une chaîne, qui passe sur une poulie montée sur cet axe K, pour empêcher le cadre D de céder indéfiniment à cette tendance.

Un état de régime s'établit; et ce mouvement uniforme met en

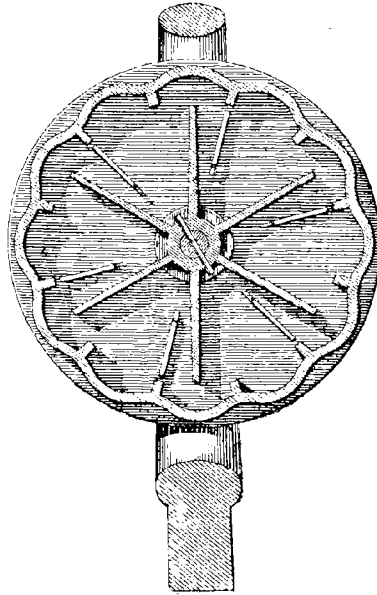


Fig. 531. — Régulateur Allan (coupe transversale).

équilibre, d'une part, la force qui tend à entraîner le cadre DK, et qui résulte du point d'appui partiel que prennent les palettes sur l'huile, et de l'autre les diverses résistances passives du système, auxquelles s'adjoint la tension de la chaîne enroulée sur l'arbre K.

Si la vitesse du moteur vient à augmenter, l'équilibre est détruit. Le poids monte, en augmentant la tension de la chaîne; et ce mouvement est utilisé pour agir sur la distribution et raccourcir progressivement l'admission, tant que ce corps ne se sera pas arrêté

dans son ascension par le rétablissement de l'équilibre, c'est-à-dire de l'ancienne vitesse de régime, qui seule en est capable.

**906** — *Régulateur Allan*. — Le dispositif précédent est analogue à celui d'Allan<sup>(1)</sup>; toutefois il présente plus de netteté dans le principe de son jeu, la communication des efforts de proche en proche s'opérant par des réactions de corps solides.

Dans le modérateur d'Allan (fig. 550, 551), les effets ne se transmettent de la machine à l'arbre chargé d'un poids, que par l'action que l'huile, battue par les palettes, exerce sur les sinuosités de son enveloppe, qui a la forme d'un cylindre ondulé, et sur les diaphragmes qui hérissent cette dernière à l'intérieur.

## § 4

### REGULATEURS CHRONOMÉTRIQUES

**907** — On a encore pensé à demander la régularisation des machines à la comparaison directe de leur allure avec *un mouvement d'horlogerie*, appareil isochrone par excellence, que l'on suppose réglé pour la vitesse précise du régime que l'on a en vue. Ce système a reçu le nom de *régulateur différentiel*, ou *régulateur chronométrique*<sup>(2)</sup>. Le dispositif suivant peut en donner une idée (fig. 552).

La roue A est mue directement par le mouvement d'horlogerie. De son côté le moteur actionne en sens contraire la roue B, identique à la première. Entre elles se trouve une roue *planétaire* C<sup>(3)</sup>

(1) Leduc. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 259. — *Annales des mines*, 7<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 514. — *Bulletin de la Société d'Encouragement*, 1871, t. XVIII, p. 30. — *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, juillet 1875, p. 1; octobre 1875, p. 10; mai 1876, p. 1. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1874, p. 107. — *Société des Ingénieurs civils de Londres*, 1<sup>er</sup> mai 1875.

(2) Je citerai notamment les régulateurs : BÉNÉST. Spineux. *De la distribution de la vapeur dans les machines*, p. 250. — COLLIN. HIRSCH. *La mécanique à l'Exposition de 1878*, p. 288. — MAYNARD et BAYLIE. RANKINE. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction Richard, p. 594. — Régularisation au moyen d'une machine à mouvement uniforme. Leduc. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 255.

(3) Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 146.

sollicitée par les précédentes aux deux extrémités de l'un de ses diamètres. Si c'est avec la même vitesse de la part de chacune d'elles, cette rotation pourra évidemment s'effectuer sur place. Mais si l'allure de B vient à changer, tandis que celle de A reste immuable par hypothèse, la roue C recevant des deux côtés des vitesses composantes inégales, l'axe  $c$  sur lequel elle est folle ne saurait rester immobile. Il tend donc à sortir du plan de la figure, en décrivant un plan rectangulaire. A cet effet, il est assemblé perpendiculairement à l'arbre  $\gamma$ , placé dans l'alignement des deux premiers.

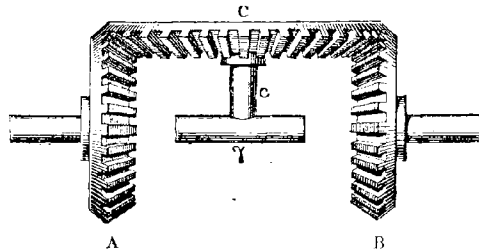


Fig. 552. — Régulateur chronométrique (élévation).

On voit que cet axe accusera par ses mouvements de rotation les anomalies du régime du moteur. Si donc on le met en rapport avec la distribution, il pourra servir à la régler en conséquence. En imaginant par exemple que la machine s'emporte,  $\gamma$  tourne dans le sens qui a pour effet de restreindre l'admission. Le moteur se calmera peu à peu, et quand la vitesse normale se trouvera rétablie, toute tendance au déplacement ayant cessé pour la roue planétaire, son axe restera dans la position où il aura conduit le mécanisme de la distribution.

## § 5

### RÉGULATEURS ÉLECTRIQUES

**908** — Les relations qui s'établissent d'une manière de plus en plus intime, dans la mécanique moderne, entre le travail dynamique et l'électricité, devaient naturellement amener l'apparition

de cet agent dans la question de la régularisation (1). On demande alors de doser à chaque instant la puissance de la machine motrice qui conduit une dynamo, de manière à maintenir la constance du courant.

Ce genre d'appareils comporte deux catégories distinctes, suivant que leur action est directe ou indirecte. Dans les premiers, l'électricité agit par elle-même sur la distribution, tout comme la pesanteur, l'élasticité ou la force centrifuge dans les systèmes précédents. Les autres fonctionnent au contraire à deux degrés, à la manière du servo-moteur. La faiblesse de l'action des solénoïdes doit engager en effet, pour les machines puissantes, à ne faire agir leur armature que sur un très petit distributeur, qui serve à engager le piston d'un cylindre auxiliaire : hydraulique ou à vapeur, destiné à commander lui-même la distribution du moteur.

**909** — *Régulateur Carus Wilson.* — Cet appareil est à action directe. Le courant produit par le moteur traverse l'électro-aimant

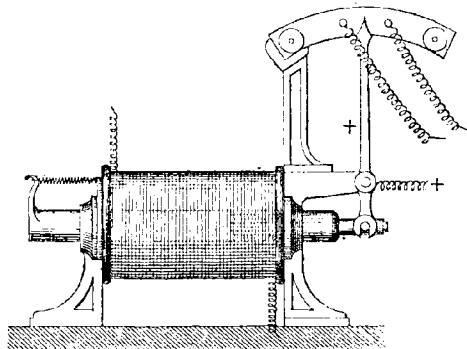


Fig. 555. — Régulateur électrique de Carus Wilson (élévation).

horizontal (fig. 553), dont l'armature attire plus ou moins fortement l'aiguille, suivant les variations de l'intensité. Si celle-ci augmente, l'aiguille vient toucher la borne, et le courant passe partiellement

(1) Gustave Richard. Les régulateurs électriques. *La lumière électrique*, 24 mai 1884, p. 503 ; 17 janvier 1885, p. 100. — Kummer. *Ibidem*, 31 octobre 1885, p. 225. — M. Deprez. *L'électricité*, p. 76. — *La lumière électrique*, t. XIX, p. 34.

à travers l'électro inférieur (fig. 554), dont l'armature agit sur le

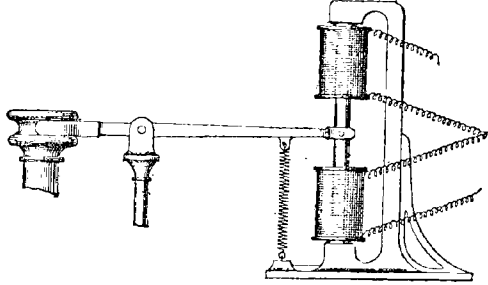


Fig. 554. — Régulateur électrique de Carus Wilson (élévation).

levier, et soulève le manchon du régulateur en raccourcissant l'admission. Si l'intensité faiblit, l'aiguille vient au contact de l'autre borne. Le courant traverse l'électro-aimant supérieur, dont l'action abaisse le manchon, et prolonge la phase de pleine pression.

**910** — *Régulateur Willans.* — Ce régulateur est à action indirecte (fig. 555). La tringle A qu'il s'agit de mouvoir est commandée par la tige creuse B d'un gros piston C, environné sur son pourtour d'eau sous-pression, qui est fournie par la conduite D. A l'intérieur de C, se meut un petit piston E, sollicité par l'armature de l'électro-aimant F.

Si la force électro-motrice augmente, E se trouve soulevé et, à travers le tube central, il ouvre l'évacuation de l'eau qui baigne la face supérieure du piston C, en admettant la pression au-dessous de lui par un jeu de conduits. Ce piston monte donc à son tour,

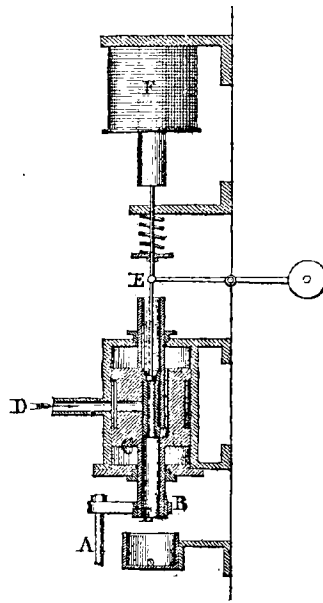


Fig. 555. — Régulateur électrique de Willans (coupe).

en exerçant un effort qui est capable de soulever A, et que l'on n'aurait pu demander directement à l'électro-aimant (1).

**911** — *Régulateur Ledieu*. — M. Ledieu (2) a mis en avant une idée intéressante. Il fait en sorte que l'action réparatrice du régulateur *précède* dans une certaine mesure, très courte bien entendu mais toutefois efficace, l'altération d'allure produite par la suppression brusque d'une partie de la résistance, dans un atelier où des outils nombreux et massifs sont en action d'une manière indépendante les uns des autres, espacés souvent sur de grandes longueurs.

Au moment d'un débrayage partiel, de nature à produire une accélération dans l'ensemble lorsque la transmission à cette distance aura pu s'effectuer en tenant compte des jeux, de l'élasticité, etc., l'organe de manœuvre laisse passer le courant d'une pile dans un fil qui aboutit à une petite dynamo, installée près d'un régulateur ordinaire que l'on a soustrait à l'action de la pesanteur. Celui-ci a dès lors le temps de préparer son action, avant que l'accélération ait pu développer tous ses effets.

On associe d'ailleurs à l'arbre de couche un indicateur instantané du nombre de tours, qui commande un commutateur destiné à laisser passer le courant, tant que la vitesse est égale ou supérieure à sa valeur normale; tandis qu'il le renverse, dès que l'allure tombe au-dessous de ce degré.

## § 6

### CONNEXION

**912** — *Connexion directe ou indirecte*. — Jusqu'ici nous avons laissé de côté la manière dont la déformation du régulateur, quel qu'il soit, sera utilisée pour modifier l'admission du fluide moteur. Il convient d'aborder enfin ce point (3). Notons d'abord l'intérêt qui

(1) Je mentionnerai encore, dans cet ordre d'idées, les régulateurs COOK, RICHARDSON, WESTINGHOUSE (Richard. *La lumière électrique*, 24 mai 1884, p. 505).

(2) Ledieu. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CX, p. 618.

(3) Léauté (Marche rationnelle à suivre en pratique pour l'établissement d'un régu-

s'attache à ce que les pièces de cette connexion soient équilibrées et soustraites à l'influence de la gravité. Sans cette précaution, trop souvent négligée, l'influence du régulateur ne se fait pas sentir également dans les deux sens.

Un premier système d'attaque consiste à manœuvrer directement la valve qui est installée sur la conduite d'amenée de la vapeur. Dans un second type, on met en relation le modérateur avec la distribution proprement dite, de manière à faire varier la période d'admission <sup>(4)</sup>. Il est bon également de disposer, parmi les organes qui relient le régulateur avec la machine, en vue des cas où celle-ci viendrait à s'emporter, un moyen de faire tomber la courroie de transmission, en coupant complètement la vapeur.

**913** — La connexion peut être directe ou indirecte. Le premier mode expose à une grande instabilité, en faisant retentir sur la distribution les moindres perturbations du modérateur. En outre, il est

lateur à action directe. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. LXXXIX, p. 451, 473; CII, 497; 2 juillet 1888. — Marche rationnelle à suivre en pratique pour l'établissement d'un appareil de régularisation à action indirecte. *Ibidem*, 1<sup>er</sup> mars, 13 décembre 1886. — *Compte rendu des travaux de la Société de l'industrie minière de Saint-Étienne*, 1886, p. 69). — Bérard et Léauté (Sur les moyens de réduire les accroissements momentanés de vitesse dans les machines munies de régulateurs à action indirecte. *Mémorial des poudres et salpêtres*, t. II. — *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. C, p. 1241; CIII, 4167; CIV, 657). — Débrayage Bodemer. Hirsch. *La mécanique à l'Exposition de 1878*, p. 286.

<sup>(4)</sup> De ces deux procédés, le premier présente en général beaucoup moins de résistance à vaincre; mais il est inférieur au second au point de vue théorique. Nous avons en effet reconnu (n° 654) que le résultat économique fourni par un poids déterminé de vapeur est plus satisfaisant avec l'étirage aux lumières. D'ailleurs la formule de Poncelet (t. I, p. 819) nous fournit, pour la somme des travaux de pleine pression et de détente, l'expression suivante :

$$p_1 v_1 \left( 1 + L \frac{p_1}{p_2} \right).$$

Le premier facteur est supposé constant. Dans le second, si l'on étrangle avec la valve, on diminue la pression  $p_1$  avec laquelle la vapeur est admise dans le cylindre. Si au contraire on agit sur le mécanisme de distribution pour allonger la détente, on diminue  $p_2$  qui représente la tension finale. Le résultat est donc plus favorable avec ce mode qu'avec le premier.

On a parfois, en vue de s'opposer aux longues oscillations inhérentes à l'isochronisme, associé sur une même machine (Lodieu. *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CX, p. 620) la commande de la valve et celle de la distribution, la première d'une manière directe et permanente, la seconde à l'aide d'un embrayage (n° 913) qui n'entre en jeu que pour des influences d'une certaine importance.

peu de distributeurs offrant une résistance assez faible pour pouvoir être actionnés directement par cet appareil, comme la détente Ridder, et les systèmes à déclié, ou à excentrique de calage variable.

L'interposition d'un système d'embrayage (fig. 556) a été introduite en vue de parer à ces inconvénients. Le régulateur n'a plus alors de solidarité permanente avec le mécanisme distributeur. Son action directe se limite au manchon d'embrayage A. Celui-ci prend sous cette influence, le long de l'axe B, un déplacement vers l'une

ou l'autre des roues folles C, C', qui engrenent toutes les deux avec le pignon D, monté sur l'arbre E.

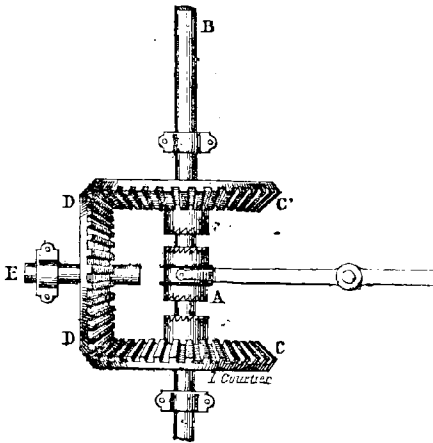


Fig. 556. — Embrayage du régulateur (plan).

Avec une allure moyenne, A se tient entre C et C'. De faibles oscillations lui sont donc permises sans engager aucune de ces deux roues, afin que la distribution ne soit pas actionnée à l'occasion de variations insignifiantes. Mais, si un changement plus notable

se manifeste, A se trouve mis en prise avec C ou C', ce qui transmet à la roue D, suivant les cas, deux rotations inverses l'une de l'autre. Pour une accélération, par exemple, E se trouve attaqué de manière à raccourcir l'admission. Le moteur se calme; mais dès que la vitesse tend à décroître, le manchon A, reporté en sens inverse, abandonne la roue qui redevient folle. On cesse donc de restreindre progressivement la pleine pression; la vitesse n'a plus de raison de diminuer davantage, ni A de se porter plus loin, et d'aller jusqu'à la roue opposée. Le régime voulu se trouve ainsi établi, sans être nécessairement détruit par une oscillation inverse (\*).

On remarquera, en outre, que si la stabilité du régulateur est

(\* ) Voyez toutefois sur ce sujet la théorie du n° 915.



améliorée, il en est de même de sa puissance. On ne demande plus, en effet, à l'appareil déformable que la faible force nécessaire pour faire glisser le manchon, tant qu'il n'est pas en prise avec l'une des roues d'angle. A cet instant, la résistance augmente subitement par l'embrayage de toute la distribution, mais c'est alors le moteur lui-même qui est chargé de la vaincre par l'intermédiaire de l'arbre B, et non plus le modérateur proprement dit. Celui-ci pourra donc être construit plus légèrement.

**914** — M. Raffart a imaginé une ingénieuse application du *mouvement louvoyant* <sup>(\*)</sup>, en vue d'assouplir la résistance à vaincre par le régulateur. L'obturateur cylindrique qui sert de valve, est animé sur lui-même d'une rotation, avec laquelle devra se composer son propre soulèvement opéré par le modérateur. Le déplacement résultant se trouvera donc incliné en biais sur la direction de ce mouvement; et le frottement lui sera diamétralement opposé. Son intensité immuable  $fN$  se décomposera de son côté, et la composante directement opposée à l'action du levier sera réduite par là dans un rapport dont on reste maître, en disposant de la vitesse de rotation imprimée à l'appareil.

**915** — *Oscillations de la connexion.* — Si l'on y regarde de plus près, il arrive, pour l'explication présentée au n° 913, ce que nous avons déjà vu se produire à l'occasion de celle qui nous a conduit à la recherche de l'isochronisme. C'est que le résultat cherché, qui théoriquement semblait être atteint directement, ne peut pratiquement s'établir qu'à travers une série d'oscillations. Nous pouvons nous en rendre compte à l'aide de l'analyse suivante.

Supposons que l'ensemble des pièces solidaires de l'arbre de couche du moteur en affectent la rotation par un moment d'inertie total A. On vient à supprimer subitement dans l'atelier une partie du moment résistant, que nous représenterons par la constante M. Mais, en même temps, le régulateur entre en jeu pour diminuer le moment de la puissance d'une quantité N, qui sera en général

<sup>(\*)</sup> *Génie civil*, t. XVIII, p. 247. — *La lumière électrique*, t. XXXVIII, p. 208. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 4<sup>e</sup> série, t. VI, p. 62.

une fonction de l'angle de rotation  $\varphi$ . L'arbre qui auparavant tournait uniformément avec une vitesse  $\omega_0$ , va prendre sous cette double influence une accélération angulaire :

$$(1) \quad \frac{d\omega}{dt} = \frac{M - N}{A}.$$

Pour intégrer cette équation différentielle, multiplions-la membre à membre par l'identité :

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt};$$

il viendra ainsi :

$$A\omega d\omega = m d\varphi - N d\varphi,$$

et en intégrant depuis l'instant :

$$(2) \quad \varphi = \omega, \quad \omega = \omega_0,$$

pour lequel l'embrayage entre en prise :

$$\frac{A}{2} (\omega^2 - \omega_0^2) = M\varphi - \int_0^\varphi N d\varphi.$$

Cette relation est identiquement satisfaite, comme cela devait être, pour les données initiales (2). Mais si l'on veut que la vitesse qui vient d'abandonner cette valeur  $\omega_0$ , y rentre de nouveau, il faut attendre que l'angle de rotation atteigne une seconde racine de l'équation déterminée :

$$(3) \quad M\varphi - \int_0^\varphi N d\varphi = 0.$$

Or rien ne prouve que cette valeur satisfera en même temps à la condition :

$$M - N = 0,$$

qui serait nécessaire (éq. 1) pour annuler à cet instant  $\frac{d\omega}{dt}$ , en lais-

sant définitivement la vitesse dans l'état voulu. Si, au contraire, il subsiste alors une certaine accélération, l'on verra l'allure s'éloigner de nouveau des conditions désirées, en exécutant successivement de nouvelles oscillations.

**916** — Pour le faire encore mieux saisir sur un exemple précis, choisissons comme hypothèse celle qui est la plus simple au point de vue analytique :

$$N = B\varphi,$$

$$\int_0^\varphi N d\varphi = \frac{B\varphi^2}{2}.$$

L'équation (3) devient :

$$B\varphi^2 - 2M\dot{\varphi} = 0,$$

et donne comme seconde racine :

$$= \frac{2M}{B}.$$

La relation (1) donne par cette substitution :

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M - B\varphi}{A} = \frac{M - 2M}{A} = \frac{M}{A}.$$

L'accélération angulaire possède donc, au moment où l'on regagne la vitesse de régime  $\omega_0$ , une valeur égale et de signe contraire à celle  $\frac{M}{A}$  qu'elle avait à l'instant initial, pour lequel  $\varphi = 0$  et  $N = 0$ . Par conséquent des effets absolument identiques vont se dérouler en sens contraire, et théoriquement cet état d'oscillation ne prendra jamais fin.

La solution du n° 913, qui présente en outre le défaut de la lenteur, a donc peu réussi sous cette forme, et réclamait de nouveaux perfectionnements. On en trouve un, digne de remarque, dans l'ingénieux mécanisme connu sous le nom de *compensateur Denis*.

**917** — *Compensateur Denis*. — Cet appareil <sup>(1)</sup> peut s'adapter à un modérateur quelconque. Lorsque celui-ci vient à se déformer en faisant varier l'admission, le compensateur lui permet de regagner ensuite sa position normale sans modifier la distribution en sens contraire, pendant qu'il exécute pour son propre compte ce mouvement de recul.

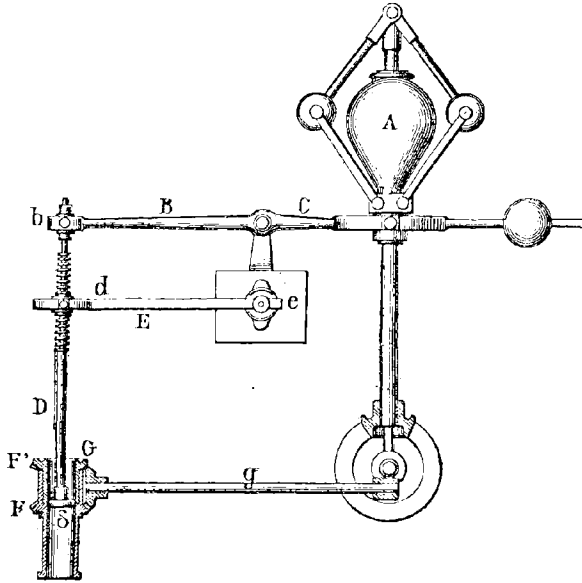


Fig. 557. — Compensateur Denis (élévation).

La figure 557 nous montre en A un régulateur. Si son manchon vient à jouer, il fait basculer le levier B sur l'articulation C. La fourche *b* sollicite dès lors la tringle D, dont la partie *d* peut coulisser à travers le levier E du papillon *e*, de manière à concilier le mouvement circulaire de E avec celui de D, qui s'effectue en ligne droite.

Le déplacement de D met le toc inférieur  $\delta$  de cette tige en prise avec l'une des deux roues d'angle F, F' qui, comme dans l'ap-

(<sup>1</sup>) Marié. *Annales des Mines*, 7<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 503. — Coste et Maniquet. *Traité théorique et pratique des machines à vapeur*, pl. 14. — Hirsch. *La mécanique à l'Exposition de 1878*, p. 284. — *Congrès international de mécanique appliquée de 1889*, t. II, p. 110.

pareil précédent (fig. 556), reçoivent des mouvements angulaires respectivement inverses de la part du pignon calé sur l'arbre  $g$ , lequel a une connexion constante avec le moteur. Le pignon  $\delta$ , ainsi actionné subitement dans le sens convenable, fait tourner sur elle-même la tige  $D$ . La partie filetée de celle-ci se vissant dès lors dans la douille du levier  $E$ , la tige tenue en respect par le régulateur force cette douille à se déplacer en manœuvrant la valve. La vitesse du moteur tend à se rectifier, le régulateur mollit, et dès que l'on revient à l'allure voulue, les résistances majeures qu'offre la distribution arrivent à caler le levier  $E$  dans lequel, comme dans un écrou, la tige  $D$  regagne avec légèreté sa première position. Dès le premier instant, son toc  $\delta$  abandonne la roue folle, la tringle cesse de tourner, et par suite de se déplacer dans sa propre direction. Elle abandonne donc le modérateur dont la position est à peine modifiée, en raison du faible écartement qui sépare  $F$  de  $F'$ , dans l'intervalle duquel la tringle peut osciller verticalement sans être amenée à tourner sur elle-même.

## CHAPITRE LII

### GRAISSAGE

#### § 1

#### FROTTEMENT DANS LES MACHINES

**918** — Les lois du frottement sont classiques; et bien que, sur quelques points, elles semblent appeler une revision, ce n'est pas ici le lieu d'en reprendre l'étude (<sup>1</sup>). Il s'attache au contraire un réel intérêt à faire connaître dans ce Cours quelques essais de *synthèse* de l'influence des résistances passives pour l'ensemble d'une machine en mouvement.

De Pambour avait admis, d'ailleurs sans preuves, que l'expression de la perte de travail doit être la somme d'une constante (à laquelle il donnait le nom de *frottement à vide*), et d'un terme proportionnel à la pression (appelé par lui *frottement en charge*), qu'il fixait à 14 % du travail développé.

Ce principe a été longtemps accepté sans contrôle. Tout au plus s'élevait-il quelque discussion sur la valeur numérique du coefficient. M. Zeuner, tout en se rattachant à ce point de vue, en a modifié la forme (<sup>2</sup>). Il ajoute à une constante un second terme proportionnel au travail disponible, et non au travail effectif.

M. Delafond a soumis ces énoncés à la sanction de l'expérimentation.

(<sup>1</sup>) Héton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 551. — Bochet. Du frottement de glissement. *Annales des Mines*, 5<sup>e</sup> série, t. XIII, p. 175. — Goodmann. *Association des Ingénieurs de Manchester*, 1890.

(<sup>2</sup>) Zeuner. *Théorie mécanique de la chaleur*. Traduction Arnthal et Cazin, p. 499.

tation, dans ses essais effectués sur une machine Corliss du Creusot (1). Ses expériences lui ont montré que le *travail effectif* (2)  $T_e$  et le *travail indiqué* (3)  $T_i$  étaient reliés par l'équation linéaire :

$$T_e = AT_i - B.$$

Il ajoute que cette formule n'est qu'approximative, et que les coefficients A et B varient avec la pression; la relation paraissant perdre sa forme linéaire pour les faibles puissances.

Le professeur Thurston (4) a été conduit par une étude très approfondie aux énoncés les plus inattendus. La grande autorité du nom de l'auteur doit appeler sur ces résultats l'attention des praticiens. Toutefois une rupture aussi caractérisée avec les idées reçues provoquera peut-être des discussions et de nouvelles expériences.

D'après M. Thurston, avec une bonne lubrification, le frottement de la machine reste sensiblement constant et indépendant de la charge. En d'autres termes, le coefficient de frottement des substances en contact, au lieu de rester invariable, irait en décroissant quand la force transmise augmente. L'effet nuisible paraît d'ailleurs s'accroître avec la vitesse.

**919** — Indépendamment du résultat total, M. Thurston a étudié

(1) *Annales des Mines*, septembre-octobre, 1884, § X.

(2) Travail disponible sur l'arbre du moteur.

(3) Travail de la vapeur mesuré à l'indicateur dans le cylindre.

(4) Thurston (On the distribution of internal friction of Engines. *Journal of Franklin Institute*, décembre 1886, novembre 1888. — On variable load internal friction and engine speed and work. *Scientific American Supplement*, 27 octobre, 5 novembre 1888. — *Friction and lost work in machinery and mill work*. New-York, 1885. — New determinations of the coefficients, etc. *Journal of Franklin Institute*, novembre 1871, p. 289. — *Engineering*, t. XLVII, p. 48, 68. — *Génie civil*, 1<sup>er</sup> mars 1890. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1889, t. IV, p. 218]. — Gustave Richard, *Revue industrielle*, 1890, p. 56, 64, 84, 108, 129, 149, 168. — Deprez. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 1884, 2<sup>e</sup> semestre. — Général Pétroff. Étude théorique et expérimentale sur le frottement médiateur. *Revue générale des chemins de fer*, mai 1888, p. 280. — Expériences du capitaine Douglas Galton sur les variations du coefficient de frottement. *Ibidem*, septembre 1878, février 1879. — *Meeting de l'Association britannique*, 16 août 1878). — *Meeting de l'Institution des Ingénieurs mécaniciens*, 25 avril 1878.

la répartition des effets résistants entre les principaux organes des machines. Il a dressé à cet égard le tableau suivant, qu'il serait désirable de voir étendre de nouveau; car les types y sont encore peu nombreux, et les variations sont notables de l'un à l'autre, ce qui est du reste très naturel.

RÉPARTITION DES FROTEMENTS	STRAIGHT - LINE		LAUSING - IRON - WORKS		
	TIROIR équilibré	TIROIR non équilibré	MACHINE de traction	AUTO- MATIQUE	CONDEN- SATION
Coussinets de l'arbre principal. . .	470	354	350	416	460
Piston et sa tige. . . . .	350	250	210	491	210
Bouton de manivelle . . . . .	68	51	150		
Crossette et son tourillon. . . . .	54	41		220	95
Tiroir et sa tige. . . . .	25	264			
Collier d'excentrique . . . . .	53	40	90	—	—
Coulisse et excentriques. . . . .	—	—			
Pompe à air. . . . .	—	—	—	—	120
Nombre proportionnel à la perte totale. . . . .	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Rapport réel de la perte au travail développé. . . . .	0,090	0,120	0,095	0,089	—
Nombre de tours par minute.	230	250	200	190	206
Coefficient { à vide. . . . . de frottement { en pleine charge.	0,10	0,10	0,31	0,19	0,09
	0,06	0,06	0,08	0,05	0,04

On sera frappé de l'importance du frottement des tourillons. Il serait peut-être possible d'y apporter quelque atténuation en employant le procédé Girard (\*). On remarquera également, pour la machine straight-line l'énorme différence qui se manifeste, suivant que le tiroir est ou non équilibré; circonstance essentielle au point de vue de la commande par le régulateur. Le frottement du

(\*) Procédé Girard. Voyez plus loin n° 925. — Piston liquide sans frottement. *Les Mondes*, t. XVIII, p. 166, 260.



piston et de sa tige a aussi une grande importance. Les garnitures ne doivent pas être trop serrées. Si avec le temps un serrage très prononcé leur devient nécessaire pour conserver l'étanchéité, il convient plutôt de les renouveler.

On recommande souvent de ne graisser que dans la mesure strictement nécessaire <sup>(1)</sup>, au point de vue de l'économie, en même temps que pour ne pas encombrer d'huile le condenseur, et comme conséquence la chaudière. M. Thurston est au contraire d'avis <sup>(2)</sup> de lubrifier avec profusion, sauf à reprendre l'excès de l'huile <sup>(3)</sup> et à l'épurer <sup>(4)</sup>. On voit dans le tableau précédent qu'un dixième au moins du travail produit se trouve perdu par le frottement. Les perfectionnements de la construction et du graissage sont donc de nature à exercer la plus utile influence.

**920** — La lubrification est particulièrement nécessaire pour prévenir les *grippements* et *arc-boutements*. On sait que ce phénomène singulier résulte de certaines dispositions relatives des surfaces en contact, eu égard à la valeur de l'angle de frottement <sup>(5)</sup>. Or ce dernier, dont la tangente trigonométrique constitue précisément le coefficient de frottement, peut, en l'absence du lubrifiant, augmenter au point de faire rentrer dans les conditions de l'arc-boutement des contacts pour lesquels on était fondé à se croire à l'abri.

Pour ce motif notamment, il est très nécessaire de calculer l'étendue des surfaces d'appui de façon que la répartition par

<sup>(1)</sup> Seguela. *Portefeuille économique des machines*. 5<sup>e</sup> série, t. XV, p. 12. — Bienaymé. *Les machines marines*, p. 374.

<sup>(2)</sup> Thurston. *Le graissage des machines et les lubrifiants*. Traduction Jarry, 1885, in-16.

<sup>(3)</sup> Danger. Appareil pour la récupération des huiles de graissage. *Génie civil*, t. XV, p. 568. — Bariquand. Machines à extraire l'huile des copeaux. *Revue industrielle*, 4<sup>er</sup> novembre 1890.

<sup>(4)</sup> Épurateur Ducrétet (*Bulletin de la Société d'Encouragement*, 1889, p. 84. — *Revue industrielle*, avril 1888. — *Journal des usines à gaz*, 5 mai 1889. — *Industrie moderne*, 25 décembre 1887, p. 277). — Appareil Koelner pour la purification des huiles. *Portefeuille économique des machines*, 5<sup>e</sup> série, t. XIII, p. 78. — Filtration des huiles, appareil Michiels. *La Nature*, 11 octobre 1884, p. 298. — Filtre Hamelle. — Robertson's oil filter. *The Engineering and mining Journal*, 4<sup>er</sup> novembre 1890, p. 511.

<sup>(5)</sup> Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 376.

millimètre carré de la pression totale transmise ne soit pas suffisante pour déterminer l'*expulsion des enduits*.

Le graissage se recommande enfin au point de vue de la conservation de la machine. L'usure détériore les pièces, nécessite des *rattrapages de jeu*, et finit par mettre le matériel hors de service (1). Elle est, pour certaines pièces, à peu près indépendante de la pression de la vapeur, et fonction seulement du poids des organes. Pour d'autres au contraire, comme dans les tiroirs, elle croît rapidement avec la tension.

## § 2

### PROPRIÉTÉS DES LUBRIFIANTS

**921** — Les lubrifiants par excellence sont les corps gras (2). Le suif et les graisses pâteuses sont quelquefois employés dans les machines, et jouent le principal rôle pour les véhicules de chemin de fer. Mais on emploie de préférence dans les ateliers et dans la

(1) On attache depuis quelque temps beaucoup d'importance à la fabrication des pièces *interchangeables*. Plusieurs constructeurs s'appliquent à étudier un type de machines avec un très grand soin, de manière à l'établir sur des bases fixes pour en graduer l'échelle et pouvoir fournir diverses puissances dynamiques. Ils reproduisent alors en grand nombre les diverses pièces que désignent des numéros d'ordre, et il suffit, quand l'acheteur se trouve dans des contrées lointaines, ou dépourvues de moyens de réparation, de réclamer par correspondance une pièce neuve d'après son numéro, pour que celle-ci vienne prendre sa place dans le moteur, en se substituant à celle qu'il y a lieu de rebuter.

(2) On peut cependant mentionner en dehors de cette catégorie quelques cas particuliers.

Le *métal blanc*, ou *antifriction*, est très doux, et permet d'établir des contacts à vif sans enduit. Sa composition, un peu variable, oscille autour de la suivante :

Plomb. . . . .	80
Étain . . . . .	12
Antimoine. . . . .	8
	<hr style="width: 100%;"/>
	100
	<hr style="width: 100%;"/>

On a introduit avec quelque succès la poudre de talc impalpable dans les *tresses Miller* pour la garniture des stuffing-box (Bienaymé. *Machines marines*, p. 574. — Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 207).

On peut citer pour mémoire le remplacement du glissement par le roulement dans les *paliers à boules indépendantes* (Richard. *Revue industrielle*, 26 avril 1890, p. 168).

marine les lubrifiants liquides, c'est-à-dire l'huile, et quelquefois la glycérine.

On distingue les huiles d'origine organique et les huiles minérales <sup>(1)</sup>.

Les premières sont empruntées au règne animal, comme l'huile de baleine, ou au règne végétal : huiles d'olive, de lin, de colza <sup>(2)</sup>.

L'emploi des huiles minérales est relativement récent <sup>(3)</sup>; mais il s'est répandu avec une grande rapidité. Ces matières présentent une composition plus fixe. Elles ne se résinifient pas. Elles sont par elles-mêmes neutres, et n'attaquent pas les métaux, comme le font quelquefois les huiles organiques par leur décomposition naturelle ou provoquée, avec formation d'acides gras. Elles gèlent

<sup>(1)</sup> *Asbestoline, caucasine, déodoroline, dynamine, neutraline, pétroline, pétroléine, piméline, valvoline, vaseline, etc.*

Huiles ANDRÉ, HAMELLE, LEROY, RAGOSINE, etc.

<sup>(2)</sup> D'ailette, d'arachides, de coton, de résine.

<sup>(3)</sup> De l'utilisation des huiles minérales pour le graissage (*Portefeuille économique des machines*, 5<sup>e</sup> série, t. XIII, p. 106. — Général Petroff. Étude sur le frottement et le graissage par l'emploi des huiles minérales. *Revue générale des chemins de fer*, mai 1888, p. 280. — Essais de la Compagnie de l'Est sur l'emploi des huiles minérales (*Ibidem*, octobre 1885. — *Génie civil*, t. XVI, p. 459, 455). — Ortolan. *Sur les huiles minérales employées pour le graissage des machines*, 1881. — Belleroche. Emploi des hydrocarbures comme lubrifiants (*Revue industrielle*, 25 juillet 1883, p. 298. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 2<sup>e</sup> série, t. XIII, p. 215). — Gérardin. *Recherches nouvelles sur l'essai des huiles et le graissage*, in-8°, Baudry. — Seguela. Note sur le graissage (*Portefeuille économique des machines*, t. XIV, p. 146, 162, 186; XV, 7, 52. — Salomon. *Ibidem*, 3<sup>e</sup> série, t. XV, p. 115, 156. — *Revue générale des chemins de fer*, 1881, p. 120; avril 1884, p. 216; juillet 1885, p. 54; octobre 1885, p. 224; 1887, p. 587). — Gibon. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1886, p. 151. — Armengaud. *Publication industrielle*, t. XXVI, p. 529; XXX, 545. — *Annales industrielles*, 4<sup>er</sup> décembre 1889, p. 700. — *Revue industrielle*, 7 juillet 1880, p. 269. — *Moniteur industriel*, 16 septembre 1886, p. 296. — *Génie civil*, t. XVI, p. 459. — *Technologie*, janvier-février 1885. — *Le Technologiste*, mai 1881, p. 700. — *Portefeuille économique des machines*, déc. 1878, mai 1881, juillet 1884, février et mai 1887.

Friction and Lubrication. *American Association for advancement of Science*, août 1878. — Veitch Wilson. On lubrication. *Association of Employers of the mechanical Trades of Great Britain*, 31 mars 1885, p. 51. — *The railway Engineer*, août 1890, p. 205. — *The rail road and engineering Journal*, 19 mars 1882, p. 164; janvier 1890, p. 52. — *Industries*, 6 août 1886, p. 159. — *American machinist*, 30 octobre 1890, p. 10. — *Scientific American Supplement*, 18 août 1885, p. 6554; 24 janvier 1885, p. 7544.

Heusinger von Waldegg. *Handbuch für specielle Eisenbahn Technik*, t. III, p. 555.

moins facilement. Elles ont moins de tendance à la formation du cambouis. Tout au contraire les huiles minérales délayent ce pro-

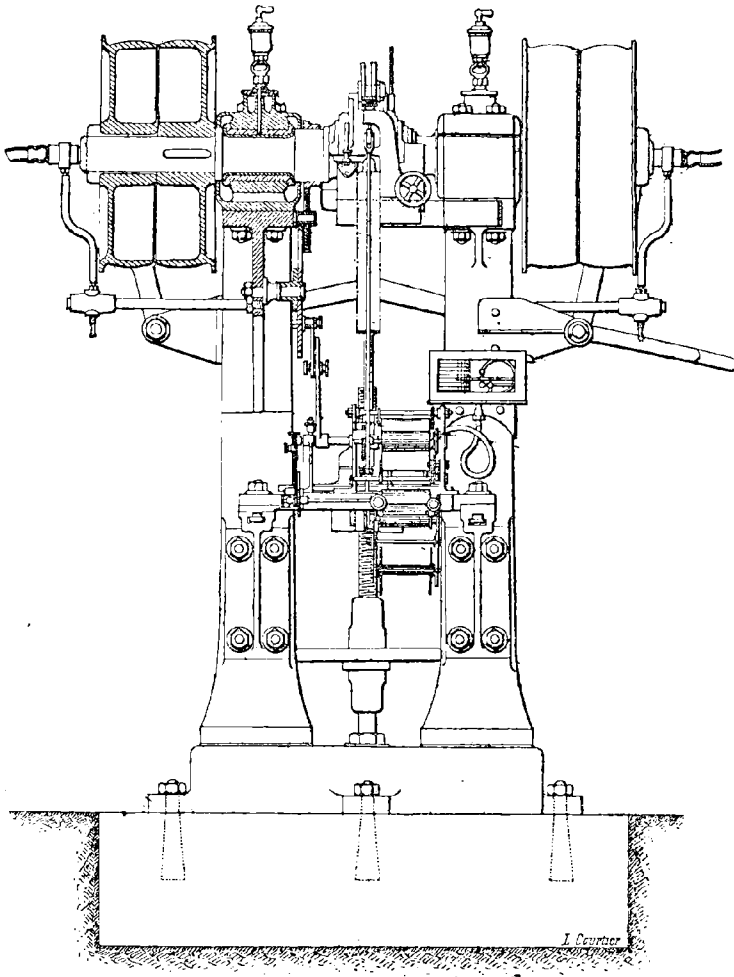


Fig. 558. — Frictonètre Deprez-Napoli (élévation antérieure).

duit, et procèdent en quelque sorte à une lessive générale des machines dans lesquelles on vient à les substituer aux huiles organiques. Avec elles, il est plus facile d'éviter les dépôts pour les condenseurs à surfaces. Elles exposent moins facilement à la for-

mation dans les chaudières de savons gras pulvérulents, qui sont la source de graves dangers <sup>(1)</sup>.

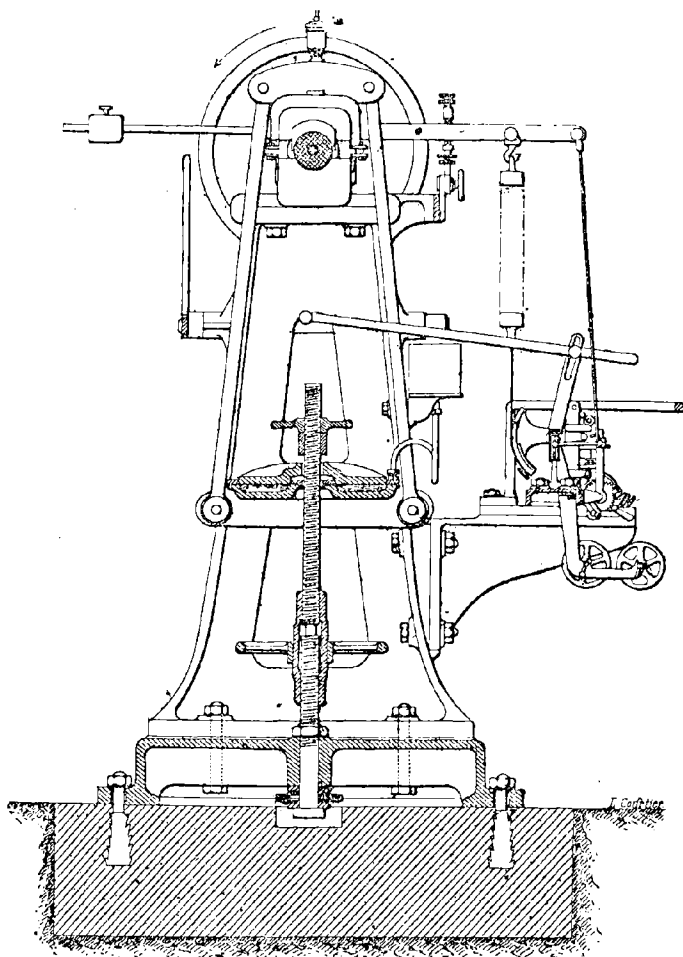


Fig. 539. — Frictomètre Deprez-Napoli (élévation latérale).

Les huiles minérales gèlent, suivant leur degré de fluidité, entre

<sup>(1)</sup> Circonstance qui ne doit pas être confondue avec le danger de surchauffe spéciale signalé par M. Hirsch, pour les surfaces métalliques enduites d'huile minérale qui les empêche d'être mouillées par l'eau (*Annales du Conservatoire*, 2<sup>e</sup> série, t. I). Nous reviendrons en détail sur ces deux points dans la théorie des générateurs.

0 et  $-12$  degrés. Elles émettent des fumées dans une étendue variable de l'échelle thermométrique, vers 200 degrés, et entrent en ébullition aux environs de 300 degrés. Le point de fusion des suifs se place entre 35 et 60 degrés.

La densité à la température de 15 degrés est de 0,917 pour l'huile de lin; 0,915 pour celle de colza; et en ce qui concerne les huiles minérales : 0,915 à 0,910 pour les huiles lourdes destinées au graissage des cylindres et des tiroirs; 0,907 à 0,905 pour des produits plus fluides employés dans les mécanismes; 0,898 à 0,895 pour les broches de filature et les métiers de tissage.

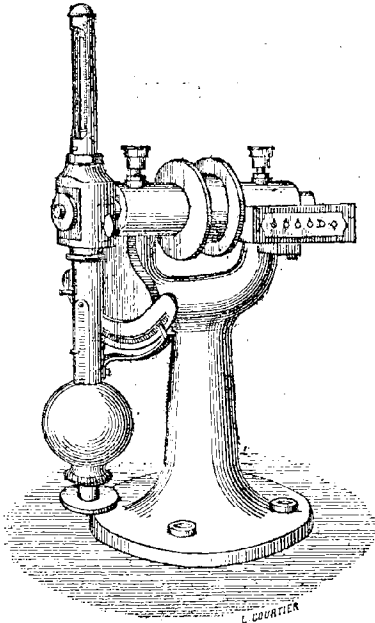


Fig. 560. — Frictionnètre Thurston.  
(Vue perspective).

**922** — Plusieurs Compagnies industrielles ont établi un service spécial affecté à l'essai et à la vérification des échantillons qui leur sont présentés par

le commerce des huiles. On procède dans ces laboratoires à des opérations chimiques, physiques ou mécaniques.

On a construit à cet effet divers types de *machines à essayer les huiles*, ou *frictionnètres*. Sans pouvoir m'arrêter ici à cet objet, qui est accessoire pour notre étude, je citerai du moins (\*) l'appar-

(\*) Je mentionnerai encore les frictionnètres suivants : ASPINOLI. *Revue industrielle*, 13 décembre 1886, p. 513. — BARNEY. *Idem* (*Génie civil*, t. XVI, p. 455. — *Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. XI, p. 206. — *Chronique industrielle*, 9 mai 1886, p. 218. — *Proceedings of Institution of mechanical Engineers*, novembre 1883, p. 652). — HATCHER. — HONGSON. *Génie civil*, t. VII, p. 242. — INGRAM et STAFFER. *Ibidem*. — KLEIN et SCHANZLIN. *Ibidem*. — LEBEAC. *Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. IX, p. 92. — MAC NAUGHT. *Ibidem*, t. XV, p. 114. — PEHET et FAYOL. *Ibidem*, t. XV, p. 118. — PELLIN. — RIETER. *Génie civil*, 1887, p. 221.

reil Deprez et Napoli <sup>(1)</sup> (fig. 558, 559), et celui du professeur Thurston <sup>(2)</sup> (fig. 560).

### § 3

#### RÉPARTITION DES LUBRIFIANTS

**923** — Pour répartir le corps gras sur les surfaces frottantes, on dispose de différents moyens.

On peut d'abord faire intervenir la pesanteur, en versant l'huile au point le plus haut, d'où elle redescend par la gravité. On facilite au besoin sa dispersion au moyen de sillons gravés en creux, tels que la *patte d'araignée* du palier graisseur (fig. 561), que l'on pratique à l'intérieur du coussinet supérieur suivant deux arcs d'hélice, de manière que le liquide traverse chacune des génératrices en quelque point, à partir duquel la rotation l'étale sur toute une circonférence.

En opérant d'une manière inverse, on a recours au relèvement. Un bain d'huile séjourne au point le plus bas, et l'on y puise au moyen de *releveurs*, tels qu'un disque monté sur l'arbre tournant. Sa périphérie plonge dans le fluide par la partie inférieure, qui devient immédiatement la plus haute en vertu de la rotation. L'huile coule de là sur le noyau de l'arbre.

On a eu également recours, dans le même ordre d'idées, à un rouleau de liège appelé *grenouille*, qui tend à surnager, sans pouvoir émerger tout à fait, attendu qu'il vient buter sous la surface de l'arbre. Le mouvement de ce dernier détermine par contact celui du flotteur mouillé d'huile, qui en imprègne toute la surface métallique.

On emploie de même des *lécheurs*<sup>(3)</sup>, sorte de pinceaux imbibés d'huile, contre lesquels les pièces mobiles viennent à chaque course se recouvrir de lubrifiant.

<sup>1</sup> *Bulletin de la Société d'Encouragement*. 1876. — *Génie civil*, t. XVI, p. 459.

<sup>(2)</sup> *Ibidem*, t. VII, p. 242. — Stevens. *Institute of technology*.

<sup>(3)</sup> Leduc. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 526.

**924** — On fait intervenir le refoulement lorsque, le corps gras ayant été versé dans un récipient, la vapeur y est admise pour faire pénétrer ce liquide à l'intérieur d'une enceinte fermée.

La condensation de la vapeur est aussi mise en œuvre pour le même objet. On fait passer ce fluide dans un serpentin qui le refroidit sous forme d'eau liquide, dont la pression hydrostatique,

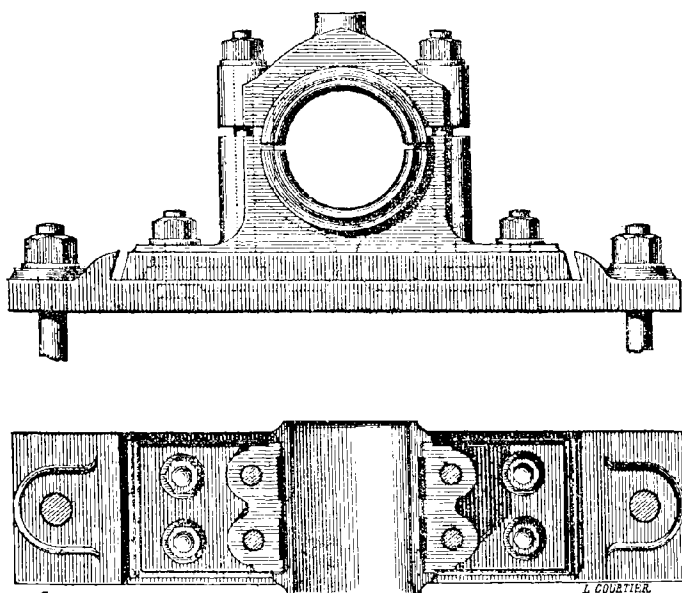


Fig. 561 et 562. — Palier graisseur (plan et élévation).

s'adjoignant à celle de la vapeur, agit sur l'huile, la déplace et l'engue dans les organes.

La force centrifuge est utilisée pour le graissage des poulies folles<sup>(1)</sup>. On emploie à cet effet une graisse semi-fluide, sur laquelle cette influence agit directement, ou par l'intermédiaire d'un piston assez lourd.

La capillarité est employée depuis longtemps sous la forme de

<sup>(1)</sup> Graisseurs pour poulies folles : CHEVAL. *Portefeuille économique des machines*, 1881, p. 180. — HEILMANN et DUCOMMEN. *Collection de dispositifs destinés à empêcher les accidents de machines*, Mulhouse, 8<sup>d</sup> in-4<sup>e</sup>, p. 9. — KUCH. — LENEVEU. — LUNEMAN. *Ibidem*, p. 10. — MICHAUX et LEFEBVRE. — MILLET. — PAPPERITZ. — SAUREL, etc.



mèches de coton, qui font monter l'huile d'un bain inférieur jusqu'au point à lubrifier. Ce procédé est assez défectueux. On lui

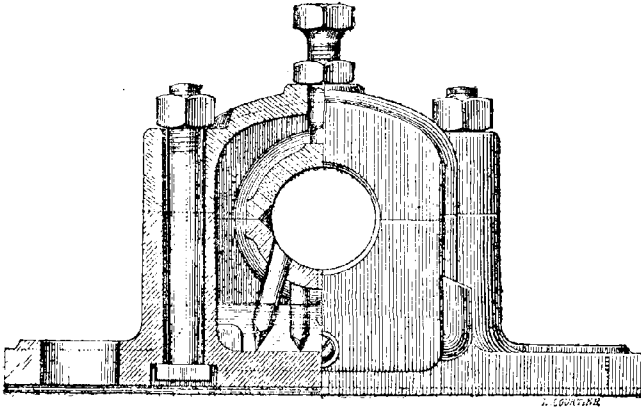


Fig. 563. — Graisseur à rotins. Palier (coupe et élévation).

préfère le *rotin*, ou *jonc perméable de l'Inde* <sup>(1)</sup>, à travers les fibres duquel s'opère une ascension régulière du liquide. De petits bouts

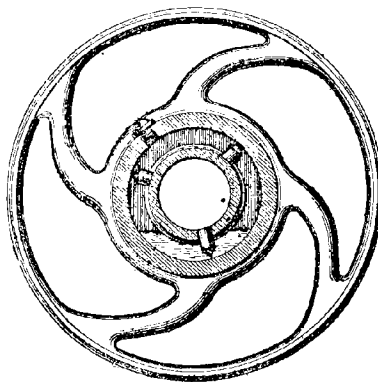


Fig. 564. — Graisseur à rotins. Poulie folle (élévation).

de ce rotin sont implantés dans le godet, qu'ils traversent de manière à venir au contact de l'arbre, tandis que leurs extrémités inférieures restent plongées dans le liquide (fig. 562, 563).

(1) Graissage par rotins. *Revue industrielle*, 12 novembre 1884, p. 455.

**925** — Aucun principe ne saurait être plus efficace que l'immersion pure et simple dans un *bain statique*. On voit par exemple, dans les machines horizontales, de larges patins carrés, destinés à supporter la crossé d'une lourde tige de piston, glisser au sein de l'huile qui remplit une baignoire large et peu profonde. De même les pivots et les crapaudines des turbines noyées sont immergés sous une cloche, que l'on remplit d'huile au moyen d'un tube hydrostatique plus élevé que le niveau du bief inférieur, en vertu du principe des vases communicants<sup>(1)</sup>. Citons encore la tige à fourreau de Penn, au fond de laquelle l'articulation de la bielle baigne dans le corps gras<sup>(2)</sup>, la pompe Fixary<sup>(3)</sup>, la machine Westinghouse<sup>(4)</sup>, etc.

Girard a introduit un principe nouveau<sup>(5)</sup>, dont l'efficacité est remarquable, et qui a été depuis imité par divers constructeurs<sup>(6)</sup>. On injecte à l'aide d'une pression suffisante un *courant dynamique* d'huile, ou même d'eau additionnée de glycérine pour prévenir la gelée. Le liquide s'échappe entre les surfaces frottantes, en les écartant par sa pression d'une quantité pour ainsi dire inappréciable, mais capable cependant de détruire l'adhérence. Les métaux ne sont plus alors à proprement parler en contact; et le glissement n'est plus celui d'un solide sur un autre, mais d'un métal sur une couche liquide. Son coefficient se trouve par là réduit à une valeur absolument minime.

**926** — On obtient d'excellents résultats en *graisant dans la vapeur*<sup>(7)</sup>. On verse alors le lubrifiant par petits jets, ou goutte à goutte, sur le trajet du fluide moteur. L'huile se trouve finement divisée, et portée par la vapeur elle-même dans toutes les parties

(1) Voy. t. I, p. 282.

(2) Voy. n° 570.

(3) Voy. t. I, p. 888.

(4) Voy. n° 858.

(5) L. D. Girard. *Projet de palier glissant appliqué au porte-hélice d'une frégate de mille chevaux*, autographié, in-4°. — Barre. *Système Girard. Génie civil*, t. XV, p. 506. — Haton de la Goupillière. *Revue des Cours scientifiques*, 1867, p. 385.

(6) Coussinet hydraulique de SHAW, etc.

(7) Asselin. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, 19 juillet 1878. — *Annales industrielles*, 28 juillet 1878. — *Génie civil*, 15 juillet 1873, p. 449.

où pénètre celle-ci. Le graissage est alors excellent ; mais la quantité de corps gras entraînée au condenseur se trouve augmentée.

Lorsque, par quelque négligence dans le service du graissage, des pièces viennent à chauffer, on commence par les arroser avec une petite quantité d'eau, pour ne pas déterminer un changement trop brusque de température ; puis on en verse davantage jusqu'à complet rafraîchissement. Il est bon à cet effet de ménager à l'avance des robinets au-dessus des parties les plus menacées, ou de disposer de lances d'eau sous pression.

M. Raffard a proposé, en vue de cette circonstance, d'adapter sur les points dangereux une lentille en métal fusible, destinée à couler en cas d'échauffement, en déterminant ainsi la mise en train d'une sonnerie électrique avertisseuse.

#### § 4

### EXEMPLES DE GRAISSEURS

**927** — *Burette*. — L'instrument le plus élémentaire est la burette à main. Le mécanicien s'en sert pour verser, au moment opportun, quelques gouttes d'huile dans un petit orifice qui conduit aux parties à graisser <sup>(1)</sup>.

On a proposé pour le service de nuit, ou pour les recoins obscurs, une burette sur le bec de laquelle est implantée une petite lampe, afin de laisser libre l'usage de la main gauche en la dispensant de tenir cette lumière.

Pour éviter aux hommes de se glisser dans des régions dangereuses au milieu d'organes en mouvement, on met à leur disposition une perche, à l'extrémité de laquelle est adaptée la burette. Une brochette transversale sert à en soulever le couvercle.

Mais un moyen à la fois plus sûr et plus commode consiste dans l'emploi de tubes pour *graisser à distance*. D'une caisse centrale pleine d'huile part un tuyau principal, sur lequel s'embranchent des

<sup>(1)</sup> Seringue d'Indret (Bienaymé. *Machines marines*, p. 374. — *Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. XV, p. 7).

conduits plus étroits. A l'extrémité de chacun d'eux se trouve une petite boîte à soupape, munie d'une tige taraudée à l'aide de laquelle on règle l'écoulement. Le liquide tombe ainsi goutte à goutte dans un petit entonnoir, ou bien il est recueilli par des lécheurs.

**928** — *Godet graisseur à la main.* — Pour faire pénétrer le corps gras dans une enceinte où s'exerce une pression supérieure

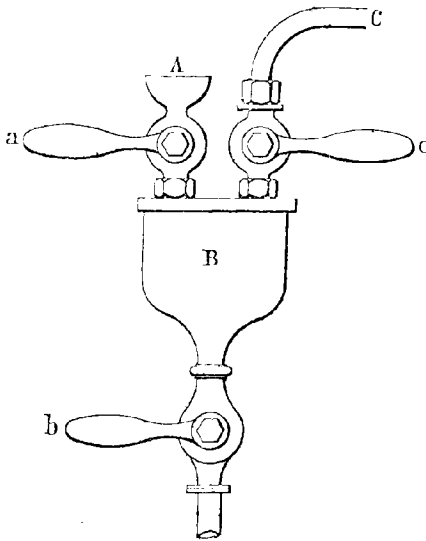


Fig. 565. — Graisseur à la main (élévation).

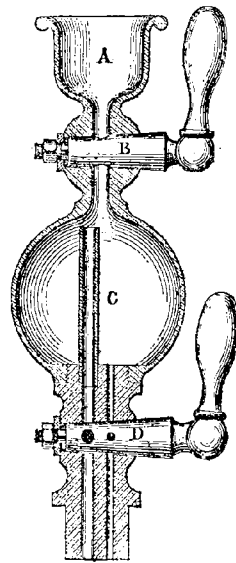


Fig. 566. — Graisseur Thiébaud.  
(Coupe méridienne).

à celle de l'atmosphère, on est obligé de constituer un sas, que l'on met successivement, par un jeu de robinets, en communication avec l'extérieur et l'intérieur (fig. 564).

On verse l'huile à l'aide du godet A et du robinet *a* dans la capacité B. Pour graisser en dehors de la présence de la vapeur, on se contente d'ouvrir le robinet *b*. Mais quand la machine est sous pression, il est nécessaire, après avoir refermé *a*, d'ouvrir au préalable le robinet *c*, qui fournit de la vapeur par la conduite C.

**929** — *Graisser discontinu Thiébaud.* — L'un des premiers appareils qui aient été employés pour graisser sous pression est celui de Thiébaud (1). L'huile versée dans l'entonnoir A (fig. 565) est admise à l'aide du robinet B dans le récipient C, le robinet D étant fermé. Après avoir isolé cette enceinte en tournant B, on ouvre D. Un double passage fournit alors accès à la vapeur au-dessus et au-dessous du corps gras. Mais comme le premier conduit est le plus large, il s'établit à la fois, en raison de cette facilité et de la pesanteur, un courant ascendant de vapeur et un flux descendant du lubrifiant.

**930** — *Graisser continu Mollerup.* — On préfère souvent aux appareils discontinus les graisseurs continus ou automatiques.

Dans le système Mollerup et Drevdal (2), un corps de pompe, isolé tout à la fois de l'atmosphère et de la machine à l'aide de deux robinets, se trouve rempli d'un certain volume d'huile, progressivement chassée par la rentrée d'un piston plongeur. Ce mouvement est déterminé avec une lenteur suffisante par une vis sans fin commandée par la machine.

**931** — *Graisserie à gouttes visibles Consolin et Bourdon.* — M. Consolin (3) a imaginé un graisseur continu fort ingénieux, qui opère par gouttes visibles. MM. Édouard Bourdon et Hamelle (4) en ont simplifié le dispositif (5).

(1) Bienaymé. *Les machines marines*, p. 574. — Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 522. — Seguela. *Portefeuille économique des machines*, 5<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 165.

(2) *Portefeuille économique des machines*, mai 1885, p. 71; décembre 1889, p. 190. — *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1886, p. 155. — Armengaud. *Publication industrielle*, 2<sup>e</sup> série, t. X, pl. 45. — *Scientific American Supplement*, 22 novembre 1884, p. 7405.

(3) Bienaymé. *Machines marines*, p. 374. — Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 519. — *Génie civil*, t. XVI, p. 451. — *Portefeuille économique des machines*, 1881, p. 18; 1884, p. 111; 1889, p. 168.

(4) *Annales industrielles*, 1885, t. I, p. 217. — *Portefeuille économique des machines*, 1884, p. 115; 1889, p. 165, 186. — Armengaud. *Publication industrielle*, 2<sup>e</sup> série, t. X, pl. 45. — *La meunerie française*, 1889, p. 280.

(5) Indépendamment des divers graisseurs qui sont décrits dans ce Cours, je mentionnerai encore les suivants : ANDERSON. *Engineering*, 31 mars 1890, p. 567. — ANSCHUTZ. *Portefeuille économique des machines*, 5<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 164. — ARNIER. *Génie civil*, 15 juillet

Un cylindre A (fig. 568) est rempli d'huile, que l'on y verse au

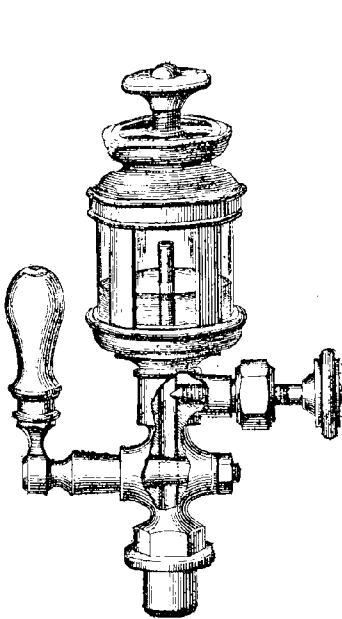


Fig. 567. — Graisseur De la Coux.  
(Vue perspective).

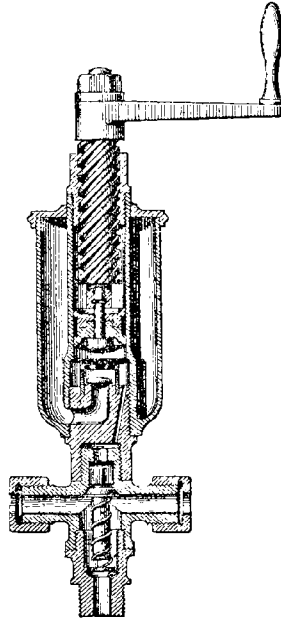


Fig. 568. — Graisseur Dusert.  
(Coupe méridienne).

1885, p. 449. — BAILEY (*Iron*, 8 avril 1881, p. 257. — *Portefeuille économique des machines*, 5<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 163, 166, 189). — BAIRD. *Revue industrielle*, 12 novembre 1885, p. 155. — BARGLAY. *Scientific American*, 25 juillet 1885, p. 51. — BOSSIÈRE et LATNAY. *Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 147. — BOULLON. *Ibidem*, p. 166. — BROUDER. *Génie civil*, t. XVI, p. 450. — BURNETT. *Génie civil*, t. XVI, p. 452. — CADIAT (*Ibidem*, p. 451. — *Portefeuille économique des machines*, 1881, p. 69; 1890, p. 8. — ARMENGAUD. *Publication industrielle*, 2<sup>e</sup> série, t. X, pl. 45). — CAMPBELL. *American machinist*, 3 février 1885, p. 5. — CARRIÈRE (*Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 186. — *Génie civil*, t. XVI, p. 452. — *Bulletin de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 2<sup>e</sup> série, t. XI, p. 1141). — CLÉGY. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1<sup>re</sup> série, t. VI, p. 359. — COLOMBIER. *Revue industrielle*, 28 décembre 1889, p. 515. — COLQUHOUN et FERRIS. *Ledieu. Nouvelles machines marines*, t. II, p. 518. — COURBERAISSE et PENELLE. *Ledieu. Ibidem*, t. II, p. 518. — CRAIG. *American machinist*, 7 juillet 1885, p. 5; 26 juillet 1884, p. 7. — CROSBY (*Revue industrielle*, 22 avril 1886, p. 162. — *Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 167). — DE COSTER. *Collection de dispositifs destinés à éviter les accidents de machines*. Mulhouse 1889, 8<sup>e</sup> in-4<sup>o</sup>, p. 4 et 8. — DE LA COUX (fig. 566). *Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 149. — CURANT. *Ibidem*, t. XIV, p. 162; XV, 57. — DAMILAVILLE. *Ibidem*, t. XIV, p. 186. — DEGREMONT et SAMADEN. *Ibidem*, p. 188. — DORIER. *Ibidem*, p. 164. — DREYER, ROSENKRANTZ et DROOP. *Ibidem*, t. XV, p. 7. — DUBALLE et LAMBELIN. *Ibidem*, t. XIV, p. 147. — DUSAUX.

moyen d'un godet B. Un tube communiquant avec le robinet C y descend en D à la partie inférieure. Un second tuyau, en relation avec le robinet E, s'y élève jusqu'en F. Un troisième robinet G permet d'admettre la vapeur de la conduite H dans le tube I, qui se continue en J sous forme de serpentín, et redescend à travers C à la base D du récipient. La vapeur s'y condense au contact de l'atmosphère; et le liquide, en raison de la pression hydrostatique, vient soulever l'huile, qu'il fait refluer par le tuyau FE à travers le tube de cristal K rempli d'eau. On y voit les gouttes d'huile monter l'une après l'autre pour se réunir à la partie supérieure, où une vis à pointeau L sert à en régler l'écoulement dans le conduit de retour M, qui ramène l'huile au sein de la vapeur du tuyau d'amenée, pour procéder au graissage de ce fluide moteur. On règle l'écoulement à l'aide

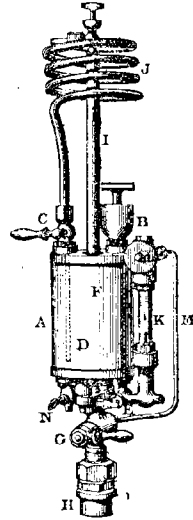


Fig. 369.  
Graisseur Hamelle-Bourdon.  
(Vue perspective).

Dwelschauvers Dery. Exposition d'Amsterdam. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1885, p. 33. — DUSERT (fig. 567) (*Revue industrielle*, 11 juin 1885, p. 235. — *Portefeuille économique des machines*, 5<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 187; XV, 9). — ECCER. *Ibidem*, t. XV, p. 54. — EGLI. *Ibidem*, p. 59. — FLECTELOT (*Ibidem*, t. XIV, p. 149. — *Génie civil*, t. XVI). — FURNESS. *Portefeuille économique des machines*, 5<sup>e</sup> série, t. XV, p. 57. — GETZ. *Ibidem*, p. 55. — GORGEIN. *Ibidem*, p. 56. — GRANDISON. *Ibidem*, t. XIV, p. 186. — GUILLOT. *Ibidem*, p. 165. — GURTLER et BAUDEL. *Annales industrielles*, 1885, t. I, p. 215. — HABISHEK. *Ibidem*, p. 798. — HARLOW. *American machinist*, 9 janvier 1886, p. 4. — HENRY. *Collection de dispositifs destinés à éviter les accidents de machines*, Mulhouse, g<sup>e</sup> in-4<sup>e</sup>, 1889, p. 9. — HOCHGESAND (*Revue industrielle*, 15 août 1885, p. 323. — ARMENGAUD. *Publication industrielle*, 2<sup>e</sup> série, t. X, pl. 45. — *Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 149). — HOLLAND. *Ibidem*, p. 167. — HORN. *Scientific American*, 19 janvier 1884, p. 55. — IMPERMEATOR. Lédieu. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 523. — IRVINE (*Revue industrielle*, 25 juin 1885, p. 256. — *Scientific American*, 28 juillet 1884, p. 50). — KESSLER. *Portefeuille économique des machines*, 5<sup>e</sup> série, t. XV, p. 56. — LAINÉ. *Ibidem*, 1881, p. 67; 1889, p. 166. — LENEVEU. — LENORMAND. *Ibidem*, p. 54. — LETHULLIER-PINEL. ARMENGAUD. *Publication industrielle*, 2<sup>e</sup> série, t. X, pl. 450. — LIMON. *Portefeuille économique des machines*, 5<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 166. — MACABIÈS. *Ibidem*, 3<sup>e</sup> série, t. X, p. 124. — MARCHANT. *Ibidem*, t. XV, p. 9. — MESSIER. *Collection de dispositifs destinés à empêcher les accidents de machines*, Mulhouse, g<sup>e</sup> in-4<sup>e</sup>, 1889, p. 9. — MÉKARSKI. *Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 150. — MEUSE. *Ibidem*, t. XIV, p. 167; XV, 55.

des divers robinets et, au besoin, en faisant jouer la purge N qui permet d'évacuer l'eau en excès.

— MILLET. *Ibidem*, t. XIV, p. 167. — OSWALD ROMBERG. *Revue industrielle*, 18 juillet 1885, p. 286. — PATRICK. *The Railroad Gazette*, 31 mars 1882, p. 193. — PEARSON. *Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 167. — PHILLIP (*Revue industrielle*, 19 juillet 1882, p. 285. — *Génie civil*, t. XVI, p. 452). — POUGET. *Portefeuille économique des machines*, t. X, p. 30. — RAGOSINE (*Ibidem*, 3<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 186. — *Génie civil*, t. XVI, p. 452. — Armengaud. *Publication industrielle*, 2<sup>e</sup> série, t. X, pl. 45. — Guérin. *Notice sur le graissage dans la vapeur et le système Ragosine*). — RAMSBOTTOM. *Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 165. — REIMHERR. *Ibidem*, p. 165. — REISERT. *Collection de dispositifs pour empêcher les accidents dans les machines*, Mulhouse, g<sup>d</sup> in-4<sup>e</sup>, 1889, p. 9. — ROBERT. Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 521. — RODIEUX. *Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 166. — ROST (*Ibidem*, t. XV, p. 8. — *Chronique industrielle*, 1886, p. 59). — ROLLIN. *Portefeuille économique des machines*, 5<sup>e</sup> série, t. XV, p. 57. — ROULIN. *Ibidem*, 1884, p. 94. — ROSCKE (*Ibidem*, t. XIV, p. 165. — Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 516. — Bienaymé. *Machines marines*, p. 375). — ROUS (*Portefeuille économique des machines*, 1881, p. 70; 1889, p. 165. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 8 juillet 1870; 1880, p. 416). — ROUSSEAU et BALLAND. *Revue industrielle*, 11 mai 1889, p. 181. — ROYLE (*Ibidem*, 1881, p. 156. — *Annales industrielles*, 1885, t. II, p. 183. — Armengaud. *Publication industrielle*, 2<sup>e</sup> série, t. II, pl. 45. — *Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 188). — RUE. *Ibidem*, p. 165. — SALOMON et TOUCHAIS. *Ibidem*, p. 162. — SANTENARD (*Chronique industrielle*, 22 décembre 1889, p. 188. — *Annales industrielles*, 1<sup>er</sup> décembre 1889, p. 702). — SCHARGER. *Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 162. — SCHAUBERGER. *Ibidem*, p. 162. — SCHAUWECKER. *Ibidem*, p. 162. — SCHOEFFER et BUDENBERG (*Génie civil*, 29 avril 1890, p. 511. — *Revue industrielle*, 26 juillet 1890, p. 201). — SCHENHEIDER. (*Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 187. — Armengaud. *Publication industrielle*, 2<sup>e</sup> série, t. X, pl. 45). — SCHOLLWER. *Portefeuille économique des machines*, 5<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 164. — SEIBERT. *Engineering News*, 13 décembre 1879, p. 405. — STAUFFER. *Portefeuille économique des machines*, 1884, p. 114. — STEVENS et MAJOR (*Revue industrielle*, 1<sup>er</sup> mai 1889, p. 181. — *Génie civil*, t. XVI, p. 452). — STORER. *Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 147. — SUCHANECK. *Ibidem*, p. 166. — SWIFT (*Génie civil*, t. XVI, p. 451. — *American machinist*, 16 décembre 1882, p. 4). — TOVOTE. *Collection de dispositifs destinés à empêcher les accidents de machines*, Mulhouse, g<sup>d</sup> in-4<sup>e</sup>, 1889, p. 9. — TRUTE. *Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. XV, p. 55. — VATINET. *Bulletin de la Société d'encouragement*, t. LV. — VINSONNEAU. *Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. XVI, p. 188. — WÄHRER. *Ibidem*, p. 149. — WENGER, *Ibidem*, p. 166. — WILDEHANN. *Ibidem*, p. 165. — WILSON. *Ibidem*, t. XV, p. 56.



# CINQUIÈME PARTIE

## CHAUDIÈRES A VAPEUR

---

### CHAPITRE LIII

#### COMBUSTION

---

##### § 1

#### SURFACE DE CHAUFFE

**932** — *Influence de la température.* — La conception fondamentale de la thermodynamique nous présente, dans toute machine à feu, un corps destiné à servir de véhicule à la chaleur pour mettre en rapport une *source chaude* et une *source froide*. Il transporte à celle-ci le calorique qu'il emprunte à la première, à l'exception de la portion qui a été changée en travaux de toutes natures.

En ce qui concerne en particulier la machine à vapeur, le moteur proprement dit, dont l'étude a fait l'objet de la quatrième partie de ce Cours, constitue le laboratoire dans lequel s'accomplit cette transformation. Il nous reste maintenant à joindre à sa description celle des deux sources en question. Ce sera l'objet de cette cinquième partie.

Nous envisagerons en premier lieu la source chaude, appelée habi-

tuellement *chaudière à vapeur* ou *générateur de vapeur* (1). Il est naturel en effet de commencer par elle, car la source froide, ou condenseur, ne se rencontre pas dans toutes les machines, dont

(1) Denfer. *Traité pratique des chaudières à vapeur*, gr. in-4°. — Delvordre. *Traité pratique sur les chaudières à vapeur*, in-8°. — Laurent et Dunkel. *Album des constructeurs de chaudières à vapeur*, 1875, in-8°. — Poillon. *Cours théorique et pratique de chaudières et de machines à vapeur*. — Delevacque. *Études sur les chaudières à vapeur*, gr. in-8°. — G. Richard. *Les chaudières de locomotives*, gr. in-4°. — Bour. *Notes sur l'installation des chaudières à vapeur*, 1881. — Delaunay. *Études sur les générateurs à vapeur à haute pression*, 1878, in-8°. — Keller, Ludwig et Walther-Meurier. *Chaudières et moteurs à vapeur*, gr. in-8°. — Havrez. *Chaudières à vapeur à vaporisation décroissante en progression géométrique*, in-8°. — Havrez. *Chaudières à vapeur accolées. Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1874, t. I, p. 235. — Massart. *Études sur les nouveaux générateurs pour machines fixes*, t. XVII, p. 515, 537; XVIII, 50. — Benoit (*Cours de chaudières à vapeur à l'usage des chauffeurs*, in-16. — *Traité de chaudières à vapeur à l'usage des propriétaires d'appareils à vapeur*, in-12). — Desnos et Baretta. *Les nouvelles chaudières à vapeur*, 1881, in-4°. — Hervier. *Les appareils à vapeur*, in-12. — Bougarel. Les générateurs à l'Exposition de 1889. *Revue technique de l'Exposition internationale de 1889*, décembre 1889, n° 5; mars 1890, n° 9. — Périssé. Les chaudières à vapeur à l'Exposition de 1889. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*. — Regnard. Les chaudières à vapeur à l'Exposition de 1889. *Ibidem*. — Compère. Les chaudières à vapeur à l'Exposition de 1889. *Ibidem*. — Chabaud. Note sur les générateurs de vapeur à l'Exposition de Vicme. *Bulletin de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 2<sup>e</sup> série, t. III, p. 121.

Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 274. — Callon. *Cours de machines*, t. II, p. 754. — Jacquin. *Traité de machines à vapeur*, t. I, p. 100. — Ser. *Traité de physique industrielle*, t. II, p. 13. — Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 3. — Richard et Baelé. *Manuel du mécanicien conducteur de locomotive*, p. 25. — Bienaymé. *Traité des machines marines*, p. 426. — Leduc. *Les nouvelles machines marines*, t. III, p. 42. — Delaunay. Comparaison des divers types de chaudières. *Les Mondes*, t. XXXVII, p. 202. — Haton de la Goupillière. *Annales des mines*, 7<sup>e</sup> série, t. XVI, p. 165. — Sauvage (Revue de l'état actuel de la construction des machines. *Ibidem*, mai-juin et novembre-décembre 1890. — Production de la vapeur. *Congrès international des chemins de fer*, 1892, question X<sup>e</sup> — Chaudières. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1875, t. 1, p. 466; II, 1288; 1<sup>re</sup> série, t. XXVIII, 158. — Chaudières. *Les Mondes*, t. XXXIII, p. 48.

Wilson. *A Treatise on steam boilers*. — Knight. *Practical boiler-maker*, in-8°. — Smart. The modern practice in the construction of steam boiler. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1884-84. — Hutton. *Steam boiler construction*, in-8°. — W. Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction par G. Richard, p. 474, 684.

Fallenstein. *Dampfkessel, deren rationelle Construction, Anlage und Betrieb*. — Von Gutbier. *Hilfsbuch für den Dampfkesselbetrieb, die Gewichts und Druckvergleichen*, 1874, Leipzig. — Diesz. *Taschenbuch über Dampfkesselanlagen*. — Thielmann. *Lehr und Handbuch der Dampfkessel*, Leipzig, 1879. — Bede. De l'économie de combustible, avec considérations sur l'installation des chaudières à vapeur. *Glaser's Annalen für Gewerbe und Bauwesen*, 1879. — Hildebrandt. *Sur les dispositions mécaniques pour le chauffage des machines à vapeur*, Berlin 1880. — Reiche (*Der Dampfmaschinenconstruction*. Aachen, 1880. — *Recherches sur les chaudières à l'Exposition de Düsseldorf en 1880*, Aachen). — Simerka. *Dampfkessel*, in-8°, Pilsen, 1884.

beaucoup sont à échappement libre. Le générateur, au contraire, existe de toute nécessité. En outre, on voit souvent des chaudières sans machines, destinées à fournir la vapeur nécessaire à certaines industries calorifiques ou chimiques.

**933** — Il s'est introduit un usage regrettable, qui tend d'ailleurs à disparaître. Il consiste à caractériser l'importance d'une chaudière par le nombre de chevaux auquel elle est censée correspondre. Une telle expression manque essentiellement de précision ou, pour mieux dire, elle constitue un véritable non-sens.

D'une part, en effet, elle ne saurait servir pour des générateurs qui ne sont pas associés à un moteur. Mais, dans ce cas même, la puissance dynamique qu'on pourra tirer de telle ou telle chaudière dépendra essentiellement de la manière dont le moteur utilisera le fluide produit par elle.

On peut ajouter à cet égard que, dans l'association d'un générateur et d'un récepteur, c'est bien plus la chaudière que la machine qui détermine la puissance de l'ensemble. En adaptant à un petit cylindre un générateur important, il suffira de mener vite le piston pour développer un grand nombre de chevaux. Avec une faible chaudière, au contraire, le plus grand cylindre ne pourrait que fonctionner lentement et fournir par unité de temps une quantité d'énergie très limitée; car elle reste forcément proportionnelle au poids de vapeur engendré et dépensé pendant cet intervalle.

C'est donc dans le générateur lui-même qu'il convient de chercher la véritable caractéristique de sa puissance. Cette caractéristique est *la quantité d'eau qu'il peut vaporiser en une heure dans des conditions bien définies.*

**934** — Ces conditions dépendent naturellement de la température, et par suite de la pression (\*). Mais il est facile de reconnaître tout d'abord que cette influence aura très peu d'effet.

Rappelons à cet égard l'équation :

$$\lambda = 606,5 + 0,505 t,$$

\* Voy. t. I, p. 771.

qui définit la quantité de chaleur nécessaire pour porter 1 kilogramme d'eau du point de fusion de la glace à la température du thermomètre usuel, et l'y volatiliser sous la pression correspondante. On voit que le premier de ses deux coefficients est à peu près 2000 fois plus grand que l'autre. Chaque degré de température fera donc varier le résultat de  $1/2$  millième de sa valeur. Comme d'ailleurs le thermomètre s'élève peu lorsque la pression vient à s'accroître, même d'une manière notable, il s'ensuit que la variation proportionnelle de la fonction  $\lambda$  sera toujours très limitée.

Par exemple, pour passer de 5 à 10 atmosphères, on ne parcourt qu'une amplitude de 50 degrés environ, ce qui donnera pour  $\lambda$  un accroissement de 1, 5 % ; résultat bien peu important, qui disparaîtra sous diverses influences accessoires.

**935** — *Surface de chauffe.* — L'élément qui sert à différencier réellement les chaudières les unes des autres au point de vue de leur puissance de vaporisation est la *surface de chauffe*, c'est-à-dire l'étendue de la tôle qui, baignée par l'eau sur l'une de ses surfaces, se trouve pour l'autre au contact des gaz chauds du foyer (<sup>1</sup>).

Il est inutile d'ajouter que l'effet produit par une même superficie dépendra très directement de la manière plus ou moins efficace dont elle sera mise en œuvre pour utiliser la chaleur développée par la combustion. A cet égard, on rencontre la plus grande variété. Tandis que, dans certains cas, le mètre carré de surface de chauffe ne vaporisera par heure que 10 à 15 kilogrammes d'eau, l'on arrive souvent au chiffre de 20, 30 et 40 kilogrammes (<sup>2</sup>).

Il faut d'ailleurs se garder d'en déduire hâtivement que ces divers nombres devront, dans chaque cas, servir de mesure au degré d'estime dans lequel il y aura lieu de tenir tel ou tel générateur. Cette question présente bien des faces distinctes.

La plus essentielle est évidemment l'économie de combustible.

(<sup>1</sup>) Manière d'évaluer la surface de chauffe des générateurs. *Quatrième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur.* Rouen, 1881, p. 57.

(<sup>2</sup>) On obtient des chiffres incomparablement plus élevés dans des circonstances exceptionnelles, qui ne pourraient servir de type pour une marche normale (voy. n° 958, note 1, et n° 1186).

Mais cette considération même ne saurait suffire à elle seule, et bien des points de vue divers viendront s'y adjoindre au fur et à mesure que nous avancerons dans cette étude.

Sous ce point de vue du moins, nous pouvons ajouter dès à présent que, pour réaliser la plus grande *économie de charbon*, il convient d'employer une grande surface, et de réduire le *coefficient d'utilisation* à sa valeur minima : 10 à 12 kilogrammes. Toutefois comme le combustible n'est pas le seul facteur de l'*économie pécuniaire*, qui dépend en même temps de l'importance du personnel, de l'entretien, des frais de premier établissement, etc., on pourra trouver avantageux, si le combustible est à bon marché, d'élever ce chiffre à 15 ou 20 kilogrammes.

**936** — Quoi qu'il en soit, c'est ce coefficient qui permettra, dans l'établissement d'un projet, de déterminer les dimensions à donner au générateur dont le type aura été une fois choisi. Il nous met en effet en état d'évaluer la surface de chauffe totale que devra présenter cet appareil, pour correspondre à la puissance dynamique demandée.

Ce calcul est très simple, et je me contenterai de l'expliquer sur un exemple. Nous supposerons à cet effet, d'après les résultats constatés couramment pour les chaudières du type adopté, en les supposant bien établies, que l'on puisse compter sur une vaporisation de 20 kilogrammes d'eau à l'heure. Le résultat varierait naturellement en raison inverse du nombre que l'on viendrait à substituer à celui-ci.

Il est encore nécessaire, pour cette détermination, de posséder le rendement du moteur, dont le type aura été également défini à l'avance. Supposons, à cet égard, que l'appareil soit de nature à consommer  $n$  kilogrammes de charbon par cheval-heure (<sup>1</sup>).

Le pouvoir calorifique de ce combustible devra de même être donné, car c'est un élément essentiellement variable. On l'exprime ordinairement en calories ; mais comme nous connaissons d'autre part le nombre de calories qui est nécessaire pour la production

(<sup>1</sup>) Voy. t. I, p. 821.

de 1 kilogramme de vapeur à la pression de régime, nous pouvons prendre ici directement sous cette dernière forme le pouvoir en question. En fait, on arrive rarement dans la pratique à vaporiser plus de 7 à 8 kilogrammes d'eau à l'aide de 1 kilogramme de houille. Admettons ici le dernier de ces deux chiffres.

La chaudière devra, d'après cela, vaporiser  $8n$  kilogrammes d'eau par cheval-heure; et comme un mètre carré de surface de chauffe est supposé en fournir 20, il faudra  $\frac{8n}{20}$  ou  $\frac{2n}{5}$  mètres carrés pour la rendre capable d'entretenir pendant une heure la puissance d'un cheval.

**937** — Par exemple, pour qu'un mètre carré correspondit précisément à un cheval, il faudrait avoir en particulier :

$$\frac{2n}{5} = 1, \quad n = \frac{5}{2} = 2^{\text{kg}},50;$$

ce qui est un rendement assez fréquent dans la pratique.

Pour réaliser un poncelet de 100 kilogrammètres par seconde, on devra évidemment majorer la surface d'action dans le rapport de 3 à 4. Si donc nous voulons au contraire la faire encore rentrer dans la même étendue d'un mètre carré, il sera nécessaire d'améliorer le rendement dans la même proportion, ou de diminuer  $n$  dans le rapport inverse :

$$n = \frac{5}{4} \cdot 2,5 = 1^{\text{kg}},88;$$

résultat que la perfection actuelle de la construction permet facilement d'atteindre<sup>(1)</sup>.

**938** — Dans tout ce qui précède, la surface de chauffe a été

(1) On n'oubliera pas que ces résultats spéciaux restent essentiellement corrélatifs du choix particulier du coefficient de vaporisation, qui a été fixé à 20 kilogrammes d'eau par mètre carré et par heure.

envisagée en bloc avec son efficacité *moyenne*, rapportée au mètre carré et à l'heure. Mais l'efficacité *réelle* de chaque élément superficiel est très variable, depuis les parties les plus voisines du foyer, qui font beaucoup de besogne<sup>(1)</sup>, jusqu'aux plus éloignées, sur lesquelles on peut, par la pensée, ajouter ou retrancher sans modifier beaucoup le résultat total. Il faudrait, en effet, théoriquement un développement infini pour parvenir à identifier les températures de la masse gazeuse et de la tôle. Il est facile de s'en rendre compte de la manière suivante.

Soit à cet effet  $\theta_1$  cette dernière,  $\theta_0$  la température initiale des flammes, et  $\theta$  la valeur qu'elle conserve à une distance quelconque  $x$  du point de départ. Sur un développement  $dx$ , il s'opère un abaissement thermométrique  $d\theta$  proportionnel au flux de chaleur qui traverse cet élément. Ce dernier est lui-même, pour une surface supposée cylindrique, proportionnel à l'étendue  $dx$  et à la différence locale  $\theta - \theta_1$ , des températures. On peut donc poser, avec une constante  $A$  :

$$d\theta = - A(\theta - \theta_1) dx,$$

$$\frac{d(\theta - \theta_1)}{\theta - \theta_1} = - A dx;$$

et en intégrant depuis le point de départ, avec un logarithme népérien :

$$L\left(\frac{\theta - \theta_1}{\theta_0 - \theta_1}\right) = - Ax,$$

$$\theta - \theta_1 = (\theta_0 - \theta_1)e^{-Ax}.$$

On voit par là que l'écart des températures décroît en progression géométrique, quand la distance augmente en progression arithmétique.

(1) Un essai de Petiet (*Revue industrielle*, 13 décembre 1876) a montré que, pour le dispositif spécial qui se trouvait soumis à l'expérience, une étendue de 100 mètres carrés partagée en cinq zones successives de 20 mètres carrés chacune fournissait pour ces dernières, dans leur ordre d'éloignement, les proportions suivantes en centièmes sur la vaporisation totale :

68,0; 15,0; 9,0; 5,5; 2,5.

Pour éviter un trop rapide refroidissement des flammes au contact de la paroi métallique mouillée sur sa face interne, en diminuant la valeur de A, l'on garnit parfois la partie antérieure du générateur d'un revêtement en briques réfractaires.

**939** — On appelle, d'après cela, surface de chauffe *directe* celle qui *voit le feu*, actionnée aussi bien par la radiation immédiate du foyer que par la convection, c'est-à-dire le contact des gaz chauds; et surface *indirecte* celle qui ne subit que cette seconde influence, d'une manière décroissante au fur et à mesure qu'elle s'éloigne du théâtre de la combustion. Le développement proportionnel de la première tend à augmenter la puissance, et celui de la seconde l'économie.

Il ne faudrait pourtant pas, dans l'établissement d'un projet, s'exagérer l'importance de cette distinction. La quantité de chaleur qui n'est pas cédée immédiatement au métal restant forcément dans les gaz, les rendra plus actifs pour les régions ultérieures. L'élément décisif à cet égard est la température finale du courant gazeux, qui nous occupera en temps et lieu (n° 955).

En partant de ces vues, on a souvent cherché à ménager le *métal du coup de feu* à l'aide d'écrans ou de revêtements réfractaires, et il n'a pas paru que le rendement final ait eu beaucoup à en souffrir (\*).

**940** — Il est important de bien spécifier dans chaque cas si le chiffre que l'on indique pour la surface de chauffe concerne l'étendue de la surface de contact entre les gaz chauds et la tôle, ou bien celle qui sépare cette dernière de l'eau. C'est la première qui forme l'élément le plus intéressant, comme permettant de recueillir la chaleur sans la laisser emporter par le torrent fluide à la cheminée. Une fois entrée dans le métal, elle passera facilement à l'eau, quelle que soit la surface mouillée (\*\*).

(\*) On peut citer notamment sous ce rapport les essais de M. Vanderber sur les locomotives hongroises, et ceux de M. Anderson en Suède (Sauvage. Revue de l'état actuel de la construction des machines. *Annales des mines*, novembre-décembre 1890, p. 559. — Pechar. Die Lokomotiv-Fenerbüchse. *Glaser's Annalen*, 1884).

(\*\*) Voy. n° 956.



A la vérité cette distinction sera bien souvent tout à fait insignifiante; mais, avec certains types qui emploient un grand nombre de tubes de faible diamètre et d'une certaine épaisseur, la différence peut aller jusqu'à un dixième.

## § 2

### COMBUSTIBLES

**941** — *Pouvoir calorifique.* — Un générateur de vapeur, pas plus qu'aucun autre appareil, ne saurait créer par lui-même de l'énergie. Il ne peut qu'en opérer le déplacement. L'énergie calorifique fournie par le jeu de forces naturelles, et dénaturée à des époques diverses par des réactions chimiques endothermiques, s'est emmagasinée dans certains matériaux sous la forme potentielle. Il nous suffit aujourd'hui de la remettre en activité en développant, au moment voulu, des réactions exothermiques appropriées. Il ne reste ensuite qu'à recueillir la chaleur ainsi mise en liberté, et à la transmettre à l'eau, qu'elle convertit en vapeur.

Dans la liste si nombreuse des réactions chimiques qui appartiennent à cette dernière catégorie, la pratique industrielle emploie uniquement <sup>(1)</sup> l'union de l'oxygène avec le carbone et l'hydrogène; phénomène qui a reçu le nom de *combustion*. Les matériaux qui nous présentent dans la nature ces deux corps simples à l'état convenable, sont appelés *combustibles*.

Il existe des combustibles solides, liquides ou gazeux. On les distingue également en naturels <sup>(2)</sup> et artificiels, obtenus à l'aide

<sup>(1)</sup> On peut toutefois citer encore à cet égard l'exemple du développement de chaleur qui accompagne l'hydratation de la soude, et qui fournit le principe du fonctionnement de la chaudière Honigmann (n° 107).

Ajoutons encore que le soufre se rencontre également dans les houilles pyriteuses. Mais sa combustion ne dégage qu'une quantité de chaleur insignifiante. Cette circonstance doit d'ailleurs être considérée comme beaucoup plus nuisible qu'utile, en raison de la corrosion des grilles dont elle transforme le fer en sulfure, et du dégagement d'acide sulfureux qui attaque les tôles en se condensant dans les suies à l'état d'acide sulfurique (n° 1145).

<sup>(2)</sup> Houille, anthracite, lignite, tourbe, bois, paille, pétrole, gaz naturel, etc.

des premiers par voie d'agglomération <sup>(1)</sup>, de carbonisation <sup>(2)</sup>, de distillation <sup>(3)</sup>, ou autres dénaturations <sup>(4)</sup>.

Bien qu'on ait réussi (chap. LVII) à utiliser, pour le chauffage des chaudières, les combustibles les plus divers, on n'y affecte d'une manière véritablement courante que la houille, c'est-à-dire le résidu métamorphique des végétaux qui se sont développés sous l'influence de l'énergie solaire aux dépens de l'acide carbonique et de la vapeur d'eau que renfermait en abondance l'atmosphère de l'époque houillère. Ce produit constitue d'après cela, depuis ces temps reculés, un véritable magasin d'énergie potentielle, que le mineur va reprendre aujourd'hui dans le sein de la terre, et que le chauffeur remet en activité sur la grille de son foyer.

**912** — On distingue, parmi les houilles, diverses catégories d'après la manière dont elles se comportent avec l'air aux températures élevées.

La *houille sèche à longue flamme* est dure, compacte, légère, à cassure unie et conchoïdale. On la voit s'effriter sous l'action de la chaleur. Par la carbonisation, elle laisse un coke peu consistant.

La *houille grasse à longue flamme* présente une cassure un peu lamelleuse. Elle fournit 250 à 500 litres d'un gaz bien éclairant, et procure un coke léger.

La *houille grasse proprement dite* est d'un noir éclatant, de structure feuilletée et de consistance moyenne. Elle se gonfle et s'agglutine sous l'empire de la chaleur. Elle donne un coke compact.

La *houille grasse à courte flamme* est noire et d'un éclat assez vif, plus friable que la précédente, se gonflant moins, mais s'agglutinant encore, pourvu qu'elle ne soit pas détériorée par une longue

<sup>(1)</sup> Briquettes de houille, charbon de Paris, mottes de tannée.

<sup>(2)</sup> Coke, charbon de bois, charbon de tourbe.

<sup>(3)</sup> Gaz de l'éclairage, gaz à l'eau, gaz à l'air, gaz métallurgiques, huiles de gaz, goudrons.

<sup>(4)</sup> Copeaux, sciure de bois, bagasses de sucrerie, rafles de maïs.

On peut joindre pour mémoire à la liste des sources de chaleur appliquées au chauffage des générateurs, l'irradiation solaire directe (t. I, p. 860).

exposition à l'air. La flamme est courte et peu brillante, mais le rayonnement est énergique. Le coke est dur et compact.

La *houille maigre* donne également une courte flamme. Elle est noire, striée, peu consistante, s'enflammant et s'agglomérant avec difficulté. Elle fournit un coke sans consistance.

L'*anthracite* est du carbone presque pur, contenant très peu de matières volatiles et souvent quelques centièmes seulement de cendres. Ce charbon est noir, parfois un peu grisâtre. Il est dur, assez dense, et d'une cassure conchoïdale. Il laisse un coke pulvérulent.

**943** — Indépendamment du carbone et de l'hydrogène, les houilles renferment aussi de l'oxygène et de l'azote, ainsi que diverses substances minérales provenant des circonstances de leur formation sédimentaire. Ces dernières se retrouvent après la combustion sous le nom de *cendres*. Elles ne présentent aucune valeur sous le rapport calorifique, et absorbent même une certaine quantité de chaleur pour leur propre échauffement. De plus, elles donnent naissance, par leur fusion partielle, à des *mâchefers* qui encrassent les grilles et obligent à des nettoyages fort pénibles pour les chauffeurs, et nuisibles à la bonne marche des appareils.

Il convient de mentionner également, comme matière inerte, l'humidité qui imprègne le combustible en proportion variable et parfois importante. Elle exerce sur le *pouvoir calorifique* une influence, non pas même nulle, mais négative, en soustrayant un certain nombre de calories pour fournir à sa propre vaporisation<sup>(1)</sup>.

**944** — En outre de ces causes de diminution du pouvoir calorifique<sup>(2)</sup> de l'unité de poids, les éléments actifs, carbone et hydro-

(1) Il convient toutefois d'excepter à cet égard les *foyers fermés* (n° 1063), dont tous les produits gazeux sont envoyés indistinctement au cylindre. Dans ce cas spécial, la quantité de vapeur ainsi formée n'est plus inutile, comme lorsqu'elle se rend à la cheminée sans passer par la machine.

(2) Il est important que cette expression soit exactement déterminée, et pour cela qu'elle soit rapportée à des repères fixes. On devra donc supposer dans les évaluations le combustible et l'air pris à la température de la glace fondante et à la pression normale de 760 millimètres de mercure. On ramènera de même les produits de l'opération à cette température, en supposant d'ailleurs qu'elle s'est effectuée à pression constante.

gène, se répartissent d'une manière variable dans la constitution chimique des combustibles. Or, la puissance thermique de ces deux corps simples est fort inégale. Tandis que 1 kilogramme d'hydrogène dégage 34462 calories <sup>(1)</sup>, en s'unissant à 8 fois son poids d'oxygène pour donner de l'eau, le carbone ne développe que 8080 calories <sup>(2)</sup>, en se combinant à 2<sup>kg</sup>,667 d'oxygène pour former de l'acide carbonique <sup>(3)</sup>.

Les divers combustibles sont d'après cela susceptibles de pouvoirs calorifiques très divers, et cette appréciation présente évidemment pour l'industrie l'intérêt le plus direct. Aussi a-t-on étudié diverses méthodes destinées à renseigner à cet égard, en vue des achats à effectuer <sup>(4)</sup>.

**945** — *Méthodes d'essai.* — On peut citer en premier lieu le procédé de Berthier connu sous le nom d'*essai à la litharge*. Il est fondé sur la *loi de Welter*, d'après laquelle le nombre des calories dégagées serait simplement proportionnel au poids d'oxygène absorbé dans la combustion.

La houille finement pulvérisée et intimement mélangée à l'oxyde de plomb est chauffée en vase clos. L'oxygène fixé par les éléments réducteurs laisse en liberté un poids correspondant de plomb métallique, facile à recueillir et à doser directement. Une telle opération est simple, mais fort inexacte. L'erreur peut atteindre jusqu'à 25 et même 35 %.

<sup>(1)</sup> Fabre et Silbermann. *Annales de chimie et de physique*, 5<sup>e</sup> série, t. XXXIV, p. 557, et t. XXXVI, p. 5. — Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 21.

<sup>(2)</sup> A l'état de charbon de bois fortement calciné.

<sup>(3)</sup> Lorsque du moins il se trouve en présence d'un excédent d'oxygène. Si l'excès de l'air reste insuffisant, on n'obtient plus que 2473 calories, en produisant 2<sup>kg</sup>,333 d'oxyde de carbone, par la fixation de 1<sup>kg</sup>,333 d'oxygène.

A son tour un kilogramme (et non pas le poids précédent) d'oxyde de carbone peut de nouveau développer 2403 calories, si on le combine avec 0<sup>kg</sup>,571 d'oxygène pour former de l'acide carbonique.

<sup>(4)</sup> Même. Pouvoirs calorifiques des houilles du Nord, du Pas-de-Calais et de la Belgique. *Comptes rendus de la Société des sciences et des arts de Lille*, 5<sup>e</sup> série, t. VI. — Meunier-Dollfus. Chaleur de combustion de la houille. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. CV, p. 1250. — Pouvoir calorifique des houilles. *Génie civil*, t. III, p. 151. — Ser. Puissance calorifique. *Traité de physique industrielle*, t. I, p. 18. — Commines de Marsilly. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 2<sup>e</sup> série, t. IX, p. 200. — Lavoisier. Expériences sur l'effet comparé de divers combustibles. *Académie des sciences*, 1781.

MM. Scheurer-Kestner et Meunier-Dollfus ont effectué, par la méthode de Favré et Silbermann, de nombreux essais de combustibles.

M. Berthelot a institué une méthode de la plus grande précision, au moyen de sa bombe calorimétrique. M. Mahler l'a rendue plus pratique pour l'industrie, en remplaçant la bombe de platine, qui est d'un prix fort élevé, par un obus émaillé à l'intérieur (1).

**946** — On a cherché à rattacher directement l'appréciation *a priori* du pouvoir calorifique aux résultats de l'analyse chimique du combustible.

Dulong admettait qu'après défalcation de la portion de l'hydrogène qui correspond, en tenant compte des équivalents respectifs des deux corps simples, au poids d'oxygène enfermé dans la houille, le surplus de cet élément, ainsi que la totalité du carbone, fonctionnent tous les deux comme s'ils étaient isolés, en dégageant individuellement les quantités de chaleur mentionnées ci-dessus (page 556). Si donc  $c$ ,  $h$ ,  $o$  représentent respectivement les poids de carbone, d'hydrogène et d'oxygène contenus dans 1 kilogramme de houille, on aura pour la quantité de chaleur  $q$  que ce dernier est capable de développer :

$$q = 8\,080\,c + 34\,462 \left( h - \frac{o}{8} \right);$$

l'erreur pouvant atteindre avec cette méthode 12 à 15 %.

MM. Scheurer-Kestner et Meunier (2) ont cru reconnaître qu'il n'y n'y avait pas lieu de distinguer ainsi dans le calcul l'oxygène contenu dans le combustible de celui qui est puisé dans l'atmosphère,

(1) Mahler (*Bulletin de la Société d'encouragement*, 27 novembre 1891. — *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 31 novembre et 14 décembre 1891. — *Génie civil*, t. XX, p. 497). — Scheurer-Kestner et Meunier-Dollfus. La chaleur de combustion de la houille déterminée au moyen de la bombe calorimétrique. *Moniteur industriel*, 5 janvier 1892.

(2) Études sur la combustion de la houille et le rendement des chaudières à vapeur *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 1858-1874, *passim*, articles réunis en 1875. — *Annales de chimie et de physique*, 6<sup>e</sup> série, t. XV, p. 262). — Haton de La Goupillière. *Revue des travaux scientifiques*, t. IX, p. 1.

et qu'il était préférable de baser simplement l'évaluation sur la totalité du carbone; ce qui correspond à la formule :

$$q = 8\,080\,c + 54\,462\,h.$$

On reste cependant encore exposé ainsi à des erreurs de 8 à 12  $\frac{0}{6}$ .

Cornut a été plus loin <sup>(1)</sup>. Il distingue dans le total  $c$  du charbon indiqué par l'analyse élémentaire de la substance, la partie  $c'$  qui s'y trouve à l'état de carbone fixe, et à laquelle on conservera le coefficient normal 8080, et, en second lieu, la portion  $c''$  engagée dans diverses combinaisons volatiles, à laquelle il attribue le pouvoir calorifique de la vapeur de carbone 11 214. La formule devient dans ces conditions <sup>(2)</sup> :

$$q = 8\,080\,c' + 11\,214\,c'' + 54\,462\,h,$$

et l'erreur possible paraît se renfermer entre 1 et 7  $\frac{0}{6}$ .

Ser a proposé <sup>(3)</sup> une règle empirique qui revient à ajouter le poids de l'hydrogène au tiers de celui du carbone, en multipliant le total par 26 800. Comme il est toujours plus facile d'effectuer une multiplication par 3 qu'une division, nous écrirons de préférence cette formule de la manière suivante :

$$q = 8\,960(c + 3h).$$

Sauf quelques écarts exceptionnels, elle semble ne pas excéder comme limite d'erreur 2  $\frac{0}{6}$ .

**947** — Le tableau suivant présente, pour les principales classes

<sup>(1)</sup> Étude sur les pouvoirs calorifiques des houilles (*Société industrielle du nord de la France*, 1887. — 6<sup>e</sup> Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur, 1881). — Haton de la Goupillière. *Revue des travaux scientifiques*, t. VII, p. 421. — *Génie civil*, t. III, p. 151.

<sup>(2)</sup> Cornut a publié dans son mémoire un tableau de résultats numériques comprenant plus de 150 combustibles divers. On y trouve, en même temps que des désignations géographiques précises, l'analyse élémentaire et le pouvoir calorifique de chacun d'eux.

<sup>(3)</sup> Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 66.

COMBUSTIBLES	COMPOSITION EN CENTIÈMES						RÉSILU DE LA CARBONISATION. en centièmes		POUVOIR CALORIFIQUE EN CALORIES			
	CARBONE		HYDROGÈNE		OXYGÈNE		Minim.	Maxim.	ÉTAT SEC ET PUR		ÉTAT ORDINAIRE	
	Minim.	Maxim.	Minim.	Maxim.	Minim.	Maxim.			Minim.	Maxim.	Minim.	Maxim.
Bois . . . . .	48,0	55,0	6,0	6,4	41,0	46,0	50	40	5 600	5 800	2 400	2 500
Tourbe . . . . .	58,0	64,0	5,6	6,4	50,0	56,0	55	40	4 800	5 600	5 000	5 700
Bois fossile . . . . .	58,0	68,0	5,0	6,0	26,0	57,0	55	40	4 800	5 600	4 000	4 800
Lignite . . . . .	70,0	74,0	5,0	5,5	20,0	55,0	40	50	6 000	7 500	5 500	6 600
Houille sèche à longue flamme.	76,0	80,0	5,0	5,5	15,0	20,0	50	60	8 000	8 500	7 200	7 800
Houille grasse à longue flamme.	80,0	85,0	5,2	5,8	8,0	15,0	60	68	8 500	8 800	7 500	8 000
Houille grasse . . . . .	85,0	87,0	4,8	5,5	8,0	12,0	68	74	8 800	9 500	7 800	8 500
Houille grasse à courte flamme.	87,0	89,0	4,0	5,0	6,0	8,0	74	82	9 500	9 600	8 500	8 600
Houille maigre . . . . .	89,0	92,0	5,0	4,0	4,0	6,0	82	90	9 200	9 500	8 000	8 400
Anthracite . . . . .	95,0	95,0	2,0	5,5	2,5	4,0	90	92	9 000	9 200	7 800	8 500

de combustibles naturels, les limites de variation entre lesquelles se renferment la composition élémentaire, le résidu en coke et le pouvoir calorifique <sup>(1)</sup>, soit qu'on les envisage à l'état de pureté, ou dans des conditions plus ordinaires avec une teneur en cendres de 10 à 12 % en général.

### § 3

#### COMBUSTION

**948** — *Quantité d'air*. — Nous venons de voir que le générateur doit son activité à la mise en relation de la houille avec l'air dans des conditions telles que le carbone passe directement à l'état d'acide carbonique, sans s'arrêter à celui d'oxyde de carbone, en même temps qu'on ne laissera échapper aucune portion de l'hydrogène, par l'entraînement d'hydrogènes carbonés <sup>(2)</sup>.

<sup>(1)</sup> On voit, par ces divers chiffres, que celui de 8000 calories fournit, pour les houilles, une sorte de moyenne pratique dont il ne sera peut-être pas inutile de faire ressortir ici la grande importance numérique.

Ce résultat correspond en effet à une capacité de travail de  $424 \times 8000$ , c'est-à-dire 5 592 000 kilogrammètres. Une telle énergie, en admettant qu'elle fût intégralement employée, serait donc capable de soulever le corps qui en est le siège, contre une pesanteur supposée constante, à une hauteur verticale de 5 592 kilomètres (plus de la moitié du rayon terrestre).

Si on l'envisage sous la forme de force vive, elle pourrait imprimer à ce corps une vitesse égale à :

$$\sqrt{2g \times 5\,592\,000},$$

ou 8458 mètres (plus de deux lieues par seconde).

On comprend, d'après de tels chiffres, comment la combustion d'une quantité modérée de houille sur les grilles des grands appareils à vapeur suffit à les rendre capables des énormes puissances qu'on est arrivé aujourd'hui à leur demander.

<sup>(2)</sup> Henry. *Étude expérimentale de la vaporisation dans les chaudières*, 1889, in-8°. — Buchetti. *Guide pour l'essai des machines à vapeur et la production économique de la vapeur*. Rapport de M. Brill sur cet ouvrage. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 3<sup>e</sup> série, t. XII, p. 537. — Lencauchez. Mémoire sur la production de la vapeur comme origine de force motrice. *Bulletin de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 2<sup>e</sup> série, t. XII, p. 91. — Lencauchez et Durant. De la production et de l'emploi de la vapeur (*Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, juin 1890. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 4<sup>e</sup> série, t. VI, p. 558). — Vinçotte. Expériences sur le chauffage des chaudières. *Bulletin de la Société industrielle d'Amiens*, t. XXIII, p. 152. — Poupardin. Influence de la température de l'air arrivant sous les grilles des générateurs. *Chronique industrielle*, 1890, p. 127. — Meunier-Dollfus. Rapport sur le



La première des conditions nécessaires à cet effet est une température élevée, capable de saisir immédiatement les gaz combustibles au moment de leur distillation, et de les griller au contact de l'oxygène. Autrement la calcination progressive en détruirait une partie tout au moins, avec production d'un dépôt de carbone pulvérulent, qui constitue la fumée et la suie, et devient beaucoup plus difficile à brûler, une fois qu'on l'a laissé se précipiter sous cette forme.

**949** — Une seconde condition est la présence de l'air en quantité convenable. La proportion théoriquement nécessaire résulterait dans chaque cas du calcul des équivalents chimiques, en partant des données fournies par l'analyse du combustible. Mais, dans la pratique, ce résultat serait à coup sûr insuffisant, en raison de l'impossibilité de mettre en rapport en chaque point les éléments moléculaires correspondants. En opérant ainsi, on laisserait perdre sans nul doute une grande quantité de produits combustibles.

L'addition d'un certain complément d'air s'impose donc pour réaliser la température maxima. Sa valeur résultera d'ailleurs, non

concours de chauffeurs de 1875. *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*. — Expériences sur la vaporisation. Morin et Tresca. *Traité des machines à vapeur*, 1865. — Scheurer-Kestner et Charles Meunier. Études sur la combustion de la houille, chez Lacroix, 1875. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 274. — Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 9. — Péclot. *Traité de la chaleur*. — De Mondésir. *Cours de l'École des tabacs sur la production et l'emploi de la chaleur*. — Gruner. *Traité de métallurgie*. — Prideaux. *Traité sur l'économie du combustible*. — Siemens. Conférence sur le combustible (*Revue industrielle*, 18 février 1874, p. 21. — *La Métallurgie*, 1888, p. 749. — *Van Nostrand's engineering Magazine*, décembre 1886, p. 451). — Expériences de Cornut. 4<sup>e</sup> *Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Rouen, 1881, p. 86. — Bour. *Note présentée à la Société des sciences industrielles de Lyon*, 1877. — Expériences de Geoffroy. Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 52. — Chomienne. Étude sur la combustion. *Bulletin technologique de la Société des anciens Elèves des Écoles d'arts et métiers*, novembre 1890, p. 845.

Hudson. Heat transmission in boilers. *The engineer*, 5 décembre 1890, p. 449. — The evaporative efficiency of boilers. *Engineering*, 11 avril 1890, p. 455. — Longridge. The evaporation of Lancashire boilers. *Ibidem*, 11 avril 1890, p. 461. — Desmond Fitz Gerald. Evaporation. *Transactions of the American Society of civil Engineers*, septembre 1886, p. 581. — Steam heating. *Engineering and building record office*, in-8°. — Hoadley. Experiments. *Journal of Franklin Institute*, avril 1877. — W.-J. Williams. Economy of Fuel. *American machinist*, 3 septembre 1881, p. 6. — Rankine. Vaporisation. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction par G. Richard, p. 624 à 642.

plus d'un calcul *a priori*, mais des détails de construction de l'appareil, et notamment du degré de brassage qui en résulte pour les gaz.

Un *brassage* rationnel et très actif de la masse gazeuse constitue en effet une condition essentielle à remplir. Sans cela on verrait s'établir en certains points dans les conduits un régime d'écoulement par filets parallèles, où des courants combustibles chemindraient côte à côte avec des veines d'air presque pur, sans s'y mélanger ni provoquer une réaction mutuelle en temps utile, avant leur déversement commun dans l'atmosphère. Toute combinaison favorable à un brassage énergique tendra toujours à réduire le complément d'air qui est inévitable en pratique, et à rapprocher par suite la température de son maximum.

Ajoutons cependant que, pour sauvegarder la conservation d'appareils délicats, on se voit quelquefois obligé de consentir à un certain abaissement de cette température, en ajoutant un excès proprement dit d'air atmosphérique.

On a indiqué <sup>(1)</sup> le chiffre approximatif de 12 kilogrammes d'air comme équivalant théoriquement à 1 kilogramme de houille moyenne, en ajoutant qu'il convient pratiquement de l'augmenter de moitié <sup>(2)</sup>. Avec une ventilation favorisée par des moyens artificiels, ce total peut s'abaisser notablement; jusqu'à 9 ou 10 pour les locomotives <sup>(3)</sup>.

**950** — *Tirage*. — Les moyens à employer pour fournir au foyer la quantité d'air voulue comportent un moteur et un régulateur.

Le moteur se trouve ordinairement dans le tirage d'une cheminée, dont les proportions doivent être en rapport avec l'importance du massif de chaudières <sup>(4)</sup>.

Pour les locomotives en particulier, la hauteur manque forcément, puisqu'elles doivent pouvoir passer sous les ponts. On y supplée en engouffrant l'air dans le cendrier, en raison du mouvement

<sup>(1)</sup> W. Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction de Gustave Richard, p. 299.

<sup>(2)</sup> Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 578.

<sup>(3)</sup> Dubost. *Revue générale des chemins de fer*, février 1891. — Henry. *Troisième session du Congrès international des chemins de fer*, 1889, t. II, question xii, p. 255.

<sup>(4)</sup> Voy. t. I, p. 484.

relatif dû à la marche du train, et surtout en injectant à la base de la cheminée la vapeur d'échappement, dont la condensation produit sur ce point un certain degré de vide et un appel très énergétique.

Avec les foyers fermés (n° 1063), on emploie également des injections de vapeur, et plus souvent encore l'action directe d'un ventilateur mû par la machine (n° 1095).

**951** — Quant à la régularisation du tirage, on la demande en premier lieu à une juste proportion des pleins aux vides dans la grille, à travers laquelle l'air est obligé de filtrer en subissant des résistances.

On possède d'ailleurs un moyen de modération variable à volonté dans la manœuvre du *registre*, qui sert à modifier, suivant les circonstances, l'orifice d'écoulement offert aux gaz par la cheminée (n° 1077).

Ajoutons que c'est surtout dans l'habileté du chauffeur, pour la disposition du charbon sur la grille, que réside le meilleur moyen de régularisation de l'accès de l'air, ainsi que nous le verrons en parlant de la conduite du feu (n° 965).

**952** — *Température initiale.* — Il y a lieu d'envisager séparément la température initiale qui est développée dans le foyer, et sa valeur finale, au moment où les divers produits de la combustion, solides ou gazeux, abandonnent l'appareil. La différence de ces deux températures caractérisera, par ses variations, le degré d'utilité que l'on aura réussi à retirer du charbon dépensé. On a donc tout avantage à accroître la première et à diminuer la seconde.

La température initiale due immédiatement à la réaction de l'air sur le combustible, avant toute cession de calorique aux objets étrangers et principalement à l'eau, reste, bien entendu, indépendante du poids de charbon que l'on voudra envisager par la pensée. Et en effet la chaleur fournie par celui-ci varierait en raison de ce poids, en même temps qu'elle se répartit exclusivement, pour le moment, sur les produits de la combustion, qui sont de leur côté

proportionnels à ce même poids. Nous pouvons donc raisonner sur 1 kilogramme en particulier.

L'utilisation pourra dès lors s'exprimer au moyen du quotient de la division du pouvoir calorifique par le coefficient moyen de chaleur spécifique des produits.

Toutefois, dans le numérateur de cette fraction, le pouvoir calorifique doit être diminué des pertes de toutes natures, dont les principales causes sont les suivantes :

1° La production des *escarbilles*, qui tombent sans être brûlées à travers les barreaux de la grille dans le cendrier, et dont la proportion augmente avec la friabilité, l'effritement et la décrépitation du combustible, parfois aussi en raison d'un fourgonnage trop actif de la part du chauffeur (1); 2° la chaleur sensible emportée par ces escarbilles, ainsi que par la masse des cendres; 3° la précipitation du noir de fumée entraîné dans l'atmosphère, ou fixé dans les suies; 4° l'entraînement des gaz combustibles qui ont échappé à l'oxydation : hydrogènes carbonés ou oxyde de carbone; 5° la température sensible que possède encore l'ensemble de la masse gazeuse au sortir de la cheminée; 6° le rayonnement calorifique au dehors; 7° la conductibilité à travers les massifs. Toutes les mesures qui tendront à réduire ces diverses causes de déperdition seront donc à recommander.

Dans le dénominateur de la fraction, la chaleur spécifique des gaz varie avec la température, contrairement à une opinion autrefois reçue. On peut toutefois admettre comme valeurs approximatives les coefficients suivants pour les divers produits de la combustion :

Acide carbonique. . . . .	0,217
Azote . . . . .	0,245
Air. . . . .	0,228
Vapeur d'eau. . . . .	0,475
Cendres. . . . .	0,200

Les poids respectifs de ces matières, dont la connaissance est

(1) Quand l'opération en vaut la peine, on tamise les cendres pour en retirer ces escarbilles, qui ont d'ailleurs perdu leurs parties volatiles.

nécessaire pour l'évaluation de la moyenne, se calculeraient aisément d'après les résultats de l'analyse chimique du combustible et l'excédent d'air que l'on aura jugé à propos de faire intervenir.

#### § 4

#### UTILISATION DES FLAMMES

**953** — *Température finale.* — La température finale a théoriquement pour limite celle de l'eau dans la chaudière, dont la valeur est connue <sup>(1)</sup> en fonction de la pression de marche. Tant que le courant gazeux reste plus chaud, il semble que l'on puisse encore entreprendre de lui retirer, au profit de l'eau, cette différence. Cependant il y a pratiquement des limites qu'il serait malavisé de vouloir franchir.

D'abord, si l'on mesure cette température à la base de la cheminée et non au sommet, il est nécessaire de lui conserver en ce point une valeur suffisante pour déterminer le tirage; question qui reste d'ailleurs indéterminée <sup>(2)</sup>, et comporte un certain degré d'arbitraire, puisque l'on dispose des dimensions de cette cheminée.

Si l'on apprécie la température en un point encore plus reculé vers l'intérieur, près de l'organe proprement dit de vaporisation, il sera bon de se réserver la possibilité d'utiliser sur ce trajet un excédent de chaleur capable de suffire : 1° au séchage de la vapeur pour diminuer le primage <sup>(3)</sup>, et même au besoin à sa surchauffe <sup>(4)</sup>; 2° à l'échauffement progressif de l'eau d'alimentation dans des réchauffeurs (n° 1108), avant qu'elle pénètre dans les appareils d'évaporation : corps cylindrique, bouilleurs, tubes d'eau <sup>(5)</sup>.

<sup>(1)</sup> Voy. t. I, p. 771.

<sup>(2)</sup> Voy. t. I, p. 489.

<sup>(3)</sup> Voy. p. 31.

<sup>(4)</sup> Voy. t. I, p. 851.

<sup>(5)</sup> Cet échauffement préalable présente, ainsi que nous le verrons plus tard (n° 1108), un double avantage : celui de troubler le moins possible le régime de la vaporisation, au moment où l'on alimente, et en outre de précipiter par la chaleur une partie importante des dépôts en dehors de la chaudière proprement dite, dans des régions où ces matières seront moins nuisibles et plus faciles à enlever.

Dans ces conditions, la limite inférieure que nous fixions tout à l'heure au degré thermométrique de la chaudière, s'abaissera théoriquement à celui de l'eau d'alimentation. Mais, dans la réalité, la nécessité du tirage empêchera d'atteindre des chiffres aussi inférieurs. Nous avons vu en effet <sup>(1)</sup> qu'une température d'environ 300° peut être considérée comme la plus favorable pour le tirage des cheminées.

Il ne faudrait pas d'ailleurs s'exagérer l'intérêt qui peut s'attacher à réduire outre mesure la température finale des gaz. A de tels degrés d'abaissement, elle demeure presque sans action sur l'unité superficielle de tôle, et il deviendrait nécessaire, si l'on tenait à en retirer un résultat appréciable, d'attribuer à la surface de chauffe un développement abusif, qui présenterait de nombreux inconvénients.

**954** — *Utilisation des flammes.* — C'est du mode plus ou moins parfait d'utilisation des gaz chauds que dépendra dans chaque cas la valeur finale de la température, dont nous venons de définir le *desideratum*.

La disposition géométrique de la surface de chauffe est loin d'être indifférente à cet égard. Les parois verticales, le long desquelles la flamme s'élève rapidement, récoltent beaucoup moins de calorique que les parties horizontales chauffées par-dessous. On a évalué cette réduction de l'efficacité relative à  $\frac{4}{5}$ , et même  $\frac{2}{3}$ .

On distingue les chaudières à *courant direct*, et celles qui sont à *retour de flamme*. Dans les premières, les gaz cheminent à peu près en ligne droite du foyer au pied de la cheminée, et s'y élèvent définitivement. Pour les autres, le courant est ramené à travers d'autres *carneaux* vers le point de départ. On réalise ainsi, pour un même espace superficiel, un plus long trajet du fluide au contact des enveloppes métalliques. Mais ce renversement de sens crée une perte de charge, et provoque un dépôt de suie dans la *boîte à fumée* qui se prête mal au nettoyage. L'allumage se trouve également rendu par là plus lent et plus difficile.

(1) Voy. t. I, p. 488, note 5.

Quand on emploie le courant direct, il y a intérêt à ouvrir à la base, et non au sommet du carneau, en son extrémité, le conduit d'évacuation des gaz. De cette manière, on force à se rabattre la partie la plus chaude du fluide qui s'est logée spontanément au plafond de ce conduit, et qui s'échapperait directement sans avoir beaucoup servi, si l'orifice qui lui est offert se trouvait lui-même placé à la partie supérieure.

Le mouvement des gaz chauds résulte en effet de deux forces qui en sollicitent les molécules avec une intensité variable suivant les circonstances : leur légèreté spécifique qui les dirige de suite vers le haut, et le tirage de la cheminée qui tend à infléchir leur marche par la voie la plus courte vers le rampant. Ces deux propensions se trouvent placées à angle droit l'une sur l'autre dans les carnaux horizontaux.

Pour le chauffage d'un bouilleur vertical, au contraire, elles s'ajoutent ou se retranchent directement, suivant que l'on amènera le courant par le bas ou par le haut. Ce dernier mode sera donc préférable, en vue de mieux maintenir le contact de la masse fluide avec l'enveloppe. Lorsque l'on se trouve obligé d'accepter la marche ascendante, on en contrarie du moins la rapidité à l'aide de chicanes.

Il en est de même si le courant chaud doit se bifurquer dans le sens vertical. Comme les deux branches ne sauraient être toujours placées dans des conditions rigoureusement identiques, il s'établira spontanément une tendance au passage du fluide d'une manière prépondérante par l'un des conduits. Si la vitesse est ascendante, cette branche s'échauffant progressivement, l'influence de ses parois tendra à y activer de plus en plus l'écoulement, et à réduire l'autre passage à une stagnation permanente. Au contraire, avec une marche descendante, le courant, en échauffant ses rives, y développe une force ascensionnelle antagoniste, au profit de l'autre passage qui recouvrera peu à peu son activité diminuée. Cette remarque prend beaucoup d'importance pour les réchauffeurs tubulaires (n° 1112).

Quand on dispose plusieurs récipients horizontaux les uns au-dessus des autres, il est bon de les isoler par des cloisons dans

des compartiments distincts, que parcourra successivement le courant. A la vérité, l'on rétrécit par là les sections, en augmentant la vitesse en même temps que le parcours; double motif pour accroître la perte de charge. Mais au moins l'on assure un chauffage meilleur à chacun des récipients, sans quoi celui qui est placé au-dessous se trouverait sacrifié par rapport à l'autre, en raison de la tendance des gaz les plus chauds à se loger au sommet. Pour le même motif, il est préférable, dans chacun des compartiments, d'installer le bouilleur à la partie supérieure, au sein de la température la plus élevée, en laissant en dessous le plus libre passage. Il est défectueux d'établir ce cloisonnement suivant les plans méridiens horizontaux des récipients. Leur partie supérieure se recouvre alors de cendres, qui gênent la transmission du calorique.

**955** — *Circulation méthodique*. — Il convient que la marche du courant gazeux se développe dans son ensemble à contresens du mouvement que prend de son côté le liquide à l'intérieur, depuis le point d'arrivée de l'eau froide jusqu'à la région de la volatilisation définitive. Cette dernière doit être rapprochée du coup de feu, afin de recevoir l'impression décisive de la plus haute température. En même temps il est à propos que les gaz abandonnent le contact des parois métalliques au point où l'eau la plus froide agira aussi efficacement que possible, pour achever de les dépouiller de leur chaleur sensible. Ce principe est connu sous le nom de *circulation méthodique*.

L'eau étant par elle-même peu conductrice de la chaleur, il est nécessaire, pour bien utiliser l'échauffement de la tôle, que le liquide ne reste pas immobile au contact des parois. Sans cela, derrière une tranche d'une faible épaisseur qui emprunterait directement la chaleur du métal, la température de la masse ne s'élèverait qu'avec une extrême lenteur. Cette condition, qui s'applique à tous les générateurs, prend une importance toute spéciale pour ceux d'entre eux auxquels on désire communiquer une grande activité sous un faible volume, et auxquels surtout on a besoin d'assurer une *mise en pression* rapide en raison de la nature de leurs ser-



vices (<sup>1</sup>). On les appelle *chaudières à circulation* (n° 1035). Dans ces appareils, une provision d'eau assez limitée se trouve animée de mouvements rapides, en raison du jeu des densités qui résulte de l'échauffement lui-même, et de dispositifs combinés géométriquement en vue de ce résultat.

**956** — *Conductibilité*. — La chaleur passe des gaz dans l'eau par la succession de trois phénomènes distincts : 1° transmission du foyer à la tôle par contact direct et par rayonnement ; 2° conductibilité à travers l'épaisseur de l'enveloppe ; 3° transmission du métal à l'eau par contact immédiat.

La conductibilité à travers la tôle est fort active, et ce passage intermédiaire est très facile ; au point que, contrairement aux idées anciennement reçues, l'épaisseur du métal, aussi bien que sa nature, restent à peu près sans influence sur la transmission définitive.

**957** — La communication du calorique entre la chaudière et l'eau, sans être aussi aisée, l'est cependant encore beaucoup plus que celle qui s'opère des gaz au métal.

Mais elle retrouvera un degré de difficulté analogue, quoique encore moindre, si on laisse se former, derrière la paroi, des *chambres de vapeur* ; c'est-à-dire si, de l'autre côté d'une partie léchée par les flammes, il se trouve, non plus de l'eau qui présente une grande densité, mais de la vapeur qui en a fort peu, et ne saurait enlever à beaucoup près autant de calories pendant le même temps.

Un résultat semblable se produit si l'on permet la constitution d'une épaisseur notable de *tartre* sur les parois intérieures (n° 1128), et surtout en cas d'interposition de corps gras (n° 1151). Alors l'échange de chaleur se trouve entravé ; la tôle s'échauffe beaucoup plus que dans l'état normal, et peut même rougir. Il en résulte, comme nous le verrons plus tard (n° 1166), une série d'inconvénients et même de dangers.

On doit donc éviter avec grand soin que le *plan d'eau* vienne à

<sup>1</sup>) Pompes à incendie à vapeur, embarcations, etc.

s'abaisser au-dessous de la *ligne des carneaux*, c'est-à-dire de l'intersection de la paroi métallique avec la surface d'intrados des massifs de maçonnerie qui limitent pour elle le contact des flammes. On veillera de même à ce qu'il ne puisse se former sur aucun point de chambre de vapeur accidentelle, en discutant à ce point de vue la forme des surfaces, qui doit permettre partout un dégagement facile et rapide de la vapeur hors du sein du liquide le long des parois. Enfin l'on exécutera fréquemment dans la pratique des nettoyages intérieurs (n° 1146).

**958** — C'est la transmission du calorique entre les gaz et le métal qui subit de beaucoup la résistance la plus prononcée, surtout dans les parties qui se recouvrent de suie (\*).

La conséquence est que l'enveloppe écoulant facilement dans l'eau les calories qu'elle reçoit avec plus de difficulté de l'extérieur,

(\*) On peut établir une relation entre ces trois sortes de conductibilité.

Désignons à cet effet par  $t_0$  la température de la masse gazeuse en un point considéré, par  $t_1$  celle de la pellicule extérieure du métal,  $t_2$  celle de sa surface interne, et  $t_3$  celle de l'eau qui se trouve en contact avec lui. Soient de même  $q_1$  la conductibilité, ou pour mieux dire la convection, c'est-à-dire l'échange calorifique entre le gaz et la toile,  $q_2$  la conductibilité proprement dite à travers le métal,  $q_3$  l'échange entre celui-ci et le liquide. Ces divers coefficients représentent numériquement la quantité de chaleur qui se trouve transmise, pour une différence de température s'élevant d'un côté à l'autre à un degré centigrade, et en ce qui concerne le second, pour un mètre d'épaisseur.

Le flux de chaleur doit naturellement être le même pour les trois passages successifs, une fois que se trouve atteint le régime de température stationnaire, d'après l'équivalence de la chaleur fournie par les gaz et de celle qui est emportée par la vapeur fournie à la machine motrice. Nous poserons donc l'égalité des trois expressions analytiques qu'il prend l'une après l'autre :

$$(t_0 - t_1) q_1 = (t_1 - t_2) q_2 = (t_2 - t_3) q_3.$$

ce qui peut s'écrire de la manière suivante :

$$\frac{t_0 - t_1}{\frac{1}{q_1}} = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{q_2}} = \frac{t_2 - t_3}{\frac{1}{q_3}} = \frac{t_0 - t_3}{\frac{1}{q_1} + \frac{1}{q_2} + \frac{1}{q_3}};$$

la dernière de ces fonctions étant obtenue, d'après une règle connue, en ajoutant terme à terme les diverses fractions égales entre elles.

Si donc on appelle encore  $q$  le coefficient de *transmission définitive* entre l'atmosphère du foyer et l'eau de la chaudière, lesquelles présentent respectivement les tem-

prend dans toute son étendue une température peu différente de

températures  $t_0$  et  $t_3$ , on pourra encore égaler aux expressions ci-dessus la suivante :  $(t_0 - t_3) q$ , ou bien, sous la seconde forme :

$$\frac{t_0 - t_3}{\frac{1}{q}}$$

Il en résulte l'égalité :

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_1} + \frac{1}{q_2} + \frac{1}{q_3}$$

En ce qui concerne les valeurs effectives de ces divers coefficients, Clément a effectué divers essais en vue de déterminer la quantité de chaleur transmise à travers une enveloppe en fonte. Il a trouvé que le maximum correspondait à une vaporisation de 100 kilogrammes par mètre carré et par heure. Christian a obtenu le même résultat pour le cuivre. De Pambour est arrivé, pour le fer, au chiffre de 120 kilogrammes, en effectuant la vaporisation à l'air libre, c'est-à-dire à la pression atmosphérique ou à la température de 100 degrés.

Dans cette dernière expérience, le flux de chaleur représentait donc, pour chaque kilogramme d'eau vaporisée :

$$606,5 + 0,505 \times 100 = 657^{\text{cal}},$$

c'est-à-dire, pour le poids total :

$$657 \times 120 = 76\,540^{\text{cal}}.$$

Il vient par suite, pour la transmission définitive :

$$q (t_0 - 100) = 76\,540.$$

Admettons comme température du foyer :  $t_0 = 1000^{\circ}$  (Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 497); il s'ensuivra :

$$\frac{1}{q} = \frac{1000 - 100}{76\,540},$$

$$\frac{1}{q_1} + \frac{1}{q_2} + \frac{1}{q_3} = 0,01178.$$

On connaît d'ailleurs directement la conductibilité du fer, qui est 58,82 pour un mètre d'épaisseur, d'après les derniers travaux de Neudstadt et d'Angstrom (A. Witz. *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 1892, p. 240). On aura donc, pour une tôle d'un centimètre par exemple :

$$q_2 = \frac{58,82}{0,01} = 5882; \quad \frac{1}{q_2} = 0,00017;$$

$$\frac{1}{q_1} + \frac{1}{q_3} = 0,01161.$$

Il suffirait par conséquent de la mesure directe de l'un de ces deux coefficients d'échanges extrêmes pour en déduire l'autre. Malheureusement les résultats expérimentaux ne renseignent pas suffisamment, pour le moment, à cet égard.

celle du liquide, laquelle est, d'après la loi de Regnault <sup>(1)</sup>, très éloignée de celle des gaz incandescents.

On doit voir là une circonstance fort heureuse au point de vue de la conservation des appareils. Si, par une circonstance quelconque, du genre de celles que nous indiquions tout à l'heure, cet ordre de choses se trouve renversé, et que la transmission soit rendue plus difficile entre la tôle et le liquide, le métal se surchauffe et subit des détériorations profondes, que l'on désigne sous le nom de *coup de feu* (n° 1168). Elles obligent tout au moins à des réparations, et, dans des cas extrêmes, à la mise au rebut des appareils.

## § 5

### VAPORISATION

**959** — *Vaporisation*. — Une fois la chaleur communiquée à l'eau, celle-ci se convertit en vapeur. La gazéification peut s'opérer dans toutes les parties de la masse, mais il faut toujours que les bulles finissent par se dégager à travers la *surface libre*, de manière à se réunir dans la capacité qui surmonte cette dernière, pour y constituer une atmosphère de vapeur.

Si donc ce plan d'eau est très étendu par rapport à la surface de chauffe, le dégagement pourra s'effectuer tranquillement. Il sera au contraire nécessairement tumultueux, si l'on restreint beaucoup les dimensions du plan d'eau. Or cette circonstance présente une réelle importance, car elle facilite l'entraînement mécanique des particules liquides, ou en d'autres termes le primage, dont nous avons reconnu les inconvénients <sup>(2)</sup>.

Une étendue notable de la surface libre ralentit également, en cas de défaut d'alimentation, l'abaissement du plan d'eau, dont nous reconnaitrons plus tard la gravité (n° 1178).

**960** — Le volume liquide renfermé dans la chaudière influence

<sup>(1)</sup> Voy. t. I, p. 778.

<sup>(2)</sup> Voy. t. I, p. 801, et t. II, p. 34.

également la vaporisation. Il tend à régulariser le phénomène, en répartissant sur une plus grande masse un afflux donné de chaleur. Il forme en quelque sorte *volant* pour les irrégularités de marche du foyer.

Par contre il ralentit la mise en pression. Il présente en outre le défaut de déterminer une perte importante de chaleur, et par suite de combustible, lors de la *mise hors feu* ; inconvénient qui sera surtout sensible avec les machines intermittentes, et beaucoup moins pour celles que l'on n'arrête qu'en vue des nettoyages ou des réparations.

Mais c'est surtout sous le rapport de la sécurité que cet élément exerce une influence décisive. Nous reconnaitrons plus tard (n° 1158) à quel point il constitue un danger redoutable, en constituant un énorme emmagasinement d'énergie potentielle, capable d'exercer les plus grands ravages, si une explosion de l'enveloppe vient à la mettre subitement en liberté.

L'antagonisme entre ces deux tendances opposées est inhérent à la nature des choses, et ne saurait disparaître. Il déterminera, suivant les circonstances, le choix de l'ingénieur entre les chaudières à corps cylindrique ou les générateurs à petits éléments (n° 1029).

**961** — Le volume de vapeur qui surmonte le liquide ne présente pas le même inconvénient, tout au moins à degré égal, à beaucoup près. Et cependant il contribue lui-même à régulariser la pression sous les appels du moteur, variables aux divers instants de la course du piston, et par suite aussi l'ébullition qu'influenceraient ses à-coups. Il diminue donc également le primage.

Pour ce motif, on cherche souvent à augmenter encore ce volume, en adjoignant à la portion du corps de chaudière qui lui est directement affectée, un *dôme de vapeur* additionnel surmontant ce dernier (n° 1101).

**962** — *Rendement calorifique.* — Il est facile, d'après ce qui précède, d'apprécier le *coefficient*  $\varepsilon_2$  *d'utilisation thermique* (1) que réalisent les générateurs de vapeur.

(1) Voy. t. I, p. 600.

Supposons à cet effet qu'un kilogramme de combustible soit capable de développer intégralement 8 000 calories. Si l'on effectue la vaporisation à la tension de 10 atmosphères, c'est-à-dire à la température de 180 degrés, il faudra fournir à chaque kilogramme d'eau :

$$606,5 + 0,505 \times 180 = 661^{\text{cal}}.$$

On peut d'après cela vaporiser théoriquement :

$$\frac{8\,000}{661} = 12^{\text{kg}},1;$$

ce qui représente, pour le coefficient économique thermique de l'opération dans laquelle on volatiliserait 8 kilogrammes d'eau par kilogramme de houille (n° 956) :

$$\epsilon_2 = \frac{8}{12,1} = 0,66;$$

et pour un résultat de 7 kilogrammes seulement :

$$\epsilon_2 = \frac{7}{12,1} = 0,57.$$

On estime que, dans la pratique, ce coefficient varie de 55 à 65 %. On a cependant obtenu des résultats notablement supérieurs quand il s'agit de chauffeurs choisis, qui apportent, en vue d'un concours, une attention exceptionnelle, et disposent de combustibles de choix.

**963** — La perfection économique de l'utilisation de la chaleur dans les générateurs est loin d'avoir progressé depuis Watt dans la même proportion que la puissance, aujourd'hui gigantesque, que peuvent atteindre ces appareils. Elle est demeurée à peu près stationnaire, et l'on obtient à l'aide d'un kilogramme de houille environ le même poids de vapeur que réalisait ce grand ingénieur. S'il est vrai que certains détails se sont perfectionnés dans l'intervalle,

on se trouve d'autre part de plus en plus gêné par les emplacements dans les grandes villes, et l'on néglige trop souvent, plus que par le passé, certaines précautions qui permettraient de réduire les pertes de chaleur.

Notons d'ailleurs que, pour ce genre d'appréciation, l'importance très variable du primage <sup>(1)</sup> jette souvent une certaine incertitude sur le chiffre du rendement calorifique *évalué en eau vaporisée*. Il en est de même quand on n'indique pas si les purges font, ou non, retour à la chaudière (n° 1116).

**964** — Il s'est produit ce résultat assez inattendu, et très digne de remarque que, sous ce rapport, les dispositifs les plus différents (en les supposant bien établis et convenablement proportionnés dans leurs diverses parties) arrivent tous à peu près à l'équivalence; contrairement aux assertions des prospectus, dans lesquels chacun annonce uniformément une notable économie sur ses concurrents. Cette illusion résulte souvent des soins exceptionnels, et de la bonne volonté instinctive qui sont apportés par chaque inventeur pour les essais de son propre appareil, tandis qu'il envisage les autres dans les conditions de la pratique courante.

Il semble, d'après cela, que la préoccupation du rendement doit être à peu près écartée, ou du moins reléguée au second plan, quand il s'agit de fixer le choix du type de générateur qu'il s'agit d'adopter.

Mais ce serait en même temps une grande erreur de conclure de là que l'extrême variabilité que présentent aujourd'hui ces dispositifs n'ait pas de raison d'être. Elle est au contraire d'une véritable importance, pour permettre d'adapter dans chaque cas l'appareil à des conditions bien déterminées d'emplacement, de combustible, d'exigences relatives au mode de fonctionnement, etc.; lesquelles conduiront à donner, dans cette appréciation, la prépondérance à telle ou telle propriété à l'exclusion des autres; quelques-unes d'entre elles pouvant même être contradictoires <sup>(2)</sup>.

<sup>(1)</sup> Voy. p. 54.

<sup>2)</sup> Ainsi par exemple que nous l'avons indiqué tout à l'heure en ce qui concerne la régularité et la sécurité (n° 959).

Une discussion générale des divers modèles essentiels de chaudières s'impose donc ici, ainsi que la pondération de leurs avantages et de leurs inconvénients respectifs, suivant les circonstances qui pourront se présenter pour le praticien. Avec des choix faits hâtivement et sans discernement, il arriverait précisément que le type que l'on aurait adopté, capable, moyennant des conditions favorables, de lutter à égalité avec les autres sous le rapport de l'économie, tomberait au contraire dans un fonctionnement déplorable, en perdant tous ses avantages.

## § 6

### CONDUITE DU FEU

**965** — *Chauffeur*. — Nous venons d'étudier la théorie de la combustion. Il reste maintenant à indiquer les moyens pratiques d'en assurer les *desiderata* (<sup>1</sup>).

Le *chauffeur* doit être un homme d'une certaine instruction, présentant des garanties suffisantes de moralité, de sang-froid, de sobriété. Son habileté est l'un des facteurs principaux de l'économie du combustible. Dans beaucoup de centres industriels, un enseignement technique est fait aux chauffeurs, et des concours avec primes ont été institués comme moyen d'émulation.

On doit s'attacher à faciliter leur service, sans excéder leurs

(<sup>1</sup>) Conduite du feu dans les chaudières verticales. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, mars 1887, p. 211. — Jaunez. *Manuel du chauffeur. Guide pratique à l'usage des mécaniciens, chauffeurs et propriétaires d'appareils à vapeur*. — Cornut. *Cours de chauffeurs*, in-8, Lille, Danel, 1889. — Ledieu, Hubac et Gilbert. *Manuel de l'ouvrier chauffeur de la flotte*. — Couche. *Emploi de la houille dans les foyers Ten-Brink*, in-8°. — Coal waste and some remedies. *The railway Engineer*, avril 1889, p. 120. — Schwackhöfer. *Technologie de la chaleur et de l'eau, avec examen spécial de la conduite des chaudières à vapeur*. Vienne, in-8°, 1885. — Gautero. *Manuel du machiniste et du chauffeur*. Milan, in-32, 1885. — Zanon. *Conduite des chaudières et des machines à vapeur*. Venise, in-16, 1885. — Beretta. *Istruzioni pratiche de caldaie e macchine a vapore*. Novare, in-16, 1891. — Pizzorno. *Schema di programma per gli asami conduttori di apparecchi a vapore*. Gênes, in-16, 1891. — Sanna. *Manuale dei conduttori di apparecchi a vapore*. Turin, in-16, 1891. — Sinigaglia. *Istruzione pratiche, per fuschissi, con un'introduzione destinata ai proprietari di caldaie a vapore*. Rome, in-16, 1891.



forces physiques, ni l'intelligence moyenne de leur classe. Ces fonctions sont pénibles. La température qui règne aux abords du foyer a fait donner à cette région le nom d'*enfer* (<sup>1</sup>). Pour réduire l'intensité du rayonnement, on laisse une couche d'eau à la sole du cendrier, qui est garnie de fonte ou d'un radier étanche. Cette eau sert à éteindre les escarbilles. Elle forme en même temps un miroir qui permet au chauffeur d'étudier par-dessous la marche de son feu.

**966** — Divers instruments : ringards, tisonniers, pinces, pelles, etc. (fig. 570 à 579), sont mis à sa disposition pour piquer le feu, dégager la grille des mâchefers qui l'encombrent, et disjoindre au moment voulu les barreaux. Les houilles grasses, en s'agglutinant, bouchent les passages de l'air, et il est nécessaire de les briser fréquemment. Cette propriété est d'ailleurs utile pour retenir les menus sur la grille. Les houilles maigres conservent leurs formes et leurs intervalles, et l'on doit au contraire éviter de les fourgonner avec excès, de peur d'augmenter la proportion des escarbilles.

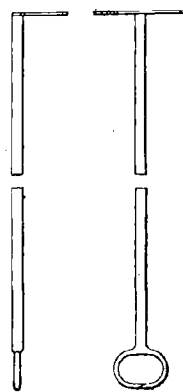


Fig. 570 et 571.  
Raclette pour nettoyer la grille (élevations antérieure et latérale).

**967** — Le chauffeur manœuvre le registre pour activer ou ralentir le tirage. Un manque d'air produit de la fumée, un trop grand excès provoque le refroidissement. Il ouvre ou referme, suivant les variations de l'allure, les trous d'air que l'on ménage parfois à travers la porte du foyer, en vue d'admettre au moment utile un supplément d'air, destiné à griller les gaz combustibles qui viendraient à distiller en trop grande abondance (<sup>2</sup>).

Il ouvre et ferme la porte du foyer pour charger le combustible,

<sup>1</sup> Les paquebots qui naviguent dans la mer Rouge affectent souvent, au service des grilles, des nègres, dont le tempérament est presque seul capable de résister à de telles conditions.

(<sup>2</sup>) On voit parfois, au moment de l'ouverture de la porte du foyer, se former une flamme caractéristique de l'oxyde de carbone, que l'on n'observe plus dans les périodes d'incandescence générale.

travailler le feu ou dégrasser la grille. En raison de l'afflux considérable d'air froid qui résulte de ces manœuvres, on doit fermer le registre avant d'ouvrir le foyer, afin de diminuer l'appel<sup>(1)</sup>.

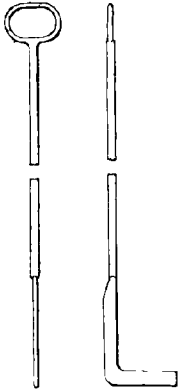


Fig. 572 et 573.  
Ringard pour détacher  
les scories (élevations  
antérieure et latérale).

**968** — *Marche normale.* — Si le feu était abandonné à lui-même, la quantité d'air ne se trouverait presque jamais en rapport convenable avec la phase que traverse à chaque instant la combustion.

Quand on vient de charger du combustible, la grille est encombrée, le charbon s'agglomère s'il est d'une nature collante, l'air filtre difficilement ; et cependant c'est le moment où il en faudrait beaucoup pour griller le flot de gaz combustible qui commence à distiller, avec production de fumée noire.

Vers la fin de la combustion au contraire, le coke se raréfie, les intervalles sont redevenus libres, et l'air passe en grande abondance, au moment où le carbone seul reste en ignition et où toute la partie volatile a disparu ; ce qui devrait inversement motiver une diminution dans l'accès de l'air.

Il est donc nécessaire que le savoir-faire du chauffeur remédie à ces tendances par l'habile disposition de son feu.

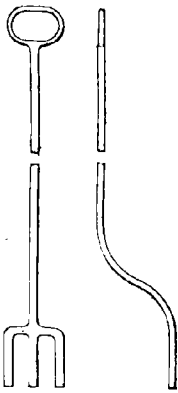


Fig. 574 et 575.  
Fourche pour détacher  
les scories (élevations  
antérieure et latérale).

**969** — Un premier principe consiste à charger fréquemment et à petites doses, afin d'atténuer autant que possible les alternatives dont il vient d'être question. Une combustion convenablement dirigée nécessite moins de dégrassages, et détermine moins d'usure

qu'un régime de coups de collier.

(1) On emploie aussi dans ce but certains procédés mécaniques (n° 1077). Un moyen radical d'écarter ces irrégularités se trouve dans l'emploi des foyers fermés (n° 1065).

Il faut disposer le combustible bien également de manière à uniformiser la filtration de l'air. Tout au plus charge-t-on un peu davantage sur les bords que vers le centre. Les barreaux sont par là soulagés dans leur partie la plus éprouvée par la pesanteur et par la température. En outre les parois se trouvent jusqu'à un certain point protégées. On donne une faible pente de l'avant vers l'arrière de la boîte à feu, pour faciliter le dégagement de l'air dans cette dernière région qui est la plus décisive. On empêche avec soin la formation de cratères, donnant passage à des dards de chalumeau. Il suffit pour cela de jeter de petites pelletées, là où le besoin s'en manifeste.

On dispose de préférence le combustible frais sur une première zone près de l'entrée, de manière à obliger tous les produits de sa distillation à passer au-dessus de la région incandescente et oxydante. Puis l'on repousse vers l'arrière le charbon ainsi préparé par une demi-combustion, avant d'effectuer un nouveau chargement à l'avant. On opère autant que possible ce refoulement en dessous de la masse embrasée, afin d'assurer l'oxydation des dernières parties volatiles, et de ne pas amortir la température superficielle, qui détermine l'intensité du rayonnement vers la chaudière.

Il ne faut pas perdre de vue que cet ensemble de précautions, utile pour la bonne marche du foyer, est en contradiction avec l'intérêt instinctif du chauffeur, qu'il assujettit à des manœuvres plus fréquentes et plus pénibles que ne le serait un chargement en grand sur une épaisseur importante. Il l'oblige également à de fréquents nettoyages de grille, principa-



Fig. 576 et 577.  
Levier pour détacher  
les barreaux (élevations  
antérieure et latérale).

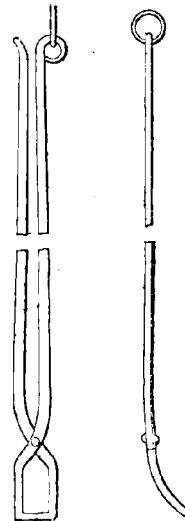


Fig. 578 et 579.  
Pince pour détacher  
les barreaux (élevations  
antérieure et latérale).

lement à l'arrière, où il est surtout essentiel d'assurer le libre accès de l'air, pour griller au passage tous les éléments combustibles du courant. Il est donc bon, par des primes d'économie, d'intéresser cet ouvrier à un bon résultat.

**970** — Dans les moments où l'on veut pousser davantage le feu, l'on ouvre un plus grand accès à l'air et l'on augmente la charge. Ordinairement, pour les chaudières fixes, on passe 40 à 60 kilogrammes de houille demi-grasse par mètre carré de grille et par heure, et dans la marine, 80 à 100 kilogrammes. Ces chiffres augmentent avec le tirage artificiel. On dépasse, pour les locomotives, celui de 400 kilogrammes (1).

Les charges se répartissent sur 0 m. 12 à 0 m. 20 d'épaisseur pour le tout-venant, et jusqu'à 0 m. 30 avec des gaillettes de bonne qualité. On se tient entre 0 m. 20 et 0 m. 25 pour le coke ; 0 m. 25 et 0 m. 30 pour le bois et la tourbe.

**971** — *Mise en feu, mise hors feu.* — Pendant un arrêt momentané de la machine (2), on ferme le registre et l'on ouvre les portes du foyer. On retire au besoin du combustible. Si les soupapes viennent à souffler (en raison de l'accumulation de calories qui n'a plus pour contre-poids l'appel de vapeur par le cylindre), on soulage l'une d'elles.

Quand on approche de la mise hors feu normale, on diminue progressivement les charges. Au moment final, on couvre le feu de cendres, on ferme le registre et les portes. Le chauffeur ne doit quitter sa chaudière qu'après avoir constaté la baisse graduelle et décisive du manomètre.

Pour remettre en marche, on ouvre le registre, puis les portes. On tisonne le feu, et l'on charge du combustible frais.

Quand il s'agit d'une première mise en feu, on intercale, entre la grille et la houille froide, des copeaux, des fragments de fagots ou de bois résineux, que l'on enflamme par-dessous au moyen d'un paquet de chiffons gras allumés, présentés à l'extrémité du pique-feu.

(1) *Troisième section du Congrès international des chemins de fer*, t. II, question XII. — M. Pechar cite une consommation de 800 kilogrammes (*Gläser's annalen*, 1884).

(2) Cornut. *Refroidissement des générateurs pendant les arrêts* ; 1881, in-8°.

## CHAPITRE LIV

### CONSTRUCTION DU CORPS CYLINDRIQUE

#### § 1

#### MATÉRIAUX

**972** — *Cuivre, laiton.* — Les métaux qui interviennent dans la construction des chaudières à vapeur sont le fer, l'acier, la fonte, le cuivre et le laiton.

Ce dernier n'est employé que pour la fabrication des tubes, et dans la robinetterie.

On en fait également en cuivre rouge, mais ce métal sert surtout pour les parois du foyer des locomotives <sup>(1)</sup>. On a complètement renoncé à son emploi pour les corps cylindriques, depuis qu'il a été reconnu que la conductibilité, par laquelle il se recommandait, reste sans influence appréciable sur le résultat de la vaporisation (n° 956). Il convient d'ajouter que la résistance du cuivre fléchit rapidement avec la température, et que ce métal est d'un prix élevé.

**973** — *Fonte.* — La fonte, qui a joué autrefois un rôle important dans la fabrication des chaudières, a presque disparu de cette branche d'industrie à la suite de nombreux accidents. On n'y a plus recours que pour certaines pièces spéciales, de fabrication difficile, telles que le trou d'homme, les têtes de bouilleurs, etc.

<sup>(1)</sup> En Amérique on leur substitue souvent l'acier pour cet emploi.

On se sert à cet effet de fonte très douce, coulée en sable. Une fonte dure casserait au rivetage destiné à l'assembler à la tôle; opération qui exige des précautions particulières (1). La tendance actuelle est d'éliminer complètement la fonte, comme une substance éminemment dangereuse, spécialement dans les parties exposées à des variations brusques de température, sujette à se fissurer d'une manière d'abord peu visible, et à rompre sans prévenir.

**974** — *Fer.* — On distingue le fer *doux*, capable de subir à froid des déformations notables, le fer *aigre* qui se gerce et se crique quand on le travaille à froid, et le fer *rouverain* qui, assez doux à froid, prend de l'aigreur à chaud. Le premier seul peut convenir pour la confection des chaudières. Quand elle doit périr, une tôle douce se déchire progressivement, et souvent elle prévient en temps utile. Un métal aigre vole subitement en éclats. C'est surtout pour les tôles de coup de feu et les pièces embouties qu'il est essentiel d'employer des fers de qualité. D'une manière générale d'ailleurs, l'économie qui résulterait de l'achat de tôles inférieures serait peu sensible et bien mal entendue, si l'on réfléchit aux dangers et aux responsabilités qu'elle ferait encourir. On rejette les fers qui ont une cassure lamelleuse à facettes ou à gros grains. On préfère une texture finement grenue ou une cassure à fibres longues.

Ou doit se tenir en garde contre les défauts d'homogénéité du métal qui sont : les fissures, à peine visibles d'abord et s'aggravant rapidement; les pailles, qui résultent d'une intercalation de scorie, laquelle transmet mal la chaleur et peut déterminer des soufflures; la dessoudure ou le dédoublement des tôles, après un laminage défectueux.

**975** — La résistance de la matière à l'extension s'apprécie à l'aide d'éprouvettes de 300 millimètres de longueur, sur lesquelles on marque deux traits espacés de 200 millimètres. C'est sur cet intervalle que l'on mesure l'allongement proportionnel, comprenant

(1) Keller. Conditions de résistance des fonds plats circulaires des appareils à vapeur *Annales des mines*, 1886, 1<sup>er</sup> sem., p. 346. — Assemblage de la tôle et de la fonte. *Ibidem.*, 1887, 1<sup>er</sup> sem., p. 185; 1888, 2<sup>e</sup> sem., p. 516.

l'influence de la striction. La limite d'élasticité doit atteindre environ 15 kilogrammes par millimètre carré; la résistance à la rupture 28 kilogrammes comme minimum de rigueur, et jusqu'à 40; l'allongement, pour le moins 5 %, et jusqu'à 30 %. On essaye également la douceur à l'aide du pliage, qui doit pouvoir s'effectuer bord à bord sans criquer ni gerçure.

La résistance d'une tôle n'est pas la même suivant les deux côtés de la feuille. Elle surpasse, dans le sens du laminage, d'environ 10 % celle de la direction perpendiculaire. Pour former le corps cylindrique, on doit toujours cintrer dans le sens du laminage; jamais en travers.

La résistance du fer varie peu avec la température jusqu'aux environs de 200°. Elle a même semblé, dans les essais de Fairbairn, augmenter légèrement jusqu'à cette limite, pour diminuer ensuite rapidement. Cette circonstance est assez favorable, puisque la température de l'eau ne dépasse pas pratiquement ce chiffre (\*).

**976** — *Acier*. — L'emploi de l'acier pour la construction des générateurs a été très discuté, mais il a des partisans convaincus, et semble avoir pour lui l'avenir (\*). Il est toutefois bien essentiel

(\*) De Maupeou. Étude relative à l'action de la chaleur sur les parois des chaudières. *Mémorial du Génie maritime*, 1889, p. 221. — Kollmann. *Sur la résistance du fer à chaud*, Berlin, in-4°, 1880.

(\*) Vinçotte. Emploi de la tôle d'acier pour la construction des chaudières. *La Métallurgie*, 1889, p. 457. — Tresca. Procès-verbal des expériences faites sur la résistance des tôles en acier fondu pour chaudières. *Annales du Conservatoire*, 5<sup>e</sup> série, t. XIX, p. 545. — Cornut. Emploi de l'acier dans les chaudières. — Haton de la Goupillière. *Revue des travaux scientifiques*, t. IX, p. 2. — Cornut. *Comparaison des tôles des diverses forges*, Lille, 1888, in-8°. — Rémaury. Note sur l'emploi dans les chaudières à vapeur des tôles en métal fondu. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, 1888, p. 768. — Considère. *Annales des ponts et chaussées*, 1886. — Couche. *Annales des mines*, 5<sup>e</sup> série, t. XIX, p. 311. — *Annales industrielles*, 17 février 1889, p. 202. — *Quatrième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, p. 77. — *Cinquième Congrès*, p. 12. — *Sixième Congrès*, p. 57. — *Septième Congrès*, p. 7, 9, 21. — *Treizième Congrès*, p. 189.

Chaudières d'acier. *American machinist*, 5 décembre 1885, p. 4. — Boiler Steel, Material and Tests. *The railway Engineer*, janvier 1890, p. 15. — Steel Boilers. *The railroad Gazette*, 1878, p. 160 et 174. — David Philipps. On the comparative endurance of iron and mild steel when exposed to corrosive influences. *Van Nostrand's Engineering Magazine*, t. XXX, p. 188. — The Steel Boiler of the Livadia. *Engineering*, 15 avril 1881, p. 378. — Greig and Eyth. Experiments referring to the use of iron and steel in high-

d'éviter à cet égard tout malentendu, et de définir avec précision la signification de ce mot en vue de cette application spéciale. On doit entendre par là, non pas le métal trempé, dur et cassant dont ce seul nom éveillait autrefois l'idée, mais au contraire un métal fondu, capable de se souder, et non susceptible de trempe. Il peut toutefois devenir aigre par un brusque refroidissement <sup>(1)</sup>, ainsi que par une succession de chaudes. Il est bon pour ce motif de le travailler en une seule fois, en s'aidant au besoin des appareils hydrauliques d'étampage et d'emboutissage. On se sert souvent de maillets de bois pour le travail à la main, et l'on cesse de marteler quand le rouge a disparu. On ne peut compter d'une manière absolue sur le recuit pour rendre, à coup sûr, à une tôle aigrie toutes ses propriétés primitives.

L'acier coulé renferme des soufflures qui ne disparaissent pas toujours au laminage. Toutefois il présente une homogénéité bien plus satisfaisante que celle des fers en paquets. Chimiquement l'acier de chaudière peut être considéré comme du fer presque pur.

Sa résistance est moindre que celle d'un métal susceptible de trempe. Cette propriété et la douceur, qui est caractérisée par l'allongement proportionnel, suivent en effet une gradation inverse. On perd en résistance en gagnant en allongement. La résistance à la rupture ne dépasse pas, dans cette application, 50 kilogrammes. Le service de la marine militaire a fixé le chiffre de 42 kilogrammes, avec 26 % d'allongement, et la condition de rester doux après la trempe. Un acier dur serait plus résistant, mais il ne pourrait supporter sans gerçures des déformations notables.

## § 2

### CORPS CYLINDRIQUE

**977** — *Corps cylindrique.* — La forme de la capacité offerte à

pressure Boilers. *Proceedings of the Institution of mechanical Engineers*, juin 1879 p. 268. — Parker. Experiments in the use of thick steel Boiler plates. *Van Nostrand's Engineering Magazine*, septembre 1885, p. 200.

<sup>(1)</sup> Pour ce motif, on doit se préoccuper des variations brusques de température dues à l'ouverture en grand de la porte du foyer, ou à l'alimentation avec l'eau froide



la vaporisation est toujours celle d'un cylindre de révolution terminé par deux fonds.

Les plus grands portent le nom de *corps cylindrique*. Leur diamètre, qui est ordinairement compris entre 1 et 2 mètres, a été poussé exceptionnellement jusqu'à 5 mètres. La longueur dépasse rarement 10 mètres. Elle a cependant quelquefois approché de 20 mètres.

Si nous faisons abstraction des fonds, la surface de chauffe est proportionnelle à la circonférence de la section droite, c'est-à-dire au diamètre, et le volume à l'aire de cette section, ou au carré du diamètre. Le volume d'eau rapporté au mètre carré de surface de chauffe croît donc lui-même en raison du diamètre. C'est par conséquent aux chaudières grosses et courtes que correspond la plus grande régularité de fonctionnement, mais en même temps, par compensation, le plus grand danger (n° 1029). Ajoutons que l'épaisseur des tôles doit augmenter en même temps que le diamètre (n° 989), et, avec elle, le poids et le prix de premier établissement. Aussi donne-t-on en général la préférence, à volume égal, à des chaudières plus allongées et d'un moins fort calibre.

Des récipients d'une forme analogue, mais de dimensions moindres, portent le nom de *bouilleurs* (n° 1005), ou de *réchauffeurs* (n° 1108), suivant leurs fonctions. D'autres, appelés *tubes* (n° 1019), ont un diamètre incomparablement plus réduit, qui ne se compte plus qu'en centimètres.

Nous nous occuperons dans ce chapitre du mode de construction du corps cylindrique.

**978** — *Viroles*. — On le compose de *viroles* successives, c'est-à-dire d'anneaux assemblés en prolongement les uns des autres, à l'aide de *rivures* circulaires (n° 984). Chaque virole est formée d'une feuille de tôle que l'on a soin (n° 975) de cintrer dans le sens du laminage, en réunissant ses bords par une clouure rectiligne.

Si la circonférence de section droite excède les dimensions de la tôle, on réunit ensemble plusieurs feuilles au moyen de rivures multiples disposées suivant les génératrices. On doit alors se borner

autant que possible à deux feuilles, pour ne pas multiplier les points faibles; et il est bon de les prendre inégales, afin que la plus grande des deux puisse embrasser la totalité de la surface baignée par les flammes, de manière à placer les clouures au-dessus de la ligne des carneaux, pour les soustraire à l'action directe du feu.

**979** — L'assemblage des viroles bout à bout peut se faire suivant deux modes distincts. Le plus naturel consiste à construire deux séries, paire et impaire, de cylindres dont les rayons diffèrent entre eux de l'épaisseur même de la tôle, de manière que chacun d'eux emboîte les deux tronçons adjacents, ou soit emboîté par eux.

Mais ce système a l'inconvénient de présenter une série de crans, et de briser la flamme qui lèche la surface extérieure avec une grande rapidité. En outre il contribue à retenir de petites flaques d'eau dans ces divers redans, au moment de la vidange du générateur; d'où une influence oxydante très nuisible.

Pour ces motifs on préfère ordinairement le mode *télescopique*, dans lequel toutes les viroles sont identiques et légèrement tronconiques, enfilées les unes dans les autres de manière à tourner leur petite base du côté du foyer. De cette manière on ne brise plus la flamme, et l'on obtient, au moment de vider la chaudière, un écoulement continu au moyen d'une légère inclinaison de l'axe.

**980** — *Fonds.* — On a employé à diverses époques, pour les générateurs, des fonds hémisphériques, en calotte sphérique, en anse de panier, ou des fonds plats.

Les fonds hémisphériques ne sauraient atteindre un diamètre considérable. On a cessé de les faire en fonte, pour les composer de fuseaux rivés ensemble.

Les calottes sphériques sont parfois assemblées au corps cylindrique à l'aide de fers cornières et de boulons. Ce mode de construction est dangereux et doit être absolument écarté (1).

La vraie solution consiste dans l'emboutissage d'une feuille

(1) Emploi des fers d'angle dans la construction des chaudières à vapeur. *Revue industrielle*, 4 février 1886, p. 58. — Witnens. Emploi des fers d'angle pour la construction des générateurs. *Annales des travaux publics de Belgique*, t. XLII, p. 207.

unique de tôle suivant une surface de révolution, qui présente comme méridienne une *anse de panier*. Le grand rayon de courbure de cette dernière est ordinairement double de celui de la section droite. On donne la plupart du temps à cette tôle un surcroît d'épaisseur. Cependant M. Collignon estime <sup>(1)</sup> que l'inverse serait plus logique, en vue d'éviter la raideur de cette partie, et de lui permettre de suivre avec plus de facilité les déformations de l'enveloppe dues aux dilatations, pour ne pas fatiguer cet assemblage si important.

Les fonds plats doivent être écartés en thèse générale, comme n'offrant par eux-mêmes qu'une résistance tout à fait insuffisante. Ils sont cependant à peu près inévitables dans certaines parties des générateurs. Mais on a soin alors de leur donner une épaisseur supérieure à celle du corps cylindrique d'au moins moitié, et surtout de les renforcer par des armatures appropriées.

**981** — *Armatures*. — On admet sous le nom de plaque tubulaire des fonds plats pour les corps de chaudières tubulaires. Ils se trouvent alors tout naturellement contreventés par les tubes eux-mêmes qui y sont assemblés. Dans les grands générateurs, on entretoise de même les fonds à l'aide de tirants intérieurs.

Les lames d'eau qui environnent le foyer, pour en empêcher l'irradiation et en recueillir la conductibilité, sont comprises entre deux feuilles planes et parallèles que l'on réunit à l'aide d'entretoises d'un diamètre double, en général, de l'épaisseur de la tôle, espacées de 0 m. 12 à 0 m. 30 et même davantage, suivant leur importance. On communique ainsi à l'ensemble une raideur incomparablement supérieure à celle d'une simple tôle.

Parfois ces entretoises sont creuses et perforées à leur extrémité située du côté du foyer, en restant pleines à l'autre bout. Dans ces conditions, si l'une d'elles vient à se rompre, un jet d'eau jaillit sur le feu et l'éteint. Le chauffeur se trouve ainsi averti de l'accident, qui risquerait sans cela de passer inaperçu. Il pourrait en survenir d'autres semblables dans cette région déjà affaiblie, et cette succes-

(1) *Annales des ponts et chaussées*, mai 1891.

sion d'avaries préparerait un désastre, sans que l'on pût le prévoir en temps utile <sup>(1)</sup>.

Le ciel du foyer des locomotives est suspendu par des boulons à une série de poutres transversales, qui portent sur les parois du foyer et sont espacées d'un décimètre environ.

Des goussets de forme triangulaire servent à réunir les parties planes avec les parois cylindriques. On leur donne une disposition rayonnante autour de l'axe.

D'une manière générale, il est bon d'emboutir sur leurs bords les fonds plats, pour faciliter leur rivetage avec le corps cylindrique; c'est ce que l'on appelle *bords tombés*.

**982** — *Dilatations*. — On doit, dans ces constructions complexes, apporter une attention spéciale à ne contrarier que le moins possible les dilatations. Leur puissance est extrême <sup>(2)</sup>; et il est facile de le comprendre, si l'on remarque que l'acier se dilatat d'environ 1 millième pour 100 degrés de température, et exigeant d'autre part, dans la traction directe, un effort de 20 kilogrammes par millimètre carré pour prendre à froid un tel allongement, l'amplitude des variations thermiques des chaudières déterminera des tensions supérieures à ce chiffre.

Si l'on arrive à lutter contre la nature des choses en s'obstinant à réparer, dans les mêmes conditions, une chaudière avariée par le jeu des dilatations, on voit reparaître des criques aux mêmes endroits, jusqu'à ce que, par une modification appropriée, on ait rendu l'élasticité nécessaire.

Les armatures destinées à consolider les maçonneries leur sont souvent plus nuisibles qu'utiles, et disloquent les massifs, en raison des différences de dilatation du métal et de la brique. Il convient pour ce motif de les disposer à l'extérieur.

En ce qui concerne les parties métalliques de la construction, il faut se rendre compte à l'avance de la manière dont les pièces tra-

<sup>(1)</sup> Entretoises tubulaires de Yarrow (*Engineering*, 7 novembre 1890, p. 544).

<sup>(2)</sup> On connaît l'expérience du redressement des murs du Conservatoire des arts et métiers par la rétraction de tirants métalliques, préalablement chauffés et boulonnés à l'extérieur des parois qui avaient pris des inclinaisons inverses.

vaileront sous l'influence de la chaleur, pour éviter de faire tourmenter les assemblages, avec formation de gerçures aux clouères ou en pleine tôle (<sup>1</sup>).

On remarquera par exemple que la dilatation du foyer est plus grande que celle du corps cylindrique. Dans les chaudières de Cornouailles (n° 1010), le foyer intérieur se dilate plus que l'enveloppe extérieure. Les tubes de laiton s'allongent plus que les génératrices de la tôle. Ils pousseront donc le centre de la plaque tubulaire, dont celle-ci retient les bords. La partie inférieure du corps cylindrique, qui est baignée par les flammes, s'échauffe plus que le dessus, qui est plein de vapeur. Le générateur, d'abord rectiligne, a par conséquent une tendance à s'arquer et à porter inégalement sur les appuis, ce qui est un grave inconvénient. Les chaudières à petits éléments (n° 1029) se trouvent placées, sous ce rapport, dans des conditions plus favorables que les grands cylindres de tôle.

### § 5

#### RIVURES

**983** — *Soudure*. — On peut employer deux méthodes pour réunir bord à bord les feuilles de tôle : la soudure ou le rivetage.

Une soudure parfaite serait une excellente solution du problème, supprimant les divers inconvénients des rivures. Cependant ce procédé se répand peu, en raison des grandes difficultés que l'on rencontre pour une bonne exécution.

**984** — *Lignes de rivets*. — Les *rivures* sont également appelées *clouères* ou *coutures* (fig. 580, 581).

L'opération du *rivetage* consiste à superposer les bords des deux feuilles, et à percer de part en part des trous disposés en file. On y passe alors des *rivets* dont une tête est déjà préparée. On *rive*

(<sup>1</sup>) De Maupeou. Étude relative à l'action de la chaleur sur les parois des chaudières. *Mémoires du Génie maritime*, 1889, p. 221.

l'autre, soit à froid, soit à chaud, dans les conditions générales de l'industrie. Mais, pour la construction des chaudières en particulier, on emploie toujours le travail à chaud.

Un semblable alignement constitue évidemment une partie faible,

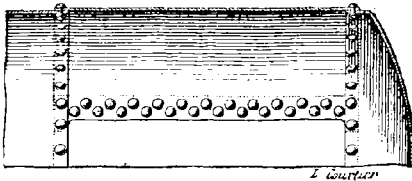


Fig. 580. — Clouure (élévation):

et détermine dans la tôle une ligne de moindre résistance <sup>(1)</sup>. Il existe à cet égard deux tendances opposées, suivant lesquelles on emploie ou bien un nombre restreint de gros rivets, espacés en conséquence, ou

bien une quantité plus considérable de petits rivets très rapprochés. Le premier mode est plus favorable à la résistance, le second à l'étanchéité.

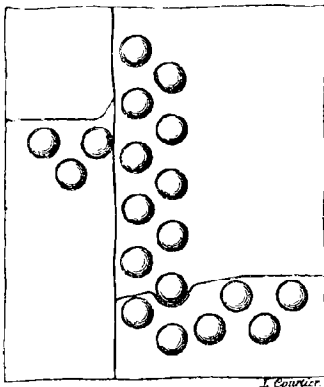


Fig. 581. — Clouure (développement):

Il est facile d'ailleurs d'augmenter le nombre des trous, sans sacrifier au même degré la solidité de leur alignement. Il suffit pour cela de les disposer sur deux files parallèles, en croisant les trous en zigzag. On a même établi souvent trois files parallèles de rivets. La distance de ces lignes ne doit pas être inférieure aux  $\frac{2}{3}$  de l'intervalle des rivets.

**985 — Tôles.** — Pour compenser l'affaiblissement, on donne quelquefois aux tôles une surépaisseur suivant une zone marginale.

L'épaisseur la plus convenable pour une bonne exécution du rivage est d'un centimètre. On ne doit pas perdre de vue à cet égard que cet élément n'est pas lié à la pression d'une manière absolue,

<sup>(1)</sup> On ne peut mieux les comparer qu'aux lignes de trous que l'on pratique tout exprès dans le papier des timbres-poste, des chèques, etc., pour en assurer la déchirure exactement suivant la direction voulue.

car le diamètre du corps cylindrique exerce sa propre influence sur la solidité de l'ensemble (n° 989).

Il est toujours utile de se procurer des tôles de dimensions aussi grandes que possible, afin de diminuer l'exagération du développement des rivures et l'affaiblissement qui en résulte, ainsi que l'augmentation de poids de l'ensemble, et celle du prix de revient.

Les feuilles sont coupées à la cisaille, et chanfreinées à la raboteuse, de manière à présenter sur leurs bords un biseau, ou plan incliné.

**986** — *Trous*. — Il est indispensable que les trous se correspondent très rigoureusement dans les deux feuilles. Tout travail de retouche à l'alésoir laissera du vide ou créera des œilletons oblongs, aussi nuisibles à la solidité qu'à l'étanchéité. Pour ce motif, il est préférable de les forer après le cintrage, de manière à être sûr qu'aucun dérangement ne proviendra plus du fait de cette dernière opération.

On peut percer les trous à la poinçonneuse. Mais ce mode de travail leur donne une forme légèrement conique, et surtout il écroute le métal aux environs de l'orifice, en altérant profondément ses propriétés. Il est préférable de les percer au foret, pour conserver à la tôle toute sa qualité. Quelquefois on les poinçonne sur un diamètre trop faible, que l'on agrandit ensuite au foret. Mais un grand nombre de cahiers des charges exigent que les trous soient forés à la mèche, et proscrivent l'usage du bédane. Il convient tout au moins, après le poinçonnage, d'effectuer un recuit.

Il est bon également d'arrondir légèrement l'arête vive, dont l'effet serait défavorable à la résistance du rivet.

**987** — *Rivets*. — Le meilleur métal pour la confection des rivets est un fer doux à grain fin.

La tige présente à froid un diamètre inférieur d'environ 5 % à celui de l'ouverture, pour tenir compte de l'effet produit par la dilatation, lorsqu'on la présentera à chaud.

On donne à la tête diverses formes (fig. 582, 583, 584) : conique,

hémisphérique, en *goutte de suif*. Parfois on fraise les bords de l'ouverture, et la pièce se trouve entièrement arrasée.

Le rivetage se fait au rivoir qui donne la tête conique, ou à la *bouterolle* pour les têtes en goutte de suif. Toutefois l'emploi des machines est plus expéditif. Par cela même, la riveuse contribue à

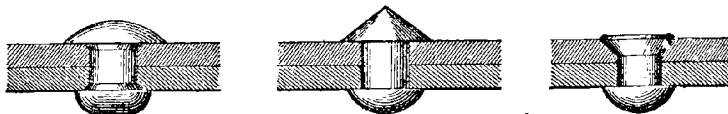


Fig. 582, 583, 584. — Rivets.

mieux remplir le trou, en utilisant plus complètement la chaleur du rivet avant sa déperdition.

Un matage soigné est indispensable, puisque le refroidissement opère le retrait du métal qui a été posé et travaillé à chaud. On effectue également le matage du chanfrein des tôles, pour assurer l'étanchéité.

**988** — *Couvre-joints*. — La rivure la plus simple se fait par la simple juxtaposition des bords. Mais ce mode présente l'inconvénient de la tendance au gauchissement, les deux forces de traction exercées par les tôles constituant, dans l'état naturel, un couple qui produira le déversement du système (fig. 585).

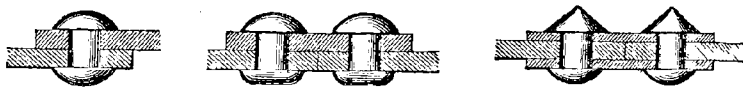


Fig. 585, 586, 587. — Rivures.

On évite cet inconvénient par l'emploi du couvre-joint (fig. 586), et surtout du double couvre-joint (fig. 587).

Les couvre-joints sont particulièrement nécessaires pour les rivures exposées à l'action des flammes, afin d'empêcher celles-ci de s'insinuer entre les deux feuilles. Il faut d'ailleurs toujours employer pour les tôles de coup-de-feu des dimensions qui per-



mettent de reculer la première clouure au moins à un 1 mètre de l'autel (n° 1074).

Dans les parties verticales, les rivures doivent tourner vers le haut le bord en saillie, afin qu'il ne gêne pas l'ascension des flammes.

## § 4

### ÉPAISSEUR DE L'ENVELOPPE

**989** — Pour établir le corps cylindrique dans des conditions de solidité qui présentent toute garantie, il convient d'examiner successivement, non pas assurément tous les modes de rupture possibles, car ils peuvent varier à l'infini d'après des circonstances fortuites, mais ceux que la symétrie indique *a priori* comme les types les plus simples, autour desquels il y a chance de voir graviter tous les autres.

On aura soin de les combiner autant que possible de manière à embrasser par la pensée des maxima de surface sollicitée par la pression, en même temps que des minima de zones de séparation. Il devient dès lors très probable que si ces types spéciaux de rupture sont rendus impossibles par l'emploi d'épaisseurs suffisantes, il en sera de même de modes plus complexes, affectant des superficies plus restreintes, et s'effectuant suivant des contours plus ou moins sinueux.

Après avoir ainsi calculé un certain nombre de valeurs, qui n'ont *a priori* aucune raison d'être égales entre elles, on adoptera pour la construction la plus grande de toutes, qui sera par cela même capable de parer à tous les modes de rupture envisagés.

**990** — Cherchons en premier lieu l'épaisseur qu'il est nécessaire de donner au corps cylindrique, pour l'empêcher de rompre par les fonds.

Nous appellerons  $e$  cette dimension, et  $R$  la résistance que l'on se propose de demander au métal *par unité de surface*, c'est-à-dire *par mètre carré*. Cette *fatigue* devra, bien entendu, rester fort

éloignée de la véritable *résistance à la rupture* dont est capable le métal poussé à outrance ; le rapport de ces deux valeurs constituant le *coefficient de sécurité* que se fixe arbitrairement la prudence du constructeur.

Supposons que la chaudière se sépare en deux tronçons suivant un plan de section droite. La couronne mise à nu pourra être exprimée approximativement par  $\pi De$ , en raison de la petitesse relative de l'épaisseur  $e$  vis-à-vis du diamètre intérieur  $D$ . La force d'adhérence qui retient chaque tronçon au contact de l'autre a donc pour valeur :

$$\pi DeR.$$

Nous devons l'égaliser à la résultante des pressions qui sollicitent l'une des deux nappes considérées. Cette force sera, d'après la symétrie, dirigée suivant l'axe de figure. Or nous avons vu <sup>(1)</sup> que son intensité s'exprime au moyen du produit de la pression rapportée à l'unité de surface et de la projection de l'aire courbe sur un plan perpendiculaire à cette direction. Cette projection sera le cercle  $\frac{\pi D^2}{4}$ , aussi bien pour la surface d'extrados que pour celle d'intrados, si nous continuons à négliger l'influence de l'épaisseur. En appelant  $N$  le timbre de la chaudière, c'est dire la différence de pression de l'intérieur à l'extérieur exprimée en kilogrammes par centimètre carré, 10 000  $N$  représentera ce même effort pour l'unité de surface, et la résultante en question aura comme valeur :

$$10\,000\,N \cdot \frac{\pi D^2}{4}.$$

Si nous écrivons l'égalité de ces deux expressions, nous en déduisons la valeur cherchée :

$$(1) \quad e = \frac{2\,500\,ND}{R}.$$

(1) Voy. t. I, p. 10.

**991** — Envisageons actuellement l'hypothèse d'un éventrement longitudinal suivant un plan méridien, et cherchons, comme seconde valeur  $e'$ , l'épaisseur qui serait capable de s'opposer à ce nouveau genre de rupture.

Nous pouvons négliger ici, pour obtenir plus de simplicité dans les formules, le supplément de résistance que procurent les fonds. Cet appoint devient en effet relativement peu considérable pour les générateurs d'une longueur importante; et d'ailleurs cette omission volontaire exercera son influence dans un sens favorable à la solidité.

La surface d'adhérence sera dès lors composée de deux rectangles de longueur  $L$  et de largeur  $e'$ . La force de ténacité aura donc pour expression :

$$2 Le'R.$$

Quant à la résultante des efforts dus aux tensions, elle sera dirigée suivant la perpendiculaire au plan de séparation; égale par conséquent au produit de la pression effective 10 000 N et de la projection de la surface d'intrados, laquelle est un rectangle de dimensions  $L$  et  $D$ . Nous aurons d'après cela comme valeur :

$$10\ 000\ NLD.$$

En égalant entre elles ces deux expressions, il vient :

$$(2) \quad e' = \frac{5\ 000\ ND}{R}$$

On remarquera la relation :

$$e' = 2e.$$

Elle nous montre que *la tendance à la rupture suivant les génératrices est double de celle qui provoquerait la séparation des fonds* (\*). Suivant l'observation générale qui a été présentée ci-dessus, c'est donc la valeur  $e'$  qu'il y a lieu d'adopter.

(\*) Pour tenir compte de cette circonstance, on compose souvent d'une seule ligne de rivets les clouures transversales, et de deux files celles qui sont longitudinales.

**992** — Il convient même de la majorer encore pour tenir compte de l'affaiblissement proportionnel occasionné par les lignes de rivures ; influence bien importante, car ce rapport peut dépasser la moitié <sup>(1)</sup>.

Désignons à cet effet par  $d$  le diamètre des trous, et par  $a$  la distance de deux centres consécutifs. Sur cet intervalle  $a$ , on a enlevé deux rayons, c'est-à-dire  $d$ . Il reste donc comme partie pleine  $a - d$ , et la tôle se trouve affaiblie dans le rapport :

$$(3) \quad m = \frac{a - d}{a}.$$

C'est par conséquent suivant le rapport inverse que l'on devra augmenter l'épaisseur calculée, en prenant :

$$(4) \quad e'' = \frac{a}{a - d} e'.$$

Ajoutons toutefois que, la plupart du temps, on passe cette correction sous silence, en la confondant, ainsi que les effets accessoires, dans le coefficient de sécurité d'après lequel se trouve fixée la valeur adoptée pour  $R$ .

**993** — On voit par ces diverses formules que, à égalité de pression, l'épaisseur de la tôle doit être proportionnelle au diamètre. C'est ce qui explique cette apparente contradiction, que des tubes de faible épaisseur puissent être employés pour amener un même fluide à des récipients que l'on est obligé de prendre au contraire très épais, parce qu'ils sont très gros.

Toutefois, dans l'application, il convient d'ajouter à cette expression théorique un terme constant, destiné à servir d'appoint en vue de diverses causes accidentelles et fortuites, et tout particulièrement de l'usure. On ne saurait évidemment admettre, pour les petits calibres des tubes, que l'épaisseur puisse tendre vers zéro en même temps que le diamètre. Il convient pratiquement de se limiter à un certain chiffre dans ce décroissement.

(1) Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation des chemins de fer*, t. III, p. 125.

L'usage est de prendre cette constante égale à trois millimètres, en posant :

$$e''' = e'' + 0,003.$$

**994** — Nous pouvons nous servir de cette équation pour contrôler l'ancienne formule réglementaire renfermée dans l'ordonnance du 22 mai 1843, et aujourd'hui tombée en désuétude, depuis que le décret du 25 janvier 1865 a rendu aux constructeurs toute liberté à cet égard sous leur propre responsabilité (n° 1187).

Cette formule est la suivante (4) :

$$\varepsilon = 0,005 + 0,0018 \text{ ND.}$$

Si nous identifions les deux valeurs, en faisant abstraction du coefficient de rivure  $\frac{1}{m}$ , il vient :

$$R = \frac{5\,000}{0,0018} = 2\,777\,777,$$

ce qui représente 2 kg. 78 par millimètre carré. Cette fatigue est extrêmement modérée pour des fers de bonne qualité. A la vérité elle concerne ici une question d'une gravité exceptionnelle. Elle correspondrait à un coefficient de sécurité d'un dixième, pour un métal présentant une résistance à la rupture de 28 kilogrammes par millimètre carré.

(4) Avec les unités que nous avons adoptées ici. La formule officielle rapporte l'épaisseur au millimètre, le diamètre au mètre, et introduit la pression *absolue*.

Un grand nombre de formules semblables ont été édictées par divers services, tant pour la France qu'à l'étranger. On en trouvera une énumération fort étendue dans les excellentes *Leçons sur les machines à vapeur* de MM. Hirsch et Debize, t. I, p. 854, et dans le *Traité des machines marines* de M. Bienaymé, p. 444. On peut consulter en outre les sources suivantes : Règles proposées pour le calcul des épaisseurs de chaudières. *Annales industrielles*, 1886, t. I, p. 782. — Règles proposées pour le calcul des épaisseurs des tôles de fer pour les chaudières neuves. *La Métallurgie*, 1888, p. 1087. — Alban Gros. Note sur le calcul des chaudières. *Génie civil*, t. XIX, p. 210. — Résal. Sur la résistance des chaudières elliptiques. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, p. 937. — The Strength of short boilers. *Engineering*, 17 avril 1891, p. 468.

## § 5

**DIMENSIONS DES RIVURES**

**995** — La résistance d'un rivet se déterminera par la condition que son cisaillement rencontre la même difficulté que l'arrachement des deux demi-intervalles de tôle qui lui sont adjacents. Ce dernier effort a pour expression  $(a - d) e'' R$ , c'est-à-dire (4)  $a e' R$ , ou enfin (2) :

$$5\,000\,ND\alpha.$$

Désignons par  $S$  la fatigue de cisaillement rapportée à l'unité de surface, c'est-à-dire la fraction arbitraire que l'on juge à propos, d'après le coefficient de sécurité adopté, de mettre en jeu sur la résistance totale à la rupture par cisaillement dont est capable le métal (1). La section du rivet est  $\frac{\pi d^2}{4}$ . La force en question sera donc (2) :

$$\frac{\pi d^2}{4} S.$$

En égalant entre elles ces deux valeurs, il vient :

$$\pi d^2 S = 20\,000\,ND\alpha.$$

Telle est la relation qui unit les deux éléments  $d$  et  $a$  de la clouure.

(1) Pour un même fer, à défaut d'essai direct de l'échantillon, on admet comme résistance au cisaillement, les  $4,5$  de celle qu'il oppose à l'arrachement par traction. Toutefois, dans les rivures, la supériorité du métal employé pour les goupilles sur celui de la tôle tendrait à rapprocher de l'égalité les deux coefficients.

(2) Nous opérons ici suivant les usages reçus. Il serait toutefois plus exact de rapporter à la résistance au cisaillement acceptée *a priori*, non pas la fatigue *moyenne*, mais la fatigue *maximum*, qui donne une idée plus exacte du danger. Celle-ci est supérieure d'un tiers à la première pour une section circulaire. Il y aurait donc lieu de remplacer dans la formule finale  $S$  par  $\frac{5}{4} S_0$ , en attribuant à ce symbole  $S_0$  la valeur numérique que l'on consent à mettre réellement en jeu comme fatigue de cisaillement.

On pourra donc se donner l'un d'eux arbitrairement, et déduire de là le second.

Il sera peut-être plus clair de prendre ici comme arbitraire le rapport  $m$  d'affaiblissement de la tôle, et de calculer le diamètre du rivet en remplaçant  $a$  par sa valeur déduite de l'équation (3) :

$$a = \frac{d}{1 - m}.$$

Il vient ainsi :

$$d = \frac{20\,000\,ND}{\pi(1 - m)S} = 6\,369 \frac{ND}{(1 - m)S}.$$

**996** — Comme il est évidemment désirable d'affaiblir le moins possible la tôle, c'est-à-dire d'augmenter  $m$ , on voit que l'on a intérêt à faire croître  $d$ , et par suite proportionnellement  $a$ ; en un mot à employer *un nombre restreint de gros rivets très espacés*, ainsi que nous l'avons énoncé ci-dessus (p. 570).

On se conforme en effet à cette règle dans les grandes constructions métalliques. Cependant, en ce qui concerne spécialement l'établissement des chaudières, on ne saurait, d'autre part, perdre de vue la nécessité de l'étanchéité, qui ne peut s'accommoder d'un trop grand espacement entre les points de la couture, propre à laisser bâiller les intervalles sous l'effort de la pression intérieure.

Il règne sur cette appréciation une assez grande variabilité, manifestée par la multiplicité des formules pratiques qui sont usitées dans les divers ateliers (\*). L'une des plus simples consiste à donner aux rivets un diamètre double de l'épaisseur des tôles qu'il s'agit de réunir, et à leur distance d'axe en axe le triple de leur diamètre.

(\*) Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 875 à 878. — De la Harpe. Étude sur les rivures de tôle. *Génie civil*, 8 novembre 1884, p. 24. — Contamin. *Cours de résistance appliquée*; rivures, p. 63, 85. — Reuleaux. *Le Constructeur*; rivures, p. 178. — Gollner. Résistance des rivures. *La Métallurgie*, 20 mai 1891, p. 765. — Ermel. *Album d'éléments et organes de machines*. — Règles à adopter pour l'écartement des rivets. *Cinquième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Lyon, 1881, p. 14. — Rivure du cuivre. *Engineering*, 24 avril 1891, p. 497. — Rivures. *Ibidem.*, 4 décembre 1891, p. 664. — Allen. Rivures. *Scientific American, supplement*, 18 juillet 1891, p. 12952. — Barnet Le Van. Riveted

**997** — La méthode précédente ne tient pas compte d'un élément important, mais encore trop peu connu pour que l'on puisse le faire figurer explicitement dans le calcul. Son omission n'influence d'ailleurs le résultat que dans un sens favorable à la solidité.

Je veux parler du frottement intense qui s'oppose au glissement mutuel des tôles, et qui par conséquent soulage d'autant les rivets contre le cisaillement. Ce frottement provient du serrage provoqué par la tendance à la rétraction longitudinale de la tige, qui a été posée à chaud, et ne peut plus ensuite changer de longueur pendant le refroidissement.

On ne doit pas d'ailleurs chercher à exagérer cet effet par un surchauffement des rivets, car on risquerait alors d'approcher de la limite de rupture de la tôle par écrasement; laquelle est considérable du reste, et à peu près double de la résistance à l'arrachement par traction.

Il y a lieu également de penser que ce que l'on gagnerait par là se perdrait en partie pour la solidité du rivet, ainsi placé dans un état de tension défavorable à sa conservation. Cette fatigue présente ce caractère particulièrement fâcheux, qu'elle n'est même pas en rapport avec le travail que l'on demande à la chaudière, puisqu'elle subsiste alors même que celle-ci se trouve sans pression.

joins in boilers shells. *Institution of civil Engineers*, Meeting de novembre 1890, p. 252. — Maberly. Account of form tests of riveted joints for boilerwork. *Van Nostrand's Engineering Magazine*, janvier 1884, p. 59. — Kennedy. Report upon Experiments on double riveted joints. *Proceedings of the Institution of mechanical Engineers*, avril 1885, p. 498.



## CHAPITRE LV

### CHAUDIÈRES A CORPS CYLINDRIQUE

#### § 1

#### GÉNÉRALITÉS

**998** — On doit, dans la construction des générateurs à vapeur, s'attacher à concilier autant que possible un grand nombre de *desiderata* distincts, et parfois même opposés : sécurité ; économie, aussi bien en ce qui concerne le premier établissement que le rendement quotidien ; régularité du régime, diminution du primage, facilité de la conduite du feu, des nettoyages intérieurs ou extérieurs et des réparations ; rapidité de la montée en pression, etc.

Suivant que, d'après les circonstances, quelque'une de ces préoccupations vient à dominer sur les autres, les grandes lignes du projet se modifient en conséquence, et l'on arrive à parcourir toute la gamme des appareils les plus dissemblables dans leur disposition générale. C'est assez dire que la classification des générateurs peut être établie d'après bien des points de vue divers. Le plus convenable paraît devoir reposer sur la considération qui prime toutes les autres, celle de la sécurité.

**999** — Or nous avons déjà indiqué que, si les chances de rupture peuvent affecter tous les types, elles sont loin d'entraîner dans chaque cas les mêmes conséquences. L'étendue du désastre dépend alors directement de l'accumulation d'énergie potentielle qui se trouve ainsi subitement rendue à la liberté (n° 1158),

c'est-à-dire tout à la fois du poids de l'eau échauffée et de son degré de caléfaction. Aussi verrons-nous plus tard (n° 1187), que la réglementation publique a basé ses diverses catégories sur la valeur numérique d'un produit de facteurs dépendant de ces deux éléments.

Mais en fait le degré d'échauffement, quoique intéressant directement l'épaisseur des enveloppes, n'en modifie pas le *facies* général à beaucoup près autant que l'importance du volume d'eau que l'on veut leur faire contenir. C'est donc dans ce dernier élément qu'il convient de chercher en ce moment la caractéristique d'après laquelle nous disposerons ici les divers générateurs suivant un ordre rationnel.

**1000** — Nous rangerons dans un premier groupe les *chaudières à corps cylindrique*, qui renferment un maximum de liquide sous un minimum de surface de chauffe (chap. LV), et dans une seconde catégorie les *chaudières tubulées* qui, en sens inverse, contiennent peu d'eau, tout en présentant une superficie très développée (chap. LVI).

Les générateurs à corps cylindrique se répartissent eux-mêmes en trois classes. On peut d'abord les chauffer uniquement par le dehors (*chaudière à foyer extérieur*); ou bien enfermer la flamme dans le sein du liquide, à travers un ou deux gros conduits (*chaudière à foyer intérieur*); ou enfin donner à ce principe toute sa valeur en faisant traverser l'eau par les gaz chauds au moyen d'un très grand nombre de petits tubes, de manière à multiplier autant que possible les surfaces de transmission pour une masse donnée (*chaudière tubulaire*).

## § 2

### CHAUDIÈRES A FOYER EXTÉRIEUR

**1001** — Parmi les générateurs à foyer extérieur, le plus simple est composé uniquement d'un corps cylindrique. Ce dispositif est dérivé de la *chaudière à tombeau* de Watt, qui était également cylindrique, mais avec des contournements dont rien ne

ustifiait l'utilité, et qui auraient pu difficilement résister aux pressions actuelles <sup>(1)</sup>. On leur a, pour ce motif, substitué depuis longtemps la section circulaire, qui est infiniment préférable. En effet, en raison de la constance de sa courbure et de celle de la pression intérieure, elle constitue pour un système flexible la forme d'équilibre stable.

Le corps cylindrique est chauffé directement, ou à retour de flamme. Dans ce dernier cas (fig. 588), une cloison sépare les car-

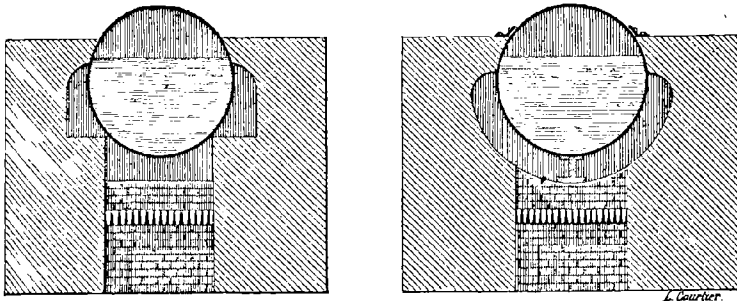


Fig. 588 et 589. — Chaudière cylindrique (coupe transversale).

neaux supérieurs du conduit inférieur. Avec le premier dispositif (fig. 589), la section offerte au courant embrasse la totalité de la surface de chauffe.

La grille (n° 1078) est placée à l'avant du corps de chaudière et au-dessous. Cette combinaison présente le défaut d'exposer à la chaleur la plus intense la surface inférieure, dans laquelle se réunissent les dépôts, qui risquent ainsi d'être calcinés. Au-dessous de la grille se trouve le cendrier (n° 1074), dans lequel tombent les cendres et les escarbilles. Sa porte sert à régler l'accès de l'air qui s'élève à travers les barreaux. Un registre placé dans le rampant, ou dans la cheminée, complète les moyens de réglage (n° 1077).

La ligne des carneaux se trouve à la hauteur du centre de la

<sup>1)</sup> Les chaudières de Papin, de Savery étaient sphériques. Cette forme est la plus irrationnelle de toutes, car la sphère (au moins lorsqu'elle est complète) est la surface qui renferme un volume donné sous la moindre superficie possible.

section, ou lui est un peu supérieure. D'après les règlements (1), le niveau de l'eau ne doit jamais s'abaisser à moins de 6 centimètres au-dessus de cette ligne (n° 1178).

Le dôme de prise de vapeur (n° 1101) est placé à l'extrémité opposée au coup de feu, en vue de diminuer l'entraînement d'eau qui proviendrait d'une ébullition tumultueuse. Cet appendice est destiné à relever aussi loin que possible de la surface liquide le point de captage de la vapeur. Pour sécher celle-ci, on la ramène parfois à travers un tube dans toute la longueur de la chaudière, jusqu'à la région du coup de feu qui est la plus chaude.

Pour permettre les visites intérieures, un *trou d'homme* (n° 1098) de dimensions suffisantes permet l'entrée du corps cylindrique. Il est, pendant la marche, fermé par un *autoclave*.

Des orifices de moindre dimension servent pour l'alimentation (chap. LIX) et la vidange (n° 1144). Les différents appareils de sûreté (chap. LXIII), ainsi qu'une tubulure d'attente pour le manomètre mobile d'épreuve (n° 1189), sont installés en divers points de l'enveloppe.

**1002** — L'ensemble de l'appareil se trouve compris dans des massifs importants de maçonnerie de briques, renforcés par des angles en pierre de taille, ou par des armatures en tôle avec tirants extérieurs (n° 982), pour l'affermir contre l'influence des dilatations et de la poussée des voûtes. L'importance de ces maçonneries diminue le rayonnement. L'interposition de gaines d'air entre doubles massifs est très efficace contre la conductibilité (2). Cette masse sert en même temps de régulateur de température; mais par cela même elle ralentit la mise en feu, et apporte quelque entrave aux coups de collier. Les joints doivent être bien pleins, pour pré-

(1) Article 10 du décret du 50 avril 1880.

Cette hauteur est de 10 centimètres pour les appareils de navigation (art. 21 du décret du 9 avril 1885; art. 34 de l'ordonnance du 17 janvier 1846).

(2) Pour empêcher le rayonnement, on établit sur les parties qui ne se trouvent pas à des températures excessives, des revêtements calorifuges analogues à ceux des cylindres (Voy. p. 40). Parfois aussi l'on enterre la chaudière sous les scories; mais ce procédé n'est pas à recommander, car il est de nature à entretenir l'humidité et à développer la rouille.

venir les rentrées d'air froid, ou l'écoulement des gaz chauds par la voie la plus courte vers la cheminée. Il est utile, pour le même motif, qu'une surveillance attentive garantisse contre les fendillements et les crevasses (<sup>1</sup>).

Il y a lieu également de suspecter les contacts de la construction et du métal. Il peut en effet s'établir sur ces points des suintements qui entretiennent une humidité capable de corroder le métal. A certains intervalles, on a soin de démolir et de reconstruire les enveloppes de maçonnerie : on choisit notamment pour cela le moment du renouvellement de l'épreuve réglementaire (n° 1189), en vue de permettre la visite minutieuse des surfaces métalliques.

## § 5

### CHAUDIÈRES A BOUILLEURS

**1003** — *Chaudières à bouilleurs*. — Le défaut essentiel du système précédent est sa faible surface de chauffe par mètre cube d'eau. On y a remédié par l'adjonction de *bouilleurs* (<sup>2</sup>).

On désigne sous ce nom (<sup>3</sup>) des corps cylindriques assez semblables au premier quant à leur forme et à leur mode de construction, mais sensiblement plus petits comme rayon, et quelquefois, comme longueur. Leur diamètre ne doit cependant pas descendre au-dessous de 0<sup>m</sup>,50 afin de conserver la possibilité des visites intérieures. On le prend souvent égal à la moitié de celui de la chaudière.

(<sup>1</sup>) Étude sur la pénétration de l'air à travers les maçonneries des générateurs. *Septième bulletin de l'Association de Propriétaires d'appareils à vapeur du Nord de la France*, Lille, 1880, p. 85.

(<sup>2</sup>) Les *chaudières à bouilleurs* sont quelquefois appelées *chaudières françaises*, parce qu'elles sont particulièrement répandues dans notre pays.

(<sup>3</sup>) On emploie également l'expression de *bouilleurs-réchauffeurs* pour désigner les appareils que nous appellerons simplement *réchauffeurs* (n° 1108) afin d'éviter toute confusion, car leur destination est très différente. Ils servent à ramener progressivement l'eau froide à une température voisine de celle de la chaudière; mais, à l'inverse des *bouilleurs-vaporisateurs*, auxquels nous réserverons le nom de *bouilleurs*, ils ne doivent pas opérer l'ébullition et la vaporisation.

Le bouilleur est entièrement plongé dans le courant brûlant, qui n'échauffe au contraire que la portion inférieure du corps principal. Cette circonstance, jointe à la diminution de diamètre, augmente sensiblement la surface de chauffe par mètre cube de liquide.

L'une des deux têtes au moins doit être percée d'un trou d'homme en vue de la surveillance. Un grand nombre de chaudières alsaciennes sont munies de bouilleurs qui en traversent toute la longueur, et présentent des trous d'homme aux deux bouts. Ordinairement il n'y en a qu'à l'extrémité la plus éloignée du foyer, et l'on fait cette tête en fonte épaisse, malgré les inconvénients et les dangers que présente ce métal. Le fond exposé au coup de feu est formé d'une feuille de tôle emboutie.

Au-dessus des bouilleurs règne une voûte peu cintrée, ou un système de trois petites voûtes juxtaposées. Les parements latéraux épousent autant que possible la courbure du métal, pour mieux utiliser le courant gazeux. Cependant la surveillance doit rester possible dans cette région.

On donne aux bouilleurs une légère inclinaison, en vue de prévenir la formation de chambres de vapeur le long de leur arête supérieure.

Quelquefois ils reçoivent le coup de feu, afin de moins surchauffer la tôle du corps cylindrique, en cas d'abaissement anormal du niveau d'eau. Le plus souvent ils sont placés dans le retour de flammes, ce qui est plus conforme au principe de la circulation méthodique (n° 955). La première disposition présente d'ailleurs l'inconvénient d'exposer à la plus violente température la partie dans laquelle les dépôts ont une tendance naturelle à se rassembler par la gravité. En outre, elle détermine une ébullition tumultueuse au sein de ces organes, qui n'ont que d'assez difficiles communications avec la surface libre du liquide.

L'alimentation s'y fait directement en général, pour ne pas troubler la température du corps cylindrique, qui forme le laboratoire définitif de la vaporisation.

**1004** — Les bouilleurs sont assemblés au corps principal au

moyen de deux *cuissards* ou *culottes* (\*). On désigne sous ce nom

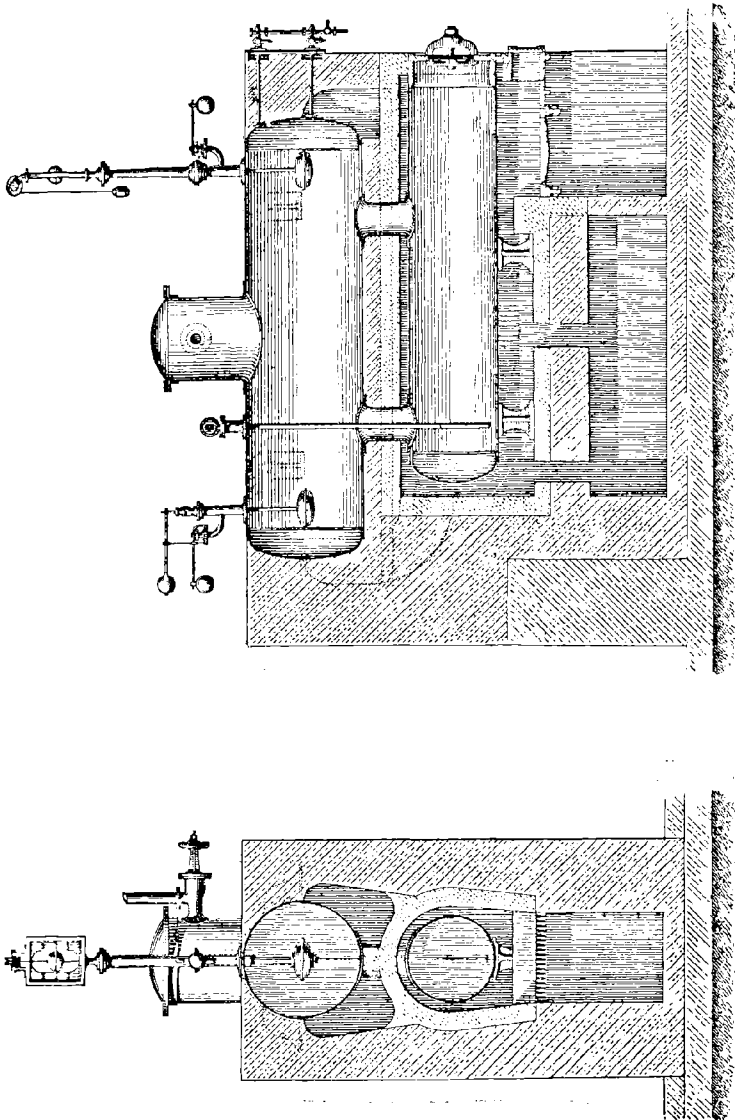


Fig. 590 et 591. — Chaudière à bouilleur unique (coupes transversale et longitudinale).

des tuyaux très courts, de 0<sup>m</sup>,30 environ de diamètre, présentant

(\*) Dans la chaudière Artige, les cuissards sont supprimés. Des tuyaux apparents, en fer ou en cuivre, établissent la communication au dehors du massif de maçonnerie.

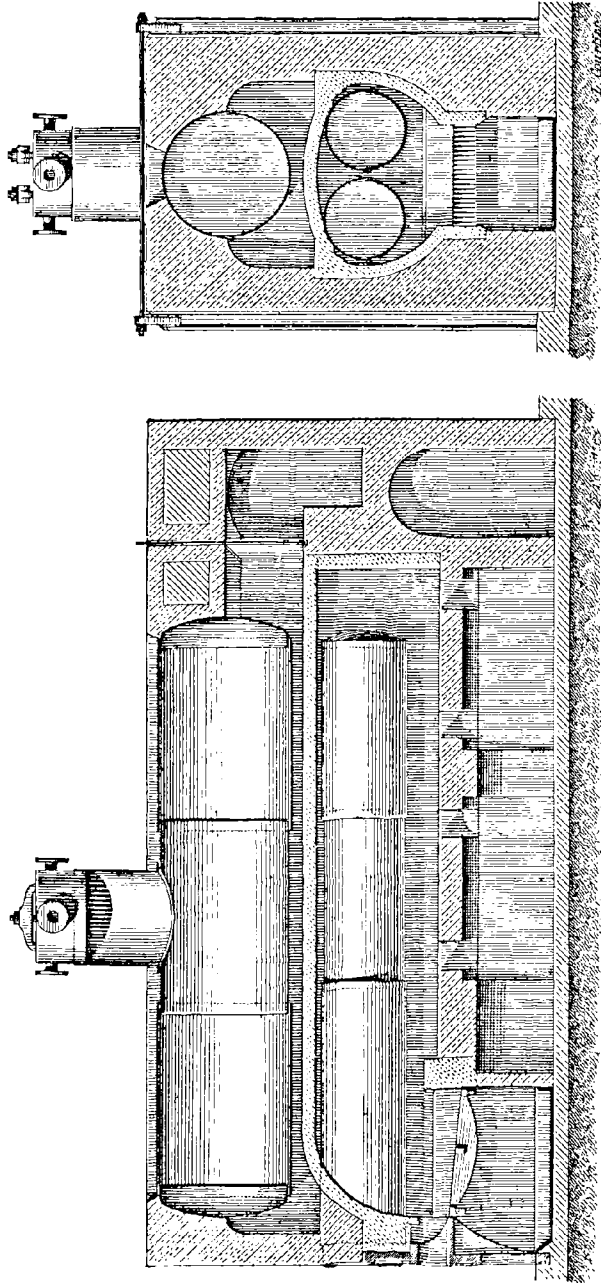


Fig. 592 et 593. — Chaudière à deux fourneaux (coupes longitudinale et transversale).



à leurs extrémités de larges *collerettes* formées de tôle de choix, embouties et rivées sur les deux enveloppes cylindriques. Ce mode d'assemblage est préférable à l'emploi de cornières à double courbure.

La circulation réciproque d'eau et de vapeur doit être facile entre le bouilleur et le corps principal. La vapeur s'élève par celui des cuissards qui est le plus voisin du foyer. L'eau redescend par l'autre.

Il est bon que leur distance ne soit pas trop grande en vue des dilatactions ; et pour ce motif on va jusqu'à mettre les deux cuissards sur la même virole. Cependant il est dangereux de concentrer dans un espace trop restreint les deux causes d'affaiblissement que créent dans les enveloppes métalliques ces vastes ouvertures.

Les supports, ou *chandeliers*, doivent offrir de larges surfaces de contact, épousant complète-

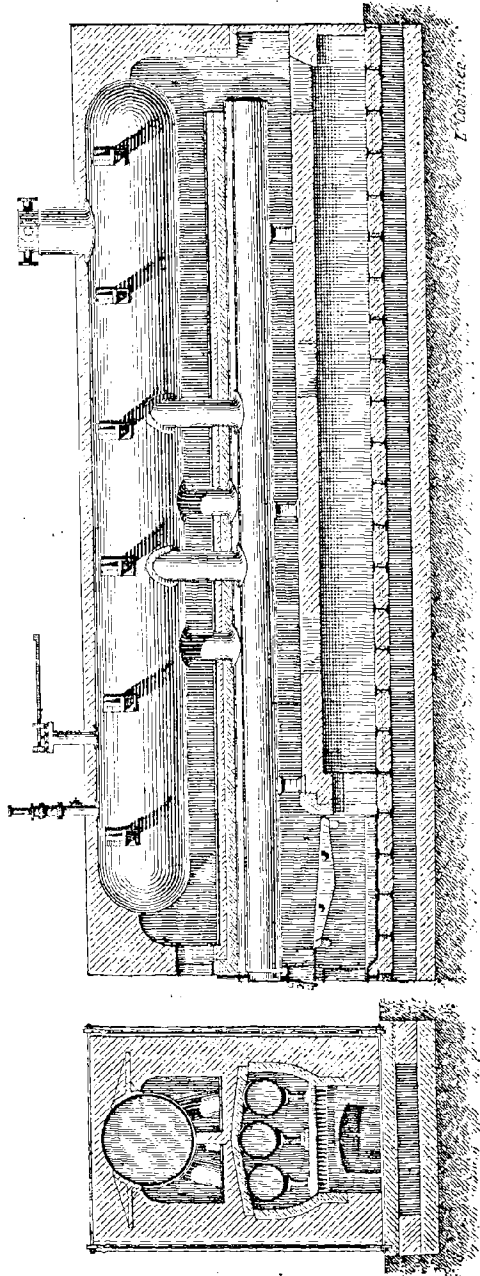


Fig. 594 et 595. — Chaudière à trois bouilleurs (coupes transversale et longitudinale).

ment la courbure de la tôle, afin de diminuer la fatigue par unité superficielle. Pour ce même motif, s'il est nécessaire d'employer des cales, on les établit sous le chandelier, et non entre lui et le bouilleur.

Il est important que la disposition du bouilleur sur les chandeliers permette autant que possible la libre dilatation.

**1005** — Le type le plus simple admet un bouilleur unique installé sous la chaudière (fig. 590, 591). On peut aussi en employer deux, placés également en contre-bas (fig. 592, 593); ou même trois, disposés suivant une ligne un peu arquée (fig. 594, 595).

Le nombre de ces organes a été dans certains cas beaucoup augmenté, et poussé jusqu'à neuf. On trouverait là, par la pensée, une sorte de transition avec la classe des chaudières tubulées (n° 1029).

**1006** — *Calcul des dimensions.* — Il est facile de comparer le diamètre d'une chaudière accompagnée de  $n$  bouilleurs avec celui du corps cylindrique *unique* qui présenterait à lui seul la même surface de chauffe que cet ensemble.

Supposons, pour fixer les idées, que la ligne des carneaux se trouve exactement au niveau de l'axe. Nous ferons abstraction de l'influence des fonds, en représentant par  $D$  le diamètre de ce corps de chaudière et par  $l$  la longueur commune de tous les récipients. Dans ces conditions, la surface de chauffe sera représentée par  $\frac{\pi D l}{2}$ .

Appelons d'autre part  $d$  le diamètre du second corps cylindrique, et  $xd$  celui de chacun de ses bouilleurs. La nouvelle surface de chauffe comprendra d'abord  $\frac{\pi d l}{2}$  pour le corps principal, et en outre  $n \pi x d l$ , attendu que, à l'inverse de ce qui a lieu pour ce dernier, les bouilleurs sont totalement immergés dans la flamme.

Nous poserons donc, en supprimant le facteur  $\frac{\pi l}{2}$ , l'égalité :

$$(1) \quad D = d(1 + 2n\alpha).$$

Si par exemple on adopte, suivant l'usage le plus ordinaire, le rapport de rayons  $\alpha = \frac{1}{2}$ , il vient simplement :

$$D = (n + 1)d.$$

Le diamètre du corps cylindrique se trouve alors réduit à moitié, au tiers, ou au quart, suivant que l'on emploie un, deux ou trois bouilleurs. De là une importante simplification au point de vue de la construction.

**1007** — On peut, d'après cela, se rendre compte de la différence d'encombrement, c'est-à-dire de projection horizontale, ou enfin de largeur totale, puisque la longueur est supposée constante.

Si l'on apprécie cette largeur d'après celle du corps cylindrique, le rapport sera, en vertu de l'équation (1) :

$$\frac{d}{D} = \frac{1}{1 + 2n\alpha}.$$

Si on l'évalue au moyen de la somme des largeurs des bouilleurs juxtaposés<sup>(4)</sup>, on devra substituer à cette formule la suivante :

$$\frac{n\alpha d}{D} = \frac{n\alpha}{1 + 2n\alpha}.$$

On aura donc à employer la première ou la seconde de ces deux expressions suivant que :

$$n\alpha \leq 1.$$

<sup>(4)</sup> En compensant approximativement les  $n-1$  intervalles, que nous négligeons pour plus de simplicité, par l'influence de la disposition en arc de cercle.

Dans l'hypothèse  $\alpha = \frac{1}{2}$ , on voit qu'il y a lieu d'adopter la première formule pour  $n = 1$ , la seconde pour  $n = 3$ , et que toutes les deux concordent pour  $n = 2$  :

$$n = 1, \quad \frac{d}{D} = \frac{1}{2} = 0,500;$$

$$n = 2, \quad \frac{d}{D} = \frac{n\alpha d}{D} = \frac{1}{3} = 0,333;$$

$$n = 3, \quad \frac{n\alpha d}{D} = \frac{3}{8} = 0,375.$$

Ces résultats indiquent une économie d'emplacement qui varie de la moitié aux deux tiers dans les cas de la pratique; avantage important au profit du système des bouilleurs.

**1008** — On peut établir une comparaison analogue entre les poids de métal qui entreront dans les deux appareils.

Nous avons vu (n° 989) que l'épaisseur de la tôle doit être proportionnelle au diamètre. La circonférence de la section droite sera de son côté. Par conséquent les sections droites des enveloppes seront entre elles comme les carrés des diamètres; et il en sera de même des poids, puisque les longueurs de ces cylindres et leurs poids spécifiques sont les mêmes.

Le rapport des poids absolus des deux systèmes sera donc représenté par la fraction :

$$\frac{d^2(1 + n\alpha^2)}{D^2},$$

ou d'après l'équation (1) :

$$\frac{1 + n\alpha^2}{(1 + 2n\alpha)^2}.$$

Reprenons par exemple l'hypothèse :  $\alpha = \frac{1}{2}$ , il vient alors :

$$\frac{n + 4}{4(n + 1)^2}.$$

On obtient par conséquent avec :

$$1, \quad 2, \quad 3,$$

bouilleurs, les rapports :

$$\frac{5}{16}, \quad \frac{1}{6}, \quad \frac{7}{64};$$

c'est-à-dire :

$$0,3125; \quad 0,1667; \quad 0,1093.$$

On voit par là que la diminution du poids est très rapide pour les nombres de bouilleurs usités dans la pratique. Si l'on fait encore le calcul pour l'hypothèse  $n = 4$ , on trouve le rapport  $\frac{2}{25}$  ou 0,0800. La nouvelle réduction qui serait ainsi réalisée ne mérite évidemment plus, par son importance, la complication qui résulterait de l'introduction d'un bouilleur de plus.

**1009** — Nous pouvons enfin déterminer les dimensions absolues qu'il y a lieu de donner au système, pour le mettre en état de fournir une puissance déterminée.

Nous venons de voir que sa surface de chauffe  $s$  a pour valeur :

$$s = \frac{\pi dl}{2} (1 + 2nz).$$

Appelons d'autre part  $p$  le poids de vapeur que l'on doit produire par heure, et  $v$  le coefficient spécifique d'activité de la chaudière. c'est-à-dire le nombre de kilogrammes que le type auquel elle appartient est capable de vaporiser par heure et par mètre carré. On aura, dans ces conditions :

$$s = \frac{p}{v},$$

ce qui donne :

$$dl = \frac{2p}{(1 + 2n\alpha)\pi v}$$

Telle est la relation à laquelle devront satisfaire les deux arbitraires  $l$  et  $d$ .

Le nombre le plus ordinaire de bouilleurs est  $n = 2$ , et le rapport de rayons le plus fréquent :  $\alpha = 1/2$ . Si nous remplaçons d'après cela  $n\alpha$  par l'unité, il viendra simplement :

$$dl = \frac{2}{3\pi} \cdot \frac{p}{v} = 0,212 \frac{p}{v}$$

Supposons, pour fixer les idées, les valeurs <sup>(1)</sup> :

$$p = 1\,000, \quad v = 15;$$

d'où il suit :

$$dl = 14,153.$$

On pourra prendre, par exemple, avec une longueur de 10 mètres, si l'on ne veut pas dépasser cette limite :  $d = 1 \text{ m. } 41$ ; ou bien, si l'on tient à ne pas excéder 1 mètre de diamètre, adopter comme longueur :  $l = 14 \text{ m. } 15$ ; ou plutôt, comme on trouvera vraisemblablement cette dernière exagérée, la répartir sous la forme d'une batterie de deux chaudières de 7 mètres de longueur. Si l'on tient au contraire à conserver l'unité de l'appareil, il faudra se résigner à franchir les limites en question. On pourra, par exemple, se proposer de le faire dans le même rapport pour toutes les deux, de telle sorte que l'on ait :

$$\frac{d}{1^{\text{m}}} = \frac{l}{10^{\text{m}}}, \quad l = 10d, \quad d = 1,4153;$$

$$d = 1^{\text{m}}, 18; \quad l = 11^{\text{m}}, 80.$$

<sup>(1)</sup> Ce qui suppose, sur le pied de 8 kilogrammes de vapeur par cheval-heure (t. I. p. 822), une puissance de 125 chevaux.

24

## CHAUDIÈRES A FOYER INTÉRIEUR

**1010** — *Chaudière de Cornouailles.* — Dans les générateurs à foyer extérieur, la veine gazeuse communique sa chaleur à sa paroi externe en même temps qu'à la paroi interne, qui seule constitue cependant la surface de chauffe utile. La première n'a d'autre rôle que de transmettre au dehors, et en pure perte, le calorique qu'elle reçoit.

On a imaginé de remédier à ce défaut en engouffrant immédiatement les flammes au milieu de la masse liquide, à l'intérieur d'un gros tube ouvert aux deux bouts (fig. 596, 597, 598), et construit, sauf cette différence, de la même manière que les corps cylindriques. Les conditions de son fonctionnement sont toutefois diamétralement inverses : il supporte la pression sur son extrados, et reçoit par l'intérieur l'action calorifique (1).

Après l'avoir parcouru d'un bout à l'autre, le torrent gazeux s'engage en retour de flamme autour du corps cylindrique proprement dit, pour l'échauffer par l'extérieur. La surface utile comprend donc, dans les *chaudières de Cornouailles*, la totalité du

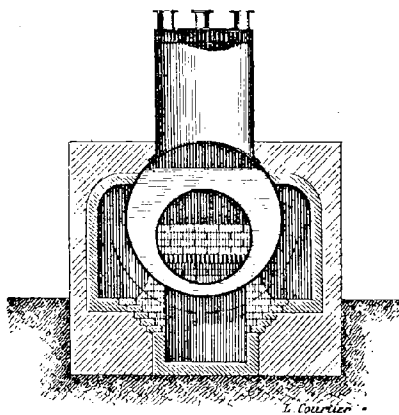


Fig. 596. -- Chaudière de Cornouailles.  
(Coupe transversale).

(1) Chaudières à foyer intérieur : BELLAMY. *Engineering*, 17 juin 1881, p. 610. — ENGERTH. *Revue industrielle*, 30 juillet 1884, p. 303. — PAUESCH. *Engineering*, 17 juin 1881, p. 610. — PIEDEBEUF. *Ibidem*, 8 avril 1881, p. 350. — SCHULTZ et KNANDT. *Ibidem* 12 juin 1891, p. 699. — WHEELER. *American machinist*, 17 juillet 1886, p. 1.

Chaudières à foyer intérieur de l'ARIZONA. *Engineering*, 3 septembre 1880, p. 192. — DU CITY OF SIDNEY. *American machinist*, 9 octobre 1890, p. 11. — DU ROSLIN CASTLE. *Scientific American supplement*, 5 janvier 1889, p. 10839. — DU VICTORIA. *Engineering*, 5 mars 1881, p. 273.

tube intérieur plus la portion de l'enveloppe extérieure qui est située au-dessous de la ligne des carneaux.

Les positions respectives de ces deux organes ne sont pas indépendantes ; le niveau devant s'élever de la quantité réglementaire

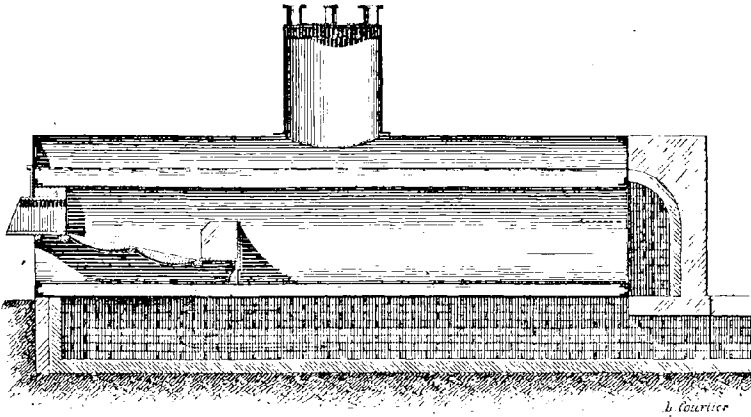


Fig. 597. — Chaudière de Cornouailles (coupe longitudinale).

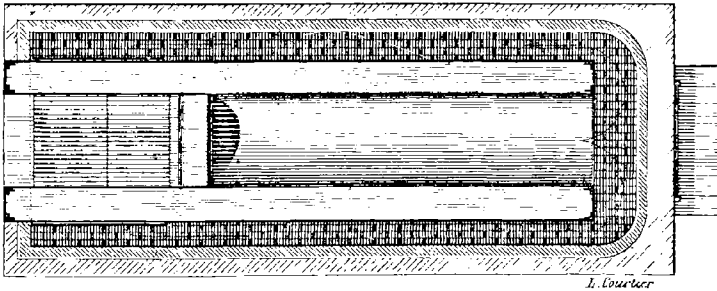


Fig. 598. — Chaudière de Cornouailles (coupe horizontale).

(n° 1001), tout à la fois au-dessus de la ligne des carneaux et du sommet du foyer intérieur.

Ce dernier sert à entretoiser les fonds de l'enveloppe extérieure : circonstance qui a sa valeur, car ces derniers présentent, à égalité de volume d'eau, un plus grand diamètre que les chaudières ordinaires. Toutefois un assemblage rigoureusement rigide offri-



rait des inconvénients, puisque ce tuyau, sollicité par une température plus élevée que celle qui agit sur le corps cylindrique, se dilate plus que ce dernier. En lui donnant une forme emboutie vers les extrémités, on communique à l'assemblage une certaine élasticité.

Dans les chaudières de Cornouailles, les maçonneries diminuent beaucoup d'importance et disparaissent même quelquefois, ce qui détermine alors un grand refroidissement. On trouve, à la vérité, une faible compensation dans la suppression de la perte du calorique emmagasiné dans les massifs à chaque reprise du travail, pour se dissiper après la mise hors feu.

**1011** — L'utilisation de la chaleur est très rationnelle avec ce dispositif, puisque rien ne peut se perdre de l'action immédiate des flammes. Elle est très rapide, car on va jusqu'à reprocher au système d'éteindre trop vite l'incandescence des gaz. La chute des cendres chaudes et des escarbilles n'occasionne même plus de perte calorifique, si l'on a soin de prolonger sous le cendrier les parois mouillées.

On a souvent constaté, pour ces générateurs, des rendements supérieurs de 5 à 10 % à ceux du type ordinaire.

**1012** — En revanche, on doit signaler à leur passif plusieurs inconvénients.

La combustion est gênée par les dimensions restreintes de la grille, et le peu de hauteur qui ne peut dépasser, dans le tube-foyer, la moitié de la largeur de cette dernière. Les manœuvres en sont rendues difficiles. Il faut conserver tout au moins 0 m. 60 de diamètre, et l'on dépasse même 1 mètre. L'application du système deviendrait tout à fait impossible avec des combustibles de qualité inférieure et d'une nature encombrante.

Une attaque aussi directe des flammes est brutale et destructive, surtout quand la houille est pyriteuse. On ne pourrait y remédier à l'aide de revêtements réfractaires sans rétrécir encore les passages.

Le danger résultant de l'abaissement du plan d'eau par défaut d'alimentation (n° 1178) devient ici plus redoutable. En effet, indé-

pendamment de son influence ordinaire le long des parois, très inclinées dans cette région de l'enveloppe extérieure, une légère dénivellation découvre tout d'un coup une grande étendue de tôle presque horizontale aux environs du sommet du foyer intérieur.

Enfin la solidité de ce dernier se trouve placée dans de mauvaises conditions. Étant pressé par l'extérieur, il ne présente plus qu'une forme d'équilibre instable. Lorsqu'une tendance à l'ovalisation s'est prononcée, elle ne s'arrêtera plus ; et le tube qui a commencé à s'affaisser doit être considéré comme condamné. Pour ce motif, on lui donne une épaisseur supérieure de moitié à celle qu'indique le calcul (n° 989) pour les corps cylindriques sollicités par l'intérieur<sup>(1)</sup>. D'un autre côté, l'exagération du diamètre de l'enveloppe extérieure exige elle-même des tôles épaisses, et finirait même par limiter la

pression, sous peine de tomber dans l'exagération. L'ensemble en est rendu plus lourd. Les réparations deviennent aussi moins faciles.

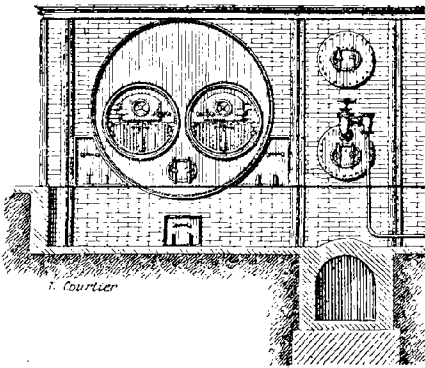


Fig. 599. — Chaudière de Lancastre (élévation).

**1013** — *Chaudière de Lancastre*. — La chaudière de Cornouailles ne présente qu'un seul foyer intérieur. On appelle *chaudières du Lancashire* ou

*de Lancastre* <sup>(2)</sup> celles qui en ont deux (fig. 599, 600, 601) groupés

<sup>(1)</sup> De nombreuses études théoriques ou empiriques ont été publiées sur cette question : Expériences de Fairbairn sur l'écrasement des foyers intérieurs (Morin, *Résistance des matériaux*, t. I, p. 195. — Armengaud, *Publication industrielle*, t. XXV, p. 299. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1859, p. 150). — Love, Mémoire sur la résistance des conduits intérieurs de fumée. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, 1859, p. 471. — Dwelshauvers Dery, *Résistance des matériaux*, 1884, in-8°, p. 115. — Audenet, *Étude sur la chaudière marine*. — Hirsch et Debize, *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 844 à 859. — *Revue industrielle*, 1879, p. 47. — Seaton, *A Manual of Marine Engineering*, 1885, p. 354.

<sup>(2)</sup> Fairbairn, Chaudières de Lancastre. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 2<sup>e</sup> série, t. II, p. 9. — Mac Dougall, Note sur les chaudières de Lancastre (*Iron*, 18 juin

dans un plan horizontal ; ou même trois, disposés suivant un arc de cercle concentrique au corps principal (fig. 602).

Ce dernier dispositif crée une difficulté spéciale pour les chauffeurs, en raison de l'inégalité des niveaux. Il conduit tout à la fois

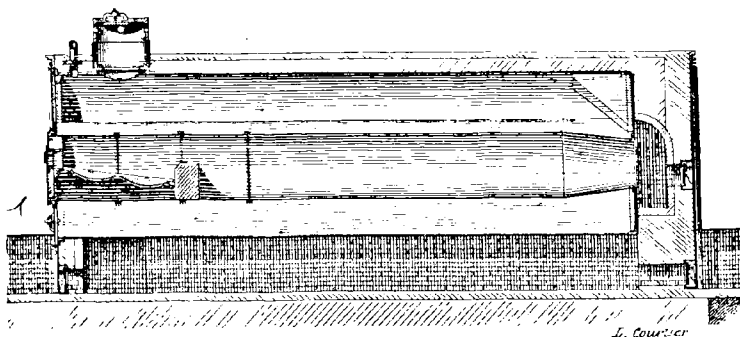


Fig. 600. — Chaudière de Lancastre (coupe longitudinale).

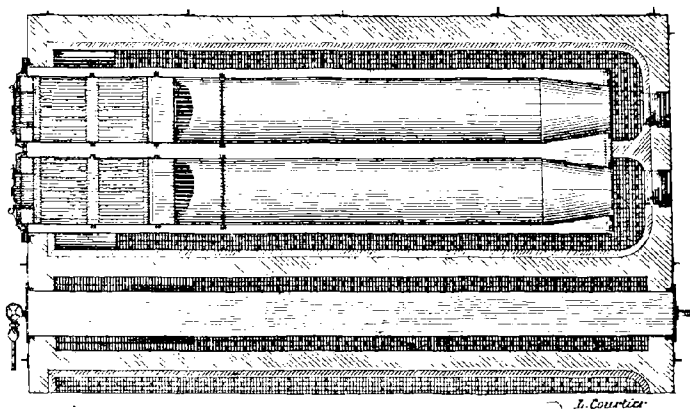


Fig. 601. — Chaudière de Lancastre (coupe horizontale).

à des corps cylindriques très gros et à des tubes-foyers étriqués. Il en résulte la nécessité de tôles fort épaisses pour le premier, et une combustion assez gênée.

1860, p. 446. — *Revue industrielle*, 9 juin 1880, p. 221). — Chaudière Duchesne à trois carneaux intérieurs. *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, mai 1877, p. 4.

La réduction du nombre de foyers à deux seulement atténue ces inconvénients et procure une grande régularité de marche, en permettant de croiser les phases de la combustion, si l'on a soin d'alterner convenablement les chargements sur l'une et l'autre grille.

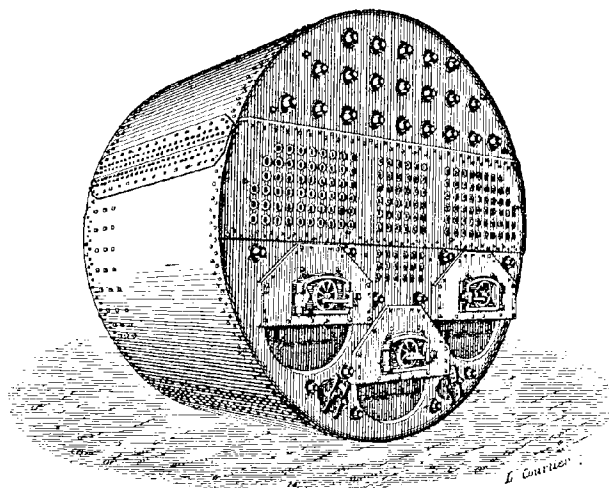


Fig. 602. — Chaudière de Lancastre semi-tubulaire à trois foyers intérieurs.

**1014** — *Chaudière Fox*. — Pour remédier au défaut de résistance des tubes intérieurs, on a introduit l'emploi des tôles ondulées <sup>(1)</sup>. Le méridien de la surface de révolution est alors, non plus une droite parallèle à l'axe, mais une sinusoïde (fig. 605). Le moment d'inertie de la coupe longitudinale d'une pareille tôle par rapport à son axe neutre (dont la valeur forme la caractéristique de la raideur), se trouve par là notablement augmenté.

<sup>(1)</sup> Tôle ondulée de Fox. Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 63. — Kuhne. Application des tôles ondulées aux générateurs. *Annales industrielles*, 1884, t. II, p. 446. — Chaudière Fox. *Chronique industrielle*, 5 janvier 1890, p. 4. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 879. — *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1878, p. 65. — *Portefeuille économique des machines*, mai 1890, p. 69. — Unwin. *On the resistance of Boiler Flues to Collapse*. — Malam. *American machinist*, 4 décembre 1890, p. 7. — *Proceedings of the Institution of civil Engineers*, vol. 46, 1876. — *The Engineer*, 29 mars 1878, p. 215. — *Engineering*, 29 septembre 1889, p. 500.

M. Fox a donné à cette fabrication une grande extension dans ses ateliers de Leeds. Il est nécessaire d'y consacrer des aciers très doux. Le supplément de solidité ainsi réalisé permet d'ailleurs, dans une certaine mesure, d'employer des tôles plus minces et plus légères, qui sont laminées sans soudures.

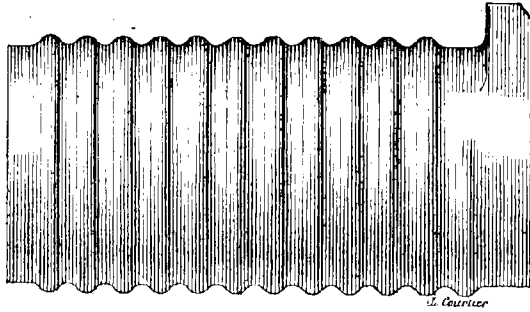


Fig. 605. — Tôle ondulée de Fox (élévation).

Les ondulations communiquent en même temps une certaine élasticité au point de vue des dilatations, et contribuent à diminuer les tractions longitudinales.

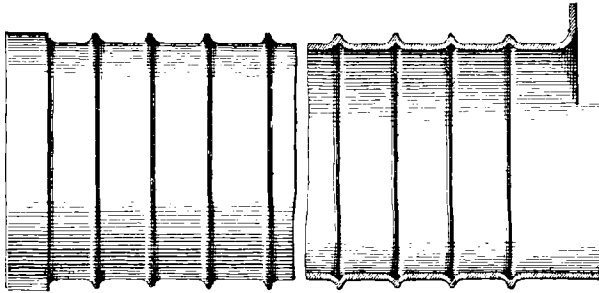


Fig. 604 et 605 — Tôle ondulée de Purves (élévation et coupe verticale).

La surface de chauffe s'en trouve augmentée, à égalité de dimensions dans l'ensemble.

Par contre, on reproche à ce dispositif de former des nids de suie dans ses ondulations successives, et de diminuer ainsi l'influence de la convection des gaz.

Dans le foyer Purves (<sup>1</sup>), on a cherché à concilier ces divers points de vue, en employant, pour le profil méridien, une succession de segments rectilignes nettement séparés par des nervures en forme de V (fig. 604, 605).

**1015** — *Chaudière Galloway*. — M. Galloway a cherché une garantie contre l'écrasement dans un remède encore plus

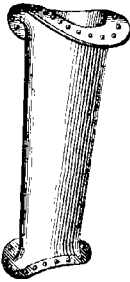


Fig. 603.  
Entretoise Galloway.  
(Vue perspective).

direct. Sa fabrication a pris un développement colossal (<sup>2</sup>).

Il établit de distance en distance, suivant certains diamètres du tube-foyer, des arcs-boutants (fig. 606) qui en étré sillonnent les parois (fig. 607). On a soin de disposer ces entretoises en quinconce, afin de mieux brasser les gaz en les forçant à infléchir leurs trajectoires pour se glisser à travers ces obstacles successifs.

Ces armatures sont formées de tubes creux, à section elliptique, et de forme légèrement tronc-conique. Leurs extrémités sont

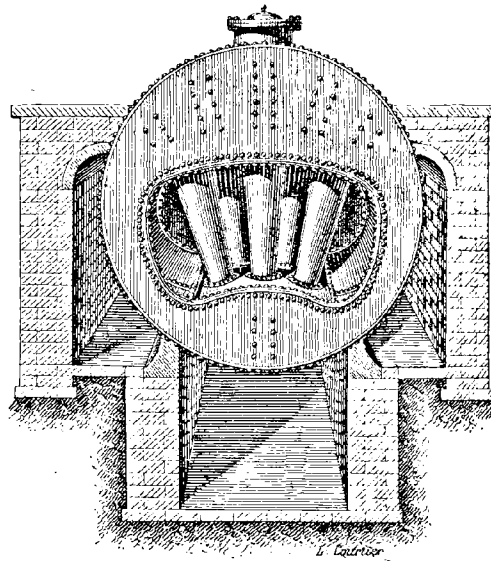


Fig. 607. — Chaudière Galloway (élévation antérieure).

(<sup>1</sup>) Foyer Purves. *Annales industrielles*, 15 février 1891, p. 203. — Foyer Monisox. *La Métallurgie*, 19 octobre 1891, p. 1288. — Foyer Farnley. Sauvage. *Annales des mines*, novembre-décembre 1890, p. 576.

(<sup>2</sup>) Hirsch. *Rapport sur l'Exposition de 1878*, p. 98. — Hirsch et Debire. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 628. — *Engineering*, 1876, p. 456.

munies de *collerettes embouties*, analogues à celles des *cuissards* (fig. 606). La plus petite des deux *collerettes* peut passer par le plus grand orifice, pour venir s'assembler sur la tôle à l'aide de clouures. L'eau circule à travers ces entretoises avec une grande activité en raison des différences de densité (fig. 608). Il en résulte une augmentation très efficace de la surface de chauffe.

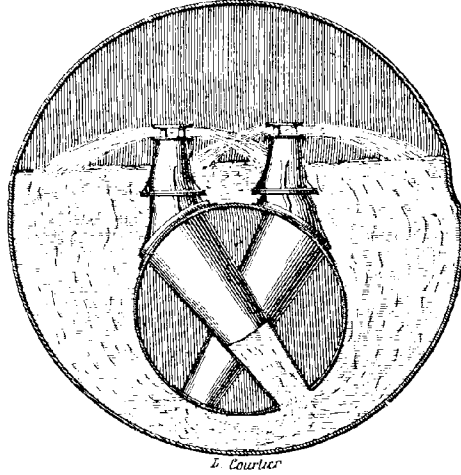


Fig. 608. — Chaudière de Gamgee (coupe verticale).

Ce mode de soutènement permet de s'écarter, pour le tube-foyer, de la section circulaire. On lui donne une forme elliptique, ou mieux encore un ciel en arc de cercle très aplati (fig. 607); ce qui a pour avantage de moins relever le plan d'eau.

La paroi longitudinale présente des renflements formant chicane, de manière à ramener incessamment les gaz vers l'axe.

M. Galloway adopte souvent le type Lancastre. Derrière l'autel, s'ouvrent les deux foyers, dans la paroi d'une chambre de combustion assez vaste pour que les gaz soient convenablement brassés avant de s'engager dans les tubes.

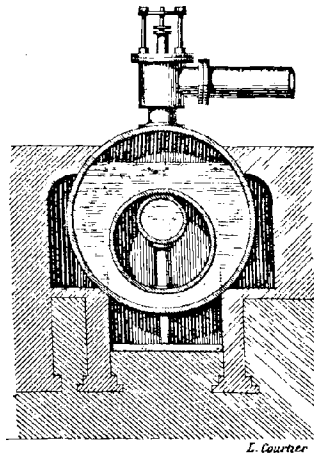


Fig. 609. — Chaudière de Cornouailles à bouilleur intérieur (coupe verticale).

**1016** — *Variantes diverses.* — Quelques chaudières de Cornouailles renferment un bouilleur à l'intérieur du tube-foyer

(fig. 609). Mais la suie a tendance à s'y déposer, en raison du rapide refroidissement des gaz. Il résulte nécessairement de cette addition, faite dans de semblables conditions, un bouilleur trop petit, en même temps qu'un carneau trop grand, et cependant étriqué par la présence du premier. Le nettoyage est en outre rendu très difficile (fig. 704).

**1017** — On a donné à certaines chaudières à foyer intérieur la disposition verticale (n° 1057). Le carneau est alors, par exception, foncé à sa partie supérieure, maintenue au-dessous de la surface liquide. Le gaz s'en échappe par une série de petits tubes, à travers cette lame d'eau et la vapeur qui la surmonte.

Une telle disposition est anti-réglementaire au point de vue strict (n° 1187), et peu favorable d'ailleurs, car elle participe aux inconvénients généraux du type vertical (n° 1057).

**1018** — *Calcul des dimensions.* — Nous pouvons, comme ci-dessus, déterminer les dimensions de l'appareil qui sera capable d'une puissance assignée à l'avance. Nous conserverons à cet effet les notations du n° 1009.

Envisageons, pour fixer les idées, une chaudière de Lancastre. Sa surface de chauffe se composera de la totalité de la superficie de ses deux foyers intérieurs :  $2\pi\alpha ld$ , et d'une fraction de la périphérie du corps cylindrique, que l'on peut prendre égale à  $\frac{2}{3}$ , attendu que la ligne des carneaux se relève ici notablement par la condition de se trouver au-dessus du sommet des tubes-foyers :

$$s = \frac{2}{3} \pi ld + 2\pi\alpha ld = \frac{2\pi ld}{3} (1 + 3\alpha).$$

Il suit de là :

$$ld = \frac{3p}{2\pi v(1 + 3\alpha)}.$$

Le rapport le plus ordinaire de rayons est  $\alpha = \frac{2}{5}$ . En adoptant cette



valeur, il vient :

$$ld = \frac{45}{22\pi} \cdot \frac{p}{v} = 0,217 \frac{p}{v}.$$

Reprenons par exemple les données ci-dessus (n° 1009) :

$$p = 1\,000, \quad v = 15, \quad ld = 14,47.$$

Si l'on impose *a priori*, pour le foyer intérieur, le diamètre minimum compatible avec des visites intérieures : 0<sup>m</sup>,60 (n° 1151), nous aurons :

$$d = \frac{5}{2} \cdot 0^m,60 = 1^m,50; \quad l = \frac{14,47}{1,50} = 9^m,60.$$

Si l'on adopte au contraire son maximum ordinaire : 1 mètre, il viendra :

$$d = \frac{5}{2} \cdot 1^m,00 = 2^m,50; \quad l = \frac{14,47}{2,50} = 5^m,80.$$

On voit que l'une et l'autre de ces limites sont pratiquement acceptables. Il en sera par conséquent de même pour toutes les combinaisons intermédiaires que l'on préférerait adopter.

## 5

### CHAUDIÈRES TUBULAIRES

**1019** — *Type locomotive*. — En prolongeant indéfiniment par la pensée la progression du nombre des foyers intérieurs, que l'on a poussée jusqu'à trois dans les foyers de Lancaster (1), on arrive à

(1) En renonçant à la possibilité de la visite intérieure de ces organes par le passage d'un ouvrier; visite qui n'a plus la même importance, lorsqu'aux viroles de tôle d'un diamètre notable on substitue des tubes d'un faible calibre, et d'un tout autre mode de fabrication.

la *chaudière tubulaire* <sup>(1)</sup>. Le principe de l'utilisation de la chaleur par la pénétration des flammes au sein de la masse liquide y acquiert toute sa valeur, au moyen de cette extrême subdivision de la masse gazeuse; d'où résulte une augmentation décisive de la surface de chauffe sous un volume d'ensemble restreint.

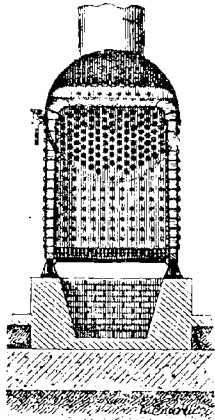


Fig. 610.  
Chaudière tubulaire.  
(Coupe transversale).

Cette condition s'imposait absolument pour les locomotives, afin de pouvoir installer sur un véhicule une puissance importante. On peut dire que toute l'industrie des chemins de fer est devenue le corollaire de cette admirable invention de Seguin qui date de 1827 <sup>(2)</sup>, depuis que l'application en a été faite à la *Fusée* par Stephenson en 1829.

C'est surtout à l'occasion de ces machines, et de celles de la marine, que le type tubulaire a reçu ses principaux perfectionnements. Aussi l'une des formes les plus usuelles sous lesquelles on le rencontre parmi les

<sup>(1)</sup> Chaudières tubulaires : ALLEN. *Engineering*, 1872, p. 277. — BATE. *American machinist*, 12 février 1881, p. 5. — BELLAMY. *Engineering*, 15 juillet 1881, p. 64. — BROMISCH. *Scientific american*, 1<sup>er</sup> novembre 1890, p. 275. — BROWN. *Engineering*, 9 septembre 1881, p. 156. — CADIAT. *Revue industrielle*, 17 septembre 1885, p. 375. — DAVEY PAXMAN. *Revue technique de l'Exposition universelle de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 177. — DELANY. *American machinist*, 15 août 1887, p. 3. — FOX. *Scientific american*, 19 septembre 1885, p. 178. — GUILLEMIN. *Résal. Traité de mécanique générale*, t. IV, p. 150. — HENNESSEY. *American machinist*, 5 novembre 1881, p. 5. — ISHERWOOD. *Journal of Franklin Institute*, avril 1879, p. 248. — LE MOAL. *Rapport Farcot. Bulletin de la Société d'encouragement*, janvier 1891, p. 22. — LE VAN. *Journal of Franklin Institute*, mai 1885, p. 596. — LIÉNARD BENOIT. *The Engineer*, 17 mai 1878, p. 354. — MANGUET. *Annales industrielles*, 29 mars 1891, p. 402. — MENAY. *Armengaud. Publication industrielle*, vol. 50, p. 195. — MEUNIER. Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 596. — MILLER. *American machinist*, 13 août 1881, p. 1. — MOLINOS et PROSDNER. Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 596. — MORRIS. *Scientific american supplement*, 18 janvier 1890, p. 11 705. — PELESTOR. *Revue industrielle*, 5 mars 1884, p. 99. — POOLE et LENT. *American machinist*, 9 août 1884, p. 7. — SCHEFFER. *Ibidem*, 29 novembre 1884, p. 6. — SINCLAIR. *Journal of Franklin Institute*, septembre 1878. — SULZER. Hirsch. *Rapport sur l'Exposition de 1878*, p. 85. — TOWARD. *Engineering*, 12 février 1892, p. 209. — TWEZE. *Engineering*, 15 décembre 1882, p. 579. — Mines de Calumet et Hécla. *Engineering*, 31 mars 1882, p. 290. — Station de Saint-James. *The Engineer*, 5 septembre 1890, p. 189.

<sup>(2)</sup> De Pambour. *Traité des machines locomotives*, p. 7.

machines fixes ou voyageuses porte-t-elle précisément le nom de *type-locomotive*. C'est l'exemple que nous décrirons ici pour fixer les idées (fig. 610, 611).

**1020** — La grille est placée dans une vaste boîte à feu de forme parallélépipédique. Les parois planes de cette dernière sont mouillées par l'eau, renfermée entre deux feuilles de tôle entretoisées. Le ciel est soutenu par de fortes armatures, qui portent sur les parties latérales. La face arrière de cette chambre constitue

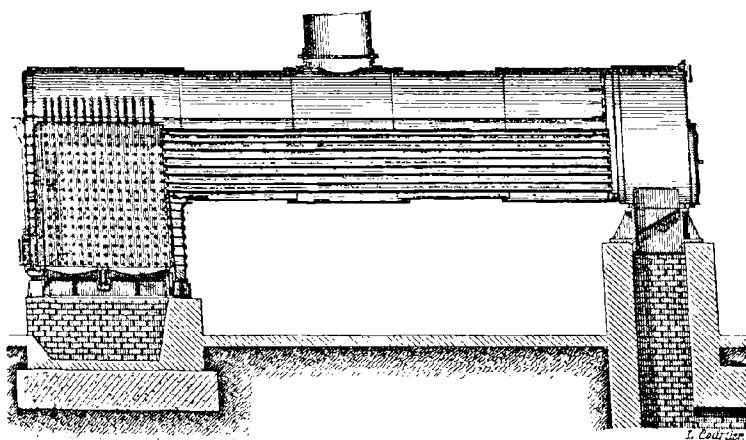


Fig. 611. — Chaudière tubulaire (coupe longitudinale).

l'une des deux *plaques tubulaires* qui ferment les extrémités du corps cylindrique, rempli d'eau dans les intervalles des tubes. Ces plaques sont percées de trous régulièrement disposés, soit en quinconce formé de triangles équilatéraux, soit en files verticales, ce qui paraît plus favorable au dégagement de la vapeur.

Les tubes, percés de part en part, vont d'une plaque à l'autre, établissant la communication entre la boîte à feu et la boîte à fumée. Assujettis aux plaques tubulaires, ils ont pour effet de les étrésillonner mutuellement, mais en même temps de les fatiguer par le jeu des dilatations, attendu qu'ils sont soumis à une température plus élevée que celle qui sollicite l'enveloppe extérieure, rivée de son côté aux bords de ces plaques.

Pour remédier à cet inconvénient, on communique parfois quelque élasticité à la plupart des tubes à l'aide de joints d'amiante, en réservant le rôle d'entretoises à un petit nombre d'entre eux, ou

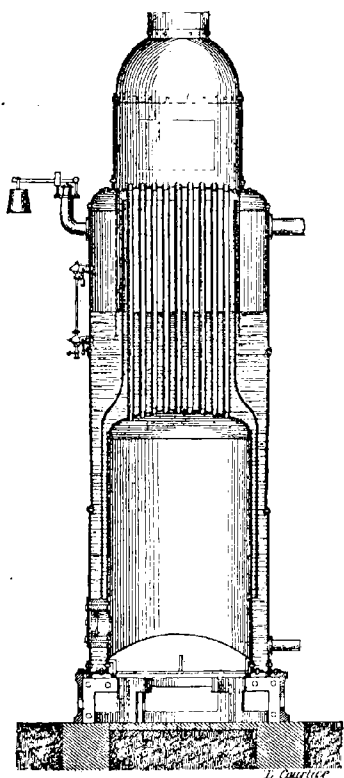


Fig. 612. — Chaudière tubulaire verticale.  
(Coupe méridienne).

meux encore à des tirants spéciaux. Dans l'évaluation de ces efforts, on n'oubliera pas que la pression ne s'exerce sur les plaques que dans les intervalles des tubes ; on devra donc retrancher de leur surface, comme pour une écumoire, la totalité de la section de ces derniers.

La longueur est en général de 5 à 5 mètres. La surface de chauffe tubulaire est décuple de celle du foyer lui-même.

Dans la boîte à fumée s'ouvre une porte d'accès, destinée à permettre le ramonage intérieur des tubes à l'aide d'écouvillons. Les gaz se rendent de cette enceinte à la cheminée.

**1021** — *Types divers.* — Dans quelques machines tubulaires fixes, on ramène les gaz chauds autour de l'enveloppe en retour de flamme.

La plupart des générateurs tubulaires sont horizontaux. On en voit cependant assez souvent de verticaux (fig. 612). Sulzer a construit un type incliné.

**1022** — *Chaudières semi-tubulaires.* — On appelle chaudières *semi-tubulaires* <sup>(1)</sup> des combinaisons, variables comme dispositifs,

<sup>(1)</sup> Chaudières semi-tubulaires : BARBE. *Revue technique de l'Exposition de 1889* 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 180. — DAMEY. *Ibidem*, p. 277. — DULAC (*Revue industrielle*, 28 novembre 1885, p. 475 — *Portefeuille économique des machines*, 1884, t. I). — LECHEF.

dans lesquelles on associe avec des formes ordinaires à bouilleurs

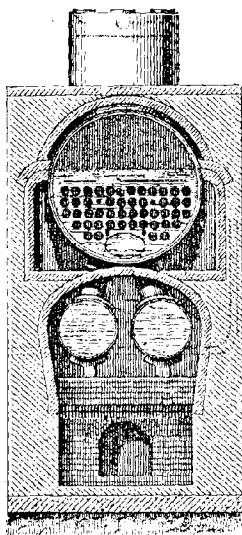


Fig. 613. — Chaudière semi-tubulaire (coupe transversale).

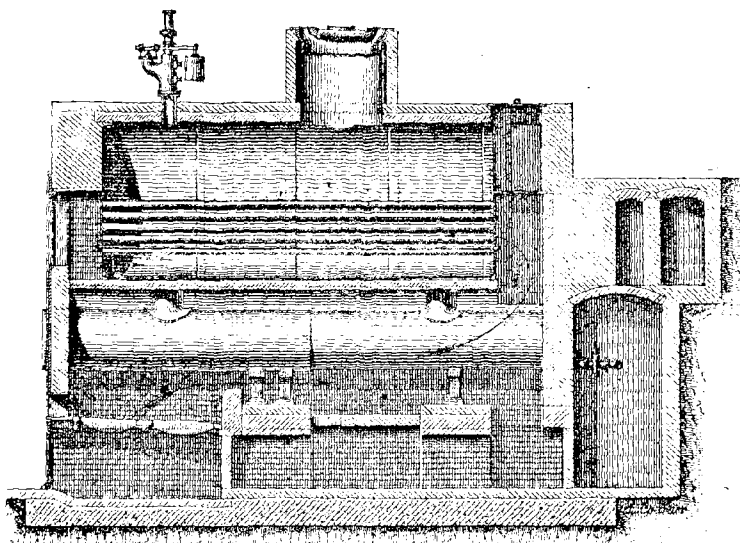


Fig. 614. — Chaudière semi-tubulaire (coupe longitudinale).

Armengaud. *Les progrès de l'industrie*, t. I, pl. I. — LENCARCHEZ. *Journal of Franklin Institute*, juillet 1881, p. 21. — MEYER (*Revue industrielle*, 16 avril 1884, p. 155. —

(fig. 613, 614) un faisceau tubulaire, afin d'augmenter suffisamment la surface de chauffe sous le volume que l'on ne veut pas dépasser pour l'ensemble.

On rencontre également des chaudières de Cornouailles, criblées de tubes de fumée dans la partie occupée par l'eau (fig. 615, 616).

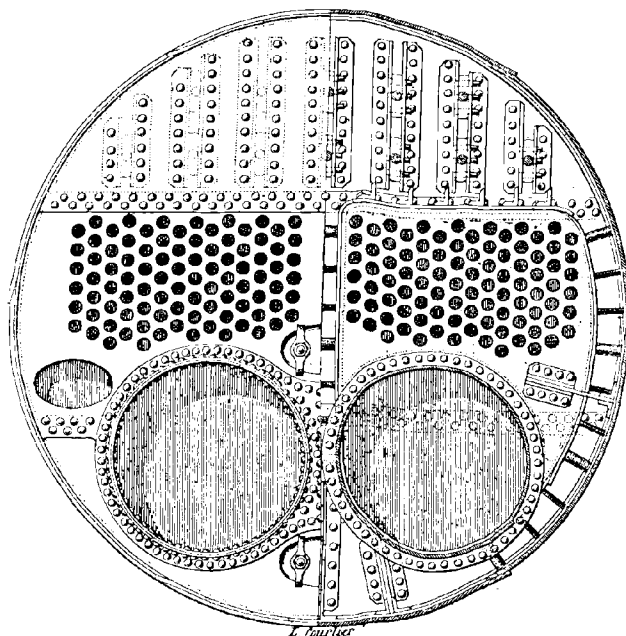


Fig. 615. — Chaudière marine semi-tubulaire (élévation antérieure).

Ceux-ci sont horizontaux ou verticaux, en même temps que le corps et le foyer intérieur. Dans la chaudière Fouché et de la Harpe <sup>(1)</sup>, on a combiné, avec un générateur de Cornouailles horizontal, un faisceau tubulaire vertical.

**1023** — *Chaudières à faisceau tubulaire amovible.* — La conduite du feu, avec les appareils tubulaires, doit être particulière-

*Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 229). — Vicroon et Forcet. *Annales industrielles*, 20 juin 1870, p. 354.

<sup>(1)</sup> Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 627.

ment attentive. Les variations de niveau sont rapides, ce qui expose aux coups de feu. Il en est de même des dépôts, particulièrement difficiles à enlever.

Pour faciliter ce nettoyage, on a imaginé de rendre les tubes amovibles. Ce principe peut être appliqué de trois manières diffé-

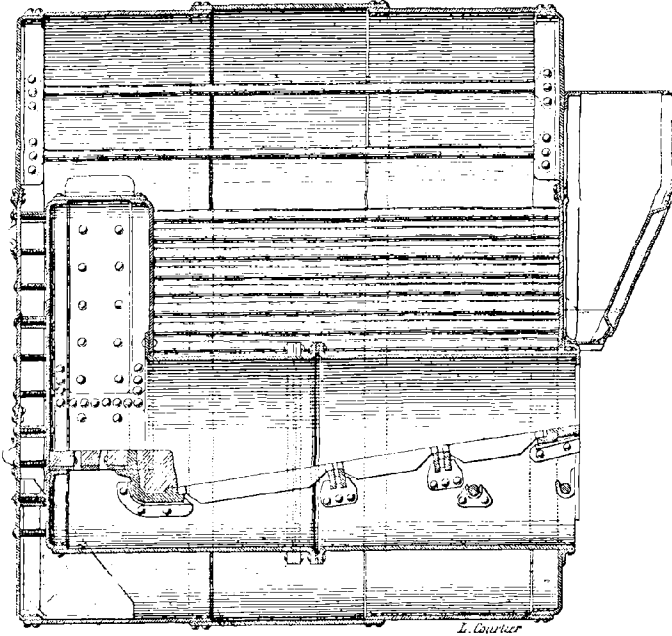


Fig. 616. — Chaudière marine semi-tubulaire (coupe verticale).

rentes : 1° en rendant la totalité des tubes indépendants, de manière à pouvoir les détartrer individuellement (nous reviendrons plus loin [n° 1028] sur les moyens en usage à cet effet) ; 2° en employant un certain nombre seulement de tubes amovibles, dont l'enlèvement laissera dans le faisceau des vides suffisants pour permettre le détartrage sur place ; 3° avec un faisceau tubulaire amovible en totalité (1).

(1) Chaudières à foyer amovible : FARCOT (Denfer. *Traité pratique des chaudières à vapeur*, p. 45. — HIRSCH. *Rapport sur l'Exposition de 1878*, p. 90. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 66). — THOMAS et LAURENS (Laurent et Dunkel. *Album du construc-*

**1021** — Les figures 617, 618 représentent la chaudière à foyer amovible de Thomas et Laurens.

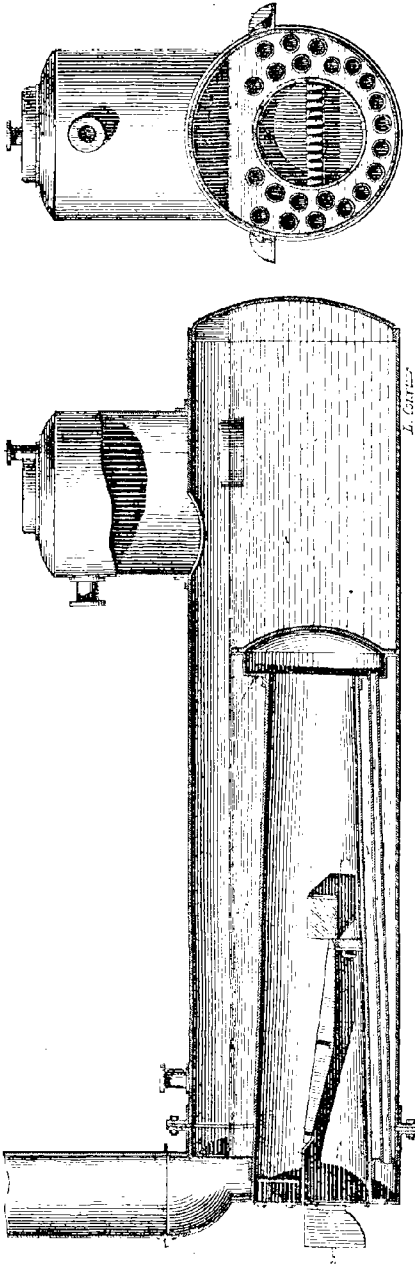


Fig. 617 et 618. — Chaudière à foyer amovible Thomas et Laurens (coupes longitudinale et transversale).

Un cylindre central reçoit les gaz, et les conduit jusqu'à son extrémité. De là ils reviennent à la cheminée placée à l'avant, en traversant un faisceau de tubes disposés autour du cylindre. L'enveloppe extérieure est ainsi préservée; circonstance utile, puisque c'est elle qui est affaiblie par toutes les ouvertures nécessaires pour l'installation des appareils de sûreté.

Le système intérieur peut se tirer au dehors. Il est nécessaire à cet effet de laisser libre un emplacement au moins égal à sa longueur. On le remet en place en refaisant un

leur de chaudières à vapeur, pl. 77. — Denfer. *Traité pratique des chaudières à vapeur*, pl. 45. — Armengaud. *Génie industriel*, vol. 21). — VELLLET et LESCUR. Hirsch. *Rapport sur l'Exposition de 1878*, p. 89. — WEYHER et RICHMOND (fig. 619, 620). *Revue technique de l'Exposition de 1880*, 6<sup>e</sup> partie, t. I. p. 257. — Laurent et Dunkel. *Album du constructeur de chaudières à vapeur*, p. 78. — Denfer. *Traité pratique des chaudières à vapeur*, p. 45. — Ser *Physique industrielle*, t. II, p. 65.



joint à bride avec des soins particuliers, car ses défauts d'étan-

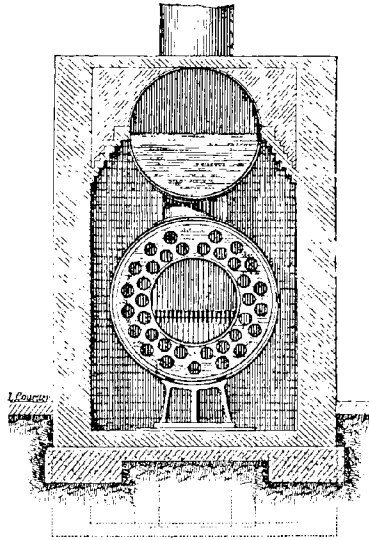


Fig. 619. — Chaudière à foyer amovible Weyher et Richemond (coupe transversale).

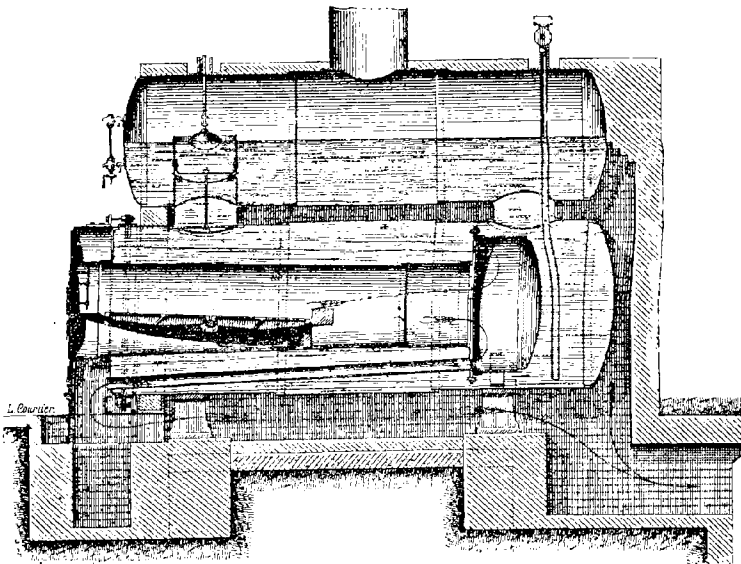


Fig. 620. — Chaudière à foyer amovible Weyher et Richemond (coupe longitudinale).

chéité ne se manifesteraient qu'au moment de la remise en marche.

**1025** — *Tubes*. — Les tubes se font en fer, en cuivre, ou en laiton (¹).

Ce dernier alliage est employé presque exclusivement par la marine militaire, avec 68 parties de cuivre de première qualité et 32 de zinc. Il résiste mieux que le fer aux acides, et paraît s'entartre avec moins de facilité. On fabrique ces tubes sans soudure, et l'on recuit les extrémités pour les préparer au travail du *baguage*.

Le cuivre est peu usité. Il est plus cher que le laiton, et plus mou. Ses surfaces s'usent par les petits chocs des corpuscules qu'entraîne le courant gazeux. On utilise parfois sa malléabilité pour le travail des joints, en brasant sur des tubes en laiton des bouts en cuivre rouge, auxquels on peut donner un surcroît d'épaisseur.

Le fer est économique. Il coûte deux fois moins cher que le laiton. Il est moins dilatable que ce dernier, et l'emporte également pour la résistance à la pression, mais non aux acides. Il s'entarte facilement, et se prête moins bien au travail des assemblages. On fabrique ces tubes soit par soudure, soit par étirage sans soudure.

**1026** — La quantité de chaleur qui passe à travers la paroi des tubes augmente avec la vitesse du courant gazeux (²), laquelle varie en raison inverse de la section, ou du carré du diamètre.

Ce diamètre est compris entre 4 et 10 centimètres. On se rapproche de la première limite pour les locomotives, et de la seconde dans la marine. Au-dessous de 4 centimètres, le ramonage devient impraticable. Au delà de 10 centimètres, le diamètre est trop grand pour l'opération du *baguage*. En outre, si de tels tubes venaient à crever, leur rupture occasionnerait des dégâts importants.

(¹) Emploi des tubes d'acier dans les chaudières. *Annales industrielles*, 17 février 1889, p. 202. — Coste. Préparation et montage des tubes. *Annales des mines*, 8<sup>e</sup> série, t. XV, p. 378. — Commission belge. Consolidation des tubes et des foyers. *Ibidem*. 7<sup>e</sup> série, t. XVIII, p. 558. — Compère. Note sur les conditions de résistance des tubes de chaudières multitubulaires. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, novembre 1891, p. 502. — Prégardien de Deutz. Perfectionnements aux chaudières tubulaires. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 5<sup>e</sup> série, t. XII, p. 573.

(²) Expériences de M. Almgren (Reuleaux. *Der Konstrukteur*, 4<sup>e</sup> édit., p. 1032).

Une épaisseur de 5 millimètres les assure contre la pression. Les tubes ne périssent alors que par suite de défauts spéciaux du métal, et non par défaut de solidité théorique.

L'intervalle mesuré bord à bord ne doit pas descendre au-dessous de 15 à 20 millimètres. A cette limite déjà, l'entartrement risque de devenir inextricable.

Les tubes Serve <sup>(1)</sup> présentent intérieurement des nervures longitudinales, destinées à augmenter leur surface de chauffe.

Les tubes Guebard <sup>(2)</sup> renferment une spirale en fer feuillard, pour forcer les gaz à circuler en hélice, de manière à faciliter le brassage en même temps que l'échange des températures.

**1027** — *Pose des tubes.* — Les tubes s'adaptent aux plaques tubulaires au moyen de viroles en fer ou en acier que l'on force à l'intérieur des bouts, en rabattant les bords de ces derniers dans des fraises pratiquées tout autour des trous. Ces viroles présentent l'inconvénient de réduire le débouché, et de fatiguer la plaque tubulaire. Aux États-Unis on environne l'extrémité du tube d'une mince bague en cuivre, qui s'écrase contre la plaque tubulaire <sup>(3)</sup>.

L'*expandeur Dudgeon* <sup>(4)</sup> est un outil fort employé pour mandriner les bouts, en profitant de

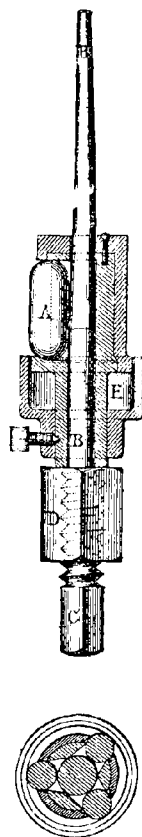


Fig. 621 et 622.  
Expandeur Dudgeon.  
(Plan et élévation).

<sup>(1)</sup> Tubes SERVE (*Bulletin de la Société d'encouragement*, 4<sup>e</sup> série, t. IV, p. 448. — *Annales industrielles*, 22 septembre 1889, 4 janvier et 18 octobre 1891. — *Engineering*, 24 octobre 1890).

Tubes GROMIENNE. *The railroad and Engineering Gazette*, mai 1887, p. 205.

Tubes à ailerons. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. C, p. 1530.

<sup>(2)</sup> Tubes GUEBARD. Bienaymé. *Traité des machines marines*, p. 479.

<sup>(3)</sup> Baudry. *Annales des mines*, 8<sup>e</sup> série, t. XII, p. 81.

<sup>(4)</sup> G. Richard. *La chaudière locomotive*, gr. in-4<sup>e</sup>, p. 607. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXIX, p. 272. — Coste. *Annales des mines*, 8<sup>e</sup> série, t. XV, p. 378. — Hervé. Appareil à mandriner les tubes. *Annales industrielles*, 1885, t. I, p. 113.

la malléabilité du cuivre rouge, de manière à pouvoir se passer de viroles. Trois galets A (fig. 621, 622) roulent sur la paroi interne du tube, en raison de leur adhérence avec la tige B, dont l'ouvrier détermine la rotation à l'aide du carré C et d'un tourne-à-gauche. En même temps il appuie longitudinalement, pour forcer l'écartement en raison de la conicité de la tige. Quand il s'agit de desserrer, on fait tourner l'écrou D, qui prend, au moyen du manchon E, son point d'appui sur les bords du trou.

Lorsque les tubes ont été assujettis à leurs places, on les y maintient à l'aide d'une *contre-plaque*. Les trous de cette dernière sont placés en regard de ceux de la première plaque, mais ils ont un calibre un peu moindre, pour que les tubes ne puissent s'y engager, tout en restant supérieur au vide intérieur de ces derniers, afin de ne pas gêner l'écoulement des gaz.

**1028** — *Tubes amovibles*. — Quand des tubes ont été installés par le procédé ordinaire, il devient très difficile de les retirer sans avaries. On se voit souvent obligé, pour les faire servir de nouveau, de tronquer les extrémités et d'en braser de nouvelles. Il est donc nécessaire de disposer d'une manière spéciale <sup>(1)</sup> les tubes que l'on veut rendre habituellement amovibles <sup>(2)</sup>.

Dans le système Bérendorf, on soude aux deux extrémités du tube deux bagues coniques exactement tournées sur deux diamètres un peu différents de l'une à l'autre. Les plaques tubulaires sont forcées inégalement d'après chacun de ces deux calibres. On enfle la plus petite bague à travers le plus grand orifice, et on l'amène

(1) Système de tubes amovibles. *Neuvième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Paris, 1886, p. 127.

(2) Tubes amovibles : BERENDORF (*Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, janvier 1886, p. 15. — Benoit. *Cours de chaudières à vapeur*, p. 84). — CONSTANT. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, janvier 1886, p. 13. — GANTELME. Leduc. *Nouvelles machines marines*, t. III, p. 175. — GIRARD. Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 598. — INFERNAT et GOUTTES. Leduc. *Nouvelles machines marines*, t. III, p. 177. — LANGLOIS. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, janvier 1886, p. 13. — MONTUPPET (Seraine. *Ibidem*, p. 15. — *Revue industrielle*, 3 décembre 1885, p. 482). — TOSGER. Leduc. *Nouvelles machines marines*, t. III, p. 175.

à son logement dans la plaque opposée. On l'y assujettit alors, en même temps que la grande bague dans le sien, en frappant sur la tête d'un boulon, dont l'embase s'appuie sur le bout du tube, et dont l'extrémité terminée par un étrier prend un point d'appui sur l'autre plaque.

La conicité détermine une tendance à ressortir. On s'y oppose en installant, contre les grandes bases, une contre-plaque dans la boîte à fumée. Il y a lieu de temps en temps de revoir certains joints des tubes démontables, qui se fatiguent et exposent à des fuites (1).

(1) De Maupéou. *Mémoires du Génie maritime*, 1889, p. 221.

## CHAPITRE LVI

### CHAUDIÈRES TUBULÉES

#### § 1

#### GÉNÉRALITÉS

**1029** — Nous avons, dans le chapitre précédent, étudié les diverses catégories de chaudières qui, tout en variant notablement dans la forme, présentent toutefois ce caractère commun de renfermer à l'intérieur d'un corps cylindrique, qui leur constitue une enveloppe générale, un grand volume d'eau, lequel est un régulateur pour la marche, mais en même temps une cause de danger.

A l'autre extrémité de l'échelle se placent des générateurs, pour la construction desquels on a cédé à une préoccupation inverse : la sécurité avant tout <sup>(1)</sup>, et par conséquent peu d'eau (n° 999). Pour en faire malgré cela passer, dans un temps donné, une grande quantité à l'état de vapeur, afin de réaliser une puissance notable, il sera nécessaire que ce liquide traverse rapidement l'appareil, en recevant la chaleur avec une activité toute spéciale. Or, nous avons vu que l'eau possède une faible conductibilité, ce qui exige un renouvellement actif des contacts entre elle et les parties les plus efficaces de la surface de chauffe, en un mot une circulation intensive.

<sup>(1)</sup> Ces appareils se sont beaucoup répandus dans ces derniers temps, et leur emploi continuera certainement à se développer, parce qu'ils fournissent le moyen pratique de concilier, dans les locaux habités et même populeux (théâtres, grands magasins, etc.), la nécessité d'un moteur puissant pour la production de la lumière électrique, avec les exigences de la réglementation publique au point de vue de la sécurité et du volume d'eau.

Aussi le nom qui nous paraîtrait le mieux convenir pour cette seconde classe d'appareils serait-il celui de *chaudières à circulation*. Mais l'usage l'a restreint, par le fait, à l'une seulement des catégories que nous distinguerons dans cette classe, celle à laquelle nous consacrerons le second paragraphe du présent chapitre. Nous adopterons donc pour tout l'ensemble la dénomination de *chaudières tubulées*, qui est également acceptée dans l'usage.

Cette expression s'inspire de la transition que l'on peut concevoir entre ces nouveaux appareils et les chaudières tubulaires. Il suffit pour cela d'une simple interversion des rôles, qui place l'eau à l'intérieur des tubes et la flamme dans leurs intervalles. En un mot, les chaudières tubulaires nous présentent des *tubes de fumée*, et les chaudières tubulées des *tubes d'eau*.

La classe des chaudières tubulées se divisera pour nous en trois catégories, que nous rangerons méthodiquement suivant l'ordre de décroissance du volume d'eau, à égalité de puissance.

**1030** — Dans la première, nous comprendrons des générateurs que l'on désigne quelquefois sous le nom de genre Field, du nom de l'un de ses types les plus répandus. On trouve dans ces appareils, avec une disposition généralement rayonnante, une nombreuse série de petits appendices qui sont reliés à une masse liquide principale. Ils constituent autant de centres spéciaux de vaporisation. L'eau vient y puiser le calorique, et la partie qui ne s'est pas immédiatement gazéifiée rentre vivement dans la masse générale, pendant qu'une quantité équivalente vient prendre sa place. On réalise ainsi une rapide communication de la chaleur au liquide.

Le nom qui, à notre avis, exprimerait le mieux ce mode de fonctionnement, serait celui de *chaudières à petits bouilleurs*. Toutefois, désireux de ne pas introduire d'expressions nouvelles dans une matière qui en renferme déjà trop, nous conserverons, pour cette première catégorie, l'expression déjà reçue dans l'usage de *chaudières à circulation*, qui n'a d'autre défaut que de pouvoir au fond, ainsi que nous l'avons expliqué, convenir également aux autres appareils de cette classe.

**1031** — Dans une seconde catégorie, nous rangerons des types extrêmement nombreux : de Naeyer, Babcock et Wilcox, etc., qui présentent tous un certain nombre de traits communs spécifiques, à savoir : une disposition généralement parallélépipédique, un réservoir spécial d'eau assez limité mais cependant encore notable, deux colonnes-mères pour la descente et la remontée de ce liquide et de la vapeur, enfin un jeu de tubes d'eau parallèles entre eux et plus ou moins inclinés sur l'horizon, destinés à établir individuellement la communication entre les deux colonnes.

Le nom de *chaudières à jeu d'orgue* caractériserait bien ce faisceau. Mais, pour le motif déjà indiqué, nous n'introduirons pas de mot nouveau, et nous affecterons à cette seconde catégorie le nom de *chaudières multitubulaires*, qui est déjà usité (concurrentement avec ceux de *chaudières à petits éléments*, *chaudières à éléments multiples*, *générateurs inexplosibles*), bien qu'avec une extension plus grande que celle à laquelle nous le restreignons en ce moment.

**1032** — Une troisième catégorie comprend enfin les *chaudières à serpent*, dont la plus caractéristique est le type Belleville. Ici les tubes, au lieu de garder, comme dans les systèmes précédents, une individualité propre, concourent tous ensemble à une action unique. Ils sont en effet réunis bout à bout, et constituent un lit commun, que le courant doit parcourir d'un bout à l'autre.

Nous consacrerons à ces trois catégories les trois paragraphes suivants.

## § 2

### CHAUDIÈRES A CIRCULATION

**1033** — *Chaudière Field*. — L'un des types les plus répandus parmi les chaudières à circulation <sup>(1)</sup> est celui du générateur

<sup>(1)</sup> Robert Wilson. The circulation of water in steam boilers. *Scientific american supplement*, 12 avril 1890, p. 11 902. — *The Locomotive*, t. II, p. 1881. — *American Engineer*, 13 mai 1882, p. 217.

Chaudières à circulation : BORDONE. *Portefeuille économique des machines*, 5<sup>e</sup> série.



Field (<sup>1</sup>). Il est vertical et à foyer intérieur (fig. 623). Le ciel est consolidé par des étriers, et percé de trous légèrement coniques,

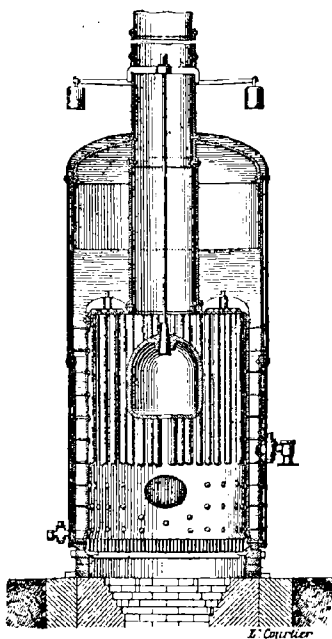


Fig. 623. — Chaudière Field.  
(Coupe verticale).

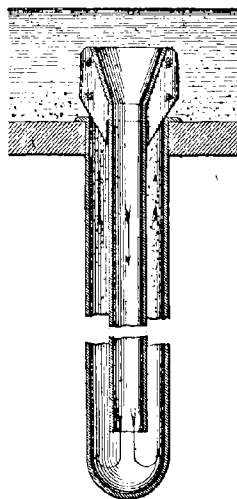


Fig. 624. — Tube Field.  
(Coupe verticale).

dans lesquels on mandrine des tubes d'une forme spéciale.

Ouverts par le bout, ils sont foncés à la partie inférieure comme

t. IX, p. 74. — BOUTIGNY. Jacquin. *Traité des machines à vapeur*, t. I, p. 114. — CHEVALIER. Péclét. *Traité de la chaleur*, t. II, p. 199. — DECKER. *Revue industrielle*, 18 août 1880, p. 321. — DULAC (*Revue industrielle*, 14 décembre 1889, p. 493. — *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 71). — HAUFF. *American Machinist*, 3 mars 1885, p. 3. — HERVIER. *Le Hérisson* (*Revue industrielle*, 23 mai 1885, p. 201. — *Génie civil*, 17 octobre 1885, p. 392. — Leperdrioux. *Bulletin technologique de la Société des anciens Elèves des Ecoles d'arts et métiers*, 1884. — *Echo des mines et de la métallurgie*, 20 juin 1886). — LEVET. *Revue industrielle*, 4 juin 1884, p. 221. — LEGAND. *Bulletin de l'Association scientifique de France*, 22 août 1875, p. 308. — MOUCNER. *Revue industrielle*, 1<sup>er</sup> octobre 1879, p. 383. — RICKENS. *Les Mondes*, t. XLI, p. 505; XLVII, 134. — ROGOUR. *Revue technique de l'Exposition de 1879*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 519. — SMITH. *Engineering*, 25 juillet 1879, p. 69. — STERLIK et METER. *Chronique industrielle*, 10 mars 1888, p. 125.

(<sup>1</sup>) *Portefeuille économique des machines*, 1886, pl. 55, 39, 46. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 624. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 108.

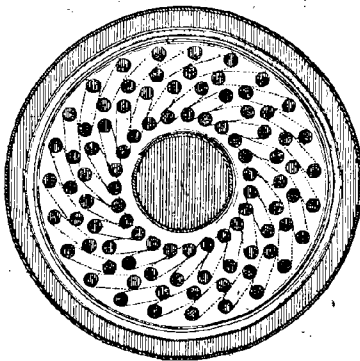
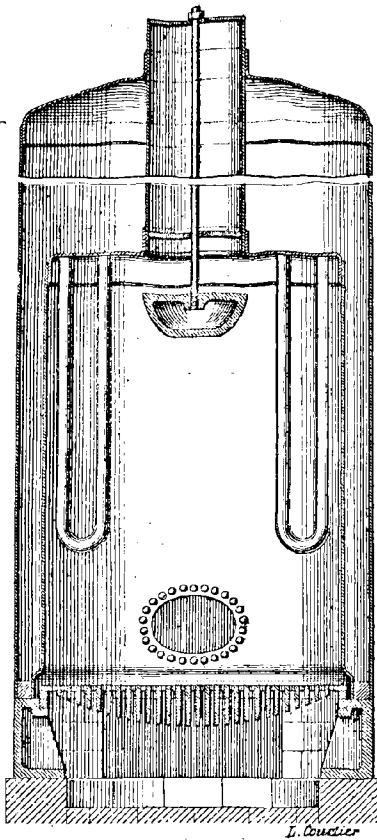


Fig. 625 et 626. — Chaudière Thirion.  
(Plan et élévation).

une éprouvette (fig. 624). A leur intérieur sont disposés d'autres tubes ouverts aux deux bouts. L'extrémité supérieure de ces derniers est évasée en forme d'entonnoir, et porte des ailettes qui les retiennent sur l'orifice des éprouvettes. L'eau la moins chaude descend à travers le tube intérieur, appelée par l'ascension de la couronne liquide qui se trouve comprise entre les deux parois; laquelle s'échauffe par le contact des flammes, devient moins dense, et ne saurait dès lors rester stagnante, en vertu du principe de l'équilibre des vases communicants. On crée ainsi un véritable thermo-siphon.

Ce dispositif laisse les dilatations absolument libres. En revanche l'appareil est, comme tous ceux de cette catégorie, assez impressionnable aux irrégularités de la combustion. En outre il n'est garanti contre l'obstruction par les dépôts, dans des passages aussi étroits, que par la rapidité du courant qui s'y établit. Les troubles ne peuvent s'y arrêter, et vont se déposer dans des régions

plus calmes, d'où on les retire à l'aide de purges périodiques. Mais pendant les arrêts la vitesse diminue, et l'on se trouve alors exposé à des engorgements, qui risquent de se calciner et d'entarter définitivement les organes.

**1034** — Dans la *chaudière Imbert* <sup>(1)</sup>, au lieu d'assembler les tubes aussi solidement que pour le type Field proprement dit, on les installe d'une manière moins rigide dans des logements coniques, sur lesquels la pression tend à les maintenir. Quelques coups de marteau en dessous suffisent à desserrer l'assemblage, au moment des nettoyages.

**1035** — *Chaudière Thirion*. — Le générateur Thirion <sup>(2)</sup>, très employé pour les pompes à incendie à vapeur, est analogue à celui de Field pour sa disposition d'ensemble; mais la forme de ses organes spéciaux de volatilisation est différente (fig. 625, 626).

Ils affectent la forme de tubes en U, dont les deux branches ont des diamètres légèrement différents. Le flux de chaleur étant proportionnel à la surface, c'est-à-dire au rayon, et la masse d'eau à échauffer variant en raison du volume, ou du carré de ce même rayon, la répartition du calorique dans le liquide ne s'opère pas également pour les deux parties; d'où résulte une tendance ascensionnelle.

**1036** — *Chaudière De Dion, Bouton et Trépardoux*. — Ce générateur vertical <sup>(3)</sup> est formé de trois enveloppes concentriques (fig. 627). Le bouilleur central et l'enceinte périphérique sont réunis par un faisceau de tubes rayonnants qui sont légèrement inclinés sur l'horizon, au lieu d'être verticaux comme dans les exemples précédents. Chacun d'eux se trouve placé au-dessus de l'intervalle de ceux qui lui sont subordonnés, afin de rompre l'ascension du courant gazeux et d'en déterminer le brassage. Le bouilleur central

<sup>(1)</sup> Mirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 625.

<sup>(2)</sup> Congrès de mécanique appliquée de 1889, t. III, p. 95.

<sup>(3)</sup> Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 109.

est cloisonné par une tôle horizontale, isolant à sa partie supérieure un compartiment où la vapeur se rend à travers les tubes les plus élevés, en se séchant dans la colonne des gaz chauds. Quatre auto-claves sont répartis sur le pourtour du tronçon inférieur, et

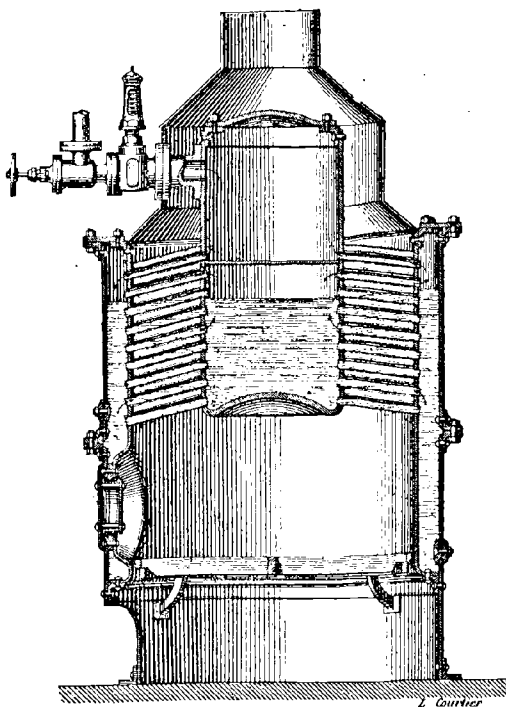


Fig. 627. — Chaudière De Dion, Bouton et Trépardoux.  
(Coupe verticale).

un cinquième sur le sommet. La disposition rayonnante, en encombrant la région centrale, détermine une tendance du gaz à circuler de préférence vers la circonférence; mais inversement le tirage le rappelle vers l'axe, et cet antagonisme produit une répartition plus égale. Les tubes sont courts, ce qui diminue l'importance des dilatations.

**1037** — *Circulateur Weyr*. — Le principe de la circulation intensive est utile non seulement

pour le fonctionnement normal, mais pour la phase même de *montée en pression*, qu'il y a lieu parfois de rendre exceptionnellement rapide, et que l'on a toujours intérêt, avec n'importe quel générateur, à ne pas se laisser se prolonger trop longtemps. On a introduit dans ce but divers appareils, parmi lesquels je me borne à une simple mention du *circulateur* ou *hydrokineter* de Weyr <sup>(1)</sup>.

<sup>(1)</sup> Circulateurs : WEYR (*Portefeuille économique des machines*, 5<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 78. — *Chronique industrielle*, 2 juin 1889, p. 256). — W. CHATEL (*Revue industrielle*).

On désigne sous ce nom un jeu d'ajutages successifs (n° 4119), entre lesquels l'eau se trouve appelée dans l'axe commun par l'injection de vapeur provenant d'un petit générateur, qui sert à mettre en train les grandes chaudières d'un steamer, par exemple. L'appareil est disposé tangentiellement à la direction dans laquelle on désire amorcer le courant circulatoire, et détermine progressivement un mouvement très actif.

### § 3

#### CHAUDIÈRES MULTITUBULAIRES

**1038** — *Généralités.* — Nous avons déjà esquissé (n° 1031) les lignes principales qui caractérisent ces appareils (1). Malgré l'épithète d'incapable, aujourd'hui consacrée par l'usage (2), ils sont

5 novembre 1885, p. 449. — DALGLISH. *The Steamship*, 1<sup>er</sup> juillet 1889, p. 23. — THOMPSON. *Ibidem*, 1<sup>er</sup> août 1889, p. 53.

(1) Oiry. Les chaudières à petits éléments. Rapport au Congrès international de mécanique appliquée de 1889. *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> série, t. I. — Demoulin. Application des multitubulaires à la marine. *Génie civil*, 11 janvier 1890, p. 255. — Dupont. Chaudières de torpilleurs. *Mémorial du Génie maritime*, 1885, 4<sup>e</sup> livraison. — Thurston. On a trial of a water tube boiler. *Scientific American, supplement*, 14 avril 1888, p. 10254.

(2) Chaudières incapables : ALMY. *American Machinist*, 17 décembre 1891, p. 1 — ARCHAMBAULT. *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 261. — BARLOW. Thurston. *Histoire de la machine à vapeur*. Traduction Hirsch, t. II, p. 35. — BÈDE. *Portefeuille économique des machines*, 1881, pl. 11. — BÛTNER (*Revue industrielle*, 1880, p. 441. — *Engineering*, 8 juillet 1881, p. 27). — CADAT (Rapport de M. Brull. *Bulletin de la Société d'encouragement*, décembre 1887, p. 754. — Armengaud. *Publication industrielle*, t. XXVI. — *Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. X, p. 158). — CALDWELL. *American Machinist*, 2 avril 1891, p. 4. — CARVILLE (Rapport de Tresca. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 14 février 1868. — *Portefeuille économique des machines*, 1868, pl. 5). — CHARLES et BABILOT. *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 242. — CHASE. *American Machinist*, 28 août 1890, p. 5. — CESTUS. *Revue industrielle*, 3 mars 1887, p. 85. — CLAPP. *American Machinist*, 7 mai 1887, p. 1. — CLARKE et SAVAGE. *Scientific American*, 18 mai 1889, p. 506. — COLLET (*Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 190. — *Journal de la meunerie*, décembre 1890, p. 92. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 99) (fig. 634). — CONEY. *Scientific American*, 20 septembre 1890, p. 178. — DUFOUR. *Les Mondes*, t. XXXVII, p. 704. — DUNN. *Portefeuille économique des machines*, 1863, pl. 29 et 50. — DURENNE. *Ibidem*, p. 285. — DURR. *Engineering*, 29 mai 1891, p. 640. — EVERING et JENKS. *Revue industrielle*, 20 octobre 1880, p. 413. — FITCH. Thurston. *Histoire de la machine à vapeur*. Traduction Hirsch, t. II, p. 19. — FONTAINE. *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 153. — GENTRY. *Scientific Ame-*

incontestablement, comme tous les autres, susceptibles de donner

rican, 11 février 1888, p. 89. — GLOBE. *American Machinist*, 19 décembre 1880, p. 7. — GORRING et LECNKS. *Engineering*, 29 mai 1891, p. 640. — GRIFFITH. *The Engineer*, 1874, p. 150. — GRIMALDI. *Portefeuille économique des machines*, 1863, pl. 29 et 30. — HALL. *Revue industrielle*, 6 février 1884, p. 59. — HANREZ. Thibaut (*Note sur le générateur tubulaire de Prosper Hanrez*, in-8°. — Tabon. Note sur le générateur multitubulaire Hanrez. *Bulletin de la Société industrielle de l'Est*, 1891). — HEINE. *Revue industrielle*, 4 juin 1879, p. 212. — HERMANN (*Engineering*, 29 mai 1891, p. 840. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 94). — HERRESHOF (*Les Mondes*, t. XLVIII, p. 602. — *L'Aéronaute*, avril 1879, p. 95. — *Engineering*, 7 février, 11 avril 1879. — *The railroad and engineering Journal*, août 1890, p. 346). — HERVIER. *Annales industrielles*, 1883, t. II, p. 569. — HOWARD (Laurent et Dunkel. *Traité des chaudières à vapeur*, p. 124. — Chabaud. *Bulletin de la Société de l'industrie minérale de Saint-Etienne*, 2<sup>e</sup> série, t. III, p. 121. — *Engineering*, 1874, p. 73). — JARROW. *Ibidem*, 16 janvier 1891, p. 81. — ISHERWOOD. *Journal of Franklin Institute*, 7 janvier 1879, p. 12. — JOLY. *Jacquin. Traité des machines à vapeur*, t. I, p. 412. — KELLOG. *American Machinist*, 12 mars 1887. — KINGSLEY. *Ibidem*, 10 novembre 1888, p. 4. — KREBS et DURASSE. Rapport Brull. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1892. — LACROIX. *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 249. — LAGASSE et BOUCHE (*Ibidem*, p. 120. — *Revue industrielle*, 14 janvier 1888, p. 15. — *Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. XIII, p. 98. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 95). — LAGRAPEL et D'ALLEST. *Congrès de mécanique appliquée de 1889*, t. III, p. 121. — LARMANJAT. *Jacquin. Traité des machines à vapeur*, t. I, p. 111. — MELVIN. *American Machinist*, 26 mars 1881, p. 4. — MONTUPET. *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 256. — MOORE. *American Machinist*, 19 décembre 1885, p. 1. — MORRIS. *Ibidem*, 28 mars 1889, p. 4. — NATU. *Revue industrielle*, 4 février 1886, p. 55. — ORIOLE (*Ibidem*, 28 avril 1888, p. 161. — *Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. XIII, p. 150. — *Annales industrielles*, 1885, p. 578. — *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 184. — *Association française pour l'avancement des sciences*, Congrès de Paris, 1878, p. 277. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 105). — PIEDREUF. *Revue industrielle*, 1880, p. 441. — POOLE et HUNT. *American Machinist*, 5 janvier 1884, p. 3. — PRÉGARDIEN (*Revue industrielle*, 10 novembre 1880, p. 443. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, novembre 1885, p. 575. — *Dingler's polytechnisches journal*, t. CCLIV, p. 415). — PRESSARD (*Revue industrielle*, 20 juillet 1889, p. 281. — *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 200). — READ. Thurston. *Histoire de la machine à vapeur*. Traduction Hirsch, t. II, p. 24. — ROOT (*Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 165. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 85. — *Engineering*, 24 octobre 1890, p. 484. — *American Machinist*, 2 février 1884; 1<sup>er</sup> et 15 mars 1886. — *Scientific American*, 20 novembre 1886, p. 322) (fig. 631). — ROWAN. *Génie civil*, t. XIX, p. 424. — SCHUTTE et GAEBRING. *American Machinist*, 4 mars 1882, p. 5. — SIMONS et LANG. *Engineering*, 29 mai 1891, p. 640. — SINCLAIR (*Portefeuille économique des machines*, 1879, pl. 5. — *Iron*, 26 avril 1879, p. 517). — SOLWAY et HANREZ. *Revue industrielle*, 27 octobre 1880, p. 425. — STEINMÜLLER (*Revue industrielle*, 10 novembre 1880, p. 441. — *Engineering*, 24 juin 1881, p. 644; 29 mai 1891, p. 640; 5 juin 1891, p. 672). — STEVENS. Thurston. *Histoire de la machine à vapeur*. Traduction Hirsch, t. II, p. 42. — TAYLOR. *American Machinist*, 25 janvier 1890, p. 7. — TWAITE. *Revue industrielle*, 15 avril 1889, p. 145. — WAKE et PASSMANN. *Chronique industrielle*, 20 janvier 1889, p. 39. — WALTHER. *Engineering*, 24 juin 1881, p. 644. — WARD (*American Machinist*, 27 août 1881, p. 4. — *Engineering*, 5 avril 1889). — WATSON. *Les Mondes*, t. XXII, p. 355. — WILMANN. *Chronique industrielle*, 6 mai 1888, p. 222. — *Engineering*, 29 mai 1891, p. 640).

lieu à des incidents et de subir des avaries ; mais il est juste d'ajouter que les conséquences en demeurent toujours limitées, et que les grands désastres sont écartés par leur emploi (n° 1157). Il n'y a ordinairement à enregistrer que des ruptures de tubes, et l'on évite en grande partie les torrents d'eau bouillante et de vapeur qui brûlent mortellement les chauffeurs, ainsi que les paniques qui peuvent devenir à elles seules un grand péril dans les locaux où des foules se trouvent réunies.

Cette qualité n'acquiert cependant toute sa valeur que pour le type à serpentín, d'où disparaît définitivement tout réservoir spécial. Dans les chaudières composites qui nous occupent en ce moment, le réservoir d'eau existe encore, bien qu'ayant déchu progressivement d'importance par rapport aux catégories du chapitre précédent. Il fournit encore ici un niveau liquide bien déterminé. Il sert à précipiter, à l'abri de la calcination, la majeure partie des dépôts par l'action de la température (n° 1137). Il fait volant de chaleur pour combattre la grande instabilité du régime. Mais comme contre-poids à ces avantages, il représente encore un élément de danger. Tout au moins doit-il, pour ce motif, être soustrait à l'attaque directe des flammes, contrairement à ce que l'on a cru pouvoir risquer dans certains types particuliers.

En vue de diminuer encore le péril, on a introduit la *forme sectionnelle*. Elle permet de constituer un ensemble d'une puissance notable par la juxtaposition de petites chaudières distinctes. On espère pouvoir ainsi limiter les suites d'un accident à celui de ces éléments qui aurait périclité ; ce qui n'est vrai cependant que dans une certaine mesure, en raison de leur corrélation commune avec le collecteur général.

**1039** — La circulation intensive indispensable à ces appareils résulte des soins que l'on donne tout à la fois au mouvement des gaz chauds à l'extérieur des tubes, et à ceux que prennent les fluides dans leur intérieur. Examinons-les successivement.

En ce qui concerne ce dernier point, l'on doit rechercher la netteté des effets à produire, et s'attacher à éviter tout antagonisme entre les tendances spontanées de l'eau et de la vapeur.

Une inclinaison notable des tubes aide au dégagement de celle-ci. Son ascension avec l'eau, qu'elle rend mousseuse, s'effectue à travers celle des deux colonnes sur laquelle s'embranchent les parties supérieures des tubes. L'autre est destinée à la descente du liquide du réservoir.

Ordinairement les colonnes sont formées d'enveloppes métalliques distinctes, sur lesquelles viennent s'assembler les tubes, individuellement ou par couples. D'autres fois ces conduits résultent seulement de la superposition des boîtes de communication. Trop souvent l'on emploie encore la fonte pour les parties compliquées de cet ensemble (1). On doit applaudir aux efforts qui sont faits par l'industrie en vue d'éliminer ce métal, malgré les difficultés d'exécution.

**1040** — Quant aux gaz chauds, on en facilite le brassage en croisant les tubes en quinconce et en les déjetant successivement, au lieu de les disposer dans des plans verticaux entre lesquels les flammes s'élèvent trop facilement. On resserre les intervalles pour multiplier les contacts de la masse fluide et du métal. Afin de favoriser le mélange, on adopte quelquefois pour les tubes des inclinaisons opposées.

**1041** — Les avantages que l'on revendique en faveur des chaudières à petits éléments sont nombreux et importants.

En première ligne, il faut rappeler l'accroissement de la sécurité, sur lequel nous avons déjà insisté. On en peut rapprocher, comme conséquence, certaines facilités administratives dont bénéficient ces générateurs.

Le transport est lui-même beaucoup facilité. Ces appareils sont en effet décomposables, à l'inverse des corps cylindriques qui sont essentiellement indivisibles. Sans parler des contrées où les moyens de transports sont restés plus ou moins primitifs, et dans lesquelles on ne pourrait même pas concevoir la pensée de faire voyager des

(1) La chaudière Harrison est entièrement constituée par des files de boules creuses en fonte (Thurston. *Histoire de la machine à vapeur*, traduction Hirsch, t. II, p. 125. — Jacqmin. *Traité des machines à vapeur*, t. I, p. 111).



objets tels que ces grands corps cylindriques, les voies de communication ordinaires ne possèdent pas dans tous les ports, dans toutes les gares, les engins nécessaires pour le chargement et le déchargement de telles pièces.

La diminution de l'emplacement est notable. Au lieu d'être étalée sur un grand espace, comme avec les corps cylindriques, la surface de chauffe se trouve ramassée dans un volume restreint. Or le terrain coûte cher dans les centres industriels, quand on veut créer un établissement. S'il s'agit d'une usine déjà formée, l'encombrement y est ordinairement très grand, et ne permet pas aisément l'installation de volumineux appareils. Dans le cas contraire, on sera toujours heureux de pouvoir faire bénéficier d'autres services de l'économie qui aura été ainsi réalisée sur celui de la production de la vapeur.

Les maçonneries sont supprimées, et avec elles les rentrées d'air, les fuites de gaz, les pertes sur la chaleur emmagasinée, la gêne que ces massifs apportent aux visites, les corrosions dont leur contact devient souvent le siège, l'obligation de les réparer, de les démolir périodiquement et de les reconstruire.

L'économie de poids est notable. A terre, elle simplifie les fondations ; dans la marine, elle est d'une importance décisive.

Si l'on compare en particulier les inexplosibles aux chaudières tubulaires, on y retrouve, encore plus accusées, une partie des propriétés de ces dernières. Toutefois le tirage est meilleur, les sections étant plus larges.

La montée en pression est rapide. L'activité de la circulation tend à uniformiser la température et les dilatations. La solidité relative des petits éléments favorise l'emploi des hautes pressions, qui est par lui-même avantageux (\*). Les anciens types ne peuvent lutter sur ce terrain qu'au prix d'une augmentation des épaisseurs et du poids, et en aggravant encore les conséquences des explosions. Déjà réduites ici par la diminution du volume de l'eau, elles le sont encore par cette circonstance que l'évacuation devient plus progressive, en raison des circuits que les fluides ont à parcourir pour se rendre à l'ouverture d'échappement.

(\*) Voy. t. I, p. 816.

La température finale des gaz s'abaisse plus facilement. Au lieu du chiffre de 300 degrés, qui est ordinaire avec les anciens types, on arrive à 200, et l'on peut même approcher de 100 en soignant le chauffage de l'eau d'alimentation par les gaz.

**1042** — En compensation de tels avantages, on ne saurait passer sous silence quelques inconvénients.

L'atténuation de la gravité des accidents ne s'étend pas à leur fréquence. Il semble, d'après la statistique, que la différence soit plutôt en sens contraire ; ce qui s'explique très naturellement par la complication même des nouveaux appareils. Cette situation ne pourra d'ailleurs que s'améliorer progressivement avec une plus longue expérience des constructeurs et des conducteurs.

La grande diminution du volume d'eau et la suppression des maçonneries entraînent comme conséquence une notable instabilité de régime ; ce qui exige l'emploi de chauffeurs particulièrement soigneux et expérimentés, ainsi qu'une surveillance très active. L'abaissement du niveau est rapide en cas de négligence. On est plus exposé aux coups de feu. Le primage est sensible. L'entartement est à redouter pour d'aussi faibles diamètres. La fréquence des nettoyages devient plus nécessaire encore qu'avec les anciens types.

**1043** — *Chaudière de Naeyer*. — La chaudière de Naeyer <sup>(1)</sup> comprend (fig. 628, 629, 630) : 1° une grille de 2 mètres environ de largeur, légèrement inclinée vers l'arrière, et comprise entre des parois en maçonnerie percées de portes pour le nettoyage ; 2° un réservoir supérieur d'eau et de vapeur, dans lequel se trouve le niveau liquide bien déterminé qui est indiqué au dehors par le tube de cristal (n° 1202) ; 3° un faisceau tubulé incliné de 0 m. 20 par mètre de l'avant vers l'arrière, et sectionné en séries verticales distinctes et juxtaposées.

<sup>(1)</sup> *Revue industrielle*, 1881, p. 433. — *Revue technique de l'Exposition universelle de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 98. — Armengaud. *Publication industrielle*, 52<sup>e</sup> volume, p. 169. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 618. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 88. — Vinçotte. *Journal of Franklin Institute*, décembre 1880, p. 361.

Ces diverses sections reposent par leur angle inférieur sur un caisson creux en fonte ou en acier, destiné à répartir entre elles l'eau d'alimentation. Un caisson semblable, opposé en diagonale au premier, réunit les têtes supérieures de ces mêmes séries, et joue le rôle de collecteur de vapeur. Deux cols-de-cygne, situés de part et d'autre du réservoir supérieur, y déversent cette vapeur au-dessus du plan d'eau. A l'extrémité opposée, dans la région inférieure

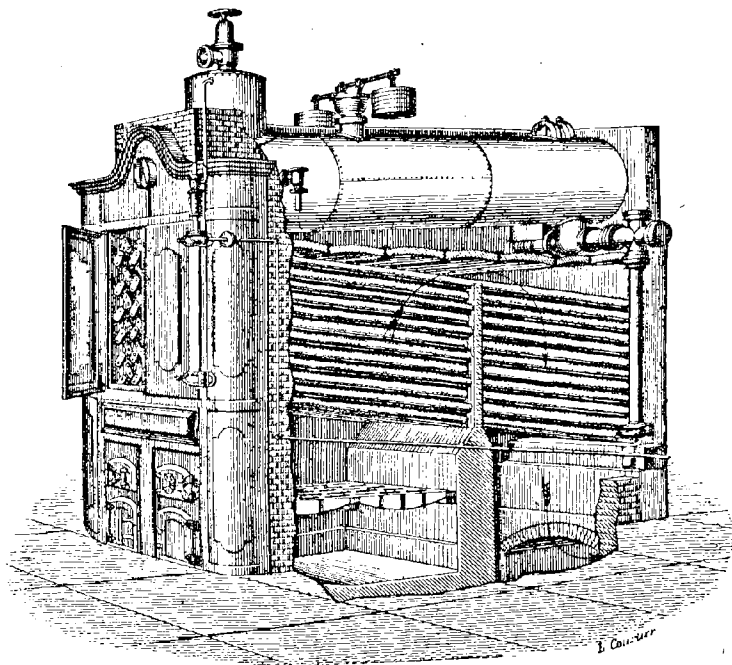


Fig. 628. — Chaudière de Naeyer (vue perspective).

du réservoir, deux tuyaux établissent de la même manière la communication entre le liquide qui s'y trouve et le caisson inférieur, de manière à compléter le circuit.

Chaque série est elle-même composée d'éléments superposés, et un peu déjetés alternativement de part et d'autre. Cette disposition en quinconce est destinée, concurremment avec un système de chicanes, à mieux brasser les flammes. Chaque élément est formé de deux tubes compris dans un même plan incliné. Ils communi-

quent ensemble à leurs extrémités, au moyen de boîtes horizontales de forme rectangulaire. D'un élément au suivant, la relation se trouve établie par des pièces de raccord comprises dans les plans de façade, et alternativement inclinées d'un côté et de l'autre, à cause de la disposition en quinconce (fig. 629). Chaque élément se trouve ainsi relié à la fois aux deux autres qui lui sont immédiatement contigus, l'un inférieur, l'autre supérieur.

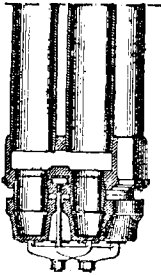
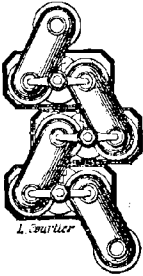


Fig. 629 et 630.  
Chaudière de Naeyer.  
(Détail des boîtes).

Les tubes ont un diamètre maximum de 120 millimètres, et une épaisseur de 5. Leur longueur varie de 3 à 5 mètres. On les essaye à la pression hydraulique de 40 kilogrammes. Ils sont matés à froid sur les boîtes horizontales. En face de chacun d'eux se trouve pratiquée dans la paroi de cette boîte une ouverture, dans laquelle on enfonce à force une bague à double cône. Sur cette dernière s'applique la pièce de raccord oblique. L'assemblage est maintenu au moyen d'un étrier serré par un écrou. Ce système est bien étanche quand les boulons sont suffisamment serrés contre les arcades; et en même temps il est facile à démonter pour les nettoyages. Il est préservé contre l'action des flammes par la superposition des boîtes, qui forment écran. Chaque pièce de réunion est ainsi maintenue par deux arcades. En outre, en cas de projection, elle serait arrêtée par les portes métalliques.

**1044** — L'alimentation s'effectue dans le réservoir supérieur. Le liquide commence par le traverser suivant sa longueur, à travers un tuyau plongé dans l'eau chaude. Il opère son déversement devant le débouché de la vapeur, et se trouve ainsi saisi dès son entrée par la température. Cette influence a pour résultat de précipiter une grande partie des sels calcaires à l'état de boues qui se réunissent dans une poche spéciale, vidée de temps en temps à l'aide d'un purgeur.

L'eau, ainsi purifiée en partie, gagne par les deux grands tuyaux

d'arrière, les extrémités de collecteurs inférieurs, destinés à la répartir entre les diverses séries sectionnelles. Dans chacune de ces dernières, le fluide s'élève à travers les pièces obliques de communication jusqu'aux divers éléments tubulaires qui composent cette série. La particule que nous suivons par la pensée s'engage ainsi dans l'un de ces éléments vaporisateurs, et regagne, à travers la

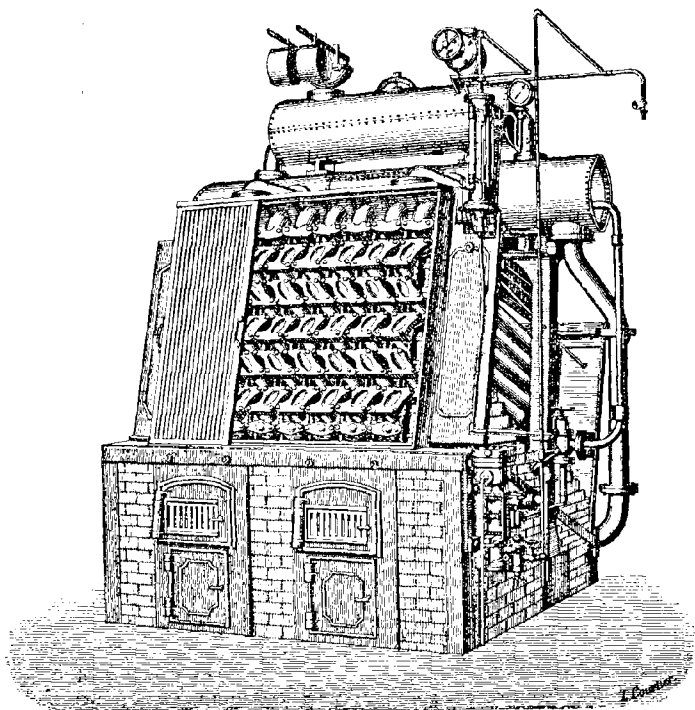


Fig. 651 — Chaudière Root (vue perspective).

seconde colonne en zigzag, le réservoir supérieur. Elle parcourt en définitive un trajet qui garde à peu près la même longueur, quel que soit l'élément traversé.

La sortie de la vapeur au milieu du déversement de l'eau d'alimentation contribue à la charger d'humidité. La prise de vapeur s'effectue à l'aide d'un dôme qui surmonte le récipient supérieur. Ce fluide se sèche ensuite dans des tubes réchauffeurs au milieu

du gaz chaud, avant de pénétrer dans la conduite générale de l'usine.

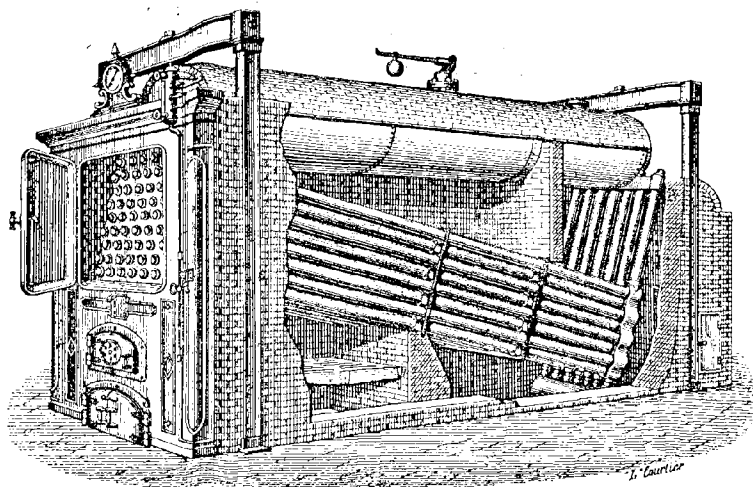


Fig. 632. — Chaudière Babcock et Wilcox (vue perspective).

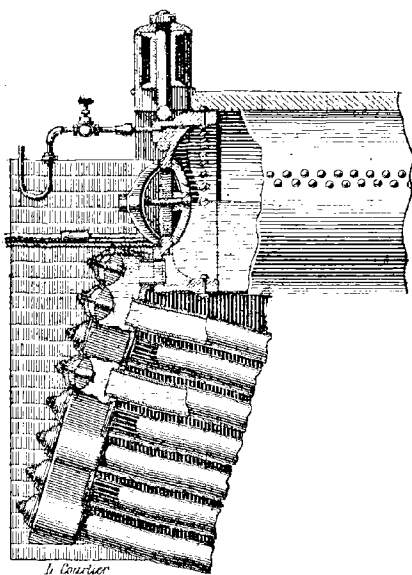


Fig. 633. — Chaudière Babcock et Wilcox (détail des assemblages).

**1045** — *Chaudière Babcock et Wilcox.* — Le générateur Bab-

cock et Wilcox <sup>(1)</sup> comprend (fig. 632, 633) : 1° une grille penchée légèrement vers l'arrière ; 2° un faisceau tubulé très incliné dans le même sens ; 3° suivant l'arête inférieure de ce dernier, un collecteur pour les boues précipitées par l'impression de la chaleur dans les eaux d'alimentation ; 4° tangentiellement à son arête supérieure, un volumineux récipient d'eau et de vapeur ; 5° au-dessus de ce

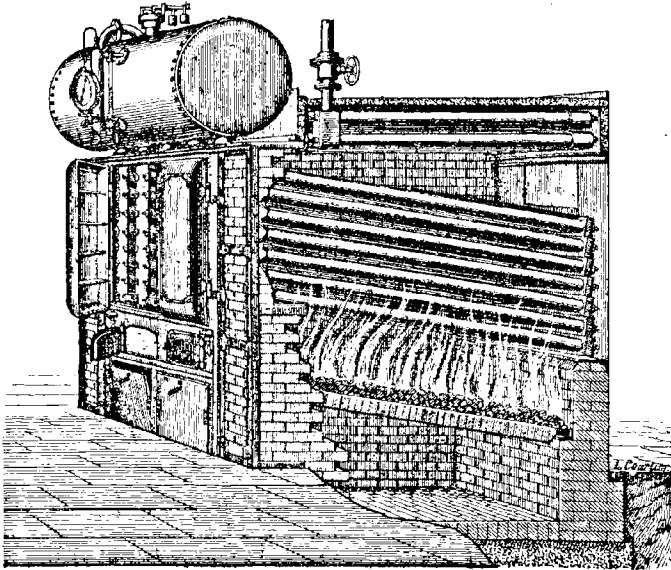


Fig. 634. — Chaudière Collet (vue perspective).

dernier enfin, un sécheur de vapeur. L'ensemble est supporté par deux tréteaux en fer, et reste indépendant des maçonneries.

Le faisceau est sectionnel, et composé de séries verticales distinctes et juxtaposées. Chacune de ces dernières est formée de tubes parallèles que réunissent deux caisses perpendiculaires en leurs extrémités. Celle d'arrière leur amène l'eau d'un collecteur trans-

<sup>(1)</sup> *Génie civil*, 27 juin 1891, p. 144. — *Revue industrielle*, 1881, p. 453 ; 1883, 121. — Armengaud. *Publication industrielle*, 1888. — *Revue technique de l'Exposition de 1888*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 154. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 95 — Hirsch et Hehize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 621. — *Engineering*, 1<sup>er</sup> mars 1885, p. 478 ; 2<sup>e</sup> mai 1891, p. 616.

versal, qui la reçoit lui-même du réservoir supérieur. Celle d'avant recueille la vapeur dégagée de chaque tube, et la conduit à un collecteur semblable qui la rend à ce réservoir. Ces deux caisses présentent une forme sinueuse, afin de permettre, pour les tubes qui s'y trouvent implantés, la disposition en quinconce. Les tubes y sont dudgeonnés dans des trous soigneusement alésés. La paroi opposée de chaque caisse est de même percée de trous situés en regard des premiers. On les ferme à l'aide d'obturateurs autoclaves placés au dehors de la caisse, à l'abri des flammes.

L'alimentation se fait dans le réservoir d'eau et de vapeur, comme pour le type précédent, et la circulation de l'eau s'opère d'une manière analogue. Quant à celle des flammes, on la prolonge en séparant en plusieurs groupes distincts, à l'aide de murettes, l'ensemble des séries qui composent le faisceau. Les gaz sont obligés par ces chicanes de monter et de descendre alternativement.

**1046** — *Chaudières diverses.* — Les tubes et leur mode de groupement se compliquent plus ou moins dans certains types, dont nous esquisserons encore quelques exemples.

Les tubes d'eau de la *chaudière Roser* (1) sont traversés dans toute leur longueur par des tubes de fumée ouverts aux deux bouts (fig. 655, 656), et jouant, par rapport à eux, le même rôle que le foyer intérieur pour les générateurs de Cornouailles.

L'alimentation se fait dans un réservoir supérieur. L'eau descend directement à un collecteur-déjecteur placé en contrebas, remonte par la colonne d'arrière, s'engage dans les tubes annulaires, et s'élève avec la vapeur à travers la colonne antérieure jusqu'au réservoir qui lui a servi de point de départ. La vapeur passe ensuite dans un sécheur.

Quant aux gaz, ils s'élèvent au-dessus de la grille entre les séries de tubes vaporisateurs, redescendent dans un compartiment postérieur pour s'engager dans les tuyaux intérieurs. Revenus à la partie antérieure de l'appareil, ils montent jusqu'au réservoir, et arrivent enfin à la cheminée.

(1) *Chronique industrielle*, 18 avril 1886, p. 189. — *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 111. — *Ser. Physique industrielle*, t. II, p. 98.



1047 — Dans le *générateur Bourgois et Lencauchez* <sup>(4)</sup>, les deux

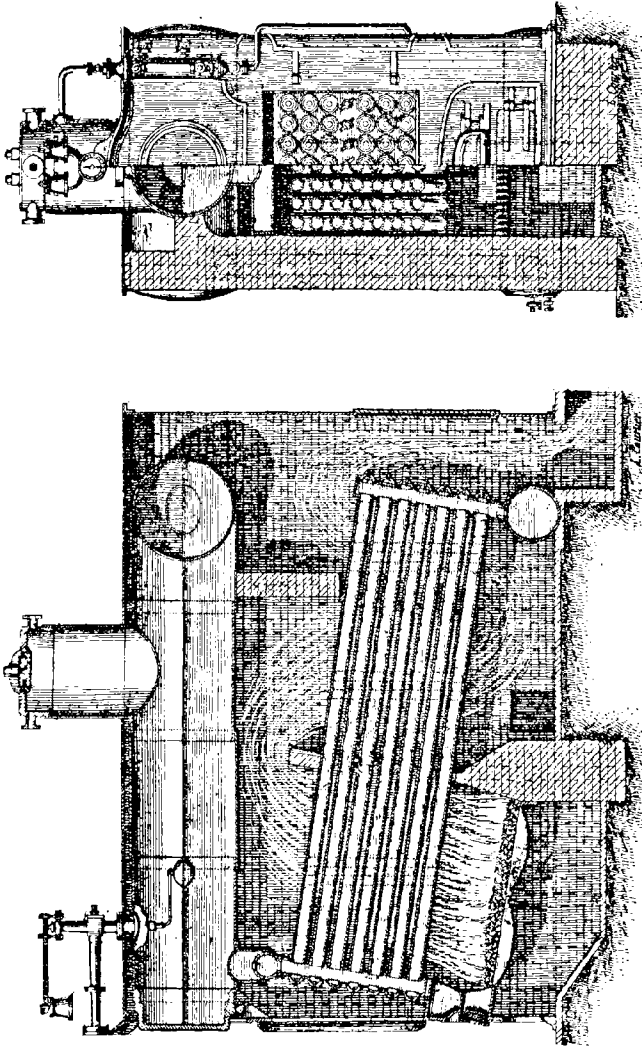


Fig 635 et 636. — Chaudière Roser (coupes longitudinale et transversale).

tubes qui composent un même élément présentent des inclinaisons

<sup>(4)</sup> *Revue industrielle*, 12 avril 1890, p. 144. — *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 288. — *La Métallurgie*, 1890, p. 1773. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 95. — *Portefeuille économique des machines*, 1877, pl. 4.

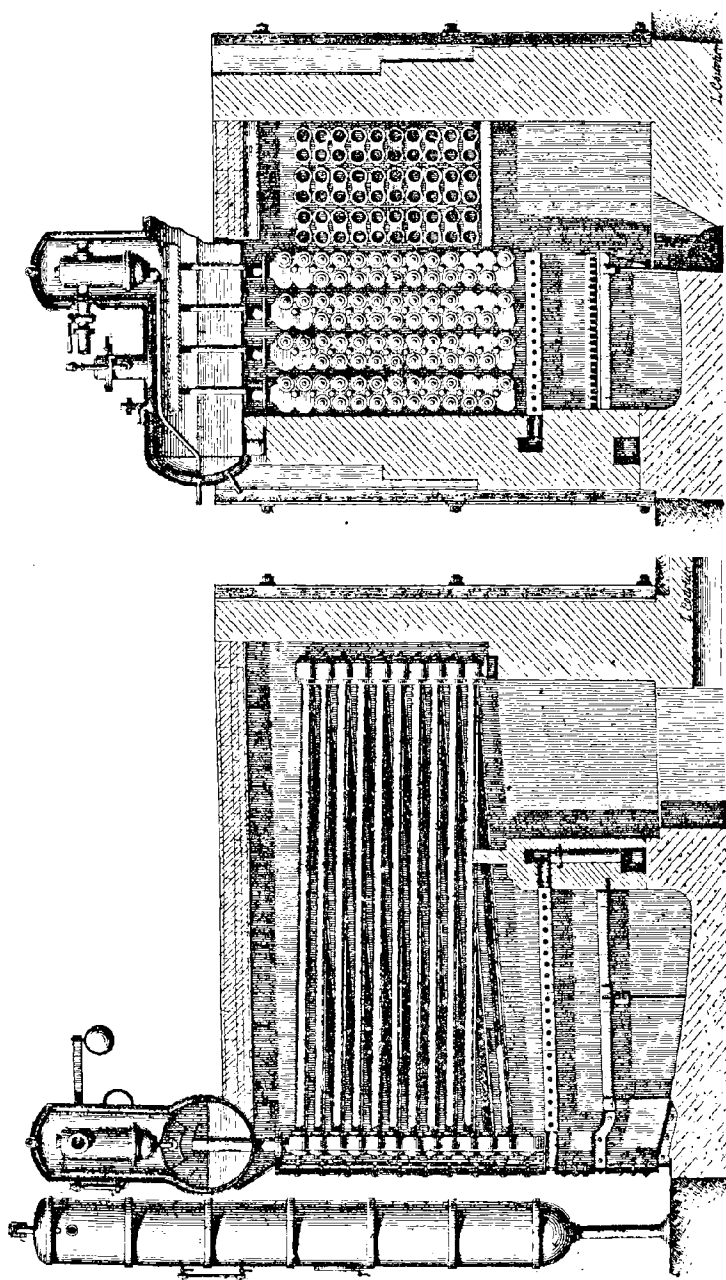


Fig. 457 et 638. Chaudière Bourgeois et Lencauliez (coupes longitudinale et transversale).

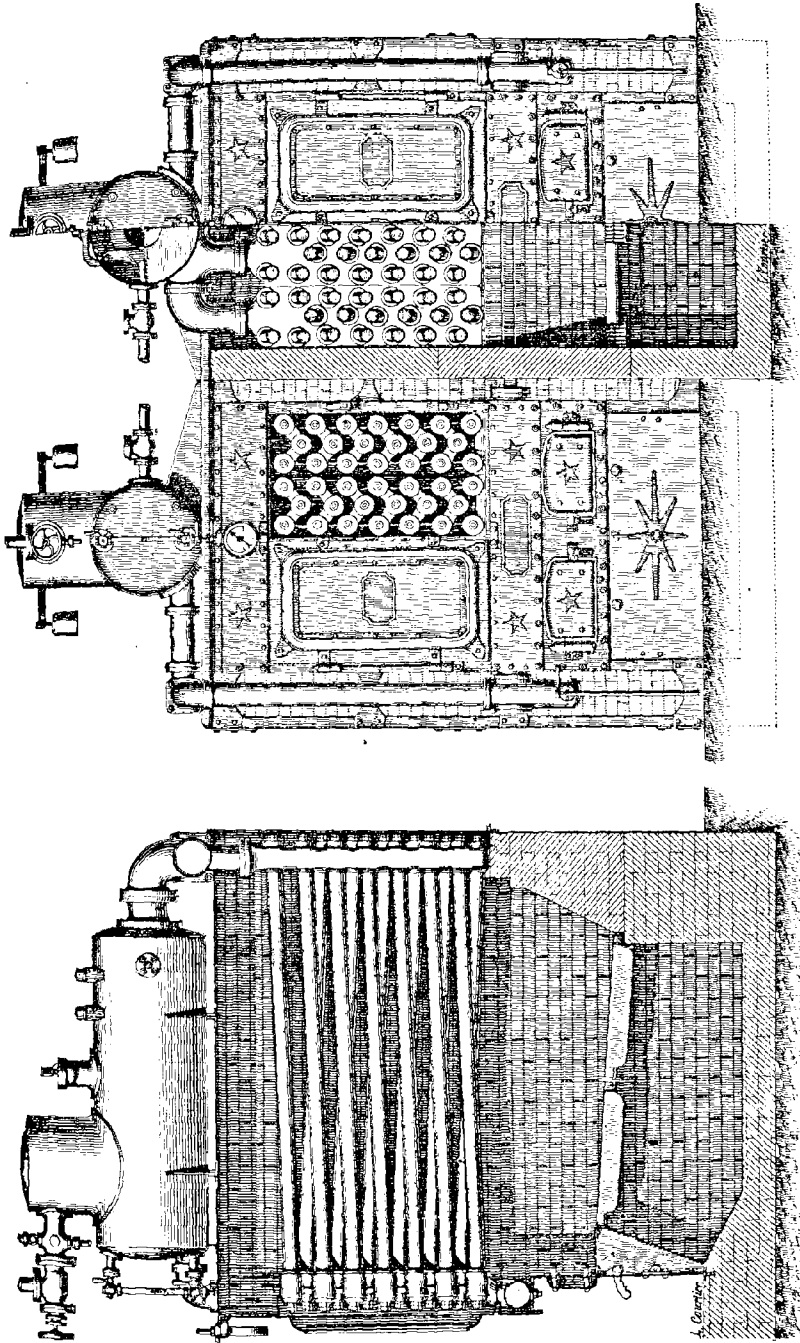


Fig. 639, 640, 641. — Chaudière Terme et Debarbe (élevations latérale et antérieure, coupé transversal).

opposées (fig. 637, 638). Ils sont réunis par une boîte de communication à leur extrémité libre. Chacun des éléments fourchus d'une même série aboutit à un barillet cloisonné en deux compartiments suivant un plan vertical. L'eau descend par une travée,

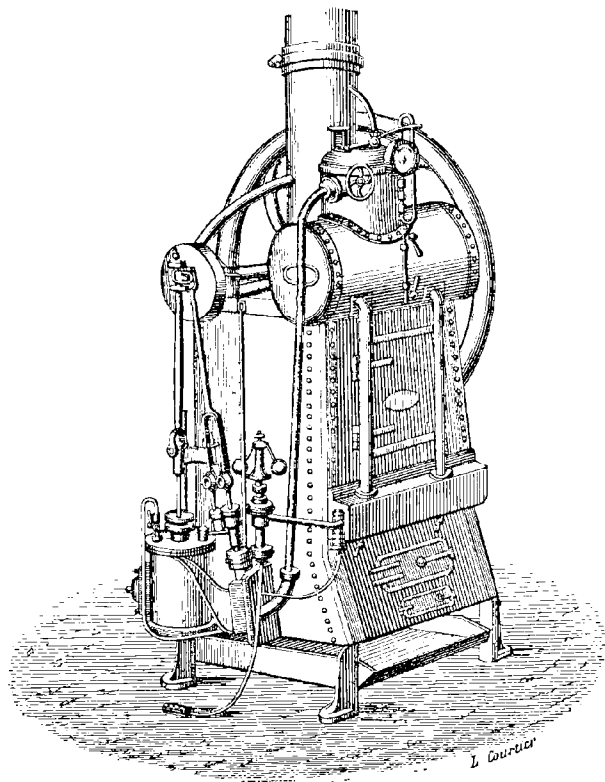


Fig. 642. — Chaudière Du Temple (vue perspective).

la vapeur remonte par l'autre. Ces barillets sont fermés par le bas et suspendus au réservoir.

**1048** — Dans la *chaudière Terme et Deharbe* <sup>(1)</sup>, le dégagement

<sup>(1)</sup> *Revue industrielle*, 23 mars 1889, p. 113. — *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 217. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 4<sup>e</sup> série, t. III, p. 161. — *Ser. Physique industrielle*, t. II, p. 104.

n'a également lieu que d'un seul côté (fig. 639, 640, 641). Les tubes se répartissent en groupes de trois, dont deux sont inclinés dans un sens, et le troisième en sens contraire. A l'extrémité libre, on les relie entre eux à l'aide de boîtes superposées. De l'autre côté, ils débouchent dans un collecteur vertical.

**1049** — La *chaudière Maniquet* <sup>(1)</sup> présente pour les gaz deux

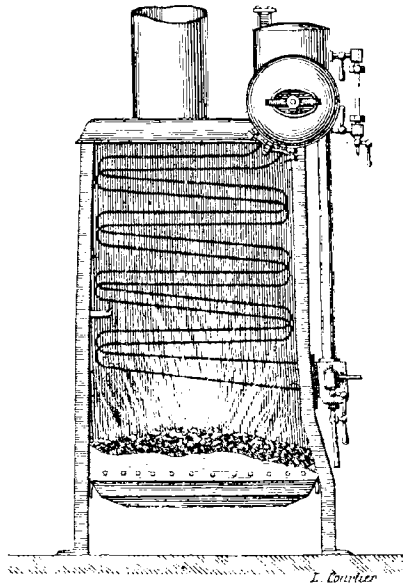


Fig. 643. — Chaudière Du Temple (coupe verticale).

parcours, séparés par une cloison. L'une des travées comprend de gros tubes d'eau, dont chacun se partage en quatre autres plus petits en passant dans la seconde partie. On arrive ainsi à mieux compléter le refroidissement des gaz.

**1050** — Avec la *chaudière Du Temple* <sup>(2)</sup>, ainsi que dans celle

<sup>(1)</sup> *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, mars 1888, p. 422.

<sup>(2)</sup> *Génie civil*, t. II, p. 1405. — *Le Constructeur*, 22 juillet 1888. — *La Nature*, 16 septembre 1882, p. 244. — *Moniteur industriel*, 23 août 1888, p. 205. — Bienaymé, *Traité des machines marines*, p. 441. — *Ser. Physique industrielle*, t. II, p. 81.

de *Thornycroft* <sup>(1)</sup> qui en est dérivée, les tubes deviennent sinueux (fig. 642, 643, 644). La surface de chauffe est formée d'un assez grand nombre d'éléments, composés chacun de deux canaux d'acier de 13 millimètres, disposés en courbe serpentine, et symétriques l'un de l'autre. Ils font communiquer un réservoir supérieur avec

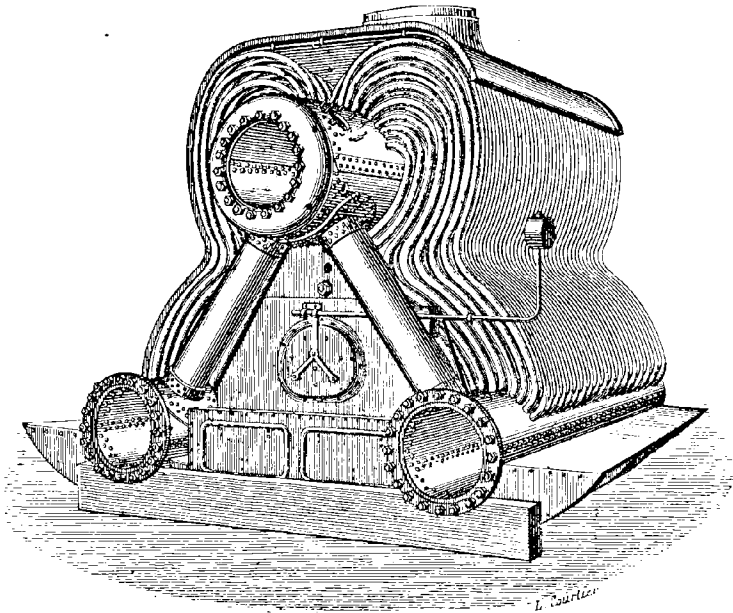


Fig. 644. — Chaudière Thornycroft (vue perspective).

deux distributeurs d'eau d'alimentation placés en contre-bas, et reliés d'autre part directement à ce réservoir par deux tuyaux de retour, de manière à compléter le circuit. La prise de vapeur se fait dans un dôme qui surmonte le réservoir. L'enveloppe métallique du générateur est garnie à l'intérieur d'un revêtement en briques réfractaires.

(1) *Génie civil*, t. XV, p. 238. — *Revue industrielle*, 3 novembre 1888, p. 454. — *Engineering*, 18 mai 1883, p. 463; 26 avril 1889, p. 402. — *Proceedings of the Institution of Civil engineers*, 1889, p. 90. — *Scientific American supplement*, 18 juin 1885, p. 11-194.

§ 4

## CHAUDIÈRES A SERPENTIN

**1051** — *Chaudière Belleville.* — La chaudière à serpentín, dont

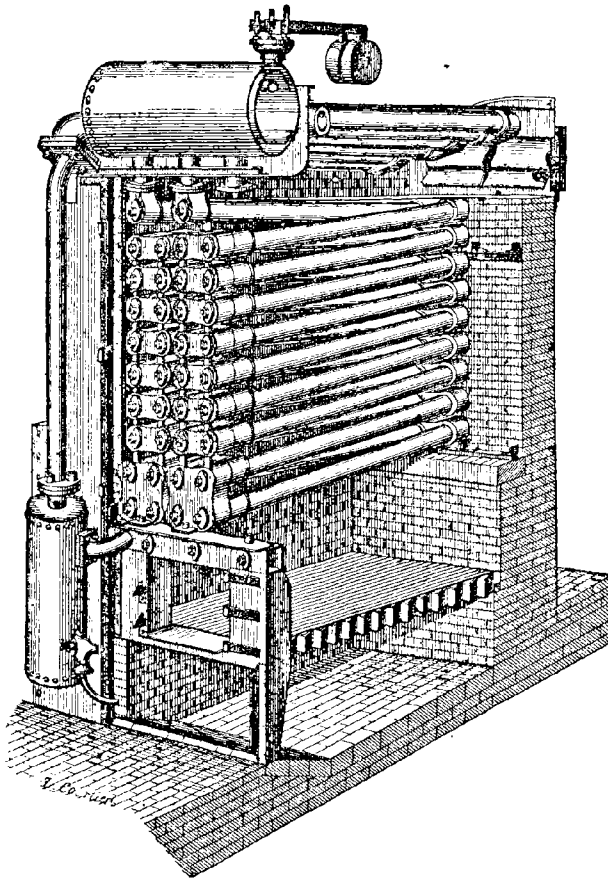


Fig. 643. — Chaudière Belleville (vue perspective.)

le type le plus parfait est le générateur Belleville <sup>(1)</sup>, représente un

<sup>(1)</sup> Delaunay. *Étude sur les générateurs à haute pression*, in-8°, 1878. -- Gley. Les

pas décisif dans la voie de la réduction du volume liquide, et par suite du danger (fig. 645, 646, 647). Le réservoir d'eau, que nous trouvons dans tous les appareils précédents, disparaît définitivement, et le faisceau tubulé reste seul pour contenir le liquide.

Une seconde différence essentielle consiste dans la disposition de ce faisceau lui-même. Comme dans le cas précédent, il recouvre en projection la grille, légèrement inclinée vers l'arrière, et il présente encore la disposition sectionnelle qui le partage en séries complètement distinctes les unes des autres. Mais, dans chacune de ces

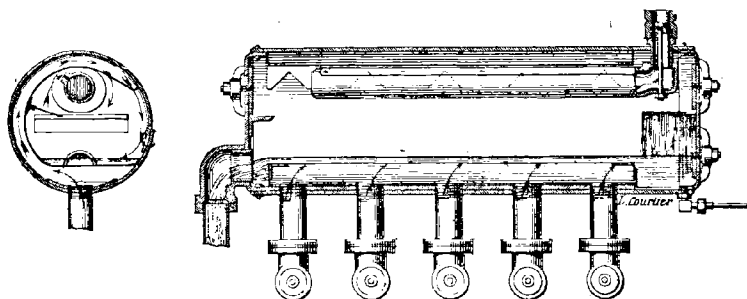


Fig. 646 et 647. — Collecteur-épurateur d'alimentation Belleville.  
(Coupes transversale et longitudinale).

dernières, les tubes ont perdu leur indépendance. Ils sont maintenant assemblés bout à bout en forme de *serpentin*, que l'eau parcourt d'un bout à l'autre. Ces diverses séries reposent par un de leurs angles sur le *collecteur d'alimentation* qui leur répartit le liquide, et par l'autre extrémité sur un seuil en maçonnerie.

Les tubes en fer qui constituent une série sont compris dans deux plans verticaux contigus séparés par quelques centimètres. Ils présentent une pente constante de 5 centimètres par mètre. Le dia-

chaudières à petits éléments. *Congrès international de mécanique appliquée de 1889*, p. 16. — Générateurs Belleville. *Guide pour la conduite et l'entretien des générateurs auxiliaires alimentés à l'eau de mer*, in-8°. — *Portefeuille économique des machines*, 5<sup>e</sup> série, t. VIII, p. 66. — *Bulletin de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 2<sup>e</sup> série, t. XI, p. 901. — *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 84. — *Les Mondes*, t. XXXVII, p. 202. — Sauvage. *Annales des mines*, 1890, p. 581. — Hirsch et Pobize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 608. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 76.



mètre ne dépasse pas 125 millimètres, avec une épaisseur de 5 millimètres, portée à 7 dans le voisinage du foyer.

De l'une des deux rangées à l'autre, les tubes sont réunis par des boîtes horizontales en fonte malléable, avec des joints à vis, assujettis à l'aide de manchons et de contre-bagues. On y ménage, en regard des tubes, des ouvertures munies de bouchons à garniture d'amiante, pour permettre le nettoyage intérieur. Ces boîtes reposent les unes sur les autres, avec interposition de cales.

Pour les communications verticales, on a soin d'environner d'une tubulure l'orifice de passage. Elle s'élève à une certaine hauteur à travers le liquide, afin que l'entartrement puisse se déposer au pied de cette saillie sans oblitérer la section offerte au courant. La jonction finale avec le réchauffeur supérieur, dont nous allons maintenant parler, se fait par un raccordement à joint conique et bride boulonnée pour permettre les dilatations.

**1052** — L'alimentation s'effectue dans un récipient supérieur qui porte le nom de *réchauffeur*, et qu'il ne faut pas confondre avec le réservoir d'eau des modèles précédents, bien qu'il les rappelle par son aspect. Comme ce dernier, il est relié directement à l'aide d'un tuyau avec le *collecteur d'alimentation* situé à la base des serpentins, et destiné à leur distribuer l'eau. Avant de s'engager de là dans les tubes, le liquide se calme assez pour que les troubles se déposent dans un *déjecteur*, d'où on les expulse périodiquement à l'aide d'un purgeur.

Ainsi que l'ancien réservoir, le nouveau récipient est destiné à l'échauffement préalable de l'eau d'alimentation, en vue de provoquer la précipitation d'une partie des sels. A cet effet, le liquide lancé par la pompe d'alimentation contre une paroi s'y pulvérise devant le débouché de la vapeur qui sort des serpentins.

Toutefois ce vase ne renferme plus, comme dans les cas précédents, un bain liquide, présentant un niveau bien déterminé. Ce niveau se trouve maintenant dans le faisceau tubulé, vers le milieu de sa hauteur; mais il n'y existe que d'une manière assez vague. En effet l'eau, en s'élevant dans les serpentins, y subit l'action calorifique; elle devient mousseuse en raison du dégagement de plus

en plus abondant de vapeur, et finit par passer à l'état gazeux, sous lequel elle rentre dans le réchauffeur supérieur. La pente constante des tubes facilite ce dégagement, en prévenant la formation de chambres de vapeur. Elle contribue en même temps à ramener vers le bas l'eau qui aurait été entraînée trop haut par les soubresauts de l'ébullition.

Une fois parvenu dans le réchauffeur, le mélange s'y épure. Des chicanes le forcent à infléchir ses trajectoires, en s'essorant par l'influence des forces centrifuges (fig. 643). Le liquide, en raison de sa grande densité, s'applique contre les parois, redescend sur le fond du cylindre, et de là dans le bas avec l'eau d'injection. La vapeur se concentre vers l'axe. Un *tube diviseur* l'y puise à travers des trous de faible diamètre, et la conduit finalement à un *sécheur*, formé de tubes qui sont disposés au ciel du foyer.

**1053** — Un tel fonctionnement est très délicat. Toutes les circonstances en ont été étudiées avec persévérance par l'inventeur pendant plus de quarante années d'incessants perfectionnements. Divers appareils sont encore annexés à ce bel ensemble pour obvier aux principales difficultés.

Nous avons expliqué que le plan d'eau est peu saisissable dans ce régime tumultueux. Cependant la réglementation publique exige que le niveau soit mis en évidence, et la conduite pratique du générateur ne saurait d'ailleurs se passer de ce renseignement. Dans ce but, on met l'intérieur en communication avec une tubulure latérale, où le calme s'établit en donnant naissance à un niveau liquide plus explicite.

Pour en assurer la constance, on n'a plus ici le secours du réservoir d'eau, qui a été supprimé. La sollicitude la plus vigilante du chauffeur n'y saurait suffire, et un appareil automatique devient nécessaire. Ce *régulateur d'alimentation* (n° 1125) consiste en un flotteur métallique, supporté par le bain dont il vient d'être question. Un jeu de leviers transmet ses variations de niveau à la soupape équilibrée qui règle l'arrivée de l'eau.

Pour éviter les conséquences d'un abaissement de niveau, s'il vient à se produire malgré ces précautions, on adapte aux points les

plus critiques de la chaudière des *chevilles en métal fusible* (n° 1225).

La tension de la vapeur est gouvernée de son côté par un *régulateur de pression* (n° 1077). Elle exerce directement sa poussée sur un ensemble élastique constitué par une pile de *rondelles Belleville*, sorte de soufflets métalliques formés de cônes très aplatis, réunis deux à deux, base contre base, et susceptibles de céder plus ou moins sous l'effort. Leur déformation est utilisée pour manœuvrer un registre, qui agit sur le tirage.

La mise en pression initiale est rapide, et sa durée ne dépasse pas 15 à 20 minutes. En allure normale, il est bon que la tension reste plus élevée de 1 ou 2 kilogrammes que dans la machine, afin de parer aux inégalités du régime de la chaudière. Un *détendeur* spécial (n° 1104) la ramène au degré constant qui est nécessaire pour la bonne marche du moteur.

**1054** — *Chaudière Serpollet*. — La chaudière Serpollet <sup>(1)</sup> constitue le dernier mot de l'inexplosibilité, attendu qu'elle ne renferme à chaque instant qu'une quantité d'énergie en quelque sorte inappréciable <sup>(2)</sup>. Pour ce motif, son emploi est limité à des applications qui ne réclament que de très petites puissances <sup>(3)</sup>. En vue de la renforcer jusqu'au chiffre de quelques chevaux, l'on associe plusieurs générateurs identiques, dont l'ensemble constitue une chaudière sectionnelle (fig. 648).

Chacun de ses éléments est un générateur à serpentín. Le liquide

<sup>(1)</sup> G. Richard. Les moteurs secondaires à l'Exposition de 1889. *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 427, 535. — *Génie civil*, t. XIII, p. 274, 285. — *Revue industrielle*, 9 novembre 1889, 25 avril 1891, p. 161. — *La Lumière électrique*, t. XXX, p. 263. — *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1888, p. 220. — Oly. Les chaudières à petits éléments. *Congrès de mécanique appliquée de 1889*, t. III, p. 27. — Lesourd. *Ibidem*, p. 116. — *Portefeuille économique des machines*, décembre 1888. — *La Nature*, 10 août 1889, 3 janvier 1891. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 1012. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 74. — Haton de La Goupillière. *Revue des travaux scientifiques*, t. VIII, p. 423. — *Engineering*, 14 août 1891, p. 195; 18 septembre 1891, p. 331. — *The Engineer*, 10 juillet et 25 septembre 1891.

<sup>(2)</sup> En conséquence, elle a été dispensée des appareils de sûreté par une décision ministérielle du 24 octobre 1888, à l'exception d'une soupape qui doit se trouver sur le tuyau de refoulement de la pompe alimentaire.

<sup>(3)</sup> Phaéton à vapeur Serpollet, tricycles, machines à coudre, etc.

parcourt d'un bout à l'autre un tube enroulé en spirale. Cette forme a pour but de ramasser sous un plus petit volume l'ensemble du système. Les flammes montent dans le centre des spires superposées, redescendent par l'extérieur, et s'échappent aux quatre angles.

Pour construire l'un de ces éléments, on prend un tube en acier doux, en cuivre, ou en laiton, et on l'aplatit au laminoin de manière à réduire sa section à une hauteur de  $\frac{1}{10}$  à  $\frac{5}{10}$  de millimètre, sur une largeur de 45 millimètres. En cet état, les tubes sont essayés à la pression hydraulique de 100 kilogrammes.

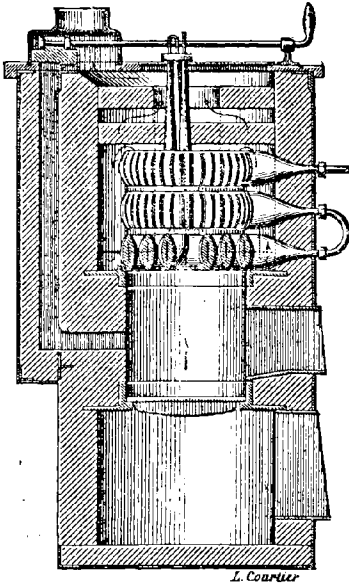


Fig. 648. — Chaudière Serpollet.  
(Coupe verticale).

L'eau d'alimentation est injectée à un bout de la spirale, à l'aide d'une pompe de compression mue par la machine. L'autre extrémité est ouverte librement du côté du moteur. Il n'y a pas de valve d'arrêt. Pour stopper, il suffit d'arrêter la pompe. La provision de vapeur se trouve épuisée à l'instant même. En vue d'éviter les coups de feu pendant les arrêts, un orifice spécial fait communiquer directement l'arrière du foyer avec la cheminée. Quand

on veut remettre en train, on donne quelques coups de pompe à la main.

Ce mode de fonctionnement présente un côté paradoxal, et l'on est porté à redouter un entartrement presque immédiat. Mais la rapidité du courant est telle, en raison de l'exigüité de sa section, que rien ne saurait s'y arrêter. Les résidus sont rejetés dans la machine, où ils jouent, dit-on, le rôle de lubrifiant, en raison de leur extrême division. L'inventeur a toutefois prévu la possibilité d'une obstruction, et un *robinet inverseur* permet en pareil cas de

faire passer le courant en sens contraire, de manière à solliciter les particules à ressortir par où elles sont arrivées.

On ne saurait évidemment attendre d'un système placé dans des conditions aussi exceptionnelles, un rendement bien économique. On annonce une consommation de 4 kilogrammes de charbon par cheval-heure. Mais dans de semblables conditions, cette considération perd évidemment son importance.

**1055** — *Batteries de générateurs.* — Nous venons de suivre pas à pas la décroissance progressive de la quantité d'eau enfermée dans le générateur, depuis les massives, chaudières à corps cylindrique unique jusqu'au volume insignifiant de l'appareil Serpollet. La surface de chauffe rapportée au mètre cube d'eau est en général de 5 à 6 mètres pour la première, de 13 à 25 avec le système tubulaire, de 50 ou même plus dans les chaudières tubulées.

En ce qui concerne le prix de revient, ce dernier système revient à peu près au même que le type tubulaire, mais il est moins économique que la chaudière ordinaire à bouilleurs. A la vérité, cette différence se trouve rachetée par de nombreux avantages qui ont été énumérés plus haut (n° 1041).

Sous le rapport de l'emplacement, on a cité les chiffres suivants<sup>(1)</sup>, qui expriment le rapport de la surface de chauffe effective à la superficie horizontale occupée par l'ensemble de l'appareil :

Chaudières à grand volume . . . . .	2 à 3,
— semi-tubulaires . . . . .	3 à 5,
— tubulaires. . . . .	5 à 9,
— tubulées . . . . .	9 à 12,
— verticales. . . . .	10 à 15.

**1056** — Il arrive fréquemment que le total de la puissance qu'il s'agit de réaliser ne permettrait pas de le demander à un seul générateur, dont les dimensions et le fonctionnement deviendraient tout à fait irréalisables. On constitue alors une *batterie de chaudières* (fig. 649, 650).

<sup>(1)</sup> Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 126

L'alimentation se fait dans ce cas à l'aide d'un engin commun et

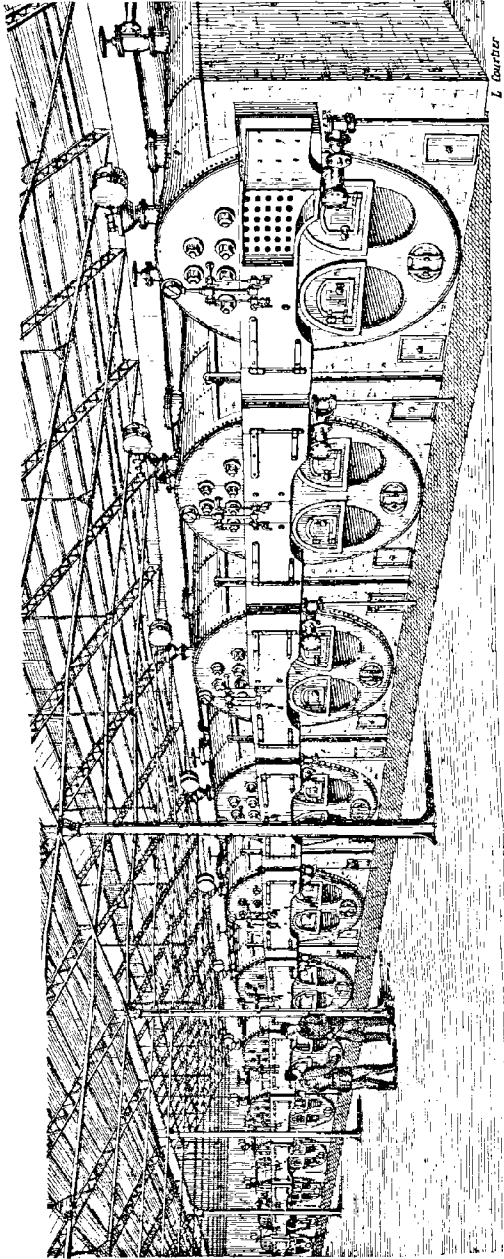


Fig. 619. — Batterie de chaudières de Lancastre (vue perspective).

d'un collecteur général, sur lequel se brancheront les divers générateurs, avec les organes de sûreté dont nous parlerons plus tard (n° 1194).

De même toutes les prises de vapeur se déversent dans un collecteur commun où le fluide se sèche, en raison de la grande section que l'on donne à dessein à cette conduite <sup>(1)</sup>. Des purgeurs servent à la débarrasser de l'eau déposée ou condensée. Les branchements doivent présenter des *cols de cygne* destinés à faciliter la dilatation <sup>(2)</sup>. Cette canalisation est disposée au-dessus des chaudières. La circulation des hommes pour la visite et les réparations s'effectue à l'aide de passerelles munies de garde-corps.

<sup>(1)</sup> Voy. t. I, p. 500.

<sup>(2)</sup> Joint à rotule Boulton pour col de cygne (*Revue industrielle*, 1880, p. 215).

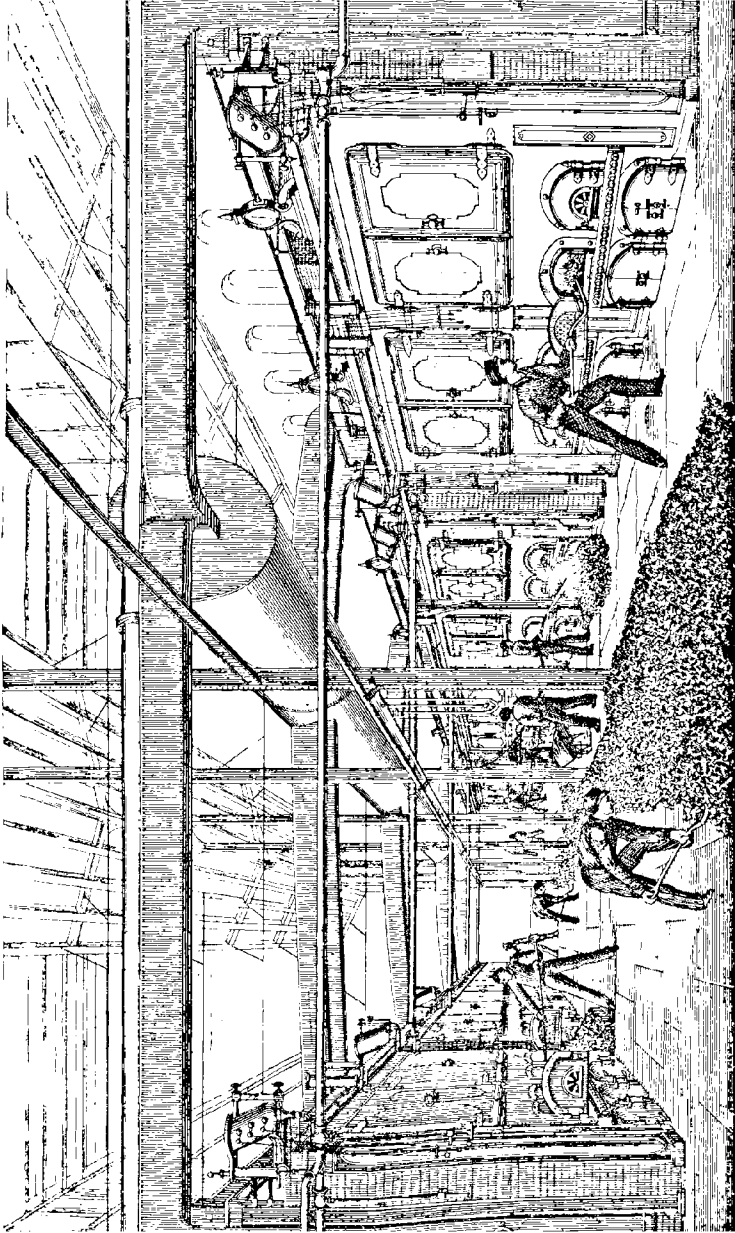


FIG. 650. — Batterie de chaudières Babcock et Wilcox (vue perspective).

Tout cet ensemble est renfermé sous une halle couverte <sup>(1)</sup>. De larges baies facilitent le tirage de l'air par les foyers, et les conditions de la ventilation d'un séjour aussi pénible pour les ouvriers. Leur place de travail, qui prend le nom d'*enfer*, doit être l'objet de la sollicitude des ingénieurs. Il faut qu'elle présente des dimensions suffisantes pour la manœuvre des râbles, ainsi que des issues très faciles pour les divers services, et surtout pour la fuite des hommes en cas d'accident. Les plates-formes, les escaliers, si la chaudière est enterrée <sup>(2)</sup>, doivent être disposés de manière qu'en aucun cas leur accès ne puisse être coupé pour un homme isolé dans quelque partie reculée, et menacé par des torrents de vapeur et d'eau bouillante. Les portes doivent s'ouvrir de dedans en dehors, ou être à simple poussée. Il faut enfin veiller à ce que, dans l'usage, ces passages ne soient jamais encombrés par des dépôts d'outils ou des tas de charbon. Des robinets avec lances d'eau sont mis à la disposition des chauffeurs, pour leur permettre d'éteindre les escarbilles et d'entretenir une propreté suffisante. Le sol est dallé en pierres dures ou en briques placées de champ. Des caniveaux, des égouts sont disposés pour la vidange et les nettoyages.

<sup>(1)</sup> Les conditions de l'emplacement sont subordonnées aux prescriptions des règlements administratifs (n° 1188).

<sup>(2)</sup> On ne saurait en pareil cas se contenter d'échelles. Il est bon en outre d'y établir des mains-courantes.



## CHAPITRE LVII

### CHAUDIÈRES A COMBUSTIBLES SPÉCIAUX

#### § 1

#### CHAUDIÈRES VERTICALES MÉTALLURGIQUES

**1057** — Les forges emploient pour l'élaboration du fer et de l'acier un grand nombre de fours à réverbère, dont la conduite est réglée par les nécessités de l'opération. Il en résulte des flammes d'une température très élevée, qui emportent en pure perte une quantité de chaleur considérable. Il était dès lors naturel de chercher à utiliser ce calorique, pour la production de la vapeur motrice qui est nécessaire à ces usines (<sup>1</sup>).

En même temps, l'affinage de la fonte réclame une action oxydante, et par suite la présence d'un grand excès d'oxygène, qui rend ces flammes particulièrement corrosives pour la tôle des chaudières; d'où la nécessité de précautions exceptionnelles, formant de ces appareils un groupe à part.

<sup>1</sup>) Hauct-Cléry. Étude sur les chaudières verticales chauffées par les flammes perdues des foyers métallurgiques. *Annales des mines*, 7<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 68. — Chaudières métallurgiques. Rapport de la sous-commission d'études. *Ibidem*, 8<sup>e</sup> série, t. X, p. 482. — Michel-Lévy. Étude et enquête sur les conditions d'installation et de fonctionnement des chaudières de première catégorie chauffées par les flammes perdues des foyers métallurgiques. *Ibidem*, novembre-décembre 1886. — Belleville. *Note sur l'emploi des chaudières pour l'utilisation des chaleurs perdues des fours métallurgiques*, in-8°, 1885. — Trautmann. Rapport sur la catastrophe de Marnaval. *Annales des mines*, 8<sup>e</sup> série, t. IV, p. 249. — *Note sur l'emploi des chaudières pour l'utilisation des chaleurs perdues des fours, notamment dans l'industrie métallurgique*, in-8°, Paris, Châir, 1888.

Ajoutons encore que la cherté des terrains tend généralement à provoquer une grande concentration dans la disposition des forges, et que d'ailleurs un motif tout spécial y concourt encore ; à savoir la nécessité de faire parcourir des trajets aussi courts que possible aux loupes chaudes qui vont de chacun des fours aux appareils de cinglage : laminoirs, marteaux ou presses. La question de l'emplacement joue donc un grand rôle dans l'installation de ces chaudières.

On peut à cet égard employer deux dispositifs : horizontal ou vertical. Le premier est assez usité<sup>(1)</sup>, mais au prix d'un grand encombrement.

**1058** — Pour ce motif, on a très souvent recours<sup>(2)</sup> à la disposition verticale<sup>(3)</sup>, qui permet d'installer au-dessus d'une projection horizontale très restreinte, une hauteur, et par suite un volume d'eau pour ainsi dire arbitraires (fig. 651). La longueur du corps cylindrique atteint ordinairement 12 à 15 mètres, et même exceptionnellement 20 mètres. La chaudière est environnée d'une tour en briques qui forme à la fois carneau et cheminée. Un intervalle de 50 à 40 centimètres est pour cela nécessaire. L'ensemble est surmonté par deux ou trois petites cheminées de quelques mètres de haut.

(1) En 1885, un total de 124 établissements métallurgiques, y compris les ateliers de chemins de fer, utilisaient en France 775 chaudières horizontales chauffées par les flammes perdues de 950 fours.

(2) En 1876, il existait en France 840 chaudières métallurgiques verticales, réparties dans 78 établissements.

(3) Chaudières verticales, métallurgiques ou autres : BOCCHÉ et DE LA HARPE. *L'Aéronaute*, septembre 1773, p. 168. — BRESLAY. *Revue industrielle*, 11 avril 1885, p. 149. — BRÉVAL. Laurent et Dunkel. *Album du constructeur de machines à vapeur*, p. 89. — COCHOT. Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 41. — CULVER. *American Machinist*, 16 février 1884, p. 1. — EGROT. Laurent et Dunkel. *Album du constructeur de chaudières à vapeur*, p. 89. — FOUGERAT (*Revue industrielle*, 1881, p. 152. — *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Ecoles d'arts et métiers*, 1881, p. 45). — GRENIER et CHEVALIER. *Portefeuille économique des machines*, 5<sup>e</sup> série, t. VIII, p. 146. — HERMANS LA CHAPELLE. Laurent et Dunkel. *Album du constructeur de chaudières à vapeur*, p. 89. — LENOIR et BELBEZET. *La Nature*, 10 décembre 1881, p. 22. — MARINONI. Laurent et Dunkel. *Album du constructeur de chaudières à vapeur*, p. 89. — MEYER (CHABAUD. *Bulletin de la Société minérale de Saint-Étienne*, 2<sup>e</sup> série, t. III, p. 147. — *Engineering*, 22 septembre 1875). — NAJER. Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction G. Richard, p. 504. — THODE. *Scientific American*, 12 septembre 1885, p. 162. — TOMSEA. *Revue industrielle*, 15 avril 1881, p. 141. — ZAMBEAUX. Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 59.

Le diamètre des générateurs proprement dits varie entre 1 mètre et 1<sup>m</sup>,40. Un moindre rayon entraverait les nettoyages. Une plus grande largeur exagérerait le rapport du volume d'eau à la surface de chauffe. On calcule ce diamètre de manière à obtenir un mètre carré de section pour 500 ou 400 kilogrammes de charbon passés à l'heure. Une telle disproportion entre les dimensions verticales et horizontales crée une instabilité qui exige des fondations soignées et de solides ancrages.

On adjoint ordinairement au système un foyer ordinaire à grille, afin de pouvoir continuer la production de la vapeur dans les intervalles de chômage ou de réparation des fours. Son rampant doit aboutir latéralement, et non sous le fond de l'enveloppe métallique, pour ne pas y provoquer la calcination des dépôts.

Quelques chaudières verticales sont chauffées à la fois par l'extérieur et par l'intérieur, d'après le type de Cornouailles. Les gaz montent alors par la circonférence et redescendent dans l'axe.

Assez souvent on réunit deux corps de chaudière dans la même enveloppe en maçonnerie.

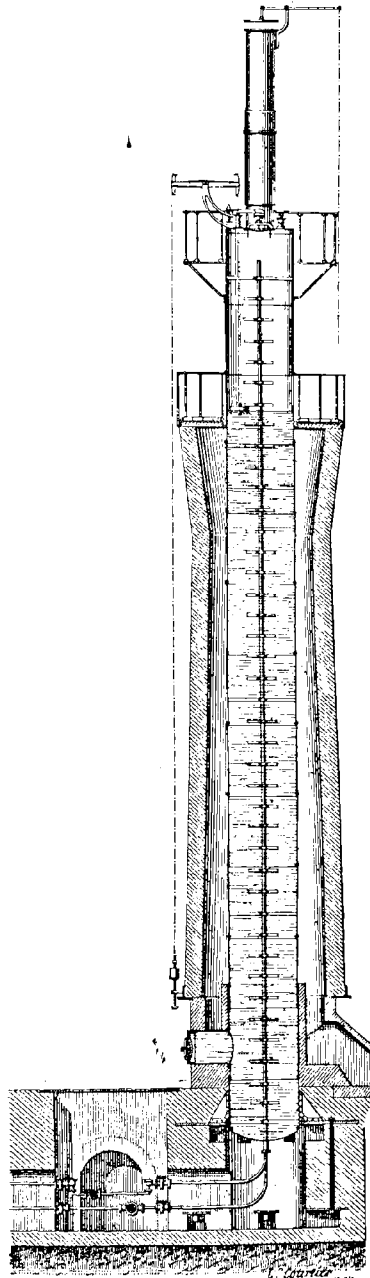


Fig. 651. — Chaudière métallurgique verticale (Coupe verticale).

Si une chaudière est chauffée à la fois par plusieurs fours, leurs divers rampants doivent avoir des registres indépendants. On a parfois, en pareil cas, cloisonné le carneau suivant des plans méridiens, pour assurer l'indépendance de ces fours. Mais cette disposition présente le grave défaut de provoquer, en cas d'inégalités ou de suspension du travail dans les uns ou dans les autres, des dilata-tions ou des contractions transversales extrêmement nuisibles à la conservation des tôles.

Les appareils de sûreté sont placés à la partie supérieure. Des escaliers des galeries, des passerelles en permettent la visite, ce qui occasionne un grand assujettissement. Nous ferons toutefois plus loin une réserve pour les indicateurs de niveau.

La nature corrosive et la température élevée des gaz a suggéré des précautions spéciales, qui ont reçu la sanction administrative<sup>(1)</sup>. Une murette doit recevoir l'action directe des flammes, afin d'éviter l'effet destructeur des dards de chalumeau. Il faut que sa hauteur soit suffisante pour infléchir à coup sûr le jet. Elle s'élève ordi-nairement à 1<sup>m</sup>,50 au-dessus de la voûte du rampant. Son déve-loppement horizontal atteint un quart de la circonférence. Il est absolument essentiel qu'elle ne se trouve pas au contact du métal (n° 1002). Un intervalle minimum de 5 centimètres est réglemen-taire, et il est préférable de le pousser à 8 ou 10.

Ce rampant doit aboutir tangentiellement, et non pas normale-ment à la circonférence. Il est très nécessaire de préserver cette partie de la chaudière, qui, en même temps qu'elle est exposée à la plus lourde charge hydrostatique et à la température la plus élevée, se trouve, à intervalles successifs, refroidie par l'alimen-tation, ce qui tend à tourmenter les tôles d'une manière des-tructive. Pour ce même motif, il est préférable d'effectuer l'ali-mentation aussi haut que possible, et d'une manière continue afin d'éviter les chutes de température.

Nous avons déjà dit (n° 954) que les surfaces de chauffe verti-cales ont moins d'efficacité que celles qui sont rapprochées d'un plan horizontal. Par compensation, on utilise ici la périphérie entière du

(1) Circulaire ministérielle du 13 février 1884. — Décret du 29 juin 1886.

corps cylindrique, tandis qu'elle n'est échauffée, avec le dispositif horizontal, que jusqu'à la ligne des carneaux. On emploie d'ailleurs un système de chicanes pour ralentir l'ascension trop rapide des gaz, et, en définitive, on calcule l'étendue de la surface de chauffe comme dans les conditions ordinaires (n° 1009), en fonction de la quantité de combustible qui est passée dans les fours.

La surface libre du liquide a peu d'étendue. Le dégagement de la vapeur en est rendu plus difficile. En même temps la partie la plus chaude se trouve à la base; c'est donc sous la plus grande charge hydrostatique que la volatilisation tend à se développer davantage. Il en résulte que l'eau devient mousseuse et l'ébullition tumultueuse. Le primage s'en trouve augmenté. Pour y remédier autant que possible, on fait redescendre la vapeur à travers un tuyau vertical au sein de la masse d'eau, afin d'obtenir un séchage approximatif.

L'abaissement du plan d'eau, en cas de défaut d'alimentation, devient plus rapide, en raison de l'exigüité de la section droite.

L'attention doit donc être particulièrement en éveil à cet égard. Aussi est-il nécessaire (n° 1205) de transmettre à la base de la chaudière, et sous les yeux du surveillant, l'indication du niveau de l'eau.

Pour le même motif, le carneau doit s'arrêter à une distance notable au-dessous de la chambre de vapeur.

L'irrégularité du régime oblige à donner à cette chambre un volume suffisant pour parer aux chutes de pression qui pour raient s'y produire sous les appels du piston.

En cas d'explosion, la tendance aux projections pouvant être considérée comme normale à la surface, les débris se trouveront lancés horizontalement, et d'un point élevé, ce qui étendra beaucoup la zone dangereuse. L'intensité des ravages est alors aggravée par l'énorme provision d'eau renfermée dans l'appareil, et par la chance de voir disloquer et bouleverser le four métallurgique lui-même, avec le bain métallique incandescent qu'il renferme. Il ne faut pas non plus perdre de vue que les forges sont toujours le séjour d'une nombreuse agglomération d'ouvriers. On devra donc s'attacher, tout en laissant, comme c'est inévitable, les généra-

teurs au voisinage immédiat des fours, à les établir, s'il est possible, hors de l'atelier.

Le danger est incomparablement plus grand pour les chaudières métallurgiques verticales qu'avec celles du type horizontal. De 1878 à 1885, celles-ci n'ont occasionné en France que 3 décès et 15 blessures, tandis que l'on trouve pour les premières 59 tués et 105 blessés. Si on les compare à la moyenne générale, on rencontre, de 1878 à 1885, un total de 37 morts et 70 blessures, tandis que l'ensemble, pour tout le territoire, est de 197 tués et 205 blessés. Or, les chaudières métallurgiques verticales ne représentent que le centième environ du total des générateurs relatif à la France entière.

## § 2

### CHAUDIÈRES A GAZOGÈNE

**1059** — *Chaudières à gaz.* — Les générateurs à gazogène<sup>(1)</sup> ne doivent pas être confondus avec les chaudières métallurgiques qui viennent de nous occuper. Dans ces dernières, on se voit obligé d'accepter avec ses défauts un mélange *brûlé* incandescent, qui a été constitué en vue d'une opération antérieure toute différente, et dont on entreprend actuellement de soutirer le calorique pour le faire passer dans l'eau, en amenant celle-ci à l'état de vapeur.

Pour conserver les avantages de ce mode de fonctionnement en évitant ses inconvénients, on a eu l'idée de fabriquer tout exprès un gaz *combustible*, et de le brûler ultérieurement sous le générateur. L'appareil qui sert à constituer ce gaz s'appelle *gazogène*, et le récipient ainsi chauffé : *chaudière à gaz*<sup>(2)</sup>.

(1) Chaudières à gaz. *Iron*, 18 juin 1880, p. 440. — Delaunay. *Étude sur les générateurs à haute pression*, in-8°. 1878, p. 24. — Sauvage. *Annales des mines*, novembre-décembre 1890, p. 554. — Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 460. — Pütsch. *Ueber Gasfeuerungen*, Berlin, in-8°, 1881.

(2) Chaudières à gaz : ALBIN. *Chronique industrielle*, 4 avril 1886, p. 158. — BEAUFUMÉ. Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 470. — BELOU. Armengaud. *Publication industrielle*, 20<sup>e</sup> volume. — GROBE. *Revue industrielle*, 3 novembre 1880, p. 455. — HAUPT. *Ibidem*, 3 mars 1880, p. 81. — JONES. *Journal des usines à gaz*, 1891, p. 251. — JUCKER. *Revue industrielle*, 3 novembre 1880, p. 455. — MINARY. *Ibidem*. — PASCAL. Armengaud. *Pu*

On a même utilisé dans ce but, sur quelques points du globe où la chose est possible, le *gaz naturel* <sup>(1)</sup> que fournissent certains puits forés dans les districts pétrolifères <sup>(2)</sup>.

**1060** — Le gaz arrive sous le générateur en même temps que l'air, qui a été préalablement échauffé par son passage dans un récupérateur soumis à l'action des gaz chauds avant leur entrée dans la cheminée. Deux conduites parallèles distribuent l'un et l'autre de ces deux fluides dans un certain nombre de brûleurs alignés sous le corps cylindrique. Une petite voûte réfractaire recouvre chacun de ces derniers, pour recevoir l'action directe du dard de chalumeau, qui serait destructeur pour la tôle en l'attaquant toujours au même point.

On supprime ainsi la diversité des phases de la combustion qui caractérise le mode ordinaire, et l'on réalise une répartition plus égale de la chaleur sur toute la longueur du générateur. La dilatation devient plus uniforme. La fumivorité est complète.

Ces appareils présentent en revanche certains inconvénients. La conduite du foyer n'est plus aussi docile. On ne peut pas, à un moment donné, pousser le feu avec la même facilité. La détérioration est rapide. Des rentrées d'air à travers les maçonneries risquent de provoquer la formation de mélanges détonants. Enfin le système perd tous ses avantages s'il est appliqué à un service quotidien et intermittent. Il lui faut le feu continu.

**1061** — *Gazogène Siemens*. — Comme exemple de gazogène, nous décrirons d'abord celui de Siemens <sup>(3)</sup>.

Le combustible est chargé par la trémie A (fig. 652), et descend progressivement sur le plan incliné B. On facilite son mouvement

*blication industrielle*, 20<sup>e</sup> vol. — POSSARD (*Les Mondes*, t. XXXI, p. 756; XXXVI, 480. — *The Engineer*, 1874, p. 66). — PRICE. *Revue industrielle*, 5 novembre 1880, p. 435

<sup>(1)</sup> Chauffage des chaudières par le gaz naturel à Pittsburg (*Chronique industrielle*, 1888, p. 542. — *Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. XII, p. 46. — *La Nature*, 22 mai 1886, p. 595. — *Scientific American*, 27 février 1886, p. 127).

<sup>(2)</sup> Haton de la Goupillière. *Cours d'exploitation des mines*, t. I, p. 456.

<sup>(3)</sup> *Chronique industrielle*, 15 février 1887, p. 78. — Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 471. — *Scientific American*, supplément, 29 août 1885, p. 8040. — Siemens. *Heizverfahren mit freier Flammen Entfaltung*, 1885, Berlin.

en ringardant à travers l'orifice C. Sur ce parcours, la houille distille. Les gaz sont appelés par le tirage de la cheminée D. Peu à peu réduite en coke, la charge atteint la grille à gradins E (n° 1092). L'air en traverse les diverses plates-formes, et en filtrant à travers

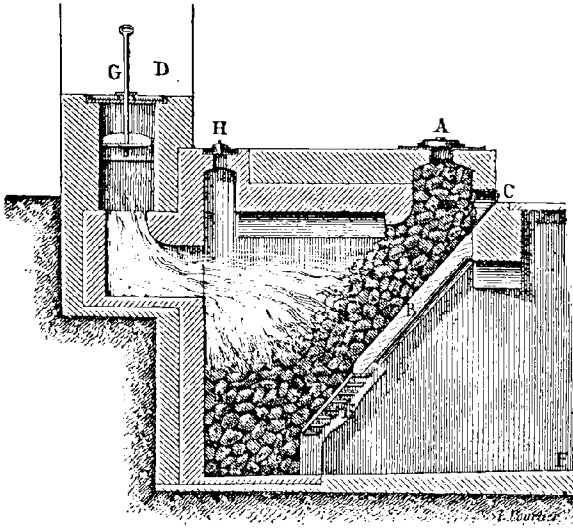


Fig. 652. — Gazogène Siemens (coupe verticale).

vers cet excès de charbon, il se convertit en oxyde de carbone, qui prend la même direction que les hydrogènes carbonés. Comme on répand ordinairement de l'eau sur la sole du cendrier, elle donne de son côté une certaine quantité de vapeur, qui se dissocie au

contact de la masse embrasée, en formant de l'hydrogène libre et de l'oxyde de carbone. Un registre G sert à régler le tirage. Un regard H permet de surveiller la marche de la réaction.

L'analyse du gaz produit dans l'un de ces appareils a donné *en volume* les résultats suivants :

PARTIE COMBUSTIBLE.	{	Oxyde de carbone . . .	23,7	}	53,9	
		Hydrogène . . . . .	8,0			
		Carbures d'hydrogène .	2,2			
PARTIE ÉTRANGÈRE.	{	Acide carbonique . . .	4,1	}	66,0	
		Oxygène . . . . .	0,4			
		Azote . . . . .	61,5			
				99,9		
				99,9		



Les éléments combustibles de toute nature forment, comme on le voit, un tiers du volume total.

L'allure est lente. Le décrassage est difficile. La température reste voisine de 600 degrés. Si on la laissait fléchir, l'oxyde de carbone passerait prématurément à l'état d'acide carbonique, et la chaleur dégagée par cette réaction ne servirait, tout au plus, qu'à augmenter le tirage, au lieu d'être recueillie par le générateur et employée pour la vaporisation.

**1062** — *Gazogène Muller et Fichet.* — L'appareil de MM. Muller et Fichet<sup>(1)</sup> a été combiné pour opérer du même coup et méthodi-

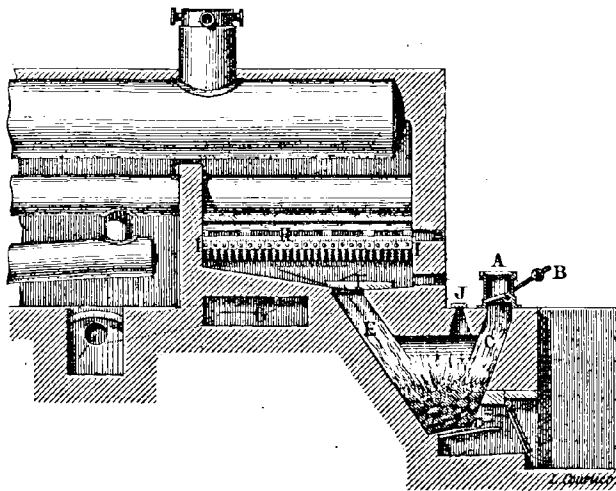


Fig. 655. — Gazogène Muller et Fichet (coupe verticale).

quement la gazéification de la houille et la combustion des produits sous le générateur.

Le combustible est chargé d'heure en heure à travers une trémie A (fig. 655), que l'on maintient fermée en temps ordinaire à l'aide d'un registre B. Un joint de sable s'oppose aux rentrées

<sup>(1)</sup> *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, 1874, p. 670. — Hirsch. *Rapport sur l'Exposition de 1878*, p. 158. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 446. — Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 479.

d'air et aux fuites de gaz. Le charbon descend lentement sur le plan incliné C sans se brûler, en raison de la faiblesse de la température qui règne dans cette région et de l'absence d'air. Il distille progressivement. La combustion se développe en D, et fournit de l'oxyde de carbone en raison de l'insuffisance de l'afflux de l'air, que l'on oblige à passer entre les deux faces de la porte du foyer, afin qu'il la rafraichisse en s'échauffant pour son propre compte. Le mélange gazeux remonte par le conduit E. Une dalle réfractaire F sert de registre pour en régler l'écoulement. Le courant d'air, que l'on a forcé de circuler à travers des canaux tels que G de manière à s'échauffer dans les massifs, vient déterminer la combustion définitive du fluide dans la chambre H. En vue de la faciliter, on tamise celui-ci à travers une grille réfractaire I. Le regard J permet de surveiller l'opération. On obtient par là un échauffement rapide et une fumivortité très satisfaisante, ainsi qu'une certaine économie, sous la condition d'opérer d'une manière continue.

**1063** — *Foyer fermé Du Fay*. — Depuis longtemps on a cherché <sup>(1)</sup> à réaliser une certaine amélioration du coefficient d'utilisation thermique  $\epsilon_2$  <sup>(2)</sup>, en enfermant complètement la combustion dans l'intérieur de l'appareil, et faisant passer tous ses produits indistinctement à travers le cylindre moteur. Un principe aussi étranger aux conditions ordinaires fait immédiatement surgir toutes sortes de difficultés, que l'on est arrivé à surmonter d'une manière plus ou moins heureuse. Je prendrai comme exemple le foyer fermé qui a été imaginé par M. Du Fay, ingénieur de la marine <sup>(3)</sup>.

Le combustible brûle sur une grille A (fig. 654). En B, une soufflerie mécanique injecte une certaine quantité d'air qui traverse la masse embrasée. Une nouvelle dose est fournie par les tuyères C au-dessus de la grille, en vue de brûler l'oxyde de carbone ainsi formé. Un autoclave D permet de nettoyer de temps en temps le cendrier. Un second autoclave E sert à charger le charbon, qui

<sup>(1)</sup> Pascal, Belou, Feuillet de Lyon, etc.

<sup>(2)</sup> Voy. t. I, p. 610.

<sup>(3)</sup> Armengaud. *Publication industrielle*, t. XX.

tombe directement sur une trappe horizontale F. Quand on a refermé l'orifice, cette trappe s'incline sous l'action d'une manette extérieure, et verse le charbon sur la grille. En G se trouve un pulvérisateur, qui fournit l'eau d'alimentation. Celle-ci, rapidement saisie par la température, se convertit en vapeur, qui se rend au cylindre par l'orifice H, en même temps que les gaz de la combustion.

**1064** — Une telle chaudière peut être considérée comme inexplosible, puisqu'elle ne renferme qu'une quantité d'eau insignifiante. Elle constitue un véritable *aéro-vapeur*, avec les avantages et les inconvénients inhérents à cette classe de moteurs (<sup>1</sup>). On évite le refroidissement dû à l'ouverture des portes. On arrive facilement, au besoin, à produire de la vapeur surchauffée, en conduisant convenablement le feu.

En revanche, ce système expose à l'encrassement des cylindres, dont les surfaces seront rayées par les escarbilles entraînées. On a soin, pour ce motif, de disposer des chicanes dans le foyer, afin de développer au sein du courant des forces centrifuges qui précipitent les matières solides dans les angles, où elles s'amassent, et d'où on les retire périodiquement. Des gouttières renversées arrêtent les fines, qui ont tendance à grimper le long des parois verticales.

Le foyer est assez difficile à conduire du dehors. On est exposé à la production de coups de feu, ou inversement à l'extinction du foyer, si la pluie du pulvérisateur arrive à prendre le dessus.

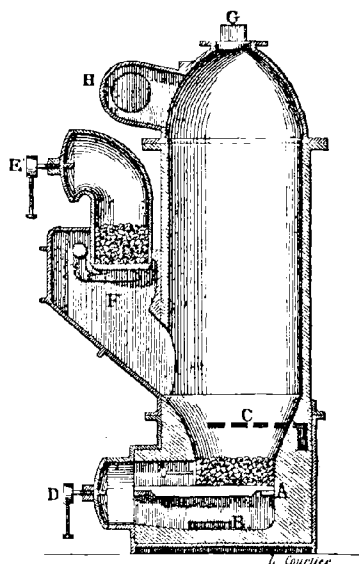


Fig. 654. — Foyer fermé Du Fay.  
(Coupe verticale).

(<sup>1</sup>) Voy. t. I, p. 827

Il est bon d'associer ces appareils par couples, de manière que l'un d'eux serve à entretenir la marche pendant que l'on procède au nettoyage de l'autre.

Une petite soufflerie spéciale sert pour la mise en train, après quoi la soufflerie principale mue par la machine alimente le fonctionnement normal. Nous reviendrons en temps et lieu sur cette question du vent forcé (n° 1095).

### § 3

#### CHAUDIÈRES A PÉTROLE

**1065** — Les essais relatifs à l'utilisation du combustible liquide pour le chauffage des générateurs <sup>(1)</sup> ont pris beaucoup d'activité dans les pays de production <sup>(2)</sup>. Un grand nombre de types divers

(1) H. Sainte-Claire Deville, Audouin, Dupuy de Lôme, Urquard, etc.

(2) Dupuy de Lôme. Emploi des huiles minérales au chauffage des chaudières à vapeur. *Annales des mines*, 6<sup>e</sup> série, t. XV, p. 61. — Foyers de chaudières au pétrole. Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. III, p. 164. — Audenet. Emploi des résidus de pétrole pour le chauffage des générateurs. *Génie civil*, t. VI, p. 346. — Chaudières à pétrole. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 745. — Chauffage des locomotives à l'huile de pétrole (*Annales des Ponts et Chaussées*, 1869, 1<sup>er</sup> sem., p. 414. — *Revue générale des chemins de fer*, octobre 1885. — *Génie civil*, 5 décembre 1886, p. 87). — Chaudières au goudron de houille (*Revue industrielle*, 28 avril 1887, p. 451. — *La Métallurgie*, 6 février 1889, p. 141).

Troost. Emploi des huiles minérales pour le chauffage. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 2<sup>e</sup> série, t. XVI, p. 571. — Debray. Sur l'emploi des huiles lourdes pour le chauffage. *Ibidem*, 2<sup>e</sup> série, t. XVII, p. 591. — Sur les propriétés physiques et le pouvoir calorifique des pétroles. *Annales des mines*, 7<sup>e</sup> série, t. I, p. 175. — Audouin. Travail relatif à la combustion des pétroles et des huiles lourdes. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 2<sup>e</sup> série, t. XV, p. 512. — Chassinat. *Chauffage aux huiles lourdes*, in-8°. — Goudron et huiles lourdes. Denfer. *Traité des chaudières à vapeur*, p. 9. — De Maupeou. *Mémoire du Génie maritime*, 1885, 7<sup>e</sup> livraison. — *Annales industrielles*, 26 avril 1891, p. 540.

Chaudières au pétrole (*American Machinist*, 17 octobre 1889, p. 4. — *Scientific American*, 11 mai 1889, p. 297). — Huile de pétrole dans les locomotives. *Proceedings of the Institution of civil Engineers*, août 1884, p. 300. — Chaudière au pétrole du steamer « Solano ». *American Machinist*, 1<sup>er</sup> août 1885, p. 2. — Chaudière à pétrole du steamer « Torpedo ». *Engineering*, 10 janvier 1890, p. 30. — Consumption of liquid fuel per ton-mile on compounded locomotives in S. E. Russia. *The Railway Engineer*, août 1891, p. 215. — Brûleurs de pétrole (*American Machinist*, 14 avril 1888, p. 5. — *Scientific American*, supplément, 7 mai 1887, p. 9456; 28 janvier 1888, p. 10 065). — *Journal of Franklin Institute*, août 1888.

de foyers (<sup>1</sup>) ont été proposés dans ce but. J'en indiquerai sommairement les traits principaux (fig. 655).

L'intérieur de la boîte à feu est revêtu de briques réfractaires, afin de pouvoir résister à la température très élevée qui s'y déve-

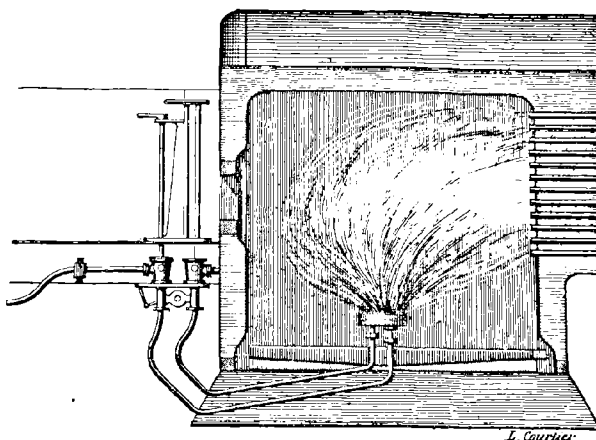


Fig. 655. — Chaudière Brandt à pétrole (coupe verticale).

loppe, et qui est nécessaire pour la combustion complète. L'huile est amenée par un tuyau, sous l'influence d'une pression hydro-

(<sup>1</sup>) Chaudières au pétrole : AGNELLET. *Ser. Physique industrielle*, t. I, p. 463. — D'ALLEST (*Génie civil*, t. VIII, p. 7, 19, 36, 67. — *Annales industrielles*, 6 septembre 1885, p. 320. — Soubiran. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, février 1885, p. 65. — *Ser. Physique industrielle*, t. I, p. 464). — ANDOW. Ledieu. *Les Nouvelles Machines marines*, t. III, p. 166. — ANDREWS et SEERY. *Scientific American*, 8 février 1890, p. 84. — AYDON (Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction G. Richard, p. 482. — *The Railroad and Engineering Journal*, t. LXII, p. 265). — BIDDLE. Ledieu. *Nouvelles Machines marines*, t. III, p. 165. — BRIDGE ADAM. *Ibidem*. — BELLARD. *Revue industrielle*, 1<sup>er</sup> septembre 1888, p. 345. — BURREL. *American Machinist*, 16 juin 1888, p. 5. — DIETRICH. *La Nature*, 1<sup>er</sup> avril 1887, p. 274. — DUPUY DE LÔME. Ledieu. *Nouvelles Machines à vapeur*, t. III, p. 166. — HOLDEX (*Revue industrielle*, 19 septembre 1891, p. 377. — *Portefeuille économique des machines*, 5<sup>e</sup> série, t. XV, p. 106. — *The Engineer*, 15 mai 1891, p. 386. — *The Railway Engineer*, janvier 1891, p. 89). — LINTON. Ledieu. *Nouvelles Machines marines*, t. III, p. 166. — MEYER. *Scientific American*, 27 avril 1889, p. 260. — MULLER et FICHET. *Ser. Physique industrielle*, t. I, p. 460. — RICHARDSON. Ledieu. *Nouvelles Machines marines*, t. III, p. 165. — H. SAINTE-CLAIRE DEVILLE. *Ibidem*, p. 166. — STEWART. *The Railroad and Engineering Journal*, t. LXIV, p. 47. — TREASY. *American Machinist*, 13 août 1887, p. 7. — WIFE. Ledieu. *Nouvelles Machines marines*, t. III, p. 165.

statique. Un second tube fournit un jet de vapeur (<sup>(1)</sup>), destiné à entraîner le liquide pulvérisé et mélangé avec l'air. La sole du foyer est formée par une tôle légèrement inclinée vers l'autel.

Pour mettre en train, on emploie une essence facilement inflammable. On doit commencer par ouvrir le jet de vapeur, afin d'éviter la production de mélanges détonants.

**1066** — Les avantages que l'on invoque en faveur de ce mode de chauffage sont nombreux. L'opération devient très facile. Un seul homme peut se substituer dans ces conditions à plusieurs chauffeurs. Les feux peuvent même être placés sous le contrôle du mécanicien de quart, qui a les moyens de les régler directement. La charge s'opère d'une manière continue, ce qui supprime les phases variables de la combustion ordinaire. La pression est plus constante, la dilatation plus uniforme. On supprime les ouvertures de portes qui refroidissent la chambre de combustion, ainsi que les dégrassements de grilles.

Le combustible possède un pouvoir calorifique exceptionnel, variant aux environs de 10 000 calories. On peut, d'après cela, dans la marine, emmagasiner sous le même poids une plus grande puissance motrice, ce qui augmente la distance qu'il est possible de franchir sans escales. Inversement, en conservant la même limite de distance, on rend disponible une partie du fret. En outre, le poids voulu se loge avec la plus grande facilité dans un volume de forme quelconque, ce qui permet d'utiliser des anfractuosités qui seraient inacceptables pour la houille. La durée du ravitaillement devient très rapide.

Dans des essais faits sur le *Puebla*, Sainte-Claire Deville a obtenu 11 kilogrammes de vapeur, au lieu de 8 que fournissait le coke. La Compagnie des Forges et Chantiers a réalisé dans ses expériences une production de 15<sup>kg</sup>,5 au lieu de 8<sup>kg</sup>,5. Nonobstant une telle réduction du poids de combustible, ce procédé de chauffage n'est pas économique, en raison du cours élevé de l'huile. Le prix de revient du

(<sup>1</sup>) Sur mer on tend à lui substituer l'air comprimé, afin d'éviter la perte correspondante d'eau distillée.

kilogramme de vapeur reste environ 5 fois plus cher qu'avec les moyens ordinaires.

Cet inconvénient n'est pas le seul, et le danger résultant de l'emploi et de l'emmaganisement à bord d'une pareille quantité de pétrole sert de contrepoids aux avantages du système. Il convient de n'employer que des résidus, de préférence au pétrole brut, et d'écartier dans tous les cas les liquides capables de s'enflammer à une température inférieure à 140 degrés.

#### § 4

#### CHAUDIÈRES A COMBUSTIBLES PAUVRES

**1067** — On a essayé d'utiliser, pour le chauffage des générateurs, les combustibles les plus divers, de pouvoirs calorifiques plus ou moins inférieurs.

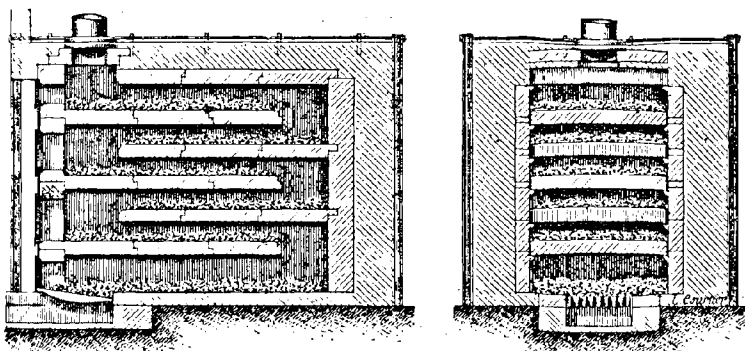


Fig. 656 et 657. — Grille Michel Perret à dalles étagées (coupes longitudinale et transversale).

Je citerai d'abord le poussier de coke (<sup>1</sup>). Le coke est exempt de fumée, mais il attaque les grilles et les cuivres.

D'une manière générale, les combustibles pulvérulents exigent

<sup>1</sup>) Chaudière à poussier de coke. *Revue industrielle*, 20 septembre 1890, p. 569. — *Engineering*, 22 septembre 1871, p. 198. — Foyer Hardt pour le charbon fin. *Scientific American*, 5 juin 1886, p. 355.

des systèmes de chauffe spéciaux (<sup>1</sup>), car ils passeraient à travers des grilles ordinaires. On peut employer en certains cas les grilles à gradins (n° 1092).

L'un des appareils les plus répandus à cet égard est la grille de M. Michel Perret à dalles perforées (<sup>2</sup>). Ces dalles sont légèrement cintrées pour offrir plus de résistance (fig. 656, 657). Des portes servent pour le chargement et l'étalage des menus. L'air circule de bas en haut. On râble successivement le combustible à contre-cou-

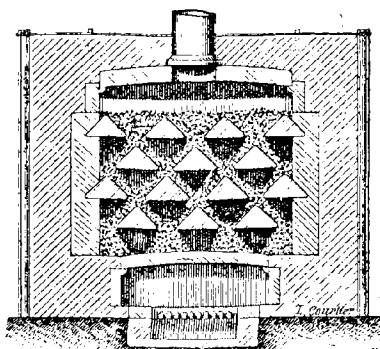


Fig. 658. — Grille Michel Perret à cônes.  
(Coupe transversale).

rant d'étage en étage, de manière à ne retirer à la partie inférieure que des matières épuisées. Une petite grille placée dans cette région sert pour l'allumage, au moment de la mise en train.

Dans un dispositif différent (fig. 658), le même inventeur a remplacé les dalles par des cônes en chicanes, en vue de simplifier l'opération de la descente.

On a imaginé de pousser à la limite extrême l'exiguïté des particules du combustible solide, au moyen de la pulvérisation. Dès 1822, Stanley a employé des fours à poussier de charbon (<sup>3</sup>). C'est un ventilateur qui est chargé de lancer le poussier dans la chauffe, en même temps que l'air nécessaire à sa combustion. Les doses sont déterminées par un régulateur. On réalise ainsi une

(<sup>1</sup>) Foyers : BRÉVAL BOUR. *Sixième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de propriétaires d'appareils à vapeur*, Paris, 1882, p. 47. — KOCH. *Ibidem*, p. 50.

(<sup>2</sup>) ANSALONI. *Notice sur l'emploi des grilles Michel Perret, pour brûler les combustibles maigres et pulvérulents*, in-8°. — *Génie civil*, 29 décembre 1888 et 9 février 1889. — ARMENGAUD. *Publication industrielle*, 51<sup>e</sup> vol., p. 92. — *Scientific American, supplement*, 28 novembre 1885, p. 8250.

(<sup>3</sup>) Foyers à poudre de charbon : CORBIN, DENFER. *Traité des chaudières à vapeur*, p. 15. — CRAMPTON, BIENAYMÉ. *Les Machines marines*, p. 509. — STEPHENSON. *The Engineer*, 1877, p. 535. — WHELPLEY et STORER (*Annual Report of the Chief of the United States Bureau of steam engines for 1876*). — *Engineering*, 1874, p. 98 ; 1877, p. 335. — *Journal of Franklin Institute*, 1874, p. 498. — RANKINE. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction Richard, p. 455). — ZÉST, DENFER. *Traité des chaudières à vapeur*, p. 15.



fumivorité satisfaisante; mais la poussière est sujette à fixer l'hygroscopicité de l'atmosphère, et la conduite d'un pareil foyer est difficile. Ces appareils ne se sont pas répandus.

**1068** — Le bois <sup>(1)</sup> est un combustible dont l'usage industriel se recommande dans certaines régions forestières. Les alandiers destinés à sa combustion sont formés d'une sole de briques réfractaires disposée en pente douce; à l'avant, une trémie de fonte occupe toute la largeur. Les bûches, d'une dimension un peu moindre, sont placées en travers et empilées les unes sur les autres. Leur poids écrase la braise qui se forme à la partie inférieure, et fait descendre la charge. L'air filtre de haut en bas à travers la masse, et entraîne les cendres. Le système de la flamme renversée convient bien à ce combustible.

On a également employé les copeaux <sup>(2)</sup>, la sciure de bois <sup>(3)</sup>, la paille <sup>(4)</sup>, la tannée <sup>(5)</sup>, ainsi que d'autres combustibles pauvres fournis par diverses industries <sup>(6)</sup>.

<sup>(1)</sup> Chaudières à bois : *American machinist*, 14 mai 1891, p. 6. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 426. — Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 436.

<sup>(2)</sup> Chaudière à copeaux de CONKLIN. *Scientific american*, 20 janvier 1883, p. 34.

<sup>(3)</sup> Chaudières à sciure (Denfer. *Traité des chaudières à vapeur*, p. 8. — *Scientific american*, 11 avril 1891, p. 231).

<sup>(4)</sup> Chaudières à paille HEAD et SHELLOTH. *Proceedings of the Institution of civil Engineers*, t. XLVIII.

<sup>(5)</sup> Chaudière à tannée : CROCKET et THOMPSON. *Thurston. Journal of Franklin Institute*, 1875. — KRAFT et MULLER. *Annales industrielles*, 1870. — Chomienne. *Bulletin technologique de la Société des anciens Éléves des Écoles d'arts et métiers*, 1887, p. 259. — Sauvage. *Annales des mines*, novembre-décembre 1890, p. 550. — Denfer. *Traité des chaudières à vapeur*, p. 9.

<sup>(6)</sup> Chaudière GODILLON pour combustibles pauvres (*Génie civil*, 1<sup>er</sup> août 1885, p. 220. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 4<sup>e</sup> série, t. IV, p. 289. — *La Nature*, 26 avril 1889, p. 349. — *Congrès de mécanique appliquée de 1889*, t. III, p. 101). — Chaudière TWAITER, STEWART et STURGEON pour combustibles et déchets de toute nature. *Revue industrielle*, 21 janvier 1880, p. 25.

## § 5

## CHAUDIÈRES SANS FEU

**1069** — Il est intéressant, dans certains cas particuliers <sup>(1)</sup>, d'éviter qu'une locomotive porte en elle-même un foyer. Cependant, puisqu'elle est destinée à développer de l'énergie tout le long de son parcours, il faut bien que celle-ci soit empruntée à une source

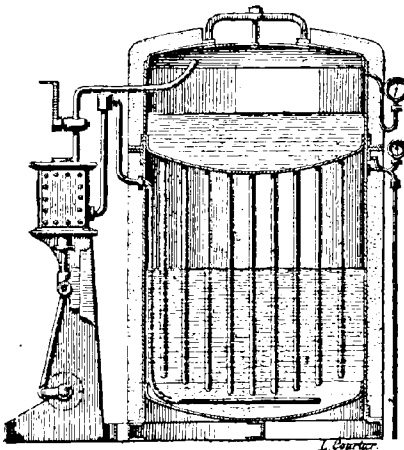


Fig. 159. — Chaudière à soude Honigmann.  
(Coupe verticale).

quelconque, qui sera presque toujours une chaudière à vapeur. La solution consiste alors à laisser fixe cette dernière, et à imaginer un artifice qui permette au véhicule de lui emprunter des doses d'énergie potentielle suffisantes pour le trajet qu'il doit accomplir, en venant se retremper périodiquement à son contact, pour reprendre chaque fois des forces nouvelles.

**1070** — *Chaudière à soude Honigmann.* — Un premier exemple de cette combinaison se rencontre dans la chaudière à la soude de M. Honigmann <sup>(2)</sup>. Son

<sup>(1)</sup> Par exemple dans les mines à grisou, dans les quartiers peuplés où l'on veut éviter la fumée des tramways, etc.

<sup>(2)</sup> *Génie civil*, t. IV, p. 142. — Riedler (*Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 2<sup>e</sup> série, t. XV, p. 365. — Gustave Blum. *Revue générale des chemins de fer*, juillet 1885. — *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure*, t. XXVII, p. 729. — *Bulletin de la Société des Ingénieurs et Architectes autrichiens*, 15 décembre 1885. — *Annales de Poggendorf*, t. CIII, p. 150; CV, 85; CX, 564. — Richard. *La chaudière locomotive*, in-4<sup>e</sup>, p. 587. — Armengaud. *Publication industrielle*, 2<sup>e</sup> série, t. X, p. 73. — Sauvage. *Annales des mines*, novembre 1890, p. 590. — *Revue générale des chemins de fer*, 1885, 2<sup>e</sup> sem., p. 21. — *Revue des questions scientifiques de la Société de Bruxelles*, 20 janvier 1885, p. 285. — *Annales industrielles*, 1884, t. I, p. 178. — *Portefeuille*

emploi est fondé sur l'élévation de température que produit l'hydratation progressive d'une solution concentrée de soude caustique.

L'appareil présente deux capacités distinctes et superposées (fig. 659). Dans le récipient supérieur se trouve de l'eau pure qui entre en vapeur (au commencement à l'aide d'une mise en train artificielle, et ensuite par le jeu normal du fonctionnement). Cette vapeur se rend au cylindre moteur, et de là dans la cavité inférieure, où un tube horizontal percé de trous nombreux la met en contact avec la lessive alcaline, dans laquelle elle se condense. La température de cette solution s'élève, et permet ainsi de chauffer au bain-marie les nombreux tubes Field qui se rattachent à la vasque supérieure, de manière à entretenir la vaporisation.

Lorsque le titre de la dissolution sodique s'est trop abaissé, et que l'échauffement correspondant cesse d'être suffisant pour maintenir dans le compartiment supérieur la pression voulue, on évacue ce liquide au dehors, à l'aide d'un jeu de pression analogue à celui des *monte-jus*, et on le remplace par une nouvelle charge suffisamment concentrée. Puis on rapproche de nouveau cette liqueur par l'application de la chaleur d'un foyer fixe, dans lequel on utilise aussi complètement que possible la température des gaz brûlés, en opérant par échelons.

On remarquera que cet appareil remplit les fonctions de condenseur en même temps que celles de générateur.

**1071** — *Chaudière à eau surchauffée de Lamm et Francq.* — Un moyen plus simple que le précédent, bien que comportant de moindres provisions d'énergie, a été proposé par le docteur Lamm, et perfectionné par M. Léon Francq<sup>(1)</sup>.

*économique des machines*, 1884, p. 21; 1885, p. 190. — *Engineering*, 27 février 1885, p. 225. — Haton de la Goupillière. *Revue des travaux scientifiques*, t. IV, p. 265.

<sup>(1)</sup> Francq (*La locomotive sans foyer*, in-8°. — *Revue industrielle*, 1880, p. 46, 48, 69). — *Génie civil*, t. XX, p. 300. — Poillon. *Les locomotives sans foyer*, in-18. — Tresca. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XCVIII, p. 1091. — Ulens. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1876, t. II, p. 1. — Flourens. *Société industrielle du nord de la France*, p. 1876. — Locomotive Francq et Mesnard. *Moniteur industriel*, 9 février 1892, p. 44. — Richard. *La chaudière locomotive*, in-4°, p. 586. — *Rapport de la Société néerlandaise de tramways*, Chaix, 1888. — Sauvage. *Annales*

Il consiste à enfermer une certaine quantité d'eau dans un corps cylindrique fortement constitué, et à la charger de calorique en la mettant en rapport avec la vapeur que fournit une chaudière fixe. Lorsque les deux récipients sont arrivés à l'équilibre de pression et de température, on interrompt la communication, et la locomotive est prête à partir (fig. 660).

La pression variera, bien entendu, depuis le maximum des pre-

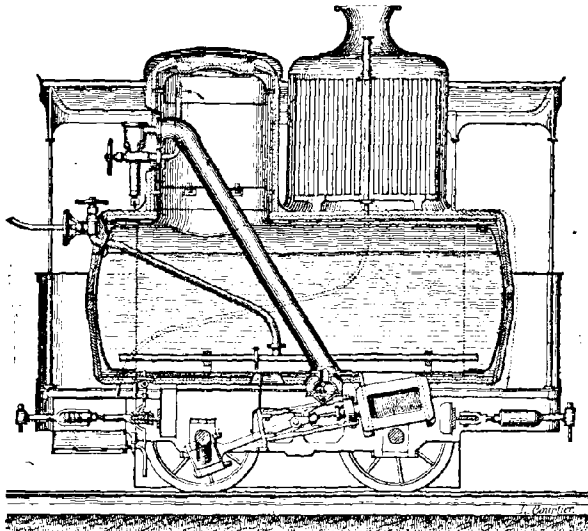


Fig. 660. — Locomotive sans foyer Lamm et Franck (coupe verticale).

miers instants jusqu'au degré final, où l'énergie est presque complètement épuisée. Cependant le moteur ne saurait s'accommoder d'un pareil régime. L'emploi d'un détendeur (n° 1104) s'impose donc. On fonctionne ordinairement à une température d'environ 200 degrés. Elle correspond à une tension de 16 kilogrammes,

*des mines*, novembre 1890, p. 590. — Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 485. — *Génie civil*, t. III, p. 148, 174. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 545. — *Annales des ponts et chaussées*, 1874, 1<sup>er</sup> sem., p. 405; 1875, 2<sup>e</sup> sem., p. 353; 1878, 2<sup>e</sup> sem. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 11 mars 1892. — *Portefeuille économique des machines*, 1885, p. 4; 1886, p. 150. — *Les Mondes*, t. LI, p. 9. — Schæffler (*Railroad Gazette*, 25 août 1877. — *Engineering News*, février 1879). — *The Engineer*, 20 février 1874, p. 135. — Birk. *Die feuerlose Locomotive*, Vienne, 1885, in-8°.

que le régulateur de pression ramène à 3 ou 5 kilogrammes aux cylindres. Une tonne d'eau chaude, en abaissant ainsi sa température du chiffre de 200 à celui de 150 degrés, peut fournir à la vaporisation de 145 kilogrammes.

Le récipient est soigneusement enveloppé de matières calorifuges, pour éviter la déperdition de la chaleur motrice. La vapeur se sèche en traversant un tube immergé dans le bain surchauffé.

**1072** — *Chaudière à huile.* — On a proposé de chauffer au moyen d'un bain-marie d'huile portée à 250 degrés, un petit récipient rempli d'eau, qui atteindrait dans ces conditions une pression d'environ 25 atmosphères. Un détendeur ramènerait à des tensions plus ordinaires sur le piston.

Le but d'une telle combinaison serait de restreindre les conséquences d'une explosion éventuelle, en raison du faible volume d'eau renfermé dans un tel générateur. Mais nous avons rencontré à cet égard, sous le nom d'inexplosibles, des solutions bien plus pratiques.

## CHAPITRE LVIII

### DÉTAILS DES GÉNÉRATEURS

#### § 1

#### FOYER

**1073** — *Porte du foyer.* — La porte du foyer<sup>(1)</sup> doit offrir des dimensions suffisantes pour le service, mais strictement, afin de diminuer l'importance du refroidissement qu'occasionne son ouverture. Le vide présente 22 à 35 centimètres de hauteur, sur 35 ou 40 de large. On en fait aussi de plus grandes à deux battants.

Cette porte est en fonte (fig. 661, 662). Elle est souvent composée de deux plaques, avec un passage d'air ménagé entre elles pour les refroidir. On doit employer une fermeture à clenche et mentonnet, afin d'éviter l'ouverture produite par une pression intérieure, et de prévenir, en cas d'accident, la projection d'un torrent d'eau bouillante et de vapeur.

Pour éviter le coup de froid que détermine dans l'intérieur l'ouverture de la porte, on peut disposer devant celle-ci un boulet suspendu à une chaîne qui passe sur des poulies et s'attache au registre. La présence de cet obstacle empêche l'ouverture, jusqu'à ce que le chauffeur l'ait remonté, en abaissant par cela même le registre.

(1) Portes de foyer : HENDERSON. *Engineering*, 22 avril 1881, p. 409. — HENNESSY. *American machinist*, 9 juillet 1887, p. 7.

Pechar. *Die Lokomotiv Feuerbüchse*, 1884, Vienne.

On a également imaginé des connexions directes entre ce dernier et la porte du foyer (\*).

Cette porte métallique est quelquefois remplacée par un tas de menu qui bouche l'ouverture, et à travers lequel on peut, à volonté, ménager une certaine filtration d'air. Quand ce combustible est carbonisé, on le pousse dans le feu, et on le remplace par une nouvelle charge.

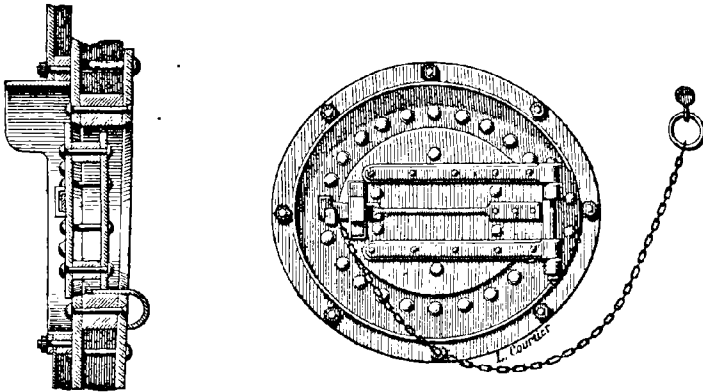


Fig. 661 et 662. — Porte de foyer (coupe et élévation).

**1074** — *Boîte à feu.* — Entre la porte et la grille, se trouve un seuil destiné à éloigner celle-ci, en vue de protéger la première. On lui donne une pente de  $\frac{1}{6}$  vers l'arrière.

A l'autre extrémité de la grille, se trouve le pont ou autel. Il sert à maintenir le combustible, et détermine dans la flamme une courbure qui contribue à en assurer le brassage.

**1075** — La boîte à feu doit présenter au moins 0<sup>m</sup>,45 de hauteur au-dessus de la grille. Cette dimension dépasse même souvent 1 mètre. Une certaine élévation contribue à procurer une combustion plus complète.

Les parois du foyer sont entourées d'eau par dessus et latéra-

(\*) Registres fermant la cheminée avant d'ouvrir le foyer : BEISSON. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne.* — THAUVOYE et DERONCOURT. Hirsch. *Rapport sur l'Exposition de 1878*, p. 161.

lement sur 0<sup>m</sup>,25 à 0<sup>m</sup>,50 d'épaisseur (n° 981). Celle-ci se trouve réduite dans les locomotives par le manque de place.

La boîte à feu se construit le plus souvent en cuivre, métal d'une fabrication plus sûre que celle de l'acier, et en même temps moins sensible que ce dernier à l'action des gaz sulfureux, ainsi qu'aux variations de température. Cependant les locomotives américaines ont fréquemment des foyers en acier.

**1076** — Sous la grille se trouve le cendrier. Sur les locomotives, il est fermé par le bas et ouvert du côté de la marche, afin que l'air s'y engouffre en raison de son mouvement relatif, de manière à augmenter le tirage.

Dans les chaudières fixes, le cendrier est souvent recouvert d'une couche d'eau, qui sert à éteindre les escarbilles, à réduire pour le chauffeur la fatigue du rayonnement, et à lui fournir par la réflexion l'image de son feu par dessous.

On règle le tirage en modifiant le degré d'ouverture des portes du cendrier.

**1077** — *Registre*. — Un second moyen d'influencer le tirage se trouve placé à l'autre extrémité de l'appareil. C'est le *registre*, dont la manœuvre permet de faire varier le passage offert aux gaz dans le carneau ou dans la cheminée.

Cet organe peut être *levant* ou *tournant*. Ce dernier dispositif est préférable. On le met en mouvement à l'aide de tringles, de chaînes et de poulies.

Nous venons de voir que l'on doit effectuer sa fermeture d'une manière absolue au moment de l'ouverture des portes, soit à la main, soit à l'aide d'une commande mécanique. Il y a lieu d'intervenir également, soit par l'action directe du chauffeur, soit automatiquement<sup>(1)</sup>, pour subordonner le degré d'ouverture aux variations de la marche.

<sup>(1)</sup> Registres-régulateurs : CURTIS. *American machinist*, 2 mai 1885, p. 5; 21 avril 1888, p. 5. — GUILLEMAUT. *Cinquième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Lyon, 1881, p. 9. — HOFFMANN. *American machinist*, 8 octobre 1887, p. 6. — KELLAM. *Ibidem*, 8 juillet 1882, p. 8. — MAC DONALD et TOWNSEND. *Scientific american*, 27 févr. 1886, p. 136. — POINDRON. *Cinquième Congrès des Ingénieurs*



Le registre *pyrométrique* Cleuet <sup>(1)</sup> est mis en action par l'influence de la température des gaz chauds. Un fléau horizontal en fonte porte à l'une de ses extrémités le registre, et à l'autre un contrepoids. Celui-ci est suspendu à une tige articulée, qui manœuvre une aiguille devant un cadre. Un tirant en cuivre agit sur le fléau d'une manière variable, en raison de la différence des dilatactions de ce métal et de la fonte.

Le registre automatique Deschamps <sup>(2)</sup>, ainsi que celui de la chaudière Belleville <sup>(3)</sup> empruntent leur mode de mise en mouvement aux variations de pression de la chaudière. Une série de rondelles Belleville fléchit plus ou moins sous l'effort de cette pression

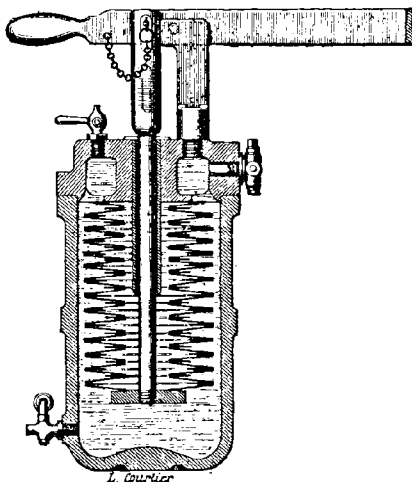


Fig. 665. — Régulateur de pression Belleville.  
(Coupe verticale).

(fig. 665), et sa déformation, transmise au dehors par une tige, actionne le registre à l'aide d'une transmission qui en amplifie la valeur.

La manœuvre de cet organe sert, à l'occasion, pour faire cesser un ronflement sonore et très fatigant, qui tient à l'harmonie de certaines proportions entre les divers éléments de la colonne gazeuse. On détruit cet accord en modifiant la section d'écoulement.

*en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Lyon 1881, p. 10. — RANSAY. *The Engineer*, 18 juillet 1890, p. 55. — RAY. *Annales industrielles*, 25 octobre 1891, p. 551. — REYET. *Cinquième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Lyon, 1881, p. 8. — ROBERTSON. *American machinist*, 17 mars 1888, p. 8. — SPENCER. *Ibidem*, 2 janvier 1886, p. 2. — WHITE et CARSON. *Chronique industrielle*, 15 mai 1888, p. 255.

<sup>(1)</sup> Hirsch. *Rapport sur l'Exposition de 1878*, p. 160.

<sup>(2)</sup> *Ibidem*, p. 160.

<sup>(3)</sup> Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 615.

## § 2

**GRILLE**

**1078** — *Généralités.* — La superficie de la grille <sup>(1)</sup> d'un générateur est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle à la consommation de combustible, et par suite à la surface de chauffe.

On ne saurait passer moins de 15 kilogrammes de charbon par heure et par mètre carré de grille, sans quoi la combustion marcherait mal. Une allure lente consomme de 15 à 30 kilogrammes de combustible; une marche moyenne : 40 à 80; un fonctionnement actif : 100 à 120. On ne franchit guère cette limite avec le tirage naturel; mais quand on emploie l'aspiration par l'échappement, et surtout le vent forcé proprement dit (n° 1095), on atteint, et l'on dépasse même les chiffres de 250 kilogrammes dans les locomotives, 400 pour les torpilleurs, 650 sur certains yachts rapides.

**1079** — Connaissant dans chaque cas la puissance en chevaux, ainsi que la consommation de combustible par cheval-heure sur laquelle on croit pouvoir compter, on en déduira la surface de grille, après avoir choisi parmi les nombres précédents celui qui paraîtra se rapporter le mieux aux conditions du projet.

Supposons par exemple qu'il s'agisse d'une machine de 100 chevaux, consommant 4 kilogrammes de charbon par cheval-heure, en admettant que l'on puisse passer 100 kilogrammes de combustible

<sup>(1)</sup> Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 595. — Essai comparatif de diverses grilles. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1<sup>re</sup> série, t. XIX, p. 161. — Expériences de Kinnear Clarke. *Proceedings of the Institution of civil Engineers*, t. XII, 1852; XLVI, 1876. — Longridge. *Ibidem*, t. LII, 1878. — *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, juin 1875. — Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction Richard, p. 624. — Havrez. *Annales du Génie civil*, août-septembre 1874. — Expériences de Geoffroy. *Couche. Voie, matériel roulant. exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 35. — *Railway machinery*, p. 158. — *Steam collieries Association of Newcastle on Tyne*, 1857. — Lavington et Fletcher. *South Lancashire and Cheshire coal Association*, 1869. — *Royal agricultural Society of England*, 1872. — Clark. *A manual of rules tables and data for mechanical Engineers*, 1876.

par mètre carré de grille et par heure, il faudra pour les 400 chevaux 400 kilogrammes de combustible, et par suite 4 mètres carrés de surface de grille.

**1080** — On peut aussi rattacher directement ce calcul à la surface de chauffe. Supposons par exemple que 1 kilogramme du combustible adopté soit capable de volatiliser 6 kilogrammes d'eau; que le type de chaudière que l'on a en vue puisse vaporiser 25 kilogrammes à l'heure par mètre carré de surface de chauffe, et permette de passer 100 kilogrammes de houille à l'heure par mètre carré de grille. On fera le raisonnement suivant :

1° A 1 mètre carré de grille correspondent 100 kilogrammes de combustible; 2° chacun de ces kilogrammes de charbon vaporise 6 kilogrammes d'eau : 1 mètre carré de grille correspond donc à 600 kilogrammes d'eau; 3° chacun de ces kilogrammes se rapporte à  $\frac{1}{25}$  de mètre carré de surface de chauffe : 1 mètre carré de grille correspond par suite à  $\frac{600}{25}$  ou 24 mètres carrés de surface de chauffe. Finalement la surface de grille devra être égale à  $\frac{1}{24}$  ou environ 4 % de la surface de chauffe.

**1081** — Le rapport suivant lequel il y a lieu de répartir le plein et le vide dans la superficie adoptée pour la grille, constitue l'un des éléments essentiels de la question. Il faut donner un total de vide suffisant pour laisser affluer l'air suivant la proportion nécessaire; et l'on doit, d'autre part, le fractionner de manière que la largeur de chaque intervalle ne laisse pas filtrer une trop grande quantité de menu et d'escarbilles. Cette perte, qui atteint au moins 5 %, augmente avec la prédisposition du charbon à donner du menu et à s'effriter sous l'impression de la chaleur, avec l'usure des barreaux, avec la trépidation des locomotives. Le rapport le plus convenable du plein au vide dépend donc dans chaque cas de la nature du combustible.

On donne en général, pour les chaudières fixes, un quart de vide

et trois quarts de plein. On va jusqu'à l'égalité dans les locomotives.

La largeur absolue des intervalles varie de 6 à 12 millimètres; celle du plein, de 12 à 20 millimètres.

Le total du vide doit, autant que possible, se retrouver comme un minimum dans la section du cendrier, des carneaux, de la cheminée.

**1082** — *Grille ordinaire.* — Le contour des grilles est la plupart du temps rectangulaire. La forme circulaire nécessite des barreaux de rechange de diverses dimensions, ou le remplacement de la grille entière dès la moindre avarie.

La longueur du rectangle ne doit pas dépasser 1<sup>m</sup>,50 ou comme extrême limite 2 mètres, afin de ne pas excéder les moyens d'action de l'ouvrier. Il serait sans cela disposé à négliger le fond de la chauffe, où s'établiraient par suite des courants nuisibles d'air froid.

La largeur reste inférieure à 1 mètre, si le foyer n'a qu'une seule porte, afin de permettre au chauffeur de travailler dans les angles.

**1083** — La grille est formée de barreaux en fonte, ou quelquefois en fer (fig. 664, 665).

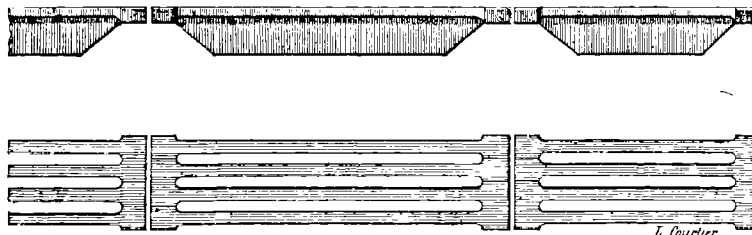


Fig. 664 et 665. — Grille (plan et élévation).

Ils sont indépendants, pour faciliter le dégrassage, et permettre de jeter bas le feu en cas de danger. Un *jette-feu* est indispensable. Souvent, dans le but de ne pas trop compliquer le service, on fait venir de fonte les barreaux par groupes de deux, trois ou quatre. Si la longueur approche de 2 mètres, on la compose de deux mises indépendantes, supportées par une barre transversale.

Pour maintenir avec précision la dimension des vides, on élargit

les barreaux à leurs extrémités, et au besoin en leur milieu, de manière que les *talons* soient jointifs, sauf le jeu nécessaire aux dilatations <sup>(1)</sup>.

**1084** — La grille Erskine <sup>(2)</sup> a des barreaux ondulés, afin d'augmenter par ces zigzags les contacts rafraîchissants de l'air. Dans le type Belleville, on les fait alterner avec des barres rectilignes. Les barreaux ondulés de Knœppel <sup>(3)</sup> sont en outre perforés (fig. 666). Les constructeurs sont arrivés dans cette voie à de très grandes complications <sup>(4)</sup>.

La section transversale d'un barreau est souvent trapézoïdale,

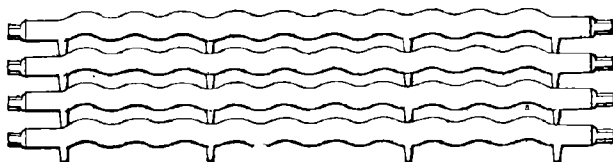


Fig. 666. — Grille à air Knœppel (plan).

avec sa grande base en haut, afin de faciliter le dégagement et la chute des escarbilles, une fois qu'elles sont engagées dans l'un des intervalles.

La hauteur est notable (jusqu'à 0<sup>m</sup>,50 dans la grille Corbin), pour donner plus de prise au refroidissement par l'air.

Dans la grille Desgouttes <sup>(5)</sup>, le profil est bombé en son milieu. L'inventeur pense faciliter par là le chargement sur le dos d'âne, et la répartition latérale du combustible.

**1085** — *Grilles à air*. — On a cherché des moyens de refroidissement plus actifs que ces divers artifices dans l'emploi de

<sup>(1)</sup> On aura soin de tenir compte de ce que le coefficient de dilatation augmente d'environ 3 à 4 % après des recuits successifs.

<sup>(2)</sup> Richard. *La chaudière locomotive*, p. 75.

<sup>(3)</sup> *Ibidem*.

<sup>(4)</sup> Grilles BURKE, GEOGEGAN, HENZEL, HIBBERT et COOKE, MOUSSERON, NEWBOLD (Richard. *La chaudière locomotive*, p. 74).

<sup>(5)</sup> *Ibidem*, p. 82.

barreaux creux<sup>(1)</sup>, à l'intérieur desquels on fait circuler de l'air. Ainsi échauffé à l'occasion de l'influence conservatrice qu'il exerce sur le métal, celui-ci se trouve lui-même mieux préparé pour la combustion. On peut à cet égard laisser les courants indépendants, ou bien associer les barreaux en serpentins. La conservation de ces derniers est plus nette avec le premier mode, mais alors le fluide élève peu sa température.

L'emploi de ces engins est surtout utile avec certains combustibles, tels que les anthracites, qui développent une température très élevée. Il s'accommode bien du *vent forcé* (n° 1095), qui facilite le passage du courant à travers ces tubes étroits.

C'est dans cet ordre d'idées que l'on fait traverser les barreaux de la grille Perkins tout à la fois par l'air et par des jets de vapeur, pour y activer la circulation.

**1086** — *Grilles à eau*. — On emploie également comme un réfrigérant plus actif l'eau, dont la température se trouve utilisée au moment où elle pénètre dans la chaudière.

Avec le système Michel Perret<sup>(2)</sup>, les barreaux sont munis de nervures très saillantes, qui plongent dans un bain liquide placé sur la sole du cendrier.

Pour la plupart de ces grilles<sup>(3)</sup>, telles que le type Ingliss, on reproduit l'emploi des barreaux creux parcourus par l'eau d'alimentation. -

(1) Grilles à air : DOBSON. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 72. — DUJAY (Génie civil, t. VII, p. 393. — *Revue industrielle*, 1<sup>er</sup> septembre 1887, p. 348. — *Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. XII, p. 126). — *Elephant. Engineering*, 16 avril 1880, p. 302. — HILL. Richard et Baclé. *Guide du mécanicien conducteur de locomotive*, p. 23. — HOLLING DRAKE. *Revue industrielle*, 5 juillet 1890, p. 265. — HOOPER. *American machinist*, 4 décembre 1886, p. 7. — MILLER. *Scientific american*, 3 octobre 1885, p. 210. — RONCOURT. *Guide manuel du chauffeur*, p. 46. — SMITH. *Engineering*, 1875, t. I, p. 348.

(2) *Revue industrielle*, 17 mars 1880, p. 119. — *Bulletin de la Société industrielle de Rouen*, 1886, p. 74. — *La Nature*, 10 mars 1885, p. 22. — *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'Industrie minérale de Saint-Etienne*, juin 1879, p. 154. — *Neuvième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Paris, 1886, p. 141.

(3) Grilles à eau : ALLEN. Clarke. *Recent practice*, p. 30. — BOBEIKO. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 69. — CROPPER. *Iron*, 6 septembre 1879, p. 291. — ELLIS. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 69. — EVANS. *Ibidem*. — MICHEL et BOISSELIER. *Ibidem*. —

**1087** — *Grilles mécaniques*. — Au bout de trois ou quatre heures, suivant la qualité du combustible, il devient ordinairement nécessaire de procéder au décrassage des grilles, afin de les débarrasser des *mâchefers* qui les encombrent. On désigne sous ce nom une sorte de scorie liquide, qui provient de la fusion d'une partie des cendres et qui se soude au métal rougi.

Cette opération est des plus pénibles. On a cherché à la faciliter

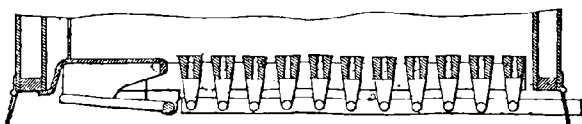


Fig. 667. — Grille à secousses (coupe verticale).

à l'aide de certains mouvements imprimés mécaniquement aux barreaux (fig. 667, 668). Dans la grille Wackernie <sup>(1)</sup>, on communique à ces derniers des balancements par séries paire ou impaire. Ceux de la grille Holmes et Walker <sup>(2)</sup> reçoivent des secousses.

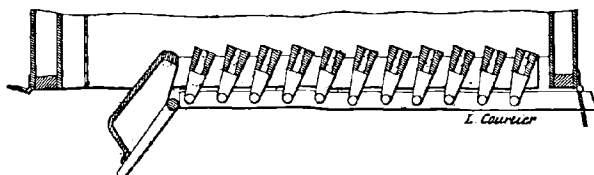


Fig. 668. — Grille à secousses (coupe verticale).

La grille Schmitz <sup>(3)</sup> est formée de barreaux cylindriques percés de trous. On leur imprime, à l'aide de roues dentées, une demi-révolution sur eux-mêmes.

Ces appareils sont connus sous le nom de *grilles mécaniques* <sup>(4)</sup>,

MOYENSEN. *Ibidem*. — ROBINSON. *Ibidem*. — SHARPE. *Engineering*, 23 janvier 1885, p. 84. — WEBER. *Ibidem*, 4 octobre 1872.

<sup>(1)</sup> Richard. *La chaudière locomotive*, p. 79. — Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 423. — *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 586.

<sup>(2)</sup> Haton de la Goupillière. *Annales des mines*, août 1879, p. 164. — *Engineering*, 1876, t. I, p. 244.

<sup>(3)</sup> Clérault. *Annales des mines*, 7<sup>e</sup> série, t. XIII, p. 527. — Hirsch. *Rapport sur l'Exposition de 1878*, p. 152.

<sup>(4)</sup> *Manuel d'Heusinger von Waldegg*. — *Catéchisme de Forney*. — *Revue univer-*

et il en existe les types les plus divers <sup>(1)</sup>. Les uns sollicitent doucement les surfaces inférieures de la charge, afin de faire tomber les cendres sans opérer un bouleversement complet ; d'autres agissent énergiquement pour briser les mâchefers <sup>(2)</sup>.

### § 3

#### FUMIVORITÉ

**1088** — *Généralités*. — De tous temps on s'est préoccupé de la suppression de la fumée <sup>(3)</sup>. C'était, au point de vue mécanique, dans la pensée de récupérer les calories qui correspondent au carbone ainsi entraîné à l'état fuligineux. Mais une connaissance plus précise de la question a montré que cette économie serait minime, et que les moyens proposés occasionnent en sens inverse des pertes plus sensibles. On en est arrivé à considérer comme économique la marche à fumée noire.

Toutefois sous d'autres points de vue la question a gardé son

*selle des mines et de la métallurgie*, 1<sup>re</sup> série, t. VI, p. 343. — *The Engineer*, 24 octobre 1890, p. 353. — *American machinist*, 4 septembre 1886, p. 7 ; 21 août 1890, p. 11.

<sup>(1)</sup> Grilles mécaniques : BOLZANO (Chabaud. *Bulletin de la Société de l'Industrie minière de Saint-Étienne*, 2<sup>e</sup> série, t. III, p. 159. — *The Engineer*, novembre 1872]. — BRUNS. *Engineering*, 25 septembre 1887, p. 337. — DALEBAC. VIGREUX. *Revue technique de l'Exposition de 1889*, n° 2, p. 69. — DILWINN et HENDERSON. *Engineering*, 1874, p. 214. — DOUGALL. *Ibidem*, 18 mars 1881, p. 281. — DUNNING. *Scientific american*, 18 février 1888, p. 99. — HELIX. *Annales industrielles*, 26 juillet 1885, p. 106. — HOLROD. *The Engineer*, 1877, p. 178. — LIVET. *The colonies and India Suppl.*, 29 décembre 1882, p. 35. — MAC DOUGALL. *Annales industrielles*, 26 juillet 1885, p. 108. — PRICE. *Scientific american*, 10 mai 1884, p. 291. — PROCTOR. *Annales industrielles*, 26 juillet 1885, p. 110. — RONEY (*The Engineer*, 19 septembre 1890, p. 252. — *Scientific american supplement*, 27 septembre 1890, p. 12 280). — SCHULTZ ROBERT. *Annales industrielles*, 26 juillet 1885, p. 110. — WYE WILLIAM. Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 428.

<sup>(2)</sup> Grilles mécaniques : BANNISIER, BESSEMER, BROUSSAS, CHANTER et ANNAIN, CLAY, DELÉVAQUE, GOUGET, HALL, HAMPTON, HOLT, HOWE, KNOWELDERS, POOLE, RYDER, SÉBILLE, SMITH (Richard. *La chaudière locomotive*, p. 77).

<sup>(3)</sup> Haage. Sur les foyers fumivores. *Annales industrielles*, 26 juillet 1885, p. 104. — Kuapp. *Traité de chimie industrielle*. Traduction Mérijot et Debize, t. II, p. 350. — Mille. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1855, p. 132. — Rapport Dubied et Burnat. *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*. — *Portefeuille économique des machines*, 1869, pl. 22, 25. — *Annales des mines*, 4<sup>e</sup> série, t. XI, p. 149 ; 5<sup>e</sup> série, VIII, 101 ; XIII, 175 ; 6<sup>e</sup> série, II, 345, 365 ; IV, 127, 197, 204, 213, 511, 514 ; V, 175 ; VI, 315 ; IX, 307. — Flimmer. *Sur la combustion sans fumée*, Leipzig, in-8°, 1883.



importance. La fumée reste un grave inconvénient pour les voisins d'une usine, pour les voyageurs qui suivent la locomotive, pour le service à bord des navires de guerre, que ce panache noir signale en outre à l'ennemi. Les conseils d'hygiène n'ont cessé d'en réclamer la suppression, et l'administration, dans les divers pays, a édicté à cet égard un grand nombre de règlements. Malheureusement les difficultés de la question ont beaucoup contribué à les tenir en échec (1). D'ailleurs la fumée des établissements industriels entraîne bien d'autres inconvénients que ceux des matières fuligineuses (2).

**1089**—Les praticiens sont aujourd'hui d'accord pour reconnaître que le meilleur des moyens de fumivorté consiste dans l'emploi d'un bon chauffeur, qui se conforme attentivement aux principes énoncés ci-dessus (n° 968).

Parmi les procédés artificiels, on peut signaler d'abord le lavage des fumées. Dans ce principe, on faisait parcourir au courant gazeux une galerie suffisamment longue sous une pluie assez abondante. Ce moyen n'a pas réussi. Il était coûteux, encombrant, compliqué, et avait pour premier résultat de ralentir le tirage.

Les autres systèmes (3) peuvent être répartis en deux catégories,

(1) L'article 19 du décret du 25 janvier 1865 avait prescrit que le foyer des chaudières de toute catégorie devait brûler sa fumée. Celui du 30 avril 1880, qui l'a abrogé, a omis intentionnellement toute disposition analogue.

(2) Schröder et Reuss. *Les dommages causés à la végétation par les fumées*, Berlin, in-4°, 1883.

(3) Fumivores : ADAM. *Annales industrielles*, 19 juillet 1885, p. 86. — ARGAND. Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 415. — ARNOTT. Denfer. *Traité des chaudières à vapeur*, p. 11. — BEAUFUMÉ (*Ibidem.*, p. 13. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 415). — BOTTYER. *Annales industrielles*, 19 juillet 1885, p. 87. — BOURNE. Bienaymé. *Les machines marines*, p. 510. — BRENTON. Denfer. *Traité des chaudières à vapeur*, p. 11. — CHODZKO. *Ibidem.* — CLARKE. Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction Richard, p. 296. — COHEN. *Génie civil*, t. XVII, p. 13; XX, 268. — CRISER (*Sixième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Paris, 1882, p. 41. — *Neuvième Congrès*, Paris, 1886, p. 80. — BAER. *Bulletin de l'Association amicale des Élèves de l'École des mines de Paris*, 1885). — DANCET (*Ser. Physique industrielle*, t. I, p. 427. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 455). — DONNELEV. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, novembre 1887, p. 800. — DOUGLAS. Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 485. — FLAMMERY. *Proceedings of the Institution of civil Engineers*, avril 1882, p. 261. — FONTENAY. *Ser. Physique industrielle*, t. I, p. 446. — GARDNER. Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. III, p. 161. — GRAR. *Ser. Physique industrielle*, t. I, p. 440. — HASECOSTER.

suyant qu'on s'attache à influencer directement la charge solide à l'aide de moyens mécaniques, ou la masse gazeuse par des procédés se rattachant à la ventilation.

**1090** — *Chargeurs mécaniques*. — La première classe de ces appareils est celle des *chargeurs mécaniques* (<sup>1</sup>). On s'y propose de réaliser automatiquement, ou de faciliter tout au moins l'application par le chauffeur des principes de chargement que nous venons de rappeler (n° 968).

La *chaîne sans fin* de Juckes ou de Tailfer (<sup>2</sup>), qui a été souvent

*Scientific american*, 6 novembre 1886, p. 290. — HEISER. *Génie civil*, 6 décembre 1884, p. 92. — HOLMES. Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 432. — HOPCRAFT. *La Métallurgie*, 13 février 1889, p. 173. — HOWATSON. Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 432. — JENKINS. *Ibidem*, p. 435. — LEE. *Ibidem*, p. 455. — LÉFROY. Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 448. — LOCAP. *Revue industrielle*, 23 décembre 1886, p. 521. — LOWE. *American machinist*, 18 septembre 1886, p. 1. — MAHONY. *Ibidem*, 23 juillet 1881, p. 1. — MALMOR et PRONIER. Denfer. *Traité des chaudières à vapeur*, p. 15. — MILLER. *Scientific american*, 1<sup>er</sup> février 1890, p. 68. — MOLINOS et PRONIER. Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 451. — MULLER. Denfer. *Traité des chaudières à vapeur*, p. 15. — NÉPILLY. *Quatrième session du Congrès international des chemins de fer*, question X, p. 6. — PAIS. *Scientific american*, 2 avril 1887, p. 217. — PALAZOT (Denfer. *Traité des chaudières à vapeur*, p. 11). — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 415). — PARKES. *Ibidem*. — PESLIN. *Scientific american*, 22 août 1885. — PEYTON. *Iron*, 9 janvier 1880, p. 22. — PLAYER (Denfer. *Traité des chaudières à vapeur*, p. 11. — Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 431). — RAVEN. *Chronique industrielle*, 4 avril 1886, p. 162. — RESSICKE. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, novembre 1887, p. 805. — SICKEL. *Scientific american supplement*, 1<sup>er</sup> février 1890, p. 11739. — SILVESTER. *Engineering*, 24 septembre 1886, p. 327. — SMITH. *Scientific american supplement*, 19 janvier 1884, p. 6698. — SPENCER (*Proceedings of the Institution of civil Engineers*, 1890-91. — *Engineering*, 6 février 1891, p. 172). — THIERRY (Liedieu, *Nouvelles machines marines*, t. III, p. 172. — Denfer. *Traité des chaudières à vapeur*, p. 15. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 415. — Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 442). — THOMAS. *Ibidem*, p. 446. — TISSOT VERDIÉ. *Quatrième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Rouen, 1881, p. 47. — TURCK. Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 415. — WELTINGER. *American machinist*, 20 août 1887, p. 7. — WILLIAMS. Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction Richard, p. 296. — WILLOUGHBY. *The Engineer*, 15 mai 1891, p. 395. — WRIGHT. *Scientific american*, 18 juillet 1885, p. 34.

(<sup>1</sup>) Chargeurs automatiques : MAC-MILLAN. *Revue industrielle*, 14 juillet 1880, p. 274. — PROCTOR. *Ibidem*, 22 novembre 1882, p. 469. — SCHULTZ, ROEBER et SCHLEMBERGER (*Septième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Bordeaux, 1882, p. 59. — *Neuvième Congrès*, Paris, 1886, p. 44). — SINCLAIR. *Ibidem*, p. 52. — VICARS. *Ibidem*, p. 48.

Hildebrandt. *Sur les dispositions mécaniques pour le chauffage des chaudières à vapeur*, Berlin, in-8°, 1880.

(<sup>2</sup>) Callon. *Cours de machines*, t. II, p. 450. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les ma-*

imitée, procède lentement et d'un mouvement continu de l'avant à l'arrière du foyer (fig. 669). On y charge le combustible en amont, et il se transporte progressivement vers l'autel, où la chaîne se déroule en dessous à l'aide de ses articulations. Le combustible traverse ainsi successivement les diverses phases propices à sa meilleure utilisation. Malheureusement les charnières s'encrassent, les chaînons deviennent cassants, et cette allure constante se prête

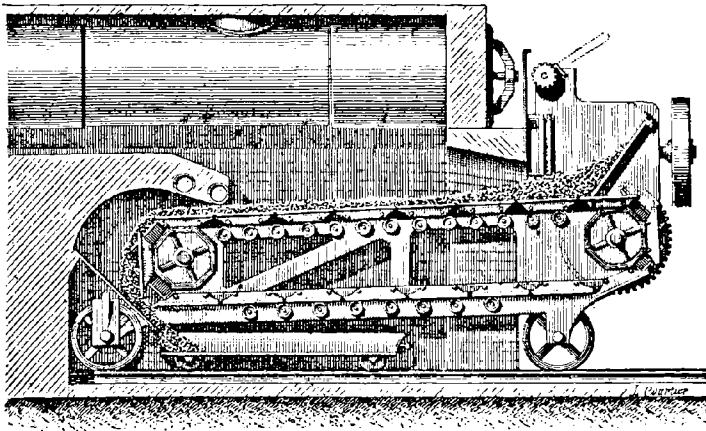


Fig. 669. — Grille sans fin Taillfer (coupe longitudinale).

mal aux coups de collier. Ce système est coûteux, et il exige pour les chauffeurs une éducation spéciale.

La grille circulaire rotative Hopcraft<sup>(1)</sup> poursuit un résultat analogue, d'une manière plus simple au point de vue mécanique. On charge toujours au même point de la circonférence, et la rotation lente de la grille autour de son centre fait traverser successivement à ce charbon les diverses phases de la combustion, qui se trouvent échelonnées à la périphérie.

**1091** — La *vis sans fin* de George<sup>(2)</sup> permettait d'alimenter les

*chines à vapeur*, t. I, p. 483. — Denfer. *Traité des chaudières à vapeur*, p. 41. — Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. III, p. 171.

<sup>(1)</sup> *Revue industrielle*, 25 mai 1889, p. 201. — *Chronique industrielle*, 10 avril 1889, p. 4071. — Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 439.

<sup>(2)</sup> Callon. *Cours de machines*, t. II, p. 431.

foyer de combustible frais par-dessous la masse incandescente, en faisant remonter progressivement les charges par la rotation de cette vis verticale.

Les *poussoirs mécaniques* de Duméry <sup>(1)</sup> remplissent la même fonction, avec moins de netteté théorique, mais plus d'efficacité réelle, bien qu'ils aient été également abandonnés. On charge sur les côtés d'une grille en bosse (fig. 670), et des poussoirs animés d'un mouvement pendulaire refoulent la charge vers le dos d'âne, en la faisant pénétrer sous la masse embrasée.

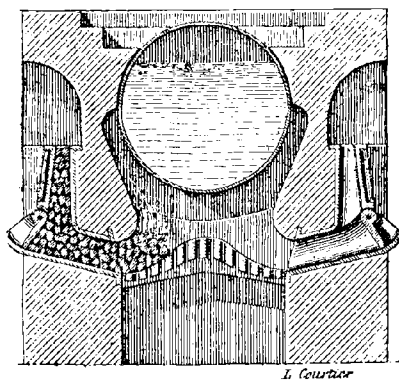


Fig. 670. — Fumivore Duméry (coupe verticale).

**1092** — *Grilles à gradins*. — La grille à gradins <sup>(2)</sup> nous présente un principe mixte, qui tient à la fois du mode de chargement et de celui de l'aération. Elle est disposée (fig. 671, 672) comme un escalier, dont les marches planes se recouvrent un peu en projection horizontale. Le combustible que l'on charge à la partie supérieure se distribue dans son ensemble suivant un plan incliné, tandis que l'air filtre horizontalement entre les divers degrés. Ce

<sup>(1)</sup> Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 426. — Ser. *Physique industrielle*, t. 1, p. 438.

<sup>(2)</sup> Grilles à gradins : CHOBRZINSKI et DE MARSILLY. Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 404. — FRANKEL. *Annales industrielles*, 26 juillet 1885, p. 44. — HANGEN. Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 428. — HAUPT. *Annales industrielles*, 26 juillet 1885, p. 104. — HEISER. *Ibidem*. — KUCH. *Ibidem*, p. 106. — LANG. Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. III, p. 171. — OTTO TUOST. *Revue technique des inventions modernes*, p. 920

dispositif convient surtout aux menus plus ou moins secs, qui

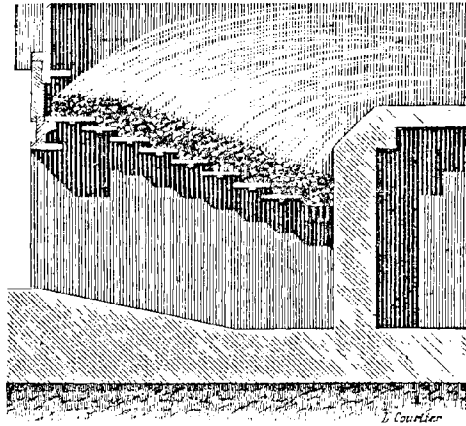


Fig. 671. — Grille à gradins (coupe verticale).

obstrueraient les vides des grilles ordinaires, ou bien passeraient

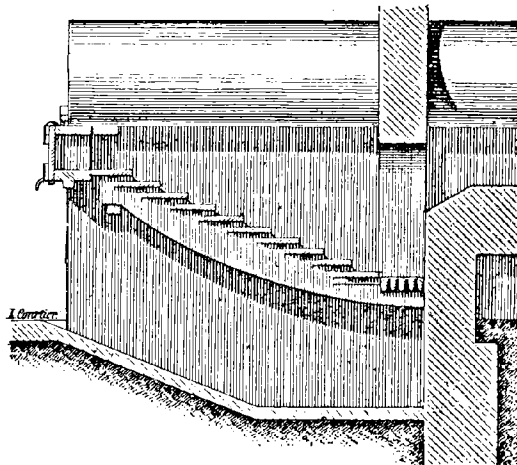


Fig. 672. — Grille Chobrzinsky et de Marsilly (coupe verticale).

au travers. Le chauffeur aide la descente progressive du charbon, au fur et à mesure de l'avancement de sa combustion.

Dans la *grille-pavillon* de M. Godillot (<sup>1</sup>), les barreaux ne sont plus rectilignes mais arqués, et le talus formé par le charbon prend la forme conique (fig. 675).

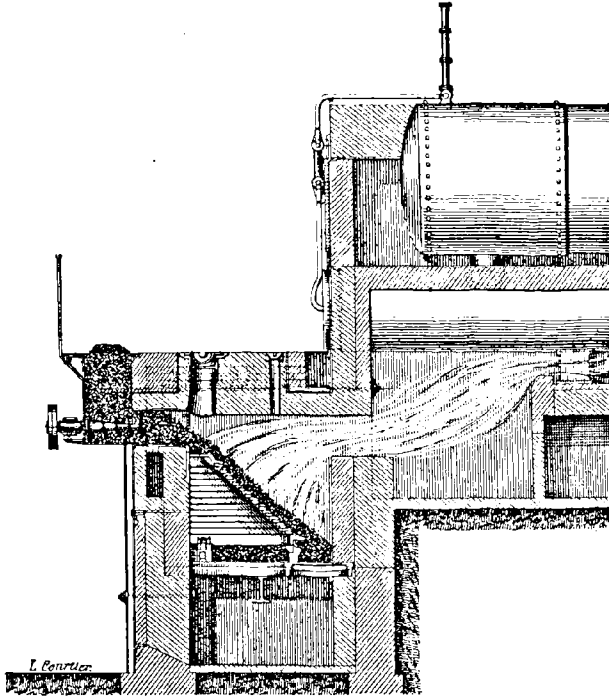


Fig. 675. — Grille Godillot (coupe verticale).

**1093** — *Fumivores pneumatiques*. — Certaines locomotives indiennes sont munies de l'*avant* de Carrick (<sup>2</sup>), destiné à rabattre sur le feu une lame d'air que laisse pénétrer la porte du foyer.

Le *foyer Tenbrinck* (<sup>3</sup>) utilise comme surface de chauffe un

(<sup>1</sup>) *Revue des appareils à vapeur*, 1<sup>er</sup> septembre 1885. — *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 525.

(<sup>2</sup>) Richard et Baclé. *Manuel du mécanicien conducteur de locomotive*, p. 25.

(<sup>3</sup>) *Annales industrielles*, 26 juillet 1885, p. 106. — Armengaud. *Publication industrielle*, 25<sup>e</sup> vol. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 457. — Bienaymé. *Les machines marines*, p. 511. — Denfer. *Traité des chaudières*, p. 11. — Couche (*Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 222. — *Emploi de la houille dans les foyers Tenbrinck*, in-8<sup>o</sup>). — *Septième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Bordeaux, 1882, p. 49. — *Neuvième Congrès*, Paris, 1886, p. 61.

obstacle analogue (fig. 674). On dispose dans la boîte à feu un bouilleur, qui a pour effet d'infléchir le torrent de la fumée distillée par la houille, en lui fermant l'accès direct des tubes de flamme, et lui donnant mieux le temps de se brûler. Ce bouilleur présente en même temps l'avantage de protéger la plaque tubulaire contre un

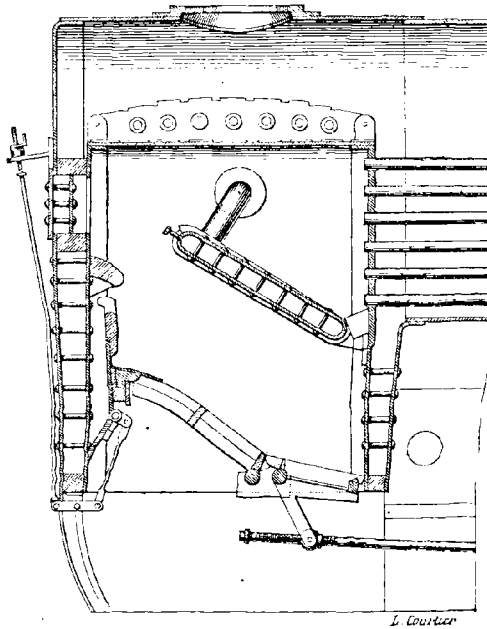


Fig. 674. — Foyer Tenbrink (coupe verticale).

coup de feu trop direct. Le chargement s'opère d'une manière à peu près continue, le charbon progressant peu à peu le long de la partie inclinée. Une lame d'air plongeante est admise au-dessus, pour brûler tous les gaz combustibles.

On s'est servi dans un but analogue <sup>(1)</sup> d'entretoises perforées de part en part <sup>(2)</sup> pour lancer, à 25 ou 30 centimètres au-dessus de la grille, de petits jets d'air destinés à oxyder les gaz combustibles.

<sup>(1)</sup> Richard et Baclé. *Manuel du mécanicien conducteur de locomotive*, p. 23.

<sup>(2)</sup> A ne pas confondre avec celles qui sont ouvertes seulement du côté du feu, dans un but tout différent (n° 981).

Cependant on y a renoncé en général, parce que le cuivre se corro-  
dait aux alentours.

**1094** — Dans le *fumivore Orvis* <sup>(1)</sup>, deux souffleurs à vapeur sont disposés sur les faces latérales du foyer, protégés le mieux possible contre l'ardeur du feu (fig. 675, 676). Ils déterminent un

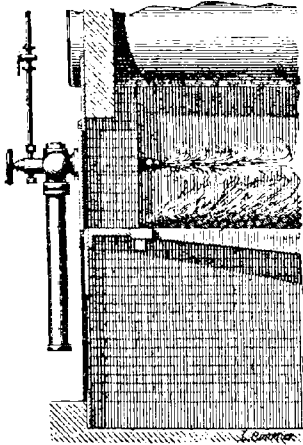


Fig. 675. — Fumivore Orvis.  
(Coupe longitudinale).

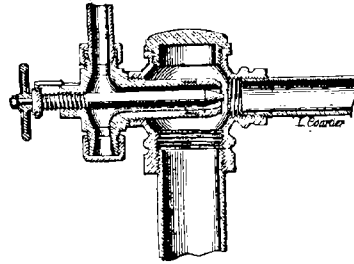


Fig. 676. — Fumivore Orvis.  
(Détail).

tirage énergique, que l'on règle suivant les besoins de la combustion.

Le *fumivore Wéry* <sup>(2)</sup> envoie dans la cheminée, au moyen d'un orifice en couronne, une injection d'air froid qui enveloppe comme une ceinture la masse gazeuse ascendante, et a pour effet d'amortir l'intensité du tirage (fig. 677, 678). On ne s'explique pas très bien l'utilité qu'il peut y avoir à restreindre la force vive, après s'être appliqué à la développer. Il est cependant juste d'ajouter que les résultats expérimentaux qui ont été obtenus méritent de fixer l'attention.

Dans l'appareil de *Holmes et Prideaux* <sup>(3)</sup>, le registre du carneau

<sup>(1)</sup> *Génie civil*, t. VII, p. 395. — *Rapport de M. Walther-Meunier*, in-4°, 1886. — *La Nature*, 17 mai 1888, p. 253. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 431. — *Scientific american*, 23 juin 1887, p. 587. — *Neuvième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Paris, 1886, p. 55.

<sup>(2)</sup> Rapport de M. Pihet. *Bulletin de la Société d'Encouragement*, 3<sup>e</sup> série, t. XII p. 185.

<sup>(3)</sup> Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 431. — Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction Richard, p. 276. — *Ser. Physique industrielle*, t. I, p. 429.



qui conduit à la cheminée, communique avec un mécanisme auto-

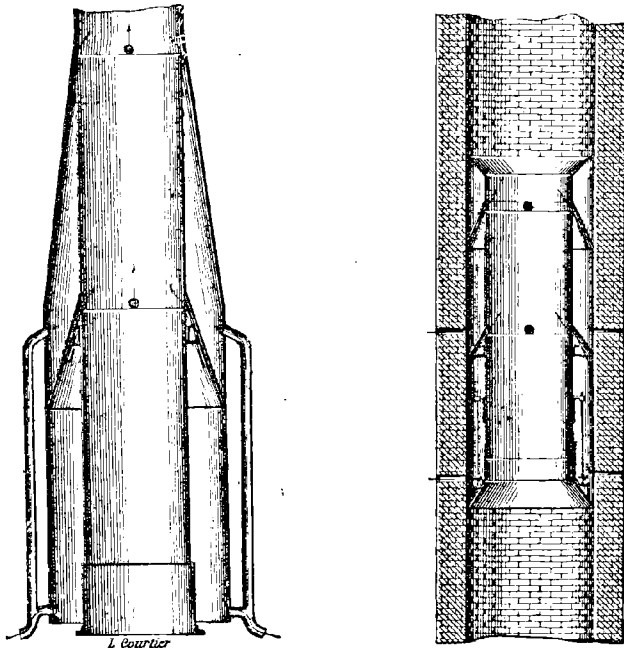


Fig. 677 et 678. — Fumivore Wéry (coupes verticales).

moteur qui s'ouvre en grand au moment du chargement, et se referme progressivement d'après la marche de la combustion.

#### § 4

#### VENT FORCÉ

**1095** — L'emploi du *tirage artificiel*, ou du *vent forcé* <sup>(1)</sup>, tend à se répandre.

<sup>(1)</sup> Demoulin. Note sur le tirage forcé et ses applications aux chaudières marines (*Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, mars 1890, p. 291). — Cornut. Consommations des chaudières forcées. *Sixième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Paris, 1882, p. 96. — De Maupeou. *Mémoires du Génie maritime*, 1876. — Chancerel. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, 19 octobre 1880, p. 371. — Bertin. *Ibidem*, 5<sup>e</sup> série, t. IV, p. 531. — Loring. *Ibidem*,

Il est naturellement indiqué dans la marine, où manquent les hautes cheminées que l'on construit pour les usines fixes.

Il améliore la fumivorté.

Il permet d'obtenir plus de puissance avec une même surface de grille. Tant que la consommation ne dépasse pas 200 kilogrammes par mètre carré, on peut admettre que la pression croît proportionnellement à son carré.

Ce procédé facilite l'emploi de certains combustibles tels que l'anhracite. Il convient bien aux houilles grasses, mais il s'accommode mal des menus secs, non susceptibles de s'agglomérer.

Le vent forcé est à conseiller pour les générateurs qui présentent une proportion notable de surface de chauffe indirecte, à laquelle ce moyen rend de l'activité. Le type-locomotive s'y prête très bien; les chaudières tubulées, moins avantageusement en général. Cependant certains modèles de cette catégorie (\*) ont été étudiés spécialement dans ce but, et font exception.

**1096** — Cet artifice exige à la vérité une consommation spéciale de travail. Cependant on comprend qu'elle puisse s'allier avec l'économie, en permettant, à l'aide de moyens appropriés, de dépouiller les gaz chauds d'une partie de l'excédent de température nécessaire au tirage naturel; ce qui permettra d'employer ce supplément à fournir la quantité de vapeur indispensable pour produire artificiellement ce tirage, et en outre un excédent.

On ne doit pas se dissimuler cependant qu'il y a là une complication, sujette à des dérangements que ne présenterait pas l'emploi des cheminées.

mars 1886, p. 300. — Michel Perret. *Ibidem*, 21 mars 1890, p. 114. — Expériences de Tresca. *Annales du Conservatoire*. — *Les Mondes*, t. XLVIII, p. 524. — *Portefeuille économique des machines*, 1886, p. 28. — Bienaymé. *Les machines marines*, p. 467. — Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 542. — *Génie civil*, septembre 1885, p. 297.

Rowan. *Institute of Engineers and Shipbuilders in Scotland*, 1889. — James Patterson et Magnus Sandison. *Engineering*, 19 mars 1886, p. 284. — William Gedder Spence. *Ibidem*, 10 février 1888, p. 151. — Thomas Coper. *Ibidem*, 6 avril 1888, p. 350. — Système Howden (*Ibidem*, avril 1884, p. 313, 347; mai 1891, p. 551. — *Van Nostrand's Engineering Magazine*, 1884, p. 248). — *Mechanical progress*, 29 novembre 1890, p. 75. — *The Engineer*, 1877, p. 75; 17 janvier 1890, p. 53; 4 avril 1890, p. 281; 28 juin 1890, p. 515; 10 octobre 1890, p. 295; 7 novembre 1890, p. 379; 6 février 1891, p. 104.

(\*) Chaudières Du Temple, Thornycroft, etc.

Le vent forcé expose à la production de coups de feu et de chambres de vapeur. Il produit un encrassement plus rapide des grilles, par cela seul qu'il permet d'y passer plus de combustible dans un même temps.

**1097** — On peut, pour sa réalisation, recourir à divers procédés.

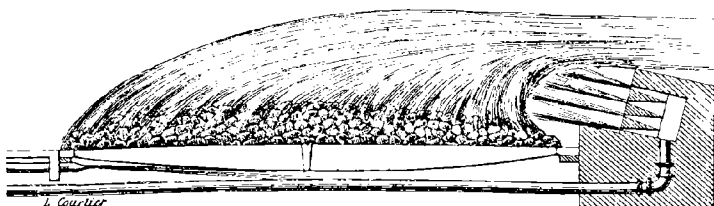


Fig. 679. — Souffleur Jones à injection de vapeur (coupe verticale).

Le premier consiste à envoyer à la base de la cheminée un jet de vapeur en ceinture, à l'aide d'un tuyau annulaire percé de trous. Ce mode d'utilisation de la vapeur a peu d'efficacité <sup>(1)</sup>, et présente en particulier pour la marine l'inconvénient de perdre la quantité correspondante d'eau distillée (fig. 679, 680).

Un second système consiste dans l'emploi de ventilateurs mécaniques, que l'on pousse jusqu'à 1 000 tours par minute, et même plus.

Citons enfin le *tirage en vase clos*. Les hommes sont alors enfermés dans la chambre de chauffe, où l'on développe une pression supérieure de quelques centimètres d'eau à celle de l'extérieur. Ce mode est surtout usité pour les torpilleurs et les grands navires de guerre. Le précédent l'est de préférence dans des installations ordinaires. Un tel emprisonnement laisse quelque appréhension aux chauffeurs; et il serait en effet de

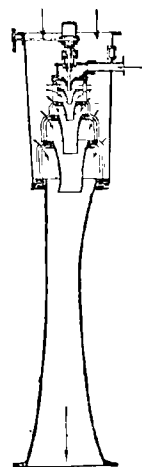


Fig. 680. — Souffleur sous-grille Kœrting. (Coupe méridienne).

<sup>(1)</sup> Pecllet. *Traité de la chaleur*, t. I, p. 592.

nature à entraîner une certaine aggravation des conséquences d'un accident. Il complique le service, et nécessite des précautions spéciales pour l'étanchéité. Il produit une forte vague d'air au moment où l'on ouvre la porte <sup>(1)</sup>. Celle-ci détermine un refroidissement de la boîte à feu, une altération du rendement, et présente l'inconvénient de faire jouer les tôles, au grand détriment de leur conservation. En revanche le système du vase clos améliore pour les chauffeurs les conditions de la ventilation, et il les garantit contre le retour en arrière des produits de la combustion.

## § 5

### TROU D'HOMME

**1098** — On appelle *trou d'homme* une ouverture oblongue pratiquée dans le corps cylindrique, et destinée à permettre l'entrée d'un ouvrier, en vue des nettoyages et des visites intérieures. Cet orifice doit dès lors présenter au moins 0 m. 40 de longueur sur 0 m. 25 de large. Il y aurait d'ailleurs inconvénient à en exagérer les dimensions ; car un tel vide constitue un notable affaiblissement de la virole dans laquelle il se trouve pratiqué. Aussi les bords de la plaie <sup>(2)</sup> doivent-ils être consolidés de manière à prévenir les déformations. On y rattache un court cylindre, dont les génératrices sont perpendiculaires aux premières, et qui porte sur sa section horizontale le couvercle obturateur.

**1099** — Cette fermeture peut être opérée de deux manières différentes (fig. 681, 682).

La plus usitée <sup>(3)</sup> est habituellement désignée sous le nom d'*auto-*

<sup>(1)</sup> M. Schickau a combiné un dispositif dans lequel la manœuvre d'un seul levier suffit pour arrêter le vent avant d'ouvrir la porte (*Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, mars 1890, p. 303).

<sup>(2)</sup> Épure de l'intersection d'un cylindre de révolution et d'un cylindre elliptique, dont les génératrices sont respectivement perpendiculaires.

<sup>(3)</sup> Schmidt. Disposition facilitant la mise en place des portes autoclaves sans se blesser. *Treizième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de propriétaires d'appareils à vapeur*, Lyon, 1889, p. 161.

*clave*. Cette dénomination exprime que le couvercle est pressé contre son siège de dedans en dehors, de manière à comprimer les fuites d'autant plus que la tendance à la filtration devient elle-même plus énergique. On a soin d'interposer dans les joints une matière plastique. Des repères servent à faciliter la mise en place sans hésitation.

Le bouchon est en fonte, ainsi que son siège. On l'introduit dans l'intérieur, en présentant son petit axe suivant le grand axe de l'ouverture; puis on le fait basculer, et on le ramène en arrière pour l'appliquer contre l'orifice. Des boulons venus de fonte avec ce couvercle passent à travers des *étriers* ou *ponts* jetés en arc par-dessus le vide. On serre à fond les écrous qui les assujettissent à ces derniers.

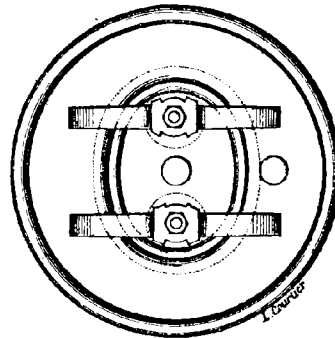
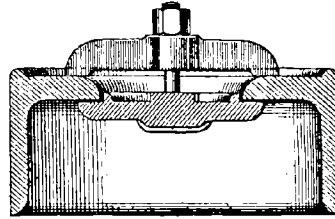


Fig. 681 et 682. — Trou d'homme.  
(Plan et coupe).

**1100** — Le second mode de fermeture n'est plus autoclave. Le couvercle repose sur son siège par l'extérieur. Les écrous sont enfilés sur des tiges venues de fonte avec ce siège, et on les serre à force. Ils ont donc à supporter tout l'effort, ce qui constitue évidemment des conditions moins sûres que les précédentes (\*). Lorsqu'une fente se déclare, le chauffeur n'y peut porter remède qu'en serrant les vis. Si alors une rupture vient à se produire, la charge se reporte sur les autres écrous, et ce supplément de fatigue risque de les briser eux-mêmes en provoquant un désastre.

Comme compensation à ces inconvénients, il est juste d'ajouter

(\*) Polonceau et Oiry. Note sur les dangers de l'emploi de boulons à charnières pour maintenir les obturateurs amovibles de certains récipients de vapeur. *Annales des mines*, janvier-février 1891.

que la manœuvre se trouve beaucoup simplifiée; considération qui a sa valeur, si ces opérations doivent se répéter fréquemment.

## § 6

## PRISE DE VAPEUR

**1101** — Afin d'éloigner le plus possible de la surface liquide le point où sera puisée la vapeur, et de diminuer ainsi le primage, on surmonte souvent le corps cylindrique d'un *dôme de vapeur*. Pour le même motif, il est bon, si rien ne s'y oppose, de placer ce dernier au point le plus éloigné du coup de feu, qui provoque l'ébullition la plus tumultueuse.

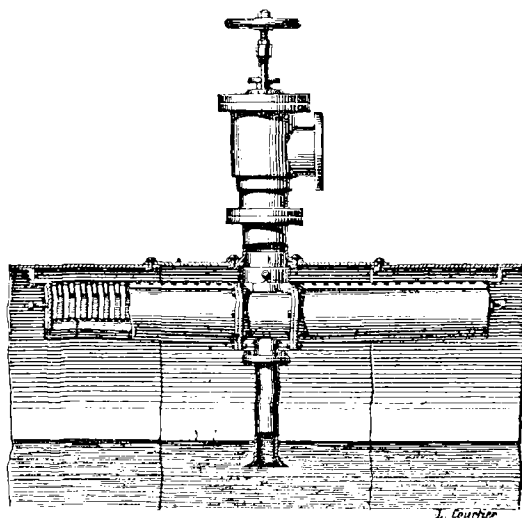


Fig. 683. — Prise de vapeur Mac-Dougall (élévation).

Ce dôme est formé d'un cylindre en tôle, disposé comme celui du trou d'homme, mais beaucoup plus long. Il est raccordé au corps cylindrique au moyen d'une cornière, ou d'une collerette emboutie<sup>(1)</sup>. Il se termine par une tête en fonte, munie de portées où

(<sup>1</sup>) Assemblage des dômes de vapeur. *Portefeuille économique des machines*, 5<sup>e</sup> série, t. IX, p. 436

l'on installe le trou d'homme, une soupape de sûreté, etc., suivant les circonstances. Si le trou d'homme en est distinct, on a la ressource, pour moins affaiblir la chaudière, de faire communiquer celle-ci avec la chambre de vapeur par une ouverture moindre que la section du dôme, et même par une série de trous de petit diamètre.

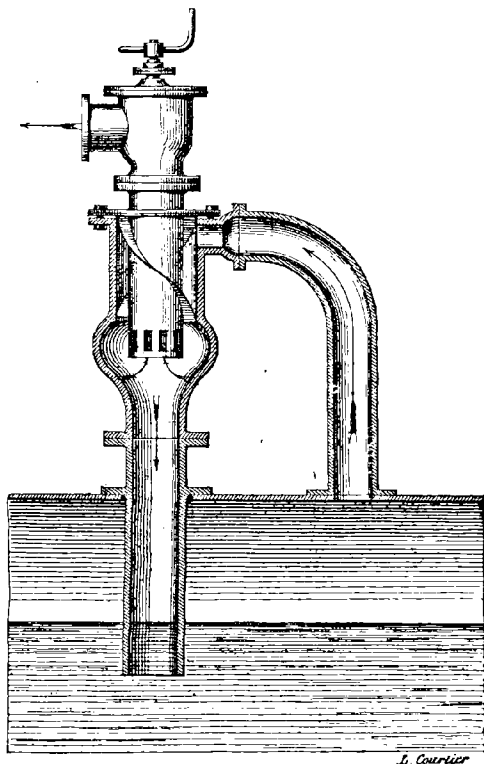


Fig. 684. — Prise de vapeur hélicoïdale Stockley (coupe verticale).

Pour éviter les coups d'eau que pourrait provoquer une ouverture trop brusque du régulateur, on a proposé <sup>(1)</sup> de diviser cette chambre en deux compartiments par un diaphragme percé de trous.

**1102** — Le tuyau de prise de vapeur débouche au sommet du dôme. Il descend dans le corps cylindrique, et le traverse dans toute

<sup>(1)</sup> Lawson. *Van Nostrand's Engineering Magazine*, novembre 1884.

sa longueur, pour passer au-dessus du coup de feu, et sécher la vapeur dans cette région où règne la température la plus élevée. On emploie également pour le même objet des sècheurs proprement dits (n° 1107).

Avec le système Crampton (fig. 683), un tuyau règne dans la longueur de la chaudière à sa partie la plus élevée. Il est percé de trous sur sa génératrice supérieure, et c'est par là que s'introduit la vapeur, à l'abri des projections d'eau qui proviennent de l'ébullition.

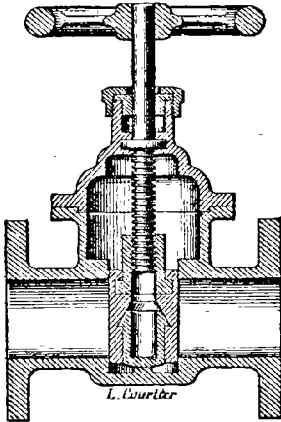


Fig. 685.  
Robinet de prise de vapeur Peet.  
(Coupe verticale).

Des moyens mécaniques sont également mis en œuvre <sup>(1)</sup> pour séparer l'eau mélangée à la vapeur. L'un des plus efficaces consiste dans l'intervention de la force centrifuge <sup>(2)</sup>. Il suffit à cet effet d'obliger le courant à circuler dans des courbes de faible rayon, comme dans la prise de vapeur Stockley qui est disposée en hélice (fig. 684), ou dans le collecteur Belleville muni de chicanes (fig. 646). La force centri-

fuge étant proportionnelle à la masse, agit moins énergiquement sur la vapeur, qui continue dès lors sa route, que sur les gouttelettes liquides qui sont précipitées sur les parois.

**1103** — Un obturateur permet d'interrompre à volonté le courant (fig. 685). On emploie à cet effet des tiroirs, des robinets ou des soupapes <sup>(3)</sup>. Ces organes doivent être très soignés. Ils risquent

<sup>(1)</sup> Prises de vapeur : BROMELGER. *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 323. — COLOMBIER. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, janvier 1887, p. 36. — DUPUCH (*Revue industrielle*, 25 avril 1883, p. 161, — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 195). — ESCHER WYSS. *Revue industrielle*, 1880, p. 313. — LE VAN. *Journal of Franklin Institute*, 1880, p. 313. — NASH. *Revue industrielle*, 1880, p. 195. — PIAT. Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 196.

<sup>(2)</sup> Séparateur centrifuge de vapeur et d'eau. *The engineering and mining journal*, 7 juin 1890, p. 640.

<sup>(3)</sup> Obturateurs : CHATEL, DUPUCH, à *jalousie*, LETHULLIER-PINEL, MALLINSON, *Pect-valve*, SELLERS (Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 705 à 716).



raient sans cela de gripper par le jeu des dilatations, ou de livrer passage à des fuites, qui ne tarderaient pas à corroder le métal en aggravant le mal.

## § 7

### DÉTENDEURS

**1104** — Dans certaines circonstances, on a intérêt à produire la vapeur à une pression notablement plus élevée que celle que l'on veut utiliser directement dans le cylindre. D'autres fois on s'attend, pour la vaporisation, à des irrégularités que l'on veut épargner au moteur. On interpose alors un *détendeur* sur le parcours du courant. Les dispositifs les plus variés (1) ont été imaginés dans ce but. Je me bornerai à décrire ici celui que M. Wenger emploie dans ses freins à air, et qui est un des plus simples. Je raisonnerai d'ailleurs comme pour une chaudière à vapeur.

Deux tubulures horizontales (fig. 686) établissent la relation avec la chaudière, à gauche, et avec la machine, à droite. Un clapet

(1) Détendeurs : ALLEN. *American machinist*, 31 décembre 1881, p. 7. — D'ARSONVAL. *La Nature*, 12 février 1881, p. 164. — BELLEVILLE (Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 616. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 203). — COIGNET. *Les Mondes*, t. XLI, p. 113. — DAVIS. *American machinist*, 2 avril 1887, p. 5. — EHLERS. Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 208. — ESCHER WYSS. *Revue industrielle*, 11 août 1880, p. 315. — GENESTE et HERSCHER. Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 202. — GIGNET. *Revue industrielle*, 7 octobre 1886, p. 496. — GIROUD (*Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, août 1886, p. 301. — *Annales industrielles*, 1885, t. I, p. 70. — *Portefeuille économique des machines*, 1881, p. 121). — GROSSEMEYER. *Revue industrielle*, 30 mars 1881, p. 122. — HAND. *American machinist*, 18 février 1882, p. 2. — HOLT. *Iron*, 3 décembre 1880, p. 417. — KUPP. *Revue industrielle*, 1881, p. 515. — LEGAT (*Portefeuille économique des machines*, 1879, pl. 17. — *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 335. — *Troisième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, 1880). — LEMOINE. *Congrès de Lille de l'Association française pour l'avancement des sciences*. — LENCACHEZ et DURANT. (*Revue industrielle*, 12 avril 1890, p. 144. — *Exposition de 1889. Compagnie du Chemin de fer d'Orléans*, in-4<sup>o</sup>). — MAISON. Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 802. — MASON. *American machinist*, 13 novembre 1886, p. 7. — DE NAEYER. Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 207. — NASH. *Revue industrielle*, 19 mai 1880, p. 193. — ROLLAND. *Annales des mines*, 1865, 2<sup>e</sup> sem., p. 461. — ROSS. *American machinist*, 11 mars 1882, p. 2. — VINGOTTE. Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 207. — *Annales des mines*, 1866, 1<sup>er</sup> sem., p. 512. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1871, p. 53.

interrompt la communication. Au-dessous de lui, un piston engagé dans un cylindre vertical supporte sur sa face supérieure la pression détendue, qui lui est transmise par un canal spécial. Il est soutenu en dessous par un ressort antagoniste, dont on peut d'ailleurs régler à volonté la raideur à l'aide d'une clef.

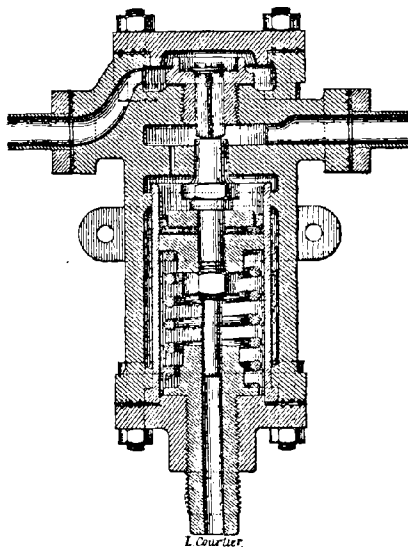


Fig. 686. — Détendeur Wenger (coupe verticale).

Lorsque, dans le canal de droite, la tension faiblit au-dessous du degré voulu, sous les appels du moteur, le ressort l'emporte, soulève le piston, et avec lui le clapet. Le courant passe, mais seulement à cette condition. On ne risque donc pas d'envoyer dans la machine de la vapeur à une tension plus élevée qu'on ne le veut.

Toutefois cette constance n'est qu'approximative. En effet nous négligeons dans ce raisonnement les variations que subit la force du ressort suivant son état de compres-

sion, et en outre l'effort exercé par la pression de la chaudière sur la tête du clapet, laquelle peut être variable d'après l'hypothèse. On a soin de donner une surface notablement plus grande au piston qu'au clapet, afin d'atténuer cette cause d'erreur.

**1105** — La sensibilité d'un détendeur s'accuse d'autant plus que, pour un même écart de pression, la section offerte à l'écoulement est plus grande. Cette sensibilité constitue une qualité utile; cependant elle ne doit pas tomber dans l'exagération, et dégénérer en une sorte d'affolement. Une certaine mesure reste ici nécessaire, comme dans la question des régulateurs de vitesse <sup>(1)</sup>.

<sup>(1)</sup> Voy. p. 465.

**1106** — Le jeu des divers organes a besoin d'être très aisé. Mais il est difficile de concilier cette condition avec celle de l'étanchéité. De là une conséquence importante.

Si le moteur reste à l'arrêt pendant un certain temps, la filtration de la vapeur autour du clapet tend à rétablir des deux côtés l'équilibre de pression. On peut arriver ainsi à développer en aval une tension égale à celle de la chaudière, dans une région de la tuyauterie qui a été établie en vue d'une pression moindre. Il pourrait en résulter un accident.

Il est bon, pour ce motif, de placer dans cette partie une soupape de sûreté, destinée à limiter la tension au degré que l'on n'y veut pas dépasser.

## § 8

### SÈCHEURS DE VAPEUR

**1107** — On confond fréquemment dans l'usage les expressions de *sécheur* et de *surchauffeur* de vapeur. Il conviendrait cependant de restreindre ces dénominations à leur signification propre.

Le *surchauffeur* est destiné à éloigner la vapeur de son point de saturation, en vue de lui communiquer des propriétés spéciales, sur lesquelles nous n'avons pas à revenir en ce moment<sup>(1)</sup>. Pour obtenir ce but, il est nécessaire d'employer le contact de gaz encore assez chauds. Celui de la vapeur n'y saurait évidemment suffire. Cependant on n'établira pas l'appareil près du foyer, attendu que le métal risquerait de rougir, n'étant plus défendu par la présence de l'eau dans l'intérieur.

Les *sécheurs* ont simplement pour but de réduire, ou même de supprimer le primage (n° 1102). On leur affecte des gaz encore moins chauds que dans le cas précédent, et même l'atmosphère de vapeur de la chaudière, en faisant régner, à l'intérieur de cette dernière, un serpentín dans la région du coup de feu.

Les dispositifs sont assez variables dans la forme<sup>(2)</sup>, mais très

<sup>(1)</sup> Voy. t. I, p. 851.

<sup>(2)</sup> Sécheurs de vapeur : EULERS. *Annales industrielles*, 1883, t. II, p. 151. — HUSSEY.

rapprochés en principe (fig. 687, 688). Ils consistent toujours en

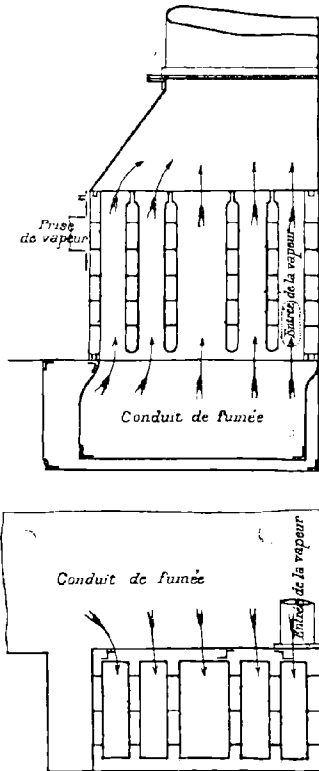


Fig. 687 et 688. — Sécheur de vapeur.  
(Coupes schématiques  
verticale et horizontale).

un jeu de tuyaux, que parcourt la vapeur au sein de l'atmosphère chaude. Leur superficie totale sera d'autant plus étendue que la température aura été plus atténuée. Cependant elle n'excède guère le quart de la surface de chauffe.

Dans le surchauffeur Uhler<sup>(1)</sup>, on a introduit un foyer spécial qui permet de rendre le système commun à plusieurs chaudières, et plus indépendant de leur fonctionnement, quand on veut obtenir avec netteté la surchauffe. L'appareil comprend une caisse en fonte, au-dessous de laquelle est suspendu un jeu de tubes. Un foyer à grille ordinaire est construit en briques avec une enveloppe de tôle, et entre les deux se trouve une certaine épaisseur de cendres pour éviter la déperdition du calorique. Un système de robinets permet d'ad-

mettre la vapeur des différents générateurs, ou de les isoler à volonté les uns des autres.

*American machinist*, 7 juillet 1885, p. 1. — HYDER et WIGFULL. *Mechanical progress*, 28 février 1889, p. 19. — PETITPIERRE. Expériences de Tresca. *Annales du Conservatoire*, 30 septembre 1868. — RAFFARD. *Génie civil*, 22 novembre 1890, p. 58. — RYCKE. *American machinist*, 17 juillet 1890, p. 5. — SCHEFFER et WALCKER. *Revue industrielle*, 4 avril 1885, p. 136. — WYATT. Cavalier de Cuverville. *Les Surchauffeurs*, in-8°.

<sup>(1)</sup> *Revue industrielle*, 2 mai 1891, p. 174. — *Génie civil*, 2 octobre 1891, p. 419. — *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, janvier 1892.

**RÉCHAUFFEURS D'EAU D'ALIMENTATION**

**1108** — Nous avons déjà insisté (n° 1005) sur l'opportunité de refuser le nom de bouilleur aux appareils qui sont destinés à échauffer progressivement l'eau d'alimentation, avant son admission dans la chaudière proprement dite. En Allemagne, on a introduit la dénomination assez bien choisie de *avant-chauffeur*. Nous adopterons ici, comme plus conforme à l'usage, celle de réchauffeur <sup>(1)</sup>.

L'opération dont il vient d'être question réalise un triple avantage : 1° Elle a pour résultat de régulariser le régime intérieur de la chaudière, en évitant les coups de froid que produit l'alimentation directe. 2° On précipite ainsi d'avance (n° 1137) une partie des sels calcaires <sup>(2)</sup>, dans une enceinte trop peu chauffée pour qu'ils puissent y former une couche pierreuse calcinée. Ils restent à l'état de boue, et l'on s'en débarrasse facilement à l'aide de purges périodiques. 3° On utilise de cette manière une certaine quantité de calories, qui sans cela seraient emportées par les gaz. Il est en effet difficile, en dehors de l'emploi des réchauffeurs, d'abaisser la température au-dessous de 250 degrés. Cette réalisation de la circulation méthodique procure donc un avantage direct. On en est quitte alors pour venir en aide au tirage en offrant de grandes sections à tous les passages, et en les ramonant plus souvent. En raison de la faible

<sup>(1)</sup> Cornut (*Étude sur les réchauffeurs*, Lille, 1888. — *Formation de vapeur dans les réchauffeurs*, autographié, Lille, 1882). — Bour. Note sur l'installation des réchauffeurs. *Annales de la Société des sciences industrielles de Lyon*, 1881, p. 145. — Réchauffeur marin d'alimentation. *Génie civil*, t. XIV, p. 181. — Walther-Meunier. Construction rationnelle des bouilleurs réchauffeurs. *Sixième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Paris, 1882, p. 61. — Ducos. Installation de réchauffeurs. *Ibidem*, p. 68. — Sauvage. *Annales des mines*, 8<sup>e</sup> série, t. XVIII, p. 431. — Burnat. *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 1875, p. 158. — *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1881, p. 160. — *Engineering*, 2 mai 1890, p. 527. — *The Engineer*, 24 octobre 1890, p. 339; 3 avril 1891, p. 265; 3 juillet 1891, p. 11.

<sup>(2)</sup> Les gaz dissous se dégagent également de suite. De là une cause assez active de corrosion de la partie supérieure des réchauffeurs par l'oxygène et l'acide carbonique, sous l'influence de la chaleur et de l'humidité.

température du milieu gazeux, il faut donner aux récipients une grande surface de chauffe : jusqu'à une fois et demie celle du générateur proprement dit.

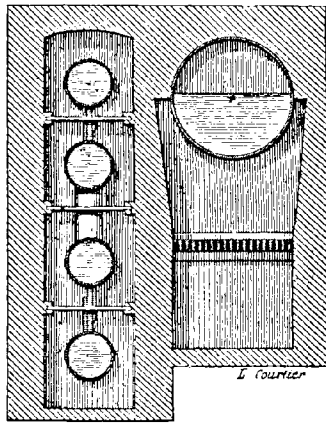


Fig. 689. — Chaudière Farcot à réchauffeurs latéraux (coupe verticale).

**1109** — On peut adopter pour la construction de ces appareils deux types fondamentaux <sup>(1)</sup>.

<sup>(1)</sup> Réchauffeurs d'eau d'alimentation : BARCOCK et WILCOX. *Ser. Physique industrielle*, t. II, p. 111 (fig. 691). — BERRYMAN. Chabaud. *Bulletin de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 2<sup>e</sup> série, t. III, p. 156. — BIOLLEY. *Génie civil*, 25 juin 1888, p. 124. — BOOTH. *American machinist*, 6 août 1891, p. 5. — CHEVALET (*Revue industrielle*, 21 septembre 1889, p. 575. — *Journal des usines à gaz*, 1889, p. 287). — DOLLFUSS-MICY. Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, atlas, pl. XIII, fig. 8, 9, 10. — FROMENTIN. *Revue industrielle*, 19 novembre 1885. — GONBERG. *American machinist*, 16 janvier 1886. — GOSLING. *Ibidem*, 16 octobre 1890. — HATE. *Ibidem*, 19 février 1881, p. 8. — HOPPE (*Ibidem*, 17 avril 1886, p. 8. — *Scientific american*, 24 mars 1885, p. 179). — JOHNSON et ALLAN. *The Engineer*, 22 octobre 1875, p. 282. — KIRKALDY. *Revue industrielle*, 26 septembre 1891, p. 581. — LOWCOCK. *American Journal of Railway Appliances*, 14 juin 1884, p. 506. — MAC-LAME. *Génie civil*, 19 janvier 1889, p. 185. — MAHONY. *American machinist*, 17 janvier 1885, p. 5. — MARCHANT. *Engineering*, 18 août 1876. — DE NAEYER. *Ser. Physique industrielle*, t. II, p. 110. — NORTHCOTE. *Engineering*, 1876, 169. — OTIS. *American machinist*, 11 décembre 1886, p. 7. — PARKINSON. *Mechanical Progress*, 21 avril 1888, p. 155. — REYNOLD. *American machinist*, 22 mai 1886. — RICHARDSON. *Ibidem*, 22 janvier 1887, p. 4. — ROOT. *Ser. Physique industrielle*, t. II, p. 111. — SCHERWIN. *Engineering*, 31 janvier 1890, p. 127. — STRONG. *Journal of Franklin Institute*, novembre 1882, p. 521. — SULZER. Hirsch. *Rapport sur l'Exposition de 1878*, p. 104. — THORILLEUX. *Écho des mines et de la métallurgie*, 1876, p. 197. — TWIBILL. Hirsch. *Rapport sur l'Exposition de 1878*, p. 113. — VINTOX. *American Journal of Railway Appliances*, 15 mai 1884, p. 244. — VIVET. *Revue industrielle*, 30 juillet 1879,

Le plus ordinaire consiste dans l'emploi de corps cylindriques horizontaux de diamètre réduit, mais suffisant cependant pour éviter l'encombrement par les dépôts, et pour comporter des visites intérieures (fig. 689, 690). On les munit à cet effet de trous d'homme à leurs deux extrémités. On les installe dans un compartiment latéral, en leur donnant une légère inclinaison pour faciliter

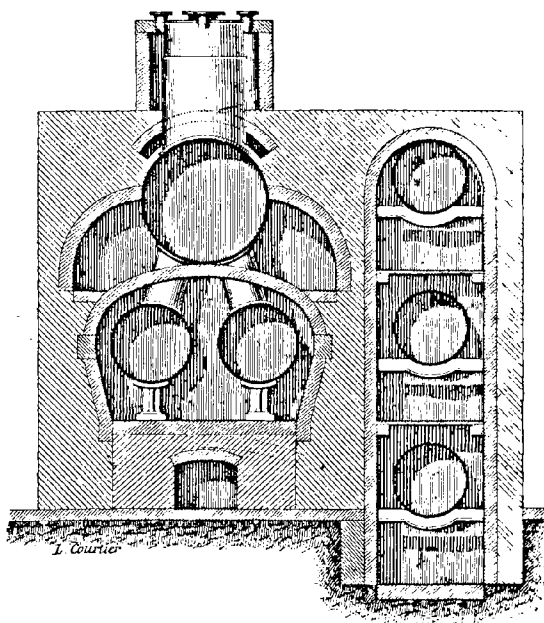


Fig. 690. — Chaudière à deux bouilleurs et à trois réchauffeurs (coupe verticale).

le dégagement des bulles, et prévenir la formation des chambres de vapeur.

**1110** — Un dispositif tout différent est connu sous le nom d'*economizer*. Au lieu de gros cylindres en tôle, coûteux, encombrants, et rapidement corrodés, on se sert de tubes en fonte, qui résistent plus longtemps à l'oxydation.

p. 296. — WARNER. *The American Engineer*, 24 décembre 1885, p. 275. — WILLINBRINK. *Scientific American*, 10 août 1889, p. 89.

Dans l'économizer Green <sup>(1)</sup>, les tuyaux sont en fer forgé (fig. 691), de 0<sup>m</sup>,12 de diamètre extérieur et de 2<sup>m</sup>,65 de longueur. Ces organes sont verticaux, et réunis à leurs extrémités <sup>(2)</sup> par des caisses en fonte, à l'aide de joints coniques forcés à la presse hydraulique. La caisse du bas fournit l'eau froide. Celle de la partie supérieure déverse son eau chaude dans un collecteur, où elle arrive à la tem-

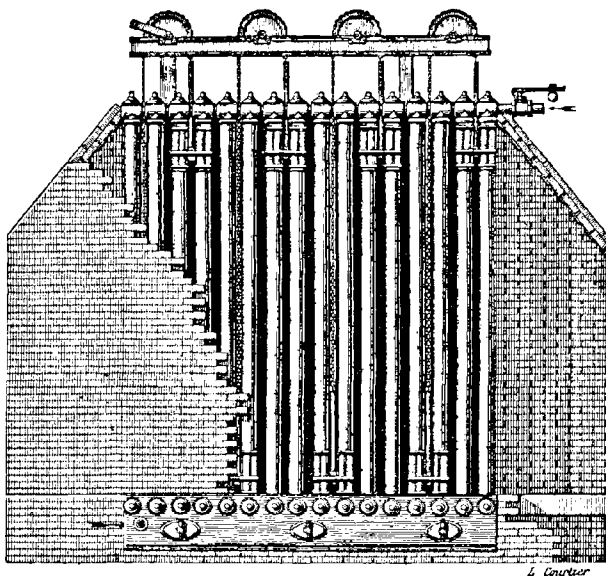


Fig. 691. — Economizer Babcock et Wilcox (élévation).

pérature de 150 degrés. L'ensemble est renfermé dans une chambre en briques qui reçoit les gaz par le haut.

La suie se dépose en abondance sur les surfaces. On les décape à l'aide d'un racleur Graham, animé d'un mouvement longitudinal de va-et-vient. Les nettoyages de la chambre ont lieu chaque semaine. Ce nettoyage est indispensable, tant pour assurer la transmission de la chaleur, que pour éviter la condensation dans les suies de vapeurs sulfuriques qui corroderaient le métal.

<sup>(1)</sup> Hirsch. *Rapport sur l'Exposition de 1878*, p. 103. — *Ser. Physique industrielle*, t. II, p. 112.

<sup>(2)</sup> Une association consécutive en serpentin exposerait au danger de la formation de chambres de vapeur aux points maxima des cols supérieurs.



**1111** — Certains réchauffeurs sont fondés sur le principe de la condensation de la vapeur détendue, pour les machines qui n'ont pas de condenseur spécial. Cette liquéfaction peut avoir lieu par transmission du calorique à travers des parois métalliques, comme dans les condenseurs à surfaces (n° 1250), ou par mélange direct de la vapeur avec l'eau (1).

Le premier mode présente l'avantage de préserver cette eau de la contamination par les matières grasses entraînées par la vapeur qui a fonctionné au sein de la machine. Dans le réchauffeur Lencachez et Durant (fig. 692, 695), on a pris des mesures pour remédier à cet inconvénient (2), qui peut

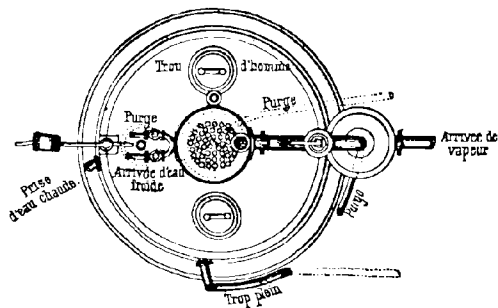
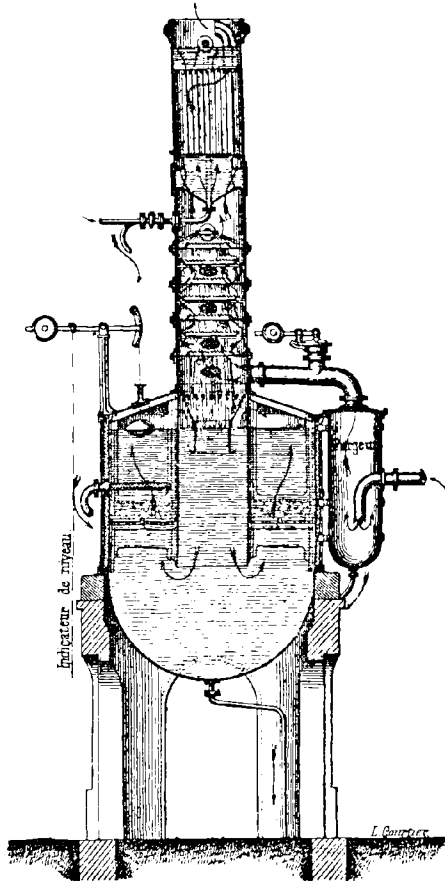


Fig. 692 et 693. — Réchauffeur d'alimentation Lencachez. (Plan et coupe).

(1) Échauffement de l'eau d'alimentation par la vapeur d'échappement. *Neuvième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Paris, 1886, p. 158.

(2) *Bulletin de la Société d'encouragement*, oct. 1891,

entraîner pour les chaudières de graves conséquences (n° 1151).

**1112** — On a construit quelquefois des réchauffeurs communs à plusieurs générateurs. A cet effet, un gros cylindre en tôle est placé dans le carneau général, dont il contribue à augmenter la section.

Ce système présente de grandes difficultés pour les nettoyages. Il faut, quand on veut y procéder, que toutes les chaudières soient éteintes ensemble, et depuis un temps assez long pour assurer le refroidissement. Il est d'ailleurs difficile de se procurer ainsi une grande surface de chauffe.

p. 558. — *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, juin 1890. — *Annales industrielles*, 17 juillet 1881, p. 84. — *Bulletin de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 2<sup>e</sup> série, t. X, p. 549. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1881, p. 217.

## CHAPITRE LIX

### ALIMENTATION

#### § 1

#### APPAREILS D'ALIMENTATION

**1113** — *Généralités.* — L'eau d'alimentation est admise dans le générateur en un lieu éloigné du coup de feu, pour mieux ménager la continuité des températures. La tubulure d'admission est munie d'une pomme percée de trous, afin de disséminer le courant dans toutes les directions, en évitant de concentrer le refroidissement sur un point déterminé. Cet organe est exposé à s'entartrer. Il doit rester possible de le détacher pour le nettoyer.

**1114** — L'intérieur du générateur se trouvant soumis à une tension supérieure à celle de l'atmosphère, l'introduction de l'eau nécessaire pour réparer ses pertes ne saurait avoir lieu sans une dépense spéciale de travail. Mais celle-ci est proportionnellement très faible.

En effet l'introduction de l'unité de volume, c'est-à-dire d'un mètre cube, malgré la pression effective de  $N$  kilogrammes par centimètre carré, exigera théoriquement un travail égal au produit du volume et de la pression effective par unité de surface, c'est-à-dire  $10\,000\ N$ . Pour chaque litre, ou kilogramme, on dépensera  $1\,000$  fois moins ; à savoir pratiquement, en appelant en outre  $\lambda$  le rendement de l'appareil :

$$10 \frac{N}{\lambda}.$$

Admettons que pour entretenir une puissance d'un cheval-heure, il faille dépenser 7 kilogrammes de vapeur, ce qui exigera une alimentation de 7 litres d'eau ; le travail à fournir deviendra :

$$70 \frac{N}{\lambda}.$$

Mais cette unité de puissance dynamique correspond à un total de  $75 \times 60 \times 60$  ou 270 000 kilogrammètres. La part *proportionnelle* à prélever pour l'alimentation aura donc pour valeur :

$$\frac{70 N}{270\ 000 \lambda} = 0,00026 \frac{N}{\lambda}.$$

Quand on emploie la pression hydrostatique (n° 1115), ou une bouteille alimentaire (n° 1118),  $\lambda$  reste très voisin de l'unité. Avec l'injecteur (n° 1119), ce coefficient peut dépasser  $\frac{4}{5}$ . Le cas le plus défavorable est celui de la pompe alimentaire (n° 1117). Nous pouvons alors admettre en nombre rond  $\lambda = \frac{1}{2}$ , ce qui donne :

$$0,00052 N.$$

Supposons par exemple un timbre de 10 kilogrammes, chiffre très élevé pour une machine fixe, quoique inférieur à la pratique des chemins de fer. Il viendra finalement : 0,0052. C'est donc environ 1/2 % du travail de la machine que l'on devra distraire de son effet utile pour subvenir à son alimentation, ce qui constitue évidemment une fraction minime.

Ce travail peut être emprunté à des sources mécaniques où calorifiques, statiques ou dynamiques. De là quatre moyens, distincts en principe, et très inégalement représentés dans la pratique :

- 1° AGENT MÉCANIQUE STATIQUE — *Pression hydrostatique* ;
- 2° AGENT MÉCANIQUE DYNAMIQUE — *Pompe alimentaire* ;
- 3° AGENT THERMIQUE STATIQUE — *Bouteille alimentaire* ;
- 4° AGENT THERMIQUE DYNAMIQUE — *Injecteur*.

Ces deux derniers conviennent seuls, avec le premier, pour les industries qui emploient des chaudières sans moteurs.

**1115** — *Pression hydrostatique.* — Ce procédé n'est que rarement employé, en raison des conditions locales exceptionnelles qui sont nécessaires pour son intervention, à savoir une dénivellation d'un nombre de décimètres égal au timbre de la chaudière. Mais lorsque les circonstances topographiques s'y prêtent, il se recommande par sa gratuité, en dehors des frais de premier établissement et d'entretien matériel. La dépense proportionnelle au travail effectué disparaît en effet, puisque celui-ci est alors développé directement par la pesanteur.

Quelquefois, en écartant la considération de la gratuité, on a trouvé commode de faire travailler d'une manière continue une pompe élévatrice pour monter l'eau dans un réservoir supérieur, à l'aide duquel on alimente, d'une manière discontinue, aux instants voulus, par la manœuvre d'un simple robinet.

**1116** — *Steam loop.* — On peut rattacher aux procédés d'alimentation fondés sur l'influence de la pression hydrostatique, le *steam loop* ou *boucle de vapeur*, appareil nouveau qui est destiné à résoudre le problème dans un cas particulier, à savoir le retour au générateur de l'eau de condensation qui se dépose dans les tuyauteries ou les chemises de vapeur <sup>(1)</sup>.

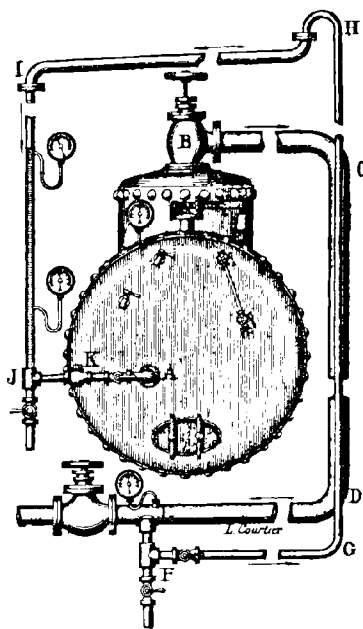


Fig. 694. — Steam-loop (élévation).

<sup>(1)</sup> *Génie civil*, 27 février 1892, p. 275. — Sauvage. *Annales des mines*, 8<sup>e</sup> série, t. XX, p. 476. — *Engineering*, 1890, t. 1, p. 712; II, 22.

La chaudière A (fig. 694) envoie le fluide par le tuyau BCDE pour accomplir le rôle que l'on attend de lui. L'eau de condensation se rassemble par son poids dans la portion FG du tube de retour. La pression la maintient dans le conduit GH à l'état d'émulsion traversée par la vapeur. La partie III qu'on laisse à nu à dessein, tandis que tout le reste de la tuyauterie est soigneusement enveloppé, achève de liquéfier le mélange, qui s'écoule dans le tuyau IJK. En K se trouve un clapet de retenue, pour maintenir close la chaudière contre sa propre tension. Mais comme cette force élastique est sensiblement la même partout, et qu'il s'y ajoute en J, d'après le principe des vases communicants, l'influence de la différence des densités des parties verticales, qui sont remplies d'eau en IJ et d'une émulsion plus légère en HG, cet excès suffit pour déterminer l'ouverture du clapet et la rentrée de l'eau, quand elle se trouve accumulée dans le tube JI en quantité suffisante.

**1117** — *Pompe alimentaire*. — Avant l'invention de l'injecteur Giffard, le moyen classique d'alimentation était la *pompe alimentaire* <sup>(1)</sup>. On l'appelle également *pompe à eau chaude*, quand elle puise dans la bêche du condenseur <sup>(2)</sup>.

Cet engin ne présente rien d'absolument spécial. Il peut être à simple ou à double effet (fig. 695). Dans ce dernier cas, il renferme deux chapelles munies chacune d'un clapet. Ceux-ci s'ouvrent et se ferment alternativement sous l'action du piston <sup>(3)</sup>.

Une surveillance active est nécessaire pour empêcher les conduits de s'entarter. En pareil cas, on pourrait croire alimenter, d'après le jeu apparent des pièces, tandis que le débit serait devenu insuffisant; circonstance de nature à entraîner de graves conséquences.

<sup>(1)</sup> Pompes alimentaires : BELLEVILLE. Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 186. — CARRÉ (fig. 695). *Chronique industrielle*, 7 mars 1886, p. 112. — IRVING FOX. *American machinist*, 6 août 1881, p. 7. — STAPPER. Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 187. — WORTHINGTON. *Ibidem*.

<sup>(2)</sup> On la distingue par là de la *pompe à eau froide*, dont on prend la commande sur le moteur, quand l'eau froide d'alimentation doit être puisée à une certaine profondeur dans le sol.

<sup>(3)</sup> Dans la pompe Thirion (Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 187), le piston est à garniture de bois de noyer bouilli dans l'huile, avec fibres normales aux génératrices du cylindre.

Dans la pompe Buzelin, une soupape de sûreté crache et avertit, lorsque le clapet n'obéit pas. Un foret, que l'on tourne à la main, permet alors de détartre le conduit.

Le volume d'une pompe alimentaire à *simple effet* est ordinairement égal à 0,006 de celui du cylindre à vapeur. La section des clapets n'était autrefois que le quart de celle du piston. On approche aujourd'hui de l'égalité. En revanche la levée, qui était alors égale au quart du diamètre, s'est abaissée au dixième, pour permettre une allure plus rapide.

La pompe alimentaire marche mal avec de l'eau trop chaude. L'espace engendré se remplit alors, non plus de liquide, mais de vapeur, sous l'influence du vide créé par le piston. En pareil cas, il convient de mettre la pompe en contrebas de la bûche, afin que la gravité vienne en aide au remplissage. On a soin également pour ce

motif, quand on emploie des réchauffeurs spéciaux, de les placer sur le refoulement, et non sur l'aspiration de la pompe.

Si celle-ci doit puiser directement dans le condenseur, son exécution sera particulièrement soignée, puisque le vide qu'elle produit doit être alors au moins égal à celui de la pompe à air (n° 1240).

La pompe alimentaire fonctionne d'une manière continue ou discontinue. Dans le premier cas, à l'aide d'un robinet, on peut à volonté injecter le courant dans la chaudière, ou lui laisser faire retour dans la bûche à travers une soupape à ressort. Avec la seconde combinaison, c'est le mécanisme lui-même que l'on embraille. Ce dernier mode est plus clair que le premier, qui risque de prêter à la confusion, et qui est pourtant le plus répandu dans la pratique.

Ordinairement la commande est prise sur le moteur à l'aide d'un

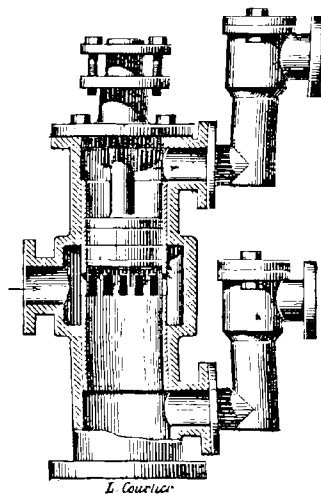


Fig. 693. — Pompe alimentaire Carré.  
(Coupe verticale).

embrayage. Cependant on emploie quelquefois un *petit cheval alimentaire* <sup>(1)</sup>, c'est-à-dire une machine distincte (fig. 696), d'un faible volume en raison du peu d'importance proportionnelle du travail à fournir (n° 1114). On trouve à cette disposition l'avantage de pouvoir alimenter sans mettre en marche le moteur proprement dit. Souvent le piston à vapeur du petit cheval et le piston hydraulique de la pompe sont, pour plus de simplicité, montés sur la même tige <sup>(2)</sup>.

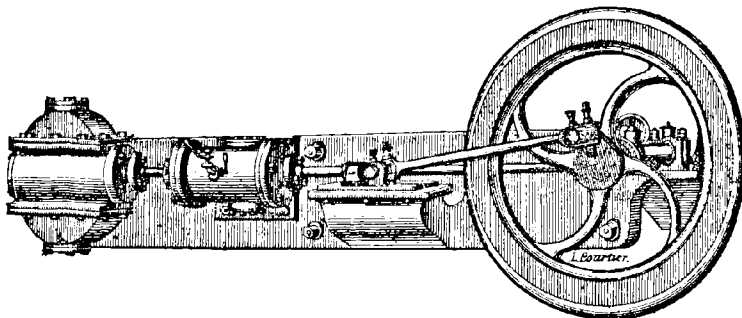


Fig. 696. — Petit cheval alimentaire Buffaud et Robatel (élévation).

**1118** — *Bouteille alimentaire*. — L'appareil connu sous le nom de *bouteille alimentaire* <sup>(3)</sup> emploie l'énergie sous la forme calorifique, pour mettre l'eau d'alimentation dans des conditions qui permettent son entrée spontanée dans la chaudière.

Un récipient muni d'un tube indicateur de niveau destiné à guider la manœuvre (fig. 697), est percé de deux tubulures A et B, garnies chacune d'un robinet à trois voies. Les manettes de ces derniers sont manœuvrées d'un même mouvement à l'aide d'une seule poignée C. L'orifice A est surmonté d'un tube D, qui débouche dans une région assez élevée pour que l'eau ne l'atteigne jamais. Le robinet dont il est muni permet de le mettre en communication, soit avec la vapeur du générateur à l'aide du tuyau E, soit avec l'atmosphère extérieure par l'ajutage F. De même le robinet B

<sup>(1)</sup> Cheval alimentaire LECOUEUX et GARNIER. *Revue technique de l'Exposition universelle de 1889*, 7<sup>e</sup> partie, 2<sup>e</sup> fascicule, p. 450.

<sup>(2)</sup> Haton de la Goupillière. *Cours d'exploitation des mines*, t. II, p. 297.

<sup>(3)</sup> *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1850, p. 466.



met en relation le fond de la bouteille avec le réservoir d'eau d'alimentation situé en G, ou avec le fond de la chaudière à l'aide du conduit H.

En poussant la poignée d'un certain côté, l'on établit la relation du récipient avec F et G, en interceptant toute communication avec la chaudière. Dans ces conditions, l'eau descend par son poids dans la bouteille à travers le tuyau G, en expulsant l'air par le tube F. Ces deux ouvertures sont ensuite refermées par le mouvement inverse de C, et l'on ouvre au contraire D et H. La vapeur du générateur se précipite alors dans la bouteille par le canal D, et s'y condense en vertu du principe de la paroi froide, jusqu'à ce qu'elle ait amené le bain

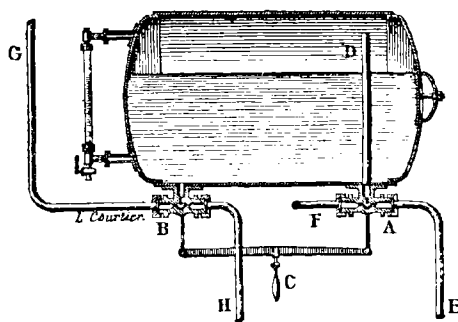


Fig. 697. — Bouteille alimentaire (coupe verticale).

liquide à la température qui règne dans la chaudière. Comme il s'ensuit par cela même l'équilibre de pression, l'eau peut s'écouler librement dans cette dernière en vertu de la gravité, à travers le conduit H.

Il est facile de voir qu'en dehors du faible travail développé par la pesanteur pendant la descente du liquide du bief extérieur dans la bouteille, et de celle-ci dans le générateur, la dépense principale d'énergie nécessaire pour vaincre l'obstacle de la pression se trouve précisément dans cette consommation de vapeur. Primitivement formé au prix de la combustion d'une quantité correspondante de charbon, ce fluide se trouve détruit par son passage dans la bouteille, de manière à exiger ultérieurement une nouvelle provision de combustible pour reprendre une seconde fois la forme gazeuse, après qu'il a fait retour dans la chaudière à l'état liquide, avec le bain additionnel qu'il a servi à y amener.

## § 2

## INJECTEUR

**1119** — *Description.* — L'injecteur Giffard<sup>(1)</sup> est une des plus brillantes conquêtes de la mécanique moderne (fig. 698). Cette

(1) Henri Giffard. *Notice théorique et pratique sur l'injecteur automoteur*, Paris, 1860, chez Flaud. — Combes (Note sur l'injecteur automoteur des machines à vapeur inventé par M. Giffard. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1859, p. 557, 565. — *Annales des mines*, 5<sup>e</sup> série, t. XV, p. 169; XVII, 511, 521, 557; 6<sup>e</sup> série, t. I, p. 575, 605; IV, 517). — Résal (Recherches théoriques sur les effets mécaniques de l'injecteur Giffard. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. LIII, p. 652. — *Mécanique générale*, t. IV, p. 176. — *Annales des mines*, 1862, 4<sup>or</sup> sem., p. 575, 606}. — Reech (*Théorie de l'injecteur automoteur des chaudières à vapeur de M. Giffard*, Mallet-Bachelier, 1860. — *Mémorial du Génie maritime*, 1858). — Deloy. Expériences sur l'injecteur automoteur de M. Giffard (*Annales des mines*, 1860, 4<sup>or</sup> sem., p. 501. — Rapport de Combes. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1861, p. 258). — Villiers. Résultats des expériences faites sur l'injecteur Giffard. *Ibidem*, 1861, p. 555. — Truchot. Expériences nouvelles sur l'injecteur Giffard. *La Nature*, 15 novembre 1879, p. 585. — Carvalho. Essai sur la théorie de l'injecteur Giffard. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. XLIX, p. 958. — *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, 1860, p. 187. — Histoire d'une grande invention : l'injecteur Giffard. *La Nature*, 1<sup>er</sup> juillet 1882, p. 65. — Notice historique et pratique sur l'injecteur Giffard. *Annales des mines*, 1860. — Haerens. Théorie de l'injecteur Giffard. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, octobre 1885, p. 251.

G. Richard. Les injecteurs. *Revue générale des chemins de fer*, 1882, 2<sup>e</sup> sem., p. 200, 554; avec une bibliographie très étendue. — Ledieu (Sur le rendement des injecteurs à vapeur. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1875, p. 711, 775, 1025. — *Nouvelles machines marines*, t. I, p. 524). — Félix de Romilly. Expériences sur l'entraînement de l'air par un jet gazeux. *Annales de la Société de chimie et de physique*. — Rapport de M. Haton de la Goupillière. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 5<sup>e</sup> série, t. IV, p. 409. — Zeuner. Théorie mécanique de la chaleur. Traduction Cazin et Arnthall, p. 585. — Staffer. *Alimentation des chaudières marines à haute pression*, in-8°. — Callou. *Cours de machines*, t. I, p. 299, 405; III, 144. — Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 179. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 761. — Ser. *Physique industrielle*, t. I, p. 745; II, 174. — Collignon. *Mécanique*, t. II, p. 527. — Pochet. *Mécanique industrielle*, p. 285. — Bienaymé. *Les machines marines*, 517. — Richard et Baclé. *Manuel du mécanicien conducteur de locomotive*, p. 50, 54, 288. — Hirsch. *Rapport sur l'Exposition de 1878*, p. 12. — Sauvage. *Annales des mines*, novembre 1890, p. 195. — Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction Richard, p. 686.

John England. Giffard's injector. *Proceedings of the Institution of civil Engineers*, 1864, p. 65, et 14 février 1865. — Denton. On the distribution of energy in an injector. *American machinist*, 17 janvier 1889, p. 2. — Froude. On Giffard's Injector's. *British Association*, t. XXX. — Robinson. On Giffard's Boiler injector. *Institution of mechanical Engineers*, 1860.

Grashof. *Theoretischen Maschinenlehre*. — Hartmann. *Die Pumpen*.

invention a été reproduite par un grand nombre de constructeurs<sup>(1)</sup>,

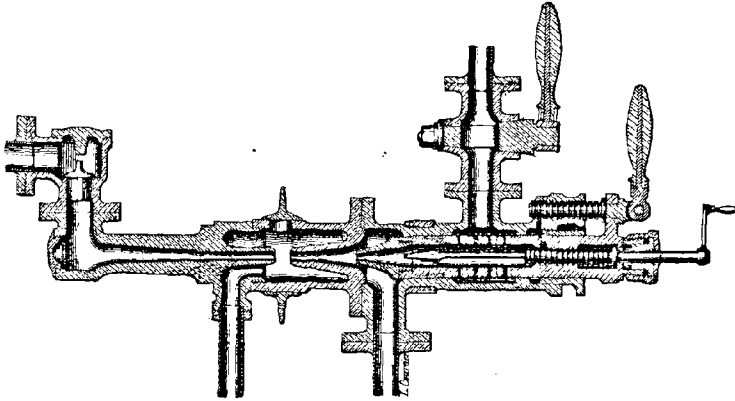


Fig. 698. — Injecteur Giffard (coupe longitudinale).

avec diverses modifications qui n'en ont pas altéré le caractère fondamental.

<sup>(1)</sup> Injecteurs : BARCLAY. *Practical mechanic's Journal*, 1865. — BORLAND. *American machinist*, 16 juin 1883, p. 4. — BOUVRET (fig. 699). Richard. *La chaudière locomotive*, p. 591. — COLVIN. *American Journal of Railway Appliances*, octobre 1884, p. 196. — DULKIN. *Annales industrielles*, 1884, t. 1, p. 562. — FRIEDMANN (*Manuel d'Heusinger von Waldegg*, t. III, p. 598. — Sauvage. *Annales des mines*, novembre 1890, p. 197). — GUYENET. *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. 1, p. 356. — HALL. *American machinist*, 50 août 1884, p. 5. — HALLAIN et STEPHERD. *The Engineer*, 26 mai 1882. — HARNER, METCALFE et DAVIES (*Revue industrielle*, 21 février 1885, p. 75. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 182. — *Engineering*, 1<sup>er</sup> mai 1885, p. 479). — *Influx*. *Revue industrielle*, 28 mai 1884, p. 215. — IRWIN. *Journal of Franklin Institute*, juin 1880, p. 386. — JUILLEMIER. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 591. — KLASER. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXV-XXVI, p. 415. — KRAUSS (Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 704. — Richard. *La chaudière locomotive*, p. 400. — *Little giant*. *American machinist*, 50 mai 1889, p. 5. — LOFTUS KINSEB. *Ibidem*, 3 décembre 1881. — MACK. *Railroad Gazette*, 4 avril 1882. — MALLOVE, ALLIOT et FRYER (*Revue industrielle*, 1885, p. 75. — *Portefeuille économique des machines*, 1884, p. 59). — MULLER et ROGER. *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. 1, p. 528. — NEZERAUX. *Bulletin technologique de la Société des anciens Elèves des Ecoles d'arts et métiers*, octobre 1891, p. 750. — PEMBERTHY (*Revue industrielle*, 12 mai 1887, p. 186. — *Scientific american*, 26 février 1887, p. 132). — POLONCEAU (Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 180. — *Compagnie du chemin de fer d'Orléans*. *Exposition de 1889*, in-4<sup>e</sup>). — ROE. Stephen Roper. *Handbook of the locomotive*, p. 250. — SCHÖFFER et BUDENBERG (*Génie civil*, t. XIX, p. 425. — Habets. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXXV, p. 27. — *The railway Engineer*, avril 1889, p. 109). — SHARP. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 586. — SHARF. *Manuel d'Heusinger von Waldegg*, t. III, p. 397. — SLATER SLAVILLE. *Proceedings of mechanical Engineers*, mai 1884, p. 167. — THURY. *Chronique industrielle*, 2 janvier 1887, p. 5. — TERCK. Hirsch et De-

Les tubes A et B (fig. 699) communiquent l'un et l'autre avec la chaudière. Dans l'état de repos, des pressions égales s'exerceraient donc sur les deux faces du clapet C, qui resterait par suite en équilibre. Au moment où l'on ouvre l'obturateur D, le contact de l'eau froide de la bêche qui communique avec le tuyau E détermine un degré de vide, et la vapeur se précipite par A. Une fois lancée, elle traverse le système convergent-divergent F, G, en crachant par

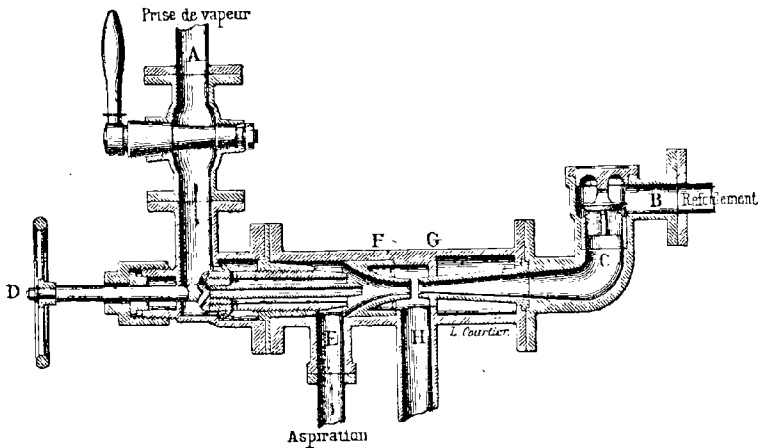


Fig. 699. — Injecteur Bouvret (coupe longitudinale).

le trop-plein H. Le principe de l'entraînement latéral des fluides, établi ci-dessus <sup>(1)</sup>, détermine l'aspiration de l'eau de la bêche E, qui se trouve entraînée pêle-mêle avec la vapeur en partie condensée, sous la forme d'une émulsion. Si l'on ouvre progressivement l'admission <sup>(2)</sup>, il vient un moment où l'impulsion du jet devient assez forte pour soulever le clapet G, et introduire l'eau dans la chaudière.

bize. *Leçons sur la machine à vapeur*, t. I, p. 775. — *Union. American machinist*, 31 janvier 1885, p. 3. — *Unique. Scientific American*, 20 juin 1885, p. 588. — WAILL et PRADL. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 386. — WEND. *Annales industrielles*, 1885, t. I, p. 66.

<sup>(1)</sup> Voy. t. I, p. 90, note 1.

<sup>(2)</sup> On doit d'abord, après avoir enfoncé l'obturateur, ouvrir la prise de vapeur. On retire un peu l'aiguille pour amorcer, puis complètement quand le sifflement de la vapeur a cessé. On règle ensuite à l'aide de la manette qui agit sur le train des ajutages.

**1120** — Dans ce phénomène d'apparence paradoxale (1), le travail nécessaire pour l'introduction du liquide à contre-pression est fourni par la chaleur que met en liberté la condensation de la vapeur au contact de l'eau froide (2). L'expérience le montre d'ailleurs avec évidence, car le Giffard marche mal, et refuse même de fonctionner avec de l'eau tiède (3), pour laquelle cette condensation manque de netteté; ou encore avec une trop grande proportion d'air, qui en est pour son propre compte incapable.

On a imaginé des *injecteurs multiples*, dans lesquels chacun des organes successifs fonctionne au sein du fluide fourni par le précédent (4). L'un aspire l'eau de la bêche, l'autre opère le refoulement dans la chaudière. On obtient par là plus de netteté dans l'action, et l'on arrive ainsi à relever dans une certaine mesure la température limite pour laquelle le jeu de l'appareil se trouve paralysé.

Quelquefois on se trouve dispensé de l'aspiration, si le réservoir est placé au niveau du générateur, ou en contre-haut.

(1) La puissance de l'appareil est même suffisante pour permettre au besoin de faire pénétrer l'eau dans une enceinte où s'exerce une tension supérieure à celle de la vapeur motrice. Cette propriété a été utilisée pour la construction de certains *injecteurs à vapeur d'échappement* (Richard. *La chaudière locomotive*, p. 585. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 782. — *Revue industrielle*, 1885, p. 73. — *Portefeuille économique des machines*, 1884, p. 59. — *La Nature*, 7 mai 1881. — *Bulletin de l'Association amicale des Éléves de l'École des mines*, 1886, p. 121. — *Bulletin de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1882, p. 127. — *Engineering*, 15 juillet 1881, p. 58; 1885, 1<sup>er</sup> semestre, p. 484. — *American machinist*, 29 juillet 1882. — *Official Gazette of the United-States*, t. XX, p. 592).

(2) On peut du reste remarquer que le fluide qui rentre dans la chaudière occupe un volume beaucoup plus petit que quand il en est sorti, même avec l'addition, proportionnellement considérable, de celui qu'il s'est adjoint en chemin. Le travail consommé pour cette introduction est donc en réalité moindre que le travail moteur fourni par l'évacuation; la différence servant pour les autres effets à produire.

(3) Pour ce motif, l'injecteur, universellement employé sur les locomotives, et souvent dans les machines fixes, l'est rarement dans la marine, où l'eau des condenseurs à surface conserve ordinairement une température assez notable. On lui reproche également d'introduire de l'air dans la chaudière. On a essayé sans succès de combattre cet inconvénient par l'emploi de la vapeur surchauffée (injecteur Allaire).

(4) Injecteurs : HANLOCK. *Appleton's cyclopaedia*, t. II, p. 171. — JENKS. *American machinist*, 16 juillet 1881. — KÖRTING (Richard et Baclé. *Manuel du mécanicien conducteur de locomotive*, p. 54. — *Scr. Physique industrielle*, t. II, p. 181. — *Engineering*, 1<sup>er</sup> décembre 1876, p. 474). — PARK. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 598.

**1121** — On remarquera que, dans ce mode de fonctionnement, rien n'est perdu théoriquement. La chaleur mise en liberté et communiquée à l'eau froide, rentre avec celle-ci dans la chaudière. Ajoutons que cette circonstance est en outre très favorable à la régularité de l'allure, puisqu'elle évite le coup de froid qui serait sans cela produit dans le générateur par l'alimentation. Aussi a-t-on reconnu pratiquement, pour cet organe, des rendements remarquables <sup>(1)</sup> allant jusqu'à 88 % <sup>(2)</sup>.

Il n'en est pas toujours de même pour une application analogue des mêmes principes, qui a donné naissance à une catégorie d'appareils appelés *élévateurs*. Ils sont destinés à faire surmonter par la force vive communiquée au fluide, non plus l'obstacle d'une pression intérieure, mais le travail de la gravité. Il y a lieu alors d'opérer une distinction.

Le rendement restera tout aussi parfait, si le genre d'industrie qui réclame cette élévation d'eau utilise en même temps sa chaleur, comme c'est le cas des teintureriers, des établissements de bains, etc. Mais il n'en est plus de même dans le cas contraire, par exemple pour des pompes de cale, pour l'épuisement d'un étage inférieur de mine <sup>(3)</sup>, pour les grues d'alimentation provisoires que l'on établit le long d'une ligne en construction, et dans lesquelles l'eau aura tout le temps de se refroidir avant d'être employée par une locomotive.

**1122** — Il arrive parfois, si la proportion de l'eau et de la vapeur se trouve troublée par une cause quelconque, que l'appareil *se désamorce* et cesse de fonctionner. Le clapet retombe, la vapeur s'échappe par le trop-plein, et la manœuvre de mise en marche est à recommencer.

On a construit, en vue de parer à cet inconvénient, des *injecteurs à remise en marche automatique* (fig. 700). Aussitôt que les conditions normales se représentent dans leur harmonie, le système se

<sup>(1)</sup> Résal. *Mécanique générale*, t. IV, p. 188.

<sup>(2)</sup> Cependant cette supériorité a été parfois contestée (*The Engineer*, 2 juin 1876. — *Rail road Gazette*, 13 mai 1876).

<sup>(3)</sup> Haton de la Goupillière. *Cours d'exploitation des mines*, t. II, p. 327.

remet à fonctionner sans que l'on ait besoin de le régler à nouveau.

On peut employer par exemple une soupape de trop-plein qui gêne l'évacuation, et favorise la pénétration normale de la veine dans le générateur<sup>(1)</sup>, ou encore une pièce mobile manœuvrée par la pesanteur<sup>(2)</sup>, ou par le jet des pressions<sup>(3)</sup>, de manière à établir ou à supprimer, suivant les circonstances, la continuité de l'appareil bi-conique.

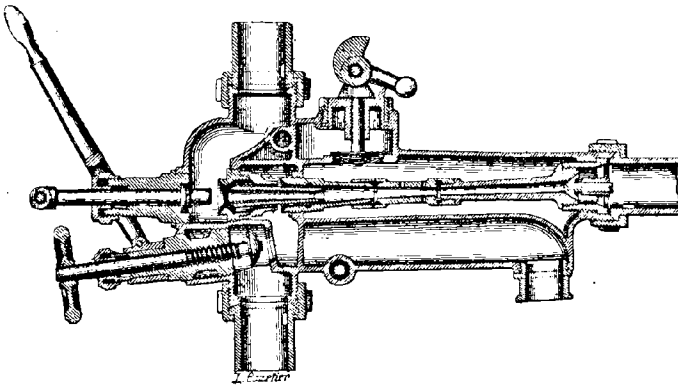


Fig. 700. — Injecteur automoteur Sellers (coupe longitudinale).

**1123** — *Théorie.* — La théorie analytique de l'injecteur présente de grandes difficultés, en raison de l'ignorance où l'on se trouve en ce qui concerne l'état réel du fluide pendant son trajet à travers l'appareil. Nous nous bornerons, pour ce motif, à en donner un aperçu approximalif.

Appelons  $p$  la pression de la chaudière,  $p'$  celle qui règne au débouché de la tuyère, et  $\sigma$  le poids spécifique en ce même lieu. En assimilant purement et simplement cet écoulement à celui d'un liquide dans lequel la pesanteur n'intervient pas d'une manière

<sup>1</sup> Injecteur CUNY (Richard. *La chaudière locomotive*, p. 392. — *Revue générale des chemins de fer*, 1881, 1<sup>er</sup> sem., p. 534).

<sup>2</sup> Injecteur GRESHAM (Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 184. — Richard. *La chaudière locomotive*, p. 386).

<sup>3</sup> Injecteur SELLERS (*Revue industrielle*, 1878, p. 62. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 779. — *Revue générale des chemins de fer*, 1874. — Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. III, p. 189. — *Appleton's cyclopædia of applied mechanics*, t. II, p. 165. — Robinson. *Institution of mechanical engineers*, 1866. — *Engineering*, 22 novembre 1889, p. 611. — *Railroad Gazette*, 1881, p. 124).

appréciable, il vient (\*) pour l'expression de la vitesse  $v$  de l'écoulement :

$$v = \sqrt{2g \frac{p - p'}{\varpi}}.$$

Soit  $m$  le poids de vapeur qui passe pendant un temps quelconque, en entraînant le poids d'eau  $M$ , et prenant avec lui la vitesse commune  $w$ . La quantité de mouvement de l'ensemble sera la même à la sortie et à la rentrée, puisqu'aucune force extérieure n'exerce une action sensible le long de ce parcours. On a d'après cela :

$$mv = (M + m)w.$$

Le mélange rentre d'une manière incessante dans la chaudière, en repassant de la vitesse  $w$  au repos, ainsi que de la tension  $p'$  à la pression  $p$ , et en surmontant pour cela un travail négatif, tandis qu'il avait précédemment passé du repos à la vitesse  $v$ , et de  $p$  à  $p'$ , en recueillant un travail positif. L'équation des forces vives se présente donc sous une forme identique à la précédente :

$$w = \sqrt{2g \frac{p - p'}{\varpi'}},$$

obtenue par la substitution de  $w$  et  $\varpi'$  à  $v$  et  $\varpi$  respectivement.

On déduit de là, en divisant membre à membre :

$$\sqrt{\frac{\varpi'}{\varpi}} = \frac{v}{w} = \frac{M + m}{m},$$

et par suite :

$$\frac{M}{m} = \sqrt{\frac{\varpi'}{\varpi}} - 1.$$

J'appelle d'autre part  $\theta$  la température de l'eau froide, et  $\theta'$  celle que prend l'ensemble. Chaque kilogramme d'eau exige une calorie

(\*) Voy. t. I, p. 47, éq. 16.



pour élever sa température d'un degré. Il en faut donc en tout  $M(\theta' - \theta)$  pour l'échauffement du liquide. De son côté chaque kilogramme de vapeur renfermait <sup>(1)</sup>  $\lambda$  calories (en sus de la valeur que prend l'énergie interne à la température de la glace fondante). Il n'en possède plus que  $\theta'$  après le mélange. Ce fluide a donc perdu en tout  $m(\lambda - \theta')$  calories. Nous admettrons d'après cela l'équation :

$$M(\theta' - \theta) = m(\lambda - \theta'),$$

qui peut se mettre sous la forme :

$$\frac{M}{m} = \frac{\lambda - \theta}{\theta' - \theta} - 1.$$

Il suit de ces deux expressions du rapport des poids, l'égalité :

$$\sqrt{\frac{\omega'}{\omega}} = \frac{\theta' - \theta}{\lambda - \theta}.$$

En réalité  $\omega'$  et  $\theta'$  nous sont inconnus. Tout ce que nous pouvons affirmer *a priori* est que d'une part :

$$\omega' < 1000,$$

puisqu'le mélange ne saurait s'identifier avec l'eau que par une condensation absolument complète; et que :

$$\theta' < 100,$$

attendu que la masse liquide traverse, sans rentrer en vapeur, une enceinte placée en libre communication avec l'atmosphère extérieure.

Si donc nous substituons pour ces inconnues les valeurs précédentes, l'équation se transforme dans l'inégalité suivante :

$$\sqrt{\frac{1000}{\omega}} > \frac{\lambda - 100}{100 - \theta} + 1.$$

(1) Voy. t. I, p. 774, éq. 124.

Or  $\lambda$  est déterminé dans chaque cas, et varie fort peu (n° 954) avec la pression  $p$ , qui modifie au contraire notablement  $\omega$ . On voit donc que cette relation sera d'autant plus facile à satisfaire que les valeurs de  $\omega$  et  $\theta$  seront plus faibles, c'est-à-dire que l'eau d'alimentation sera plus froide, et la pression de la chaudière moins élevée. L'expérience a pleinement confirmé ces deux conséquences du calcul.

### § 3

#### RÉGULATEURS D'ALIMENTATION

**1124** — *Généralités.* — La surveillance de l'alimentation est très essentielle. Une trop grande affluence d'eau tend à augmenter le primage. Un abaissement du niveau expose aux coups de feu, et peut créer un danger imminent d'explosion (n° 1178). Une grande vigilance s'impose donc pour le mécanicien.

On a songé à lui substituer, ou plutôt à lui associer des moyens automatiques mis en jeu par les variations du niveau de l'eau lui-même (1). Un *régulateur d'alimentation* supposé parfait serait évidemment d'une grande utilité. Cependant il ne faut pas perdre de vue que le meilleur appareil peut toujours se déranger, et que la confiance qu'on lui avait accordée devient alors un grand danger, attendu que l'attention du mécanicien, endormie par la sécurité qu'avait inspirée l'appareil, n'est pas avertie du nouvel état des choses. On se trouve ainsi, au lieu d'un supplément de garantie, n'avoir même plus celles que présentent les conditions ordinaires.

Quoi qu'il en soit, les dispositifs les plus variés ont été proposés à cet égard (2). On peut les rattacher à trois systèmes principaux.

(1) Worms de Romilly. Sur un alimentateur de niveau constant. *Annales des mines*, 6<sup>e</sup> série, t. II, p. 415; VII, 254. — Alimentateurs épurateurs à niveau constant. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1879, t. V, p. 601. — Régulateur automatique d'alimentation. *Portefeuille économique des machines*, 1885, p. 410.

(2) Régulateurs d'alimentation : CHALUS. *Génie civil*, t. XIV, p. 205. — GOMFELD. *Revue industrielle*, 1879, p. 576. — CONNERY. *Ibidem*, 4 août 1887, p. 506. — DERVAUX. Hirsch. *Rapport sur l'Exposition de 1878*, p. 420. — EDWARDS. *American machinist*, 17 juillet 1886, p. 5. — FOSS. *Scientific american*, 11 décembre 1886, p. 571. — FRANKLIN. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1825, p. 171. — GAUCHOT (*Revue industrielle*, 12 septembre 1885, p. 565. — *Portefeuille économique des machines*, 1885, p. 140). — GENESTE et HERSCHER. *Ser. Physique industrielle*, t. II, p. 190. — LETHUILLIER.

**1125** — *Régulateur d'alimentation Belleville.* — Le plus répandu repose sur l'emploi d'un flotteur (fig. 701), comme dans l'appareil qui fait partie de la chaudière Belleville (\*).

Ce principe général est fort simple, mais il n'est pas irréprochable. D'une part la sortie de la tige du flotteur à travers l'enveloppe, pour actionner l'appareil d'alimentation, doit concilier l'étanchéité avec une suffisante liberté de mouvement, nonobstant la rouille, l'entartrement, etc.

Mais en outre le flotteur lui-même est sujet à caution. Il consiste en une lentille creuse en tôle, et l'on doit craindre que, sous la pression de la chaudière, et sans que l'on en soit averti, il ne s'introduise de l'eau à travers les plus minces fissures des joints. S'il en est ainsi, le poids du flotteur étant changé, le jeu de l'appareil se trouve dérégulé.

Il convient de placer autant que possible les flotteurs dans des compartiments spéciaux, séparés du reste du bain liquide par une cloison percée de petits trous, afin d'amortir les oscillations que détermine une ébullition tumultueuse.

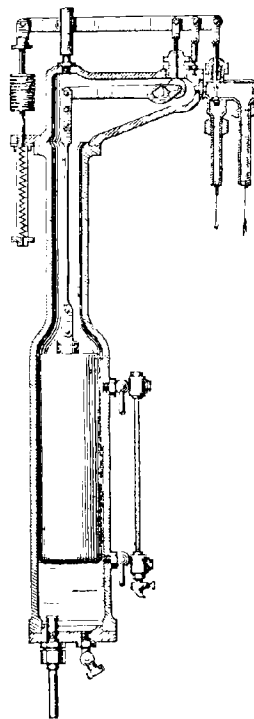


Fig. 701. — Régulateur d'alimentation Belleville. (Coupe verticale).

PINEL [Armengaud. *Publication industrielle*, 2<sup>e</sup> série, t. VIII, p. 455. — *Revue industrielle*, 1878, p. 426. — *Annales industrielles*, 1884, t. I, p. 559. — MACARIÉS (*Revue industrielle*, 1879, p. 517. — *Portefeuille économique des machines*, 1869, p. 59. — *Propagation industrielle*, 1<sup>er</sup> août 1869. — *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, décembre 1876, p. 4. — Pécelet. *Traité de la chaleur*, t. II, p. 78. — MARCIÉ. *Les Mondes*, t. XI, p. 472. — MARIOTTE. Hirsch. *Rapport sur l'Exposition de 1878*, p. 119. — MARTIN et POTEZ. Expériences de Tresca. *Annales du Conservatoire*, 25 novembre 1854. — POIXON et LIÉNARD. *Echo des mines et de la métallurgie*, 1876, p. 119. — THIRION. *Propagation industrielle*, 1<sup>er</sup> août 1869. — ULMANN. *Revue industrielle*, 1880, p. 506. — VALANT et TERNOIS. *Annales des mines*, 1865, 2<sup>e</sup> semestre, p. 254.

(\*) Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 614.

**1126** — *Régulateur d'alimentation Fromentin.* — On peut en

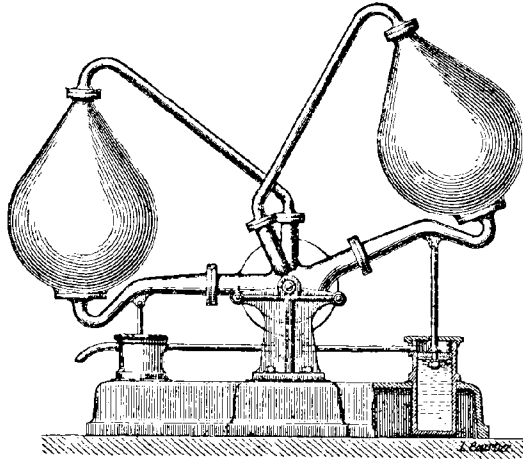


Fig. 702. — Régulateur d'alimentation Fromentin (élévation).

second lieu (fig. 702), comme dans l'alimentateur Fromentin<sup>(4)</sup>, avoir recours à un vase-contrepois, percé à sa base d'un orifice,

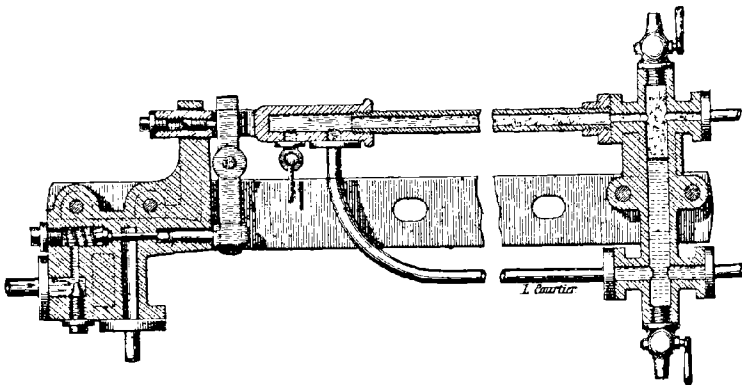


Fig. 703. — Régulateur d'alimentation Cleuet (coupe verticale).

auquel s'adapte un tube suffisamment flexible ou une rotule, établissant la communication avec l'intérieur de la chaudière exacte-

<sup>(4)</sup> *Revue industrielle*, 11 janvier 1882, p. 15; 19 novembre 1885, p. 461. — *Proceedings of the Institution of mechanical engineers*, novembre 1882, p. 479. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I. p. 757.

ment au niveau voulu. Selon que cette embouchure sera plongée dans l'eau ou dans la vapeur, le récipient se remplira d'eau par condensation, ou restera plein de vapeur; son poids variera ainsi considérablement, ce qui déterminera le basculement du système dans un sens ou dans l'autre.

**1127** — *Régulateur d'alimentation Cleuet.* — Un troisième principe, dû à M. Cleuet <sup>(1)</sup> fait intervenir un tube horizontal rigide (fig. 705), dont l'insertion dans le corps cylindrique s'opère au niveau voulu. Selon que cet organe se trouve rempli d'eau ou de vapeur, en raison des variations du niveau, il résiste d'une manière très différente au refroidissement par l'air ambiant. Il se dilate donc ou se contracte alternativement, et les variations de sa longueur, suffisamment amplifiées par un mécanisme de transmission, servent à engager au moment utile l'alimentation.

<sup>(1)</sup> *Annales des mines*, 1862, 2<sup>e</sup> semestre, p. 415. — Hirsch. *Rapport sur l'Exposition de 1878*, p. 119.

## CHAPITRE LX

### DÉPÔTS

#### § 1

#### INCRUSTATIONS

**1128** — La plupart des eaux que l'on emploie pour l'alimentation des chaudières contiennent des matières en dissolution, susceptibles d'agir de deux manières différentes, mais également nuisibles. Les unes sont *corrosives*, et attaquent le métal. Nous reviendrons plus loin sur ce côté de la question (n° 1157). Les autres sont *incrustantes*. Sans exercer d'action chimique, elles restent dans les générateurs après l'évaporation du dissolvant (fig. 704), et y deviennent par leur simple présence une source d'inconvénients, et même de dangers très graves (<sup>1</sup>).

(<sup>1</sup>) Lodin. Note sur les incrustations. *Annales industrielles*, 22 août 1880, p. 244. — Brull et Langlois. Incrustations. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXV-XXVI, p. 567, 453, 466. — Olivier. Note sur les défauts, corrosions et incrustations des chaudières à vapeur, 1885. — Recherches sur l'incrustation des chaudières à vapeur. *Annales des Ponts et Chaussées*, octobre 1854. — Jacquin. *Traité des machines à vapeur*, t. II. — Imbert. Analyse de tartres. *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Etienne*, mars 1876. — Pauly. Concrétions ferrugineuses dans les générateurs. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, avril 1889, p. 671. — Pécelet. *Traité de la chaleur*, t. II, p. 99.

Vivian. Boiler deposits (*Engineering*, 1<sup>er</sup> mai 1891, p. 539. — *Scientific american supplement*, 30 mai 1891, p. 12845). — Dangers of boiler scale. *Ibidem*, 10 mai 1890, p. 11957. — Rowan. On boiler incrustation and corrosion. *British Association*, septembre 1876. — *Engineering*, 8 décembre 1871, p. 581. — Wallace. On boiler incrustations. *Philosophical Society of Glasgow*, t. IV. — Wilson. *Steam boilers*. — Davis. On boiler incrustations. *Proceedings of the Manchester scientific and mechanical Society*, mai 1879. — Rogers. Steam boiler incrustation. *Journal of Franklin Institute*, 1872. — Jensen. On the incrustation of marine boilers. *Transactions of the Society of Engineers*, 1866.

L'idéal serait donc d'alimenter avec de l'eau pure <sup>(1)</sup>. L'eau de pluie recueillie dans des citernes convient très bien à cet égard. A son défaut, le produit des condenseurs de surface (n° 1250), sans mélange avec l'eau réfrigérante, remplit à peu près le même but. Cependant il renferme une

partie des corps gras qui ont servi à lubrifier les pièces de la machine, et qui provoquent dans la chaudière un danger spécial (§ 5). L'eau de mer contient une grande quantité de sels alcalins, qui n'entraînent pas les mêmes conséquences que les sels alcalino-

terreux (dont elle renferme d'ailleurs également une certaine proportion), mais qui déterminent des assujettissements particuliers dont nous aurons également à parler (§ 4).

L'inconvénient le plus sérieux réside dans la présence des sels alcalino-terreux : principalement les sulfates et carbonates de chaux et de magnésic. En l'absence de précautions suffisantes, ces matières s'agglomèrent au contact de la tôle, sous la forme d'une couche pierreuse appelée *tartre* ou *incrustations*, laquelle se durcit par la calcination.

Pour remédier au mal, il se présente deux moyens : ou bien purifier les eaux avant leur entrée dans la chaudière (§ 5), ou s'opposer, dans cette enceinte même, à l'aide d'agents spéciaux appelés désincrustants (§ 6), à leur agglomération sous forme de tartre, en les maintenant à l'état de boue liquide, de manière que l'entretien normal (§ 7) permette de s'en débarrasser facilement.

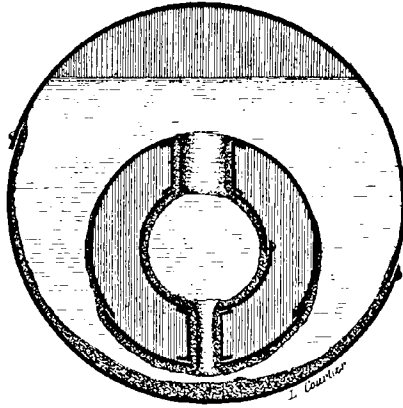


Fig. 704.  
Entartrement d'une chaudière de Cornouailles  
à bouilleur intérieur (coupe transversale).

<sup>(1)</sup> Cependant on a prétendu que l'eau distillée attaque le fer; au point que dans la marine on la coupe avec un peu d'eau de mer. Mais en même temps cette assertion a été contestée (Lodin. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 26 juillet 1880. — Jack. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1866).

Tel est le programme de l'étude que comporte ici cette importante question.

**1129** — Les inconvénients de l'entartrement sont nombreux.

En premier lieu, ce revêtement empêche l'inspection des surfaces métalliques.

L'enlèvement des incrustations est pénible, et il est difficile de le réussir sans risquer d'endommager la tôle, dont les blessures peuvent devenir l'origine d'accidents ultérieurs.

La mauvaise conductibilité des matières pierreuses (1) diminue sensiblement le rendement calorifique du combustible : jusqu'à 40 % selon M. Cousté (2) ; 50 % d'après les expériences de Tresca (3) ; 60 % suivant M. Wilson (4).

L'enveloppe, n'étant plus préservée directement par le contact de l'eau, s'échauffe beaucoup plus que dans le mode ordinaire. Elle se trouve dès lors exposée aux coups de feu, et aux dilatations irrégulières qui compromettent sa durée.

Enfin les incrustations constituent un danger d'explosion. En effet la différence des coefficients de dilatabilité du métal et des matières pierreuses hétérogènes qui adhèrent à sa surface, détermine le fendillement de ces dernières, et parfois leur soulèvement en plaques. L'eau arrive alors au contact de la tôle, qu'elle ne mouillait pas auparavant, et qui a pu rougir. De là une production instantanée de vapeur susceptible de faire monter subitement la pression, et de déterminer une déchirure de l'enveloppe.

## § 2

### COMPOSITION CHIMIQUE DES INCRUSTATIONS

**1130** — Je crois faire une chose utile à la science et à l'industrie, en publiant ici un ensemble inédit de quarante et une analyses chimiques de tartres de chaudières, qui ont été effectuées au Bureau d'Essai annexé à l'École nationale supérieure des mines, et

(1) Égale à  $\frac{1}{37}$  de celle du fer (Rogers. *Steam boilers water and incrustations*).

(2) *Annales des ponts et chaussées*, septembre-octobre 1854.

(3) *Annales du Conservatoire*.

(4) Wilson. *A Treatise of steam boilers*, p. 165.



qui sont dues à M. Rioult, l'un des chimistes de ce laboratoire dirigé par M. Ad. Carnot, inspecteur de l'École des mines.

Je les ai, autant que possible, groupées par séries relatives à un même générateur plus ou moins complexe, de manière à permettre d'apprécier les variations, souvent très notables, que présente la composition de ces dépôts dans les diverses parties de l'appareil.

Indépendamment des éléments qui sont mentionnés ci-dessous, ces analyses ont toutes décelé des *traces* de chlorures alcalins. On s'est abstenu de répéter cette indication pour chacune d'elles.

*Première série.* — Chaudière tubulaire, alimentée avec l'eau des puits de Lille, 1878.

SUBSTANCES	CORPS CYLINDRIQUE	BOUILLEUR SUPÉRIEUR	BOUILLEUR INFÉRIEUR
Sable, argile. . . . .	5,00	5,50	8,60
Sulfate de chaux. . . . .	1,90	1,70	1,00
Carbonate de chaux. . . . .	90,00	82,00	82,00
Carbonate de magnésie . . . . .	2,50	9,00	7,60
Peroxyde de fer . . . . .	0,50	1,50	0,60
Eau, matières organiques . . . . .	traces	traces	traces
TOTAL. . . . .	99,50	99,50	99,80

*Deuxième série.* — Chaudière ordinaire, alimentée avec l'eau des canaux de Lille, 1878.

SUBSTANCES	CORPS CYLINDRIQUE	BOUILLEUR DROIT	BOUILLEUR GAUCHE
Sable, argile. . . . .	8,40	7,10	9,50
Sulfate de chaux. . . . .	59,00	48,00	37,50
Carbonate de chaux. . . . .	32,40	37,60	44,70
Carbonate de magnésie . . . . .	11,50	4,20	5,50
Peroxyde de fer . . . . .	5,00	0,80	0,60
Eau, matières organiques . . . . .	2,80	2,20	1,60
TOTAL. . . . .	99,10	99,90	99,20

*Troisième série.* — Chaudière alimentée avec l'eau des puits de Tourcoing, 1878.

SUBSTANCES	CORPS	BOUILLEUR	BOUILLEUR	TUYAU
	CYLINDRIQUE	DROIT	GAGCHE	D'ALIMENTATION
Sable, argile. . . . .	15,60	11,60	15,00	2,00
Sulfate de chaux. . . . .	59,50	41,60	45,00	3,50
Carbonate de chaux. . . . .	13,60	35,00	29,00	90,50
Carbonate de magnésie . . . . .	9,80	8,50	8,60	3,40
Peroxyde de fer . . . . .	0,80	2,60	1,60	0,50
Eau, matières organiques . . . . .	0,50	0,50	0,60	0,50
TOTAL. . . . .	99,60	99,60	99,80	99,80

*Quatrième série.* — Chaudière alimentée avec l'eau du Cambrasis, 1878.

SUBSTANCES	RÉCHAUFFEUR	CANALISATION	RÉCHAUFFEUR	CANALISATION	RÉCHAUFFEUR
	SUPÉRIEUR	DE CE RÉCHAUFFEUR au suivant	MOYEN	DE CE RÉCHAUFFEUR au suivant	INFÉRIEUR
Sable, argile . . . . .	0,50	0,10	0,50	1,60	0,60
Sulfate de chaux . . . . .	—	—	—	—	—
Carbonate de chaux . . . . .	96,60	96,00	94,50	94,60	93,00
Carbonate de magnésie. . . . .	2,10	2,20	2,50	2,40	2,20
Peroxyde de fer. . . . .	0,60	1,20	2,60	1,00	3,60
Eau, matières organiques. . . . .	traces	traces	traces	traces	traces
TOTAL. . . . .	99,60	99,50	99,50	99,60	99,40

*Cinquième série.* — Chaudière de Roubaix, alimentée avec l'eau de la Lys, 1878. Les deux dernières matières contiennent une si forte proportion de goudron qu'elles brûlent avec flamme.

SUBSTANCES	CORPS CYLINDRIQUE	BOUILLEUR DROIT	BOUILLEUR GAUCHE	RÉCHAUFFEUR SUPÉRIEUR	RÉCHAUFFEUR MOYEN	RÉCHAUFFEUR INFÉRIEUR
Sable, argile. . . . .	10,00	12,00	10,60	2,00	1,60	5,00
Sulfate de chaux . . . .	6,50	6,80	4,00	0,80	0,70	0,30
Carbonate de chaux. . .	60,00	66,30	76,30	83,00	22,00	26,00
Carbonate de magnésie.	16,00	11,90	6,30	7,90	4,50	1,50
Peroxyde de fer. . . . .	5,60	2,00	2,00	3,30	3,60	7,00
Eau, matières organ. . .	1,00	0,50	0,30	2,60	67,00	60,00
Cuivre. . . . .	—	—	—	—	0,15	0,20
TOTAL. . . . .	99,10	99,50	99,50	99,60	99,55	99,80

*Sixième série.* — Chaudière ordinaire du Nord de la France, 1878. Quelques-uns de ces échantillons, spécialement le dernier, renferment tant de goudron qu'ils brûlent avec flamme.

SUBSTANCES	CORPS CYLINDRIQUE	BOUILLEUR DROIT	BOUILLEUR GAUCHE	RÉCHAUFFEUR SUPÉRIEUR	RÉCHAUFFEUR MOYEN	RÉCHAUFFEUR INFÉRIEUR
Sable, argile. . . . .	11,00	12,60	13,30	traces	1,30	10,30
Sulfate de chaux . . . .	1,60	5,30	4,20	0,50	1,00	5,60
Carbonate de chaux. . .	53,00	41,00	58,00	93,00	80,00	10,00
Carbonate de magnésie.	18,60	25,00	29,00	2,60	9,50	1,30
Peroxyde de fer. . . . .	6,30	6,00	7,10	3,00	4,10	12,30
Eau, matières organ. . .	9,30	10,00	8,00	0,60	4,00	57,20
Cuivre. . . . .	—	—	—	—	—	3,10
TOTAL. . . . .	99,80	99,90	99,60	99,70	99,90	99,80

*Septième série.* — Chaudière ordinaire du Nord de la France, 1878. Les matières du corps cylindrique et du réchauffeur inférieur contiennent beaucoup de goudron, et brûlent avec flamme.

SUBSTANCES	CORPS CYLINDRIQUE	BOULLEUR DROIT	BOULLEUR GAUCHE	RÉCHAUFFEUR SUPÉRIEUR	RÉCHAUFFEUR MOYEN	RÉCHAUFFEUR INFÉRIEUR	TUYAU D'ALIMENTATION
Sable, argile . . . . .	5,00	7,50	31,30	traces	traces	13,30	0,30
Sulfate de chaux . . . . .	7,60	7,60	18,30	0,96	1,20	5,90	2,00
Carbonate de chaux. . . . .	62,30	70,50	30,20	95,00	92,60	8,40	91,00
Carbonate de magnésie. . . . .	3,40	6,40	12,30	3,10	4,10	1,10	3,60
Peroxyde de fer. . . . .	6,60	2,00	2,30	0,20	0,20	14,00	0,60
Eau, matières organ. . . . .	15,00	5,60	5,50	0,60	1,60	53,60	2,00
Cuivre. . . . .	—	—	—	—	—	3,50	—
TOTAL. . . . .	99,90	99,40	99,70	99,86	99,70	99,80	99,50

*Huitième série.* — Deux analyses détachées, remarquables par la grande surabondance de silice combinée à la chaux ou à la magnésie, en dehors de l'argile (silicate d'alumine). Eau de Girmagny (territoire de Belfort).

SUBSTANCES	1886	1888	
Argile . . . . .	Alumine. . . . .	3,60	2,30
	Silice . . . . .	7,20	4,60
Silicates alcalino-terreux. . . . .	Silice . . . . .	10,40	5,60
	Chaux. . . . .	12,05	3,30
	Magnésie. . . . .	—	3,10
Sulfate de chaux. . . . .	17,56	65,48	
Carbonate de chaux . . . . .	25,20	—	
Carbonate de magnésie. . . . .	12,18	—	
Peroxyde de fer . . . . .	10,00	4,50	
Eau, matières organiques. . . . .	0,80	10,80	
TOTAL. . . . .	98,99	99,48	

*Neuvième série.* — Cinq analyses détachées :

N° 1. Dépôt de chaudière formé directement, 1875.

N° 2. Matière pulvérulente désincrustée par la glycérine, 1875.

N° 5. Dépôt désincrusté par la glycérine, 1871.

N° 4. Explosion. Dépôt adhérent à une tôle diminuée de la moitié de son épaisseur, 1879.

N° 5. Dépôt d'une chaudière désincrustée par le zinc, 1884.

SUBSTANCES	N° 1	N° 2	N° 3	N° 4	N° 5
Sable, argile . . . . .	3,00	6,00	non dosé	6,00	1,60
Sulfate de chaux. . . . .	11,00	20,50	5,25	—	52,34
Carbonate de chaux . . . . .	61,50	45,00	50,60	62,00	—
Carbonate de magnésie. . . . .	21,00	25,00	34,50	17,00	12,98
Peroxyde de fer. . . . .	non dosé	non dosé	non dosé	11,20	0,55
Eau, matières organiques. . . . .	non dosé	non dosé	non dosé	3,60	0,10
Oxyde de zinc. . . . .	—	—	—	—	33,15
TOTAL. . . . .	»	»	»	99,80	100,52

### § 3

#### CORPS GRAS

**1131** — L'attention a été appelée depuis un certain temps sur un danger très sérieux, qui est occasionné par l'alimentation avec les eaux grasses fournies par le condenseur (1). Cet inconvénient

(1) Danger des dépôts huileux. *La métallurgie*, 16 septembre 1891, p. 1445. — Marquard. Action destructive des graisses. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 5<sup>e</sup> série, t. VIII, p. 400. — Maurice Jourdain. Influence des graisses. *Premier bulletin de l'Association parisienne des Propriétaires d'appareils à vapeur*. — Pereyre. Note sur l'action des matières grasses. *Annales des mines*, 7<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 88. — Mercier. *Ibidem*, t. XV, p. 256. — Farcot. Danger de certaines eaux pour l'alimentation des chaudières. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, 1867, p. 326. — *Ibidem*, 1852, p. 289, 296; 1880, 212. — Delaunay. Les chaudières à haute pression, in-8°, p. 63. — *Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Bruxelles, 1877, p. 115; Bordeaux, 1882, p. 92. — *Revue industrielle*, août 1876, p. 412; mars 1881, p. 125; décembre 1891, p. 507.

Fletcher. *Overheating of furnace crowns and other boiler plates when covered with*

tend même à se développer avec la nouvelle habitude de graisser dans la vapeur (n° 926).

M. Hirsch a fait à cet égard une expérience fort intéressante. Si l'on place sur un feu ardent une casserole en fer battu remplie d'eau, l'ébullition s'effectue dans des conditions ordinaires, même avec une proportion suffisamment restreinte de sels terreux. Mais si, avant de verser l'eau, on a frotté le fond avec un chiffon imbibé d'huile de lin, on voit bientôt se former au centre une tache lumineuse qui se développe rapidement. Le métal est devenu rouge, et en même temps l'ébullition ne procède plus qu'avec lenteur. Une imperceptible couche d'huile végétale suffit donc pour empêcher le contact de l'eau et de la paroi, seule sauvegarde de celle-ci contre l'échauffement.

Ce phénomène ne se produit pas avec de l'huile minérale, à la condition toutefois que l'eau ait été versée à froid, avant toute atteinte de la chaleur capable d'altérer ce lubrifiant ; sans quoi les mêmes circonstances se reproduiraient.

Ces faits révèlent un danger évident de coup de feu pour les chaudières dans lesquelles l'admission de corps gras arriverait à reproduire fortuitement un concours de circonstances analogues. De là un argument en faveur de l'emploi des huiles minérales pour le graissage, de préférence aux huiles organiques (n° 921). On ne perdra pas de vue d'ailleurs que la composition des huiles du commerce est loin d'être toujours parfaitement connue.

**1132** — L'influence fâcheuse des corps gras se manifeste également sous une autre forme. On a observé à maintes reprises, dans des générateurs dont l'allure occasionnait des surprises et des inquiétudes (<sup>1</sup>), la présence d'une poudre brune ou grise, suivant les cas, et douce au toucher. L'eau ne la mouille pas, et se trouve

*water.* — *Mechanic's Magazine*, 17 et 24 septembre, 1<sup>er</sup> octobre 1870. — *The Engineer*, 1873, t. II, p. 94, 286; 1875, t. II, p. 291, 310, 349.

*Zeitschrift des Verbandes der Dampfkessel über Wachnungs Vereines.* — Stingl et Wartha. *Dingler's polytechnisches Journal*, t. CCXV, p. 115. — Wilson. *Ibidem*, p. 166, 242. — *Mittheilungen auf dem Gebiete des Seewesens* t. VII, p. 525.

(<sup>1</sup>) Fentes, criques, fuites persistantes, etc. (*Société des sciences industrielles de Lyon*, 15 mars 1882).

par suite placée, par rapport au métal qui en est tapissé, dans l'état d'isolement dont nous venons d'indiquer les conséquences.

Ce composé complexe a été assimilé à un savon terreux, dû à la réaction réciproque de l'huile et des bases alcalino-terreuses; laquelle s'accomplit sans doute d'une manière variable avec la nature des éléments en présence.

Ajoutons qu'une telle saponification est de nature à mettre en liberté l'acide oléique, capable de corroder les tôles, surtout aux températures élevées.

**1133** — Le remède radical à cette singulière cause de dangers serait évidemment l'abstention de l'emploi des eaux du condenseur. Mais celui-ci se recommande au point de vue de l'économie de chaleur, et surtout de l'élimination des sels calcaires, quand on repasse dans les générateurs l'eau distillée des condenseurs à surface, qui sont de plus en plus répandus dans la marine.

Tout au moins convient-il d'épurer le mieux possible ces eaux par un dégraissage méthodique <sup>(1)</sup>, et de saturer ce qui restie de matière grasse par la soude ou la chaux <sup>(2)</sup>.

**1134** — Des effets analogues à celui des corps gras ont été signalés pour des chaudières de sucreries, alimentées avec des eaux de condensation qui étaient imprégnées de substances visqueuses provenant de fuites des appareils de chauffage <sup>(3)</sup>.

<sup>(1)</sup> Dégraisseurs d'eau d'alimentation : BARNARD, *American machinist*, 26 décembre 1889, p. 8. — FOWDEN. *Ibidem.*, 21 juillet 1888, p. 1. — JARYAN. *Chronique industrielle*, 5 juillet 1889, p. 296. — LENCAUCHEZ et DURANT (*Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, juin 1890, p. 562. — *Bulletin de la Société d'Encouragement*, octobre 1891, p. 562. — *Bulletin de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 2<sup>e</sup> série, t. X, p. 549. — *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1884, p. 217). — LEROY et GAIL. *Annales des mines*, novembre-décembre 1890, p. 201. — VAN DUZEN. *Scientific american*, 30 mai 1885, p. 342. — WHETSONE et GRAN. *American machinist*, 28 octobre 1885, p. 4.

<sup>(2)</sup> *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1878, p. 543. — Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. III, p. 420. — Richard. *La chaudière locomotive*, in-4<sup>o</sup>, p. 326. — LLÉTET et RISBEC (*Mémorial du Génie maritime*, 1876. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1878, p. 543).

<sup>(3)</sup> *Annales des mines*, 7<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 549.

## § 4

**SALURE**

**1135** — Les chaudières marines ont à compter comme les autres avec les sels terreux, car ces derniers se trouvent en dissolution dans l'eau de la mer. Mais en outre, les sels alcalins arriveraient à prendre, en raison du rapprochement des liqueurs, un degré de concentration inadmissible. On se voit donc obligé à des purges fréquentes, pour en rejeter une partie au dehors. Une *pompe de salure* enlève en conséquence cette eau chaude, que l'on expulse à travers des conduits destinés à utiliser sa température, au profit de l'eau d'alimentation qui vient la remplacer et fournir en outre à la vaporisation.

On peut concevoir deux modes extrêmes à cet égard : 1° le type discontinu, dans lequel on attendrait la production du degré de concentration qui ne doit pas être dépassé, pour vider complètement la chaudière et introduire une charge nouvelle ; 2° un mode absolument continu, où les deux fonctions s'accompliraient d'une manière incessante et parallèlement.

Le premier système est évidemment inadmissible pour toutes sortes de motifs. Le second serait parfait en principe, mais d'une réalisation malaisée. On se placera donc entre les deux solutions, en se rapprochant le plus possible de la seconde ; et l'on opérera des *extractions* périodiques suffisamment rapprochées.

Il y a lieu dès lors de déterminer la proportion à établir entre le poids à extraire, et celui de la vapeur formée dans l'intervalle de deux purges.

**1136** — Appelons à cet effet  $P$  le poids total de l'eau que renferme le générateur, au moment où l'on va commencer une opération. Soit  $p$  le poids volatilisé entre deux purges consécutives, et  $p'$  celui que l'on extrait à chaque fois. Appelons encore  $S$  le degré de salure au moment de l'extraction, et  $s$  celui de l'océan.

L'opération s'effectue de la manière suivante. Avant d'opérer



l'enlèvement du poids  $p'$ , on commence par en restituer la moitié  $\frac{p'}{2}$  en eau de mer naturelle, ce qui porte la valeur du contenu total à  $P + \frac{p'}{2}$ . C'est à ce moment que l'on extrait le poids  $p'$  de ce mélange. On laisse donc dans la chaudière  $P - \frac{p'}{2}$ , c'est-à-dire la quantité de sel :

$$\left(P - \frac{p'}{2}\right) S.$$

On ajoute alors la seconde moitié  $\frac{p'}{2}$  d'eau naturelle, qui apporte avec elle la salure :

$$\frac{p'}{2} s.$$

La vaporisation continue ensuite jusqu'à l'extraction suivante, et emporte le poids  $p$  d'eau distillée. L'alimentation normale le remplace progressivement par une quantité  $p$  d'eau de mer, qui introduit dans la chaudière la quantité de sel :

$$ps.$$

Tels sont les différents apports qui constituent le total du sel renfermé dans le générateur à la fin de la période. Si donc nous représentons par  $S_0$  la teneur-limite que l'on ne veut pas dépasser, ce total sera représenté par  $PS_0$ , et l'on pourra poser :

$$(1) \quad PS_0 = \left(P - \frac{p'}{2}\right) S + \left(\frac{p'}{2} + p\right) s.$$

Envisageons maintenant l'extraction qui succède à celle-ci. On commence, ainsi qu'il a été dit, par ajouter le poids d'eau de mer  $\frac{p'}{2}$  qui apporte avec lui :

$$\frac{p'}{2} s,$$

en élevant par conséquent le total précédent à :

$$\left(P - \frac{p'}{2}\right)S + (p + p')s.$$

Ce poids de sel se trouve, à cet instant, renfermé dans la quantité d'eau  $P + \frac{p'}{2}$ . On en peut par conséquent déduire la valeur, provisoirement inconnue, de la teneur  $S$  qui règne dans le générateur au moment de l'extraction. Il vient en effet :

$$S = \frac{\left(P - \frac{p'}{2}\right)S + (p + p')s}{P + \frac{p'}{2}},$$

équation du premier degré par rapport à  $S$ , de laquelle on déduit :

$$S = \frac{p + p'}{p'} s.$$

Reportons cette expression dans l'équation (1). Elle donnera successivement :

$$PS_0 = \left(P - \frac{p'}{2}\right) \frac{p + p'}{p'} s + \left(p + \frac{p'}{2}\right) s,$$

$$P \frac{S_0}{s} = P \left(1 + \frac{p}{p'}\right) + \frac{p}{2},$$

et enfin :

$$\frac{p}{p'} = \frac{S_0 - s}{s} - \frac{1}{2} \frac{p}{P}.$$

Telle est la valeur cherchée qu'il est nécessaire de donner à l'extraction  $p'$ , en fonction de la durée de la période, caractérisée par la quantité  $p$  de vapeur formée dans l'intervalle, du degré-limite de salure  $S_0$  que l'on ne veut pas dépasser, et de l'importance de la chaudière, représentée par le poids  $P$ .

Si l'on veut tendre par la pensée vers l'alimentation continue,  $p$  et  $p'$  s'annulent ensemble ; mais leur rapport converge vers la limite :

$$\frac{p}{p'} = \frac{S_0 - s}{s}.$$

Proposons-nous, par exemple, de concentrer au décuple :

$$S_0 = 10 s,$$

il vient alors :

$$\frac{p'}{p} = 0,11.$$

Il faudrait donc extraire 110 grammes d'eau-mère par kilogramme de vapeur formée.

Dans la pratique, on se règle de préférence sur le sulfate de chaux, qui est plus à redouter que le sel marin.

## § 5

### ÉPURATION

**1137** — *Généralités.* — Les eaux peuvent renfermer des matières *en suspension* ou *en dissolution*. On sépare les troubles à l'aide de bassins de dépôt, ou de filtres rapides.

Si les substances dissoutes sont acides (1), et capables d'attaquer le fer, on les sature à l'aide d'une base, qui est ordinairement l'eau de chaux. On lui substitue le carbonate de soude, si l'on craint qu'un excès de chaux se dépose dans les chaudières.

Les matières organiques se rencontrent fréquemment dans les

(1) La plupart des eaux de mines exercent une forte réaction acide, due à l'oxydation des pyrites qui sont intercalées dans la houille, ou qui constituent des filons métalliques. On est presque toujours obligé d'avoir recours à des eaux de surface et à des aménagements spéciaux, sans pouvoir consacrer à l'alimentation des générateurs les eaux de l'épuisement. (Stocklet. *Emploi des eaux des houillères dans les générateurs. Revue industrielle des mines*, t. XIX, p. 432. — Le Chatelier. *Alimentation avec les eaux des mines. Annales des mines*, 3<sup>e</sup> série, t. XX. — Haton de la Goupillière. *Cours d'Exploitation des mines*, t. II, p. 252.)

eaux. Elles présentent l'inconvénient de rendre l'ébullition mousseuse, et en même temps l'avantage d'agir sur les dépôts terreux à la manière des désincrustants.

La question principale concerne les sels alcalino-terreux. On distingue sous ce rapport : 1° les eaux *calcaires*, très répandues dans les contrées jurassiques ou crétacées, où elles s'imprègnent de bicarbonate de chaux, à la faveur de l'acide carbonique libre qui leur permet de dissoudre le carbonate neutre ; on y trouve de même le bicarbonate de magnésie, principalement dans les régions dolomitiques ; 2° les eaux *séléniteuses* provenant des terrains à plâtre, où elles se chargent de sulfate de chaux, le pire ennemi des chaudières.

Je citerai comme exemple (\*) la teneur de quelques-unes des eaux de Paris, évaluée en kilogrammes par mètre cube, ou en grammes par litre :

EAUX	CARBONATE DE CHAUX	SULFATE DE CHAUX	MATIÈRES DIVERSES	RÉSIDU TOTAL	DEGRÉ HYDROTHERMIQUE
Belleville. . . . .	0,260	1,140	0,250	1,650	128
Arcueil. . . . .	0,170	0,170	0,150	0,470	28
Oureq . . . . .	0,200	0,020	0,050	0,250	30
Seine . . . . .	0,120	0,050	0,020	0,170	18

**1138** — On peut suivre, pour l'élimination de ces éléments, deux méthodes distinctes : l'application de la chaleur, ou les réactions chimiques.

Une élévation modérée de température détruit les bicarbonates, en laissant dégager un équivalent d'acide carbonique et précipiter les carbonates neutres.

Quant au sulfate de chaux, à l'inverse de ce qui a lieu pour l'immense majorité des substances salines, il est doué de la *solubilité inverse*, qui décroît quand la température augmente (\*).

(\*) Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 217.

(\*) Fisher et Gmelin. *Handbook of Chemistry*, t. III, p. 201. — *Dingler's polytechnisches Journal*, t. CGXII, p. 208.

Soluble dans 395 parties d'eau à 55 degrés, il devient <sup>(1)</sup> insoluble vers 150 degrés.

Il suit de là que, dans une chaudière composée d'un corps cylindrique, de bouilleurs et de réchauffeurs, la majeure partie du sulfate de chaux se réunira dans celle de ces enceintes qui approchera de cette dernière température. De là aussi l'utilité du collecteur-réchauffeur d'alimentation qui figure dans la plupart des chaudières tubulées (n° 1044), et qui est destiné à recueillir la majeure partie des dépôts avant l'admission dans des tubes étroits, dont le nettoyage deviendrait sans cela trop difficile.

**1139** — *Réactions chimiques*. — L'emploi des moyens chimiques <sup>(2)</sup> est des plus simples, en ce qui concerne les principes mis en jeu; mais il rencontre, pour son application industrielle en grand, des difficultés pratiques assez sérieuses <sup>(3)</sup>. Il y a lieu de distinguer à cet égard : 1° la réaction qui détermine la précipita-

<sup>(1)</sup> Bien que le fait soit contesté.

<sup>(2)</sup> Carcenat et Derennes. Note sur l'épuration préalable de l'eau d'alimentation, etc. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, 1891. — Delebecque. *Rapport sur l'épuration des eaux d'alimentation des chaudières à vapeur*, in-8°, Lille, 1885. — Forquenot. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, 20 février 1874. — Asselin. *Ibidem*, 21 février 1879. — Closson. *Ibidem*, juin 1880, p. 771. — Richard. *Revue générale des chemins de fer*, 1881, 2<sup>e</sup> sem., 245. — Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur, Lille, 1876, p. 51; Bruxelles, 1877, p. 156; Rouen, 1879, p. 127; Lyon, 1880, p. 64. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXXV, p. 652; 1878, t. III, p. 508; 1879, t. V, p. 601.

Rogers. Incrustation in steam boilers. *Mechanic's magazine*, 26 octobre 1872. — Kirhwood. *Report on the filtration of rivers water*, 1 vol. — Humber. *Treatise on water supply*, 1 vol. — Baldwin Latham (*Sanitary Engineering*, 1 vol. — On the Softening of water. *Society of arts*, 25 juillet 1884).

<sup>(3)</sup> Épurateurs : ANDERSON (*Revue industrielle*, 28 juin 1882. — Devonshire. *La purification des eaux par le fer métallique dans le purificateur rotatif d'Anderson*. Traduction Kemna, in-8°, Gand 1880. — *Minutes of Proceedings of the Institution of civil Engineers*, LXXXI, part. III. — *Journal of Society of arts*, 26 novembre 1886). — BLESSING. *American machinist*, 4 décembre 1886, p. 1. — BUSSE. *Mechanic's Magazine*, 26 mai 1871. — CARROLL (*Annales industrielles*, septembre 1889, p. 277. — *La Nature*, 20 juillet 1888, p. 117). — DEHUES. *Chronique industrielle*, 9 janvier 1887, p. 15. — DERSCHAN. *Ser. Physique industrielle*, t. II, p. 226. — FARQUHAR et OLDHAM. *Institution of Mechanical Engineers*, février 1881. — FOURCY, CHENOT et GUARY. *Revue industrielle*, 14 mai et 15 octobre 1884, 3 septembre 1885. — DE GASSICOURT. *Bulletin de la Société d'encouragement*, t. XVI. — GUÉPIN. *Revue industrielle des mines et de la métallurgie*, t. XXXII, p. 80. — DE HAEN (Delaunay. *Les chaudières à haute pression*, p. 50. — *Royal Society of London*, t. XXII, p. 173, 483. — *Journal of the chemical Society*, n° 161, p. 799). — HOLLIDAY. *Engineering*, 1<sup>er</sup> juillet 1881. — HYATT. *Scientific american*,

tion des substances nuisibles ; 2<sup>o</sup> le décantage destiné à séparer les précipités de l'eau clarifiée et dorénavant prête pour l'alimentation.

Les réactions mises en œuvre doivent être nettes, rapides, économiques. Il serait désirable que les réactifs pussent se précipiter en même temps que les matières qu'ils sont destinés à fixer, de manière qu'il ne restât théoriquement rien en dissolution (\*). Si la double décomposition doit au contraire laisser l'un de ses produits dans la liqueur, il est indispensable que ce dernier ne soit plus susceptible d'entartre les chaudières, et qu'il puisse être enlevé par un simple lavage. Quant au précipité, il doit se séparer nettement et assez rapidement. L'addition des réactifs s'effectue d'après des essais quantitatifs suffisamment précis pour qu'on ne risque pas d'en introduire un excès, qui serait tout à la fois coûteux et directement contraire au but à atteindre.

**1140.** — On emploie un lait de chaux pour saturer les bicarbonates, et les précipiter à l'état de carbonates neutres.

Les eaux séléniteuses sont additionnées de carbonate de soude, qui précipite le carbonate de chaux et laisse en dissolution du sulfate de soude.

Les sels de baryte sont d'un effet très net, en raison de la complète insolubilité du sulfate de baryte. On peut se servir d'azotate de baryte ou de chlorure de baryum. L'azotate de chaux ou le chlorure de calcium produits par la double décomposition restent en dissolution. Mais le chlorure de baryum est cher et vénéneux. En outre, en présence des sels de magnésie, il donne naissance à du chlorure de magnésium, capable d'attaquer la tôle. L'eau de baryte paraît donner de bons résultats.

1<sup>er</sup>, 31 mars, 21 juin 1884. — JACQUIER et DANEK. *Les progrès de l'Industrie*, t. I, pl. 35. — JOHNSON. *The Iron*, 5 novembre 1880. — LACROIX. *Propagation industrielle*, janvier 1868. — LELOGÉ. *Bulletin de la Société d'encouragement*, t. XXX, p. 171. — LENLITZ et JAMES. *Mechanic's magazine*, 8 juin 1872. — MAIGNEN. Richard. *La chaudière locomotive*, in-4<sup>o</sup>, p. 343. — NEEDHAM et KITE. *Mechanic's magazine*, 14 octobre 1871. — PEACOCK. *Annales des arts et manufactures*, t. XVIII, p. 303. — PERRET (*Revue industrielle*, 21 mars 1883. — *The Engineer*, 9 février 1877). — PINCHON. *Bulletin de la Société industrielle d'Elbeuf*, 1885, n<sup>o</sup> 1, p. 27.

(\*) Bien qu'en pratique il subsiste ordinairement une certaine teneur, marquée par 4 à 6 degrés de l'hydrotimètre.

On a essayé l'eau de savon, qui précipite un savon de chaux en laissant dans la liqueur un sulfate alcalin soluble.

**1141** — *Décantage*. — Un brassage énergique est indispensable, afin d'assurer une complète réaction mutuelle des éléments. Le repos doit lui succéder, pour préparer le dépôt des produits. Si l'on peut facilement disposer d'une grande superficie horizontale, on emploie deux bassins conjugués (<sup>1</sup>), dont l'un est en nettoyage pendant le fonctionnement de l'autre.

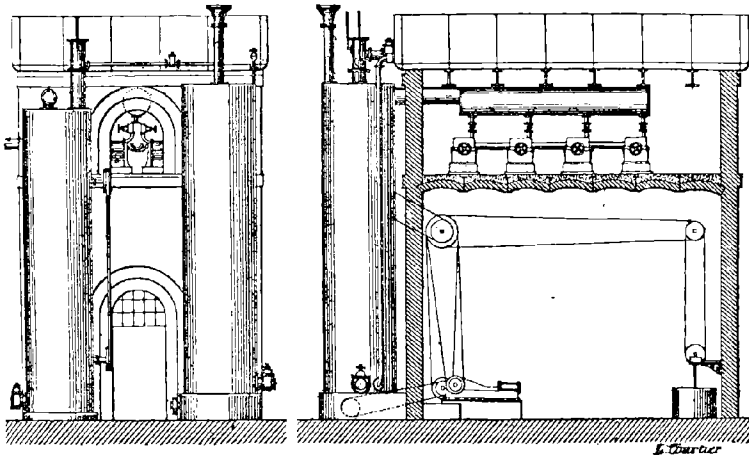


Fig. 705 et 706. — Épurateur Clarke, Atkins et Porter (élevations antérieure et latérale).

Mais dans les centres industriels, la place manque souvent, et l'on a imaginé, en vue de ce cas, certains appareils dans lesquels s'effectuent successivement les diverses opérations. L'eau s'y trouve traitée par le réactif approprié; des agitateurs favorisent le mélange, puis la clarification s'effectue au moyen de nombreux diaphragmes entre lesquels circule le liquide, en abandonnant dans chaque compartiment une partie du précipité qui ne sera plus reprise, et dont on se débarrassera par des purges périodiques.

On se sert également de filtres-presses pour activer et parachever la séparation.

(<sup>1</sup>) Voy. t. I, p. 500, note 2.

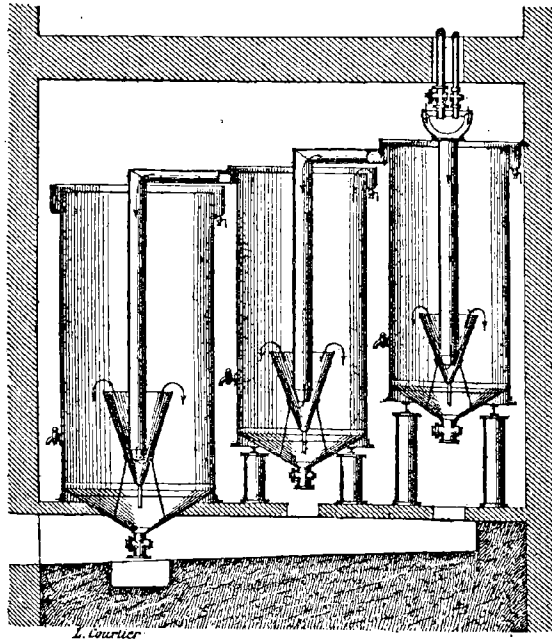


Fig. 707. — Épurateur Béranger et Stingl (coupe verticale).

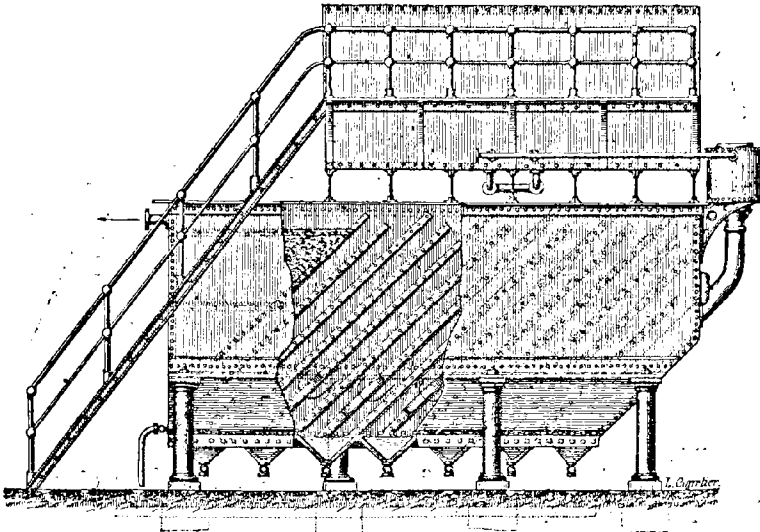


Fig. 708. — Épurateur Paul Gaillet. Type horizontal (coupe et élévation).



Avec le système Letellier <sup>(1)</sup>, l'eau arrive sous pression dans la tuyère d'un injecteur en même temps que le réactif. Le mélange se trouve projeté au milieu d'une enceinte, où se trouvent des filtres

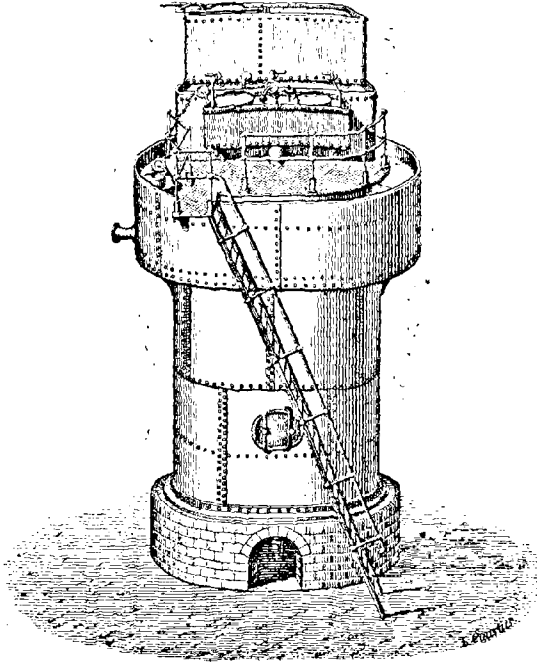


Fig. 709. — Épurateur Paul Gaillet. Type vertical (vue perspective).

formés de tubes percés de trous et environnés de feutre, que l'eau est obligée de traverser.

Je citerai comme exemple de ces diverses combinaisons (fig. 705, 706) le système Clark, Atkins et Porter <sup>(2)</sup>, l'appareil Howatson <sup>(3)</sup>, le décanteur Desrumeaux <sup>(4)</sup>, ainsi que (fig. 707) le procédé Béranger et Stingl <sup>(5)</sup>, et les deux appareils

<sup>(1)</sup> Peclet. *Traité de la chaleur*, t. II, p. 125. — Richard. *La chaudière locomotive*, in-4°, p. 346.

<sup>(2)</sup> *Ibidem*, p. 340. — *The Engineer*, 17 décembre 1880, 18 février 1881.

<sup>(3)</sup> Rapport Hirsch. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 4<sup>e</sup> série, t. VII, p. 57.

<sup>(4)</sup> *Génie civil*, t. XX, p. 385.

<sup>(5)</sup> *Revue industrielle*, juin 1874. — Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation*

de M. Paul Gaillet (<sup>1</sup>), l'un horizontal (fig. 708), l'autre vertical (fig. 709).

## § 6

### DÉSINCROUSTANTS

**1142** — Si l'on renonce à débarrasser préalablement les eaux d'alimentation des substances qu'elles renferment en dissolution, il reste encore la ressource d'empêcher les dépôts de se prendre en masse solide adhérente au métal, et de les maintenir sous la forme d'une bouillie liquide facile à nettoyer. C'est le rôle des *désincrustants* (<sup>2</sup>), dont on a proposé un très grand nombre.

*technique des chemins de fer*, t. III, p. 195. — Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 223. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 942. — *Quatrième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Rouen, 1881, p. 127. — Bour. *Cinquième Congrès*, Lyon, 1881, p. 64.

(<sup>1</sup>) *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 396. — Richard. *La chaudière locomotive*, p. 343.

(<sup>2</sup>) Désincrustation par le tannin. *Chronique industrielle*, 3 juillet 1887, p. 306. — Emploi du sucre comme désincrustant. *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'Industrie minérale de Saint-Étienne*, 1889, p. 15. — Emploi du talc comme désincrustant. *Génie civil*, t. XVIII, p. 159. — Aspirateur pour désincrustant. *La Meunerie française*, 1888, p. 427. — Dulac. Désincrustation (*Revue industrielle*, 4 janvier 1882, p. 5. — *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, 1852, p. 291; 20 février 1874; août 1883, p. 148). — Kuhlmann. *Utilité des carbonates alcalins pour éviter l'incrustation des chaudières*, 1841, Paris. — Davis. *Traité des incrustations des machines à vapeur, et moyen d'empêcher la formation des écailles*. — Pistre. Emploi de l'huile lourde pour prévenir les incrustations. *La Nature*, 19 février 1880, p. 182. — Goudronnage des chaudières (Abbé. *Compte rendu mensuel des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1880, p. 127; 1881, p. 29; juin 1877, p. 22. — *Annales industrielles*, 10 décembre 1871; 12 octobre 1890, p. 462. — *La Nature*, 19 février 1881). — Extrait de campêche. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, juillet 1889, p. 555. — Emploi du coaltar. *Annales industrielles*, 10 décembre 1871, p. 1100. — Richard (*Revue générale des chemins de fer*, 1881, 2<sup>e</sup> semestre, p. 252. — *La chaudière locomotive*, in-4<sup>e</sup>, p. 329). — Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 199. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 2<sup>e</sup> série, t. XVIII, p. 250; XXVII, p. 368. — *Chronique industrielle*, 3 mars 1888, p. 117. — *Journal des fabricants de papier*, p. 258. — *Revue industrielle*, 15 octobre 1887, p. 408. — *La Métallurgie*, 9 novembre 1889, p. 1383. — *Portefeuille économique des machines*, 5<sup>e</sup> série, t. VIII, p. 89.

Napier. On désincrustants. *Philosophical Society of Glasgow*, t. IV. — Burfite. *Journal of the chemical Society*, janvier 1876, p. 73. — Hayes. *Association der Master Mechanics*, mai 1870. — Elsner. *Zusammenstellung der bisher angewendeten Mittel die Entstehung des Kesselsteins*, Berlin, 1854, in-8<sup>o</sup>. — *Rivista di artiglieria e genio*, 1884.

Quelques-uns de ces agents, dont la composition est formulée en vue de conditions déterminées, peuvent rendre d'utiles services. Cependant un grand discrédit s'est attaché en général à ce genre de produits, que le commerce présente trop souvent, sous des noms plus ou moins excentriques, comme convenant indifféremment à tous les cas; prétention évidemment inadmissible<sup>(1)</sup>.

On peut même assurer que plusieurs de ces substances risquent d'être nuisibles dans certaines conditions, et qu'il y a toujours quelque danger à employer des matières dont la composition reste inconnue<sup>(2)</sup>. Par exemple des mélanges acides attaqueront le métal; des corps gras peuvent préparer les inconvénients dont nous avons parlé ci-dessus (n° 1131); des substances solides ou pâteuses exposent à l'encombrement des tubes dans les chaudières à petits éléments. Ces obstructions pourront amener des coups de feu. Il en est de même du goudronnage intérieur, qui demande à être appliqué avec certaines précautions. Dans tous les cas, la masse du désincrétant s'ajoute, dans les dépôts, à celle des matières précipitées.

**1143** — Les éléments qui paraissent jouir de quelque efficacité, et qui entrent le plus souvent dans la composition de ces mixtures, sont en général des matières organiques. Je citerai par exemple : le bois de campêche, les mélasses de sucreries, le tannin, la noix de galle, l'amidon, les pelures de pommes de terre, des sacs de son, la glycérine, le goudron, les résidus de pétrole, le tannate, l'ulmate, le carbonate de soude. La fécule, la gélatine, le varech<sup>(3)</sup>, ont une action peu sûre.

<sup>(1)</sup> *Antitartre* MAIN. — *Glu antitartrique* GÉRARD. — *Liquide antitartrique*. — *Nihiltartre* ROUX. — *Paratartre* MAGSET. — *Tartrifuge* NIVET. — *Tartriphage* CONSTANT. — *Tartrivore*. — *Parasel* GISSLER. — *Anticalcaire* FROIDEVILLE. — *Anti-incrustant*. — *Désincrustateur* PISTRE. — *Désincrustant* PERINBERT. — *Désincrustant à la mélasse* SUMAC. — *Extrait végétal désincrustant*. — *Liquide végétal*. — *Végétalin* LEGOURT. — *Végétaline*. — *Lithophage*. — *Lithoréactif* WEISS. — *Trisodium phosphate* SAINT-ARNAUD. — *Coagulateur* MERTZ. — *Poudre* ALFIERI. — *Calciracine* SOULTZ. — *Hydrhyaline* ÉGROT et INCO. — *Capmore* RABY et VILLAIN, etc.

<sup>(2)</sup> Olry. Note sur les dangers de l'emploi des désincrustants (*Annales des mines*, 8<sup>e</sup> série, t. XVIII, p. 628. — *La métallurgie*, 10 juin 1891, p. 884).

<sup>(3)</sup> Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. III, p. 405.

On a dû abandonner l'oxalate de soude, le borax, la plombagine, le talc, l'argile <sup>(1)</sup>, le sable, le verre pilé, la sciure de bois. Il en est de même de l'emploi direct de l'électricité <sup>(2)</sup>.

On attribue cependant quelquefois à cette dernière l'efficacité, qui paraît sérieuse, d'un réactif assez inattendu en pareille matière : à savoir le zinc métallique <sup>(3)</sup>. On admet aussi que les bulles de gaz développées par la décomposition de l'eau, sous l'influence de ce métal plus oxydable que le fer, empêchent les dépôts de s'agglutiner. Ce moyen réussit particulièrement avec l'eau de mer. Il est propre, peu gênant, assez économique. On peut ultérieurement refondre comme vieux zinc les résidus. Le métal est employé en plaques minces placées au contact de la tôle.

## § 7

### ENTRETIEN

**1144** — *Vidange*. — Une tubulure est insérée au point le plus bas du générateur, pour permettre de le mettre à sec <sup>(4)</sup>. La vidange doit toujours être complète. Les flaques d'eau qui resteraient dans l'intérieur deviendraient une cause d'oxydation. Pour ce motif, on

<sup>(1)</sup> Pelouze. *Manuel du manufacturier*.

<sup>(2)</sup> *Journal universel d'électricité*, 27 février 1886, p. 411. — *La lumière électrique*, t. XIII, p. 121. — *Génie civil*, t. VI, p. 274. — *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, 1868, p. 74; 1870, p. 80, 85. — Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. III, p. 407.

<sup>(3)</sup> Canon. Protection des chaudières par le zinc [*Moniteur industriel*, 19 novembre 1886, p. 366. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*]. — Emploi du zinc comme désincrustant. *Inventions nouvelles*, 20 novembre 1886, p. 669. — Brossard de Corbigny. *Annales des mines*, 7<sup>e</sup> série, t. XII, p. 155. — Lesueur. *Annales de chimie et de physique*, septembre 1875. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 3<sup>e</sup> série, t. III, p. 55; V, 150. — *Revue industrielle*, 1884, p. 107. — *Génie civil*, t. VI, p. 552. — *Revue scientifique*, 1886, t. II, p. 669. — *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'Industrie minérale de Saint-Étienne*, octobre 1875, p. 10, 14. — *Echo des mines et de la métallurgie*, 26 décembre 1886. — *Les Mondes*, t. XLIV, p. 510. — Bienaymé. *Les machines marines*, p. 507. — Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 950. — Instruction de l'Amirauté anglaise. *Revue maritime et coloniale*, décembre 1874.

Swinburning. *Scientific american supplement*, 5 juillet 1884, p. 7080. — King. *Electrogène*. Zinc to prevent boiler incrustations. *Society of Arts*, mai 1884.

<sup>(4)</sup> Perret. Séparation de l'eau et de la vapeur pendant la vidange. Rapport Pihet. *Bulletin de la Société d'encouragement*, avril 1888, p. 165.

donne au corps cylindrique et aux bouilleurs une légère inclinaison.

On laisse écouler l'eau sous une faible pression, afin de chasser, s'il se peut, une partie des boues. Si la chaudière est enterrée, elle se vide comme un siphon d'eau de Seltz, à l'aide d'un tube qui remonte du fond jusqu'au niveau du sol. L'eau franchit cette dénivellation en raison de la pression qu'on laisse dans ce but à la vapeur. Il serait cependant dangereux de vider le générateur à chaud. Une température élevée risquerait, après le départ du liquide, de calciner les boues.

**1145** — *Nettoyage extérieur.* — Les nettoyages de la surface externe des récipients sont nécessaires pour remettre au vif les surfaces métalliques, et les rendre plus aptes à la convection de la chaleur. Le noir de fumée et les cendres ont en effet une conductibilité 400 fois moindre que celle du fer, et 1000 fois moindre que celle du cuivre (<sup>1</sup>).

En outre, les ramonages ont pour résultat de supprimer une cause active de corrosion (n° 941, note 1), à savoir l'occlusion des vapeurs sulfuriques dans les suies, ou les cendres fines qui ont été entraînées.

On balaye les carneaux, on écouvillonne les tubes à fumée, on emploie des jets de vapeur ou des lances d'eau pour atteindre les parties inaccessibles.

Une surveillance attentive doit s'exercer en outre sur tous les organes spéciaux : robinets, soupapes, etc.

**1146** — *Nettoyage intérieur.* — Les nettoyages intérieurs sont encore plus essentiels que les précédents au point de vue de la sécurité. Leur principal objet est l'enlèvement des dépôts. Deux cas peuvent se présenter, suivant que ceux-ci se trouvent à l'état de bouillie liquide ou de tartre consolidé.

Le nettoyage des boues (<sup>2</sup>) doit avoir lieu, suivant la nature des

(<sup>1</sup>) Aussi un rempart de cendres est-il un très bon isolant pour empêcher la déperdition de la chaleur au dehors (n° 1107).

(<sup>2</sup>) Débourbeurs : ANTHONY SCOTT. Wilson. *A treatise on steel boilers*, p. 181. — BROADBENDT. *Mechanic's Magazine*, 1871, t. I, p. 236. — DERVAUX (*Revue industrielle*, 1883, t. II, p. 507. — *Engineering*, 1880, t. II, p. 529). — DUMAS GARDEIX. *Chronique in-*

eaux, tous les mois, tous les quinze jours, ou toutes les semaines. Il y aurait inconvénient à trop attendre, en dehors même des considérations de sécurité, car le primage en serait augmenté.

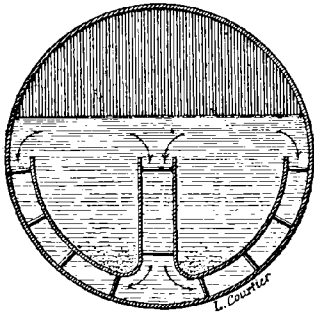


Fig. 710. — Capsule collectrice.  
(Coupe verticale).

Pour faciliter l'enlèvement des boues, on a indiqué l'emploi de collecteurs mobiles <sup>(1)</sup>. Ce sont des capsules métalliques (fig. 710) qui épousent la courbure du corps cylindrique, et que l'on installe près du fond. La chaleur de l'enveloppe extérieure établit dans le bain liquide une circulation ascendante le long des parois. Le courant redescend avec plus de lenteur vers la région centrale. Dans cette chute verticale,

les troubles rencontrent le collecteur, et y restent en grande partie. On retire ces récipients, avec quelque difficulté d'ailleurs, et on les remplace par d'autres.

**1147** — L'enlèvement des tartres est plus difficile. Aussi doit-on chercher à empêcher autant que possible les dépôts de s'agglomérer sous cette forme. Nous avons vu comment, en dehors de l'action des désincrustants, on y parvient dans les chaudières tubulées par l'introduction d'un collecteur-éboueur (n° 1044), et dans les générateurs à corps cylindrique par l'emploi de réchauffeurs (n° 1108), qui ne sont pas soumis à l'action directe des flammes.

*dustrielle*, 29 mai 1887, p. 241. — DUMÉRY. Résal. *Mécanique générale*, t. IV, p. 146. — FERGUSON. *Scientific american*, 5 décembre 1885, p. 556. — GERMAIN. *Revue industrielle*, 31 janvier 1883, p. 45. — HARGREAVES. *Mechanic's Magazine*, 1872, t. I, p. 387. — HOLCROFT et HEYLE. Claudel. *Aide-Mémoire*, p. 601. — HOTCHKISS (*La Nature*, 29 janvier 1881, p. 140. — *American machinist*, 7 novembre 1885, p. 3). — MACK. *Engineering*, 1871, t. I, p. 196. — POPPER. *Propagation industrielle*, septembre 1879. — SCHWITZ et HALWELL. Pécelet. *Traité de la chaleur*, t. II, p. 406. — SIGL. *Engineering*, 1870, t. I, p. 72. — SIM. *Chronique industrielle*, 30 juin 1889, p. 288. — VANDEZEN. *American machinist*, 30 janvier 1886, p. 5.

<sup>(1)</sup> Capsules : DULAC (*Revue industrielle*, 1880, p. 293; 1882, p. 28. — *Portefeuille économique des machines*, 1882, p. 188; 1884, p. 1. — *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 77). — SCHWITZ (Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 957. — Richard. *La chaudière locomotive*, p. 536).

Avec un corps cylindrique unique, on peut partager sa longueur en deux parties par une cloison verticale, qui n'atteint pas tout à fait le niveau du liquide, de manière à laisser les deux biefs en communication. On alimente dans celui des deux qui se trouve le plus éloigné du coup de feu. La température y est suffisante pour précipiter la majeure partie des sels, et cependant elle n'atteint pas l'intensité qui rendrait probable leur calcination.

**1148** — Lorsque l'entartrement est effectué, il devient nécessaire de *détartre* la chaudière. Nous avons vu (n° 1023) comment on s'y prend pour les tubes de fumée, et quelles difficultés on rencontre à cet égard.

Pour les corps cylindriques ou les bouilleurs, un ouvrier s'introduit par le trou d'homme. Il opère le *piquage* des incrustations à l'aide du burin et du marteau. Cette opération doit être faite avec une grande précaution, car le ciseau pourrait offenser le métal, dont les blessures seraient de nature à préparer ultérieurement des accidents.

Ces opérations, fréquemment répétées, fatiguent toujours les générateurs. On a observé dans la marine qu'un accroissement sensible de durée a coïncidé avec la substitution à l'ancien état de choses, de l'alimentation avec l'eau distillée.

On doit affecter au piquage des hommes habiles et consciencieux, car leur besogne est pénible et son contrôle difficile.

**1149** — On a proposé pour l'enlèvement des concrétions l'usage des acides. Ce moyen est en effet radical, mais doit être absolument proscrit, comme susceptible d'attaquer la tôle, sans qu'il soit possible de limiter son action.

On emploie quelquefois aussi une manœuvre extrêmement nuisible, en provoquant des refroidissements brusques, pour déterminer dans le métal des contractions rapides, qui n'étant pas suivies par la couche pierreuse, beaucoup moins conductrice, déterminent le fendillement de cette dernière, et facilitent ainsi son enlèvement par écailles. Une telle opération tourmente la tôle, fatigue les assemblages, et prépare à brève échéance la mise

hors de service. On doit conseiller au contraire d'effectuer les lavages à l'eau chaude.

Cet effet se produit d'ailleurs de lui-même, lorsque l'on vient à soumettre un générateur au régime d'un bon désincrustant. On voit alors disparaître peu à peu les anciens tartres.

**1150** — Lorsque le nettoyage extérieur est terminé, on enduit les surfaces de plombagine, afin de diminuer leur adhérence pour les incrustations.

Il est d'une grande importance, au moment où l'ouvrier sort de la chaudière, qu'il veille attentivement à n'y rien laisser. Un outil, un chiffon de nettoyage, une pierre de flotteur, en empêchant le contact de l'eau, peuvent déterminer sur ce point un coup de feu, une soufflure, qui rendront bientôt une réparation indispensable.

**1151** — *Visites.* — Les visites des chaudières par un agent expérimenté doivent se succéder régulièrement (1). On distingue les visites extérieures ou intérieures, partielles ou totales. Pour faciliter ces dernières, on établit au besoin quelques-unes des armatures métalliques de manière à pouvoir les démonter. En outre il convient, à des intervalles périodiques, de *déshabiller* complètement la chaudière en démolissant toutes les maçonneries. Outre qu'elles risquent beaucoup, en vieillissant, d'être fendillées, humides, etc., cette opération permet d'examiner l'enveloppe dans toutes ses parties. On choisit de préférence pour cette opération l'instant du renouvellement de l'épreuve légale (n° 1189), en vue de laquelle l'ingénieur des mines a toujours le droit d'exiger cette mise à nu, bien qu'il puisse également user de tolérance à cet égard suivant les circonstances(2). Les Associations de propriétaires d'appareils à vapeur (n° 1191) établissent, pour leurs clients, un service périodique de visites, confié à un personnel expérimenté.

L'examen se fait à vue, avec beaucoup d'attention, et au son. en interrogeant la tôle avec le marteau, pour juger, d'après le bruit

(1) Visites des chaudières. *La Lumière électrique*, t. XXV, p. 447.

(2) Circulaire ministérielle du 25 août 1887.



qu'elle rend, ses diminutions d'épaisseur ou autres défauts; appréciation difficile d'ailleurs, et assez sujette à caution.

**1152** — *Réparations.* — Les réparations ne doivent pas être exécutées par petites pièces, dont les dimensions deviendraient comparables à celles de la clouure. Les feuilles seront toujours cintrées dans le sens du laminage. Une pièce rapportée doit être assemblée *en dedans*. Placée en dehors, elle briserait la flamme, et déterminerait à l'intérieur la formation d'une poche pour les dépôts.

Il est bon que les tubes soient interchangeables, de manière à permettre de les remplacer facilement à l'aide de joints à vis consolidés par des contrebagues. Cet avantage est important dans la marine, car on ne peut disposer à bord de toutes les ressources que procurent, pour les réparations, les ateliers établis à terre. Cette circonstance crée un titre de préférence en faveur des chaudières tubulées.

Si, après une réparation, les avaries se reproduisent au même endroit et de la même manière, il y a lieu de suspecter le mode de construction, qui est sans doute de nature à déterminer, par l'excès des dilatations, des fatigues abusives pour certains joints.

## CHAPITRE LXI

### EXPLOSIONS

#### § 1

#### EFFETS DES EXPLOSIONS

**1153** — *Exemples.* — Les explosions des générateurs à vapeur <sup>(1)</sup> prennent souvent les proportions d'une épouvantable catastrophe, tant sous le rapport des hécatombes dont elles sont l'occasion, que

<sup>(1)</sup> *Annales des mines*, 7<sup>e</sup> série, t. I, p. 424; III, 1; IV, 28; V, 559; VI, 355; IX, 455, 463; X, 197, 201; XI, 104; XII, 490; XIII, 201, 216, 264, 279, 294, 301, 590; XIV, 68, 244, 548; XV, 313; XVII, 22; XVIII, 541, 544, 549; XIX, 48; XX, 209, 498; 8<sup>e</sup> série, II, 468, 557; III, 301; IV, 238, 249, 269; VI, 496; XII, 361; XV, 5; XVIII, 608. — Durand. Note sur les défauts des chaudières. *Bulletin de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 2<sup>e</sup> série, t. X, p. 51. — *Comptes rendus des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, décembre 1875, p. 10; juin 1876, p. 4; mai 1877, p. 45; 1881, p. 156, 219. — Désiré Tassin. *Explosions foudroyantes des machines à vapeur*, in-12. — Wronski. *Explosion irrésistible*, p. 49. — Hirsch. Expériences sur les coups de feu des chaudières à vapeur. *Annales du Conservatoire*, 2<sup>e</sup> série, t. I. — Compère. *Les chaudières à vapeur au point de vue de la sécurité*, in-8<sup>o</sup>, 1890. — Limonet. *Les explosions de chaudières*, in-8<sup>o</sup>. — Examen des théories des explosions. *Annales industrielles*, 1884, t. II, p. 440. — Soupapes coincées. *Revue industrielle*, 1876, p. 452. — *Bulletin du Ministère des travaux publics*, t. X, p. 566. — *Bulletin de l'Association scientifique de France*, juin 1875, p. 156; avril 1875, p. 15. — *Les Mondes*, t. XXX, p. 584; XXXVII, 712. — Delaunay. *Étude sur les générateurs à haute pression*, in-8<sup>o</sup>.

Thurston. Steam boilers as magazines of explosive energy. *Journal of Franklin Institute*, décembre 1884. — The Causes of boilers explosions. *Scientific american supplement*, 24 octobre 1891, p. 13176. — Hallet. On the Causes and Remedies of corrosions in marine boilers. *Institution of mechanical Engineers*, août 1880. — Engert. The defects of steam boilers and their remedies. *Van Nostrand's Engineering magazine*, juin 1884, p. 254. — *Engineering*, 5 janvier 1872; 1879, 479; 1886, 277, 289, 297; 1891, p. 490; 1892, 267.

Scheffer. Expériences sur les explosions. *Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens*, t. XIV, p. 141.

par les dégâts matériels qui les accompagnent (fig. 711, 712, 715). On en jugera par les exemples suivants.

*Coppenanfort* (Nord) ; 13 février 1864 ; 14 tués, 2 blessés <sup>(1)</sup>.

*Le Citis*, bateau naviguant sur le Rhône avec 26 passagers ; 17 février 1841 ; 11 tués, 9 blessés <sup>(2)</sup>.

*Saint-Bernard* (Aube) ; 19 juillet 1873 ; 12 tués, 9 blessés.

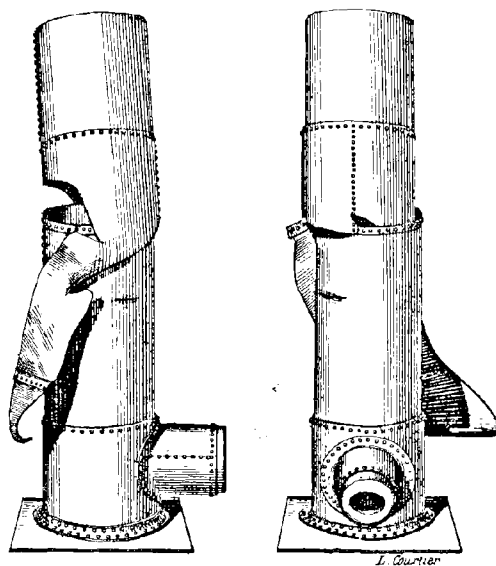


Fig. 711 et 712. — Explosion d'une chaudière verticale (élevations antérieure et latérale).

*Hartford* (Connecticut) ; 18 février 1889 ; 23 tués, 40 blessés <sup>(3)</sup>.

*Friedenshütte* (Haute-Silésie) ; juillet 1887 ; une batterie de 23 chaudières chauffées au gaz des hauts fourneaux, qui ont sauté toutes ensemble ; 12 tués, 35 blessés <sup>(4)</sup>.

*Commentry* (Allier) ; 8 septembre 1874 ; chaudières verticales métallurgiques ; 22 tués, 32 blessés.

<sup>(1)</sup> Jacquin. *Des machines à vapeur*, t. II, p. 162.

<sup>(2)</sup> *Ibidem*.

<sup>(3)</sup> Walckenaer. *Annales des mines*, juillet-août 1889.

<sup>(4)</sup> Olry. *Annales des mines*, 1889, 2<sup>e</sup> sem., p. 5. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1888, p. 450. — *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1888, p. 151. — *Annales des ponts et chaussées*, 1889, 2<sup>e</sup> sem., p. 195. — *Portefeuille économique des machines*, 5<sup>e</sup> série, t. XIII, p. 174.

*Eurville* (Haute-Marne) ; 10 novembre 1884 ; chaudières verticales métallurgiques ; 22 tués, 53 blessés <sup>(1)</sup>.

*Walsall* (Angleterre) ; mars 1880 ; chaudières de forge ; 27 tués, 28 blessés.

*Le Thunderer*, cuirassé anglais, avec des chaudières neuves ; 50 tués et 30 blessés <sup>(2)</sup>.

*La Revanche*, cuirassé ; plus de 80 personnes atteintes <sup>(3)</sup>.

*Marnaval* (Haute-Marne) ; 31 mars 1883 ; chaudières verticales métallurgiques ; 30 tués, 61 blessés <sup>(4)</sup>.

**1151** — Les dégâts matériels présentent souvent des circonstances saisissantes.

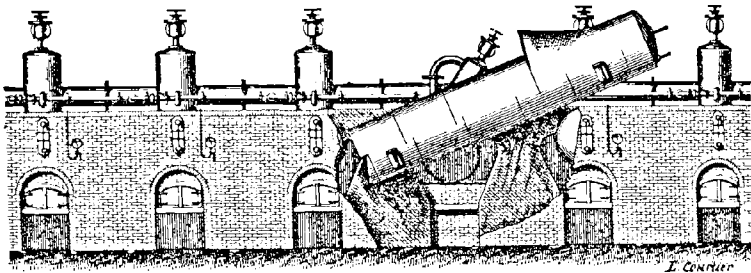


Fig. 713. — Explosion dans une batterie de chaudières horizontales (élévation).

L'explosion de Bolton qui, en 1845, a tué 18 personnes, a rasé complètement les constructions de l'usine.

Un lessiveur de la papeterie de Dvoogenbosch, près de Bruxelles, a sauté le 19 mars 1878, a traversé deux murs, dont l'un présentait un mètre d'épaisseur, et a détruit les bâtiments en ensevelissant 8 victimes sous les décombres <sup>(5)</sup>.

Le navire *l'Éclairer* a coulé à pic. Un dragueur du Rhin à Strasbourg a été coupé en deux par l'explosion de sa chaudière.

<sup>(1)</sup> *Annales des mines*, 8<sup>e</sup> série, t. VII, p. 469.

<sup>(2)</sup> *Revue industrielle*, 1876, p. 452.

<sup>(3)</sup> Delaunay. *Étude sur les générateurs à vapeur à haute pression*, p. 20.

<sup>(4)</sup> Trautmann. *Annales des mines*, 8<sup>e</sup> série, t. IV, p. 249.

<sup>(5)</sup> Delaunay. *Étude sur les générateurs à vapeur à haute pression*, p. 17.

Dans un accident du 2 janvier 1864, à Paris, une moitié du générateur a été projetée à 50 mètres de hauteur <sup>(1)</sup>.

La locomotive Irk, de 20 tonnes, a été lancée verticalement à une hauteur de 9 mètres à travers un plancher. Elle est allée retomber à 54 mètres de distance <sup>(2)</sup>.

La chaudière d'une locomotive du type Engerth s'est détachée de son châssis qui a continué de rouler, quoique ayant déraillé, et ne s'est arrêté qu'à 58 mètres de là. Elle s'est élancée par-dessus les fils du télégraphe, pour aller retomber à 158 mètres; elle a rebondi, et a parcouru une nouvelle distance de 36 mètres <sup>(3)</sup>.

Dans l'explosion de la batterie de cinq chaudières d'une sucrerie du Pas-de-Calais, les maçonneries ont été rasées, et des débris lancés jusqu'à 1 000 mètres <sup>(4)</sup>.

**1155** — *Influence du volume d'eau.* — L'importance des dégâts matériels est en rapport direct avec la quantité d'eau qui se trouve renfermée dans le générateur, ainsi qu'avec la pression. Aussi est-il naturel que la réglementation publique ait pris pour base de ses classifications le produit numérique de deux facteurs, qui sont en rapport avec ces deux éléments (n° 1188).

Cette eau crée en outre un grand danger pour les hommes. Les désordres apportés par la vapeur dans les poumons, et surtout les effets des jets d'eau bouillante sont trop souvent mortels. On peut admettre approximativement que les deux tiers des décès sont occasionnés par des brûlures, et un tiers seulement par des effets mécaniques.

Réciproquement, le peu d'importance des dégâts matériels que l'on observe en certains cas, porte alors à penser, dans l'instruction qui suit un accident, que le niveau s'était abaissé peu à peu, et que le générateur ne contenait plus que peu de liquide.

**1156** — L'innocuité relative des chaudières connues sous le

<sup>(1)</sup> Jacqmin. *Des machines à vapeur*, t. II, p. 160.

<sup>(2)</sup> *Ibidem.*

<sup>(3)</sup> Lebleu. *Annales des mines*, 1862.

<sup>(4)</sup> *Troisième bulletin de l'Association parisienne des Propriétaires d'appareils à vapeur.* — Delaunay. *Étude sur les générateurs à vapeur à haute pression*, p. 16.

nom d'inexplosibles repose sur le même principe. Nous avons déjà dit qu'elle ne concerne, pour cette classe d'appareils, que l'étendue des dégâts, et non leur fréquence.

En effet, non seulement le volume d'eau est alors très réduit, mais il est intelligemment disposé, et fractionné en une grande quantité de tubes, particulièrement dans le type Belleville. La chance d'avaries se multiplie à la vérité par le nombre de ces derniers, mais leur solidité est facilement surabondante. On peut donc admettre, sans prétention d'ailleurs à la rigueur, que la probabilité théorique générale d'une rupture varie peu. Mais les conséquences en seront tout à fait différentes. Le volume d'un cylindre est en effet proportionnel tout à la fois à sa hauteur et au carré du diamètre. D'une part la longueur des tubes d'une chaudière tubulée est en général beaucoup moindre que celle d'un corps cylindrique. En outre un tube de 0 m. 10 de diamètre contiendrait, sous une même longueur, 100 fois moins d'eau qu'un corps cylindrique d'un mètre, 1600 fois moins qu'un corps de 4 mètres. Il est nécessaire, à la vérité, d'ajouter que ce tube ne sera pas seul à se vider. Toute l'eau finira par sortir, mais d'une manière plus progressive, en raison de la forme compliquée de l'appareil. Il est rare qu'une rupture de tube suffise à disloquer le fourneau.

**1157** — Dans les générateurs à grand volume d'eau, le mode de construction influe d'une manière générale sur les conséquences d'une rupture.

Les chaudières verticales métallurgiques sont particulièrement dangereuses. Les fragments seront nombreux, en raison de l'émiettement presque inévitable de la cheminée. Partant de si haut, ils porteront plus loin ; d'autant mieux que l'effort normal à la paroi est partout horizontal, tandis qu'avec une chaudière couchée, une grande partie des projections s'effectuera verticalement. Ces motifs peuvent expliquer, qu'au lieu d'envelopper ces générateurs de cheminées en briques formant carneau, on les munisse quelquefois de foyers intérieurs (n° 1058).

Les générateurs de Cornouailles ayant plus de chances de crever vers l'intérieur, dont l'enveloppe se trouve placée dans de moins

bonnes conditions de résistance, étendront moins loin que d'autres leurs ravages. Mais les conséquences d'une rupture sont alors particulièrement redoutables pour les chauffeurs.

Les chaudières horizontales à foyer extérieur ont leur centre de gravité à la partie postérieure, où se trouve la majeure partie du poids de l'eau. Elles ont donc chance de basculer de l'avant vers l'arrière. Il est bon, pour ce motif, de n'y pas placer directement la cheminée, qui aurait par là plus de chance d'être rasée. Il sera préférable de la mettre sur le côté, près de l'avant.

**1158** — *Appréciation numérique.* — Il est facile de préciser la notion de l'influence du volume d'eau, et de se rendre compte numériquement de l'énorme accumulation d'énergie destructive qui se trouve tenue en bride dans une chaudière à grand volume, et subitement déchainée au moment de sa rupture <sup>(1)</sup>.

Appelons à cet effet  $p$  la tension, et  $\theta$  la température correspondante <sup>(2)</sup>. La chute que subira cette pression pour atteindre celle du baromètre déterminera un abaissement thermométrique  $\theta - 100$ , et mettra en liberté un nombre égal de calories par kilogramme de liquide. Pour volatiliser l'un de ces derniers à l'air libre <sup>(3)</sup>, il faut (n° 477) employer un nombre de calories  $r_{100}$ , qui a pour valeur 536,50. Le poids total qu'il est possible de réduire en vapeur est donc :

$$\frac{\theta - 100}{536,5}$$

Son expansion exercera un travail extérieur dont l'équivalent calorifique est  $\left(\frac{pu}{E}\right)_{100}$ , c'est-à-dire 40,092 calories, qui représentent le nombre de kilogrammètres :  $424 \times 40,092 = 16\,999$ . On

<sup>(1)</sup> Rankine (*Philosophical magazine*, novembre 1883. — *The Engineer*, 11 novembre 1870). — Thurston. *Ibidem*, 3 juillet 1885 — Callon. *Cours de machines*, t. II, p. 465.

<sup>(2)</sup> Voy. t. I, p. 771.

<sup>(3)</sup> Hypothèse qui n'est à la vérité qu'approximative.

développe donc enfin, *pour chaque kilogramme liquide* enfermé dans la chaudière, le travail :

$$16\,999 \frac{\theta - 100}{556,5} = 51,696 (\theta - 100).$$

**1159** — En désignant par  $m$  ce nombre de kilogrammètres, on voit que l'énergie disponible *totale* serait capable théoriquement d'élever tout le contenu à la hauteur de  $m$  mètres. En d'autres termes, elle représente l'écrasement vertical que produirait cette même masse, en tombant d'une telle hauteur.

Si l'on veut encore une autre image, on remarquera que la vitesse produite par une pareille chute aurait pour expression :

$$\sqrt{2gm} = 24,956 \sqrt{\theta - 100}.$$

L'énergie disponible serait donc comparable (en faisant abstraction de sa dissémination dans diverses directions) au choc qu'exercerait le contenu de la chaudière lancé avec cette vitesse.

**1160** — Établissons enfin un dernier rapprochement avec les effets de l'artillerie actuelle. Sa vitesse pratique  $v$ , estimée en mètres par seconde, oscille suivant les circonstances entre les limites extrêmes :

$$v' = 450, \quad v'' = 900.$$

Si l'on veut connaître le poids  $P$  qui devrait être lancé avec cette vitesse  $v$  pour posséder la force vive ci-dessus, il faut, en représentant par  $\Pi$  le contenu de la chaudière, poser l'égalité :

$$\frac{1}{2} \frac{P}{g} v^2 = m\Pi,$$

$$P = \frac{2gm\Pi}{v^2} = 621,799 \frac{\Pi(\theta - 100)}{v^2};$$



ce qui donne pour les deux limites en question :

$$P' = 0,005\,042 \Pi (\theta - 100),$$

$$P'' = 0,000\,768 \Pi (\theta - 100).$$

Les projectiles usuels qui correspondent respectivement aux vitesses  $v'$  et  $v''$  pèsent ordinairement  $8^{\text{kg}},5$  ou  $780$  kilogrammes. Les nombres de projectiles de ces deux sortes renfermés dans les poids correspondants  $P'$  et  $P''$  seront donc :

$$n' = \frac{P'}{8,5} = 0,000\,558 \Pi (\theta - 100),$$

$$n'' = \frac{P''}{780} = 0,000\,001 \Pi (\theta - 100),$$

en fonction des deux éléments  $\Pi$  et  $\theta$  qui caractérisent le travail potentiel enfermé dans la chaudière.

**1161** — Imaginons, pour fixer numériquement les idées, un timbre de  $4$  kilogrammes seulement, ce qui est très modéré. La pression  $p$  sera de  $5$  kilogrammes par centimètre carré, correspondant à la température :

$$\theta = 150^{\circ},99.$$

L'énergie  $m$  déployée en travail extérieur par chaque kilogramme de liquide devient :

$$m = 1\,616^{\text{kgm}},18.$$

Les poids lancés avec les vitesses  $v'$  et  $v''$  sont respectivement :

$$P' = 0,155 \Pi, \quad P'' = 0,059 \Pi;$$

et les nombres correspondants des projectiles des deux types :

$$n' = 0,01825 \Pi, \quad n'' = 0,00005 \Pi.$$

Si nous envisageons, en second lieu, un timbre de 9 kilogrammes, qui est encore notablement inférieur à la pratique des chemins de fer, la pression sera de 10 kilogrammes, et l'on aura :

$$= 178^{\circ},89.$$

$$m = 2500^{\text{kgm}},17.$$

$$P' = 0,240 \Pi,$$

$$P'' = 0,061 \Pi;$$

$$n' = 0,02824 \Pi,$$

$$n'' = 0,00008 \Pi.$$

Pour nous en tenir définitivement au nombre  $n'$ , on voit que chaque mètre cube d'eau renfermé dans le générateur équivaut alors théoriquement à une décharge de 28 projectiles de champ de bataille.

Imaginons, par exemple, un corps cylindrique de 1 mètre de diamètre, terminé par deux hémisphères, avec des génératrices de 10 mètres de longueur. Supposons-le rempli à moitié et timbré, comme il a été dit, à 9 kilogrammes. Il représentera, dans ces conditions, l'équivalent de 236 semblables projectiles.

On se figure dès lors quelle peut être l'étendue des ravages exercés. Que serait-ce donc pour les batteries de semblables générateurs qu'on laissait autrefois en libre communication, avant le règlement qui a exigé (n° 1194) leur isolement respectif par des clapets de retenue?

## § 2

### CAUSES D'EXPLOSIONS

**1162** — *Généralités.* — La cause essentielle des explosions est toujours la même : c'est la disproportion entre la pression intérieure et la résistance de l'enveloppe, soit que la première se soit élevée abusivement, soit que celle-ci ait diminué progressivement ou accidentellement. A la vérité, un tel énoncé avance peu la question, et ce sont précisément les motifs de cette déséquilibration qu'il importe d'analyser en détail, afin de pouvoir se tenir en garde

contre eux. C'est en réalité à eux que se rapporte dans l'usage l'expression de *causes d'explosion*.

On peut les rattacher à quatre ordres principaux : 1° *défauts d'établissement*, provenant de la faute plus ou moins lourde du constructeur; 2° *défauts d'entretien*, dont la responsabilité incombe au personnel de l'usine, depuis la direction, qui doit assurer un service régulier de visites, et veiller à ce qu'il soit remédié sans retard aux défauts relevés, jusqu'aux agents en sous-ordre ou aux simples ouvriers chargés des détails de ces visites ou de ces réparations; 3° *défauts de fonctionnement*, comprenant toutes les irrégularités du service quotidien des chauffeurs; 4° *causes fortuites*, que rien ne pouvait faire prévoir, et qui n'engagent aucune responsabilité.

**1163** — *Défauts de construction*. — Si la tôle est *aigre*, elle rompt sans prévenir et ses fragments volent en éclats <sup>(1)</sup>; avec une ductilité suffisante, au contraire, le métal avertit en général de l'approche du danger par des fuites croissantes, puis il se déchire, quelquefois sans projection. Il peut même arriver alors que la sortie des fluides soit assez progressive pour restreindre les conséquences du désastre.

La concurrence commerciale, tous les jours plus active, porte malheureusement certains constructeurs à faire, sur le choix du métal, des économies bien mal entendues. Sa résistance statique et sa douceur doivent être vérifiées par les moyens en usage. Sa résistance vive mérite également d'être prise en considération.

Il est nécessaire d'ajouter que certains fers, originellement recommandables, deviennent aigres avec le temps

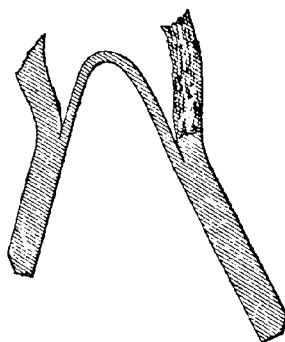


Fig. 714. — Paille.

<sup>(1)</sup> La température extérieure semble exercer une certaine influence à cet égard, et les explosions de locomotives paraissent plus fréquentes aux États-Unis en hiver qu'en été (*Railroad Gazette*, 23 janvier 1880).

En dehors de sa qualité générale, la tôle risque de présenter des défauts locaux tels que les *pailles* (fig. 714), ou les *dédoublures* (fig. 715) qui, en interrompant la conductibilité, préparent des coups de feu sur lesquels nous reviendrons dans le paragraphe 3.

**1164** — Un bon métal n'est pas toujours bien mis en œuvre. Le *cintrage en travers* prépare des *criques* (n° 975). Une *épaisseur trop faible* crée un danger encore plus immédiat.

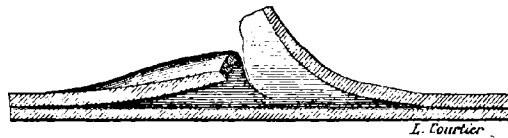


Fig. 715. — Dédoublure.

Le constructeur peut employer de *mauvaises proportions générales*, des *armatures insuffisantes*, des *congés d'emboutissage trop raides*, des combinaisons qui font naître des *dilatations contrariées*, des *difficultés pour le matage des joints*, des *impossibilités de nettoyage*, des *nids de tartre*, des *chambres de vapeur*, des *tendances aux coups de feu*, des *coincements* de soupapes ou de tiges de flotteurs, etc.

On rencontre également dans l'exécution, des *métaux écrouis* par le poinçonnage, de *mauvaises rivures*, des *malfaçons dans les assemblages de tôle sur fonte*, etc.

**1165** — *Défauts d'entretien.* — Parmi les causes de dangers se rattachant à l'entretien, je rappellerai d'abord les *dépôts*, sur lesquels nous avons déjà insisté (n° 1128) avec des développements qui nous dispensent d'y revenir.

Je mentionnerai également les *corrosions*; sujet assez important pour que nous y revenions en détail dans le paragraphe 3 ci-après.

Une mauvaise conduite du foyer expose aux coups de feu (n° 1168). Une seule de ces avaries suffit quelquefois pour mettre la tôle hors de service. Une succession de surchauffes moins accentuées peut

arriver au même résultat. On ne doit pas hésiter, en pareil cas, à provoquer la réparation immédiate de la chaudière.

Les *fentes*, les *criques* doivent fixer l'attention dans les visites (n° 1169).

Il en est de même des *fuites en marche*. A ce sujet, il y a lieu de proscrire soigneusement une tendance qu'ont parfois les chauffeurs à *serrer à outrance les boulons* pour étancher les joints. Ils risquent par là (n° 1100) de rompre un écrou, et comme conséquence tous les autres successivement; l'effort se reportant de proche en proche, en s'aggravant chaque fois. L'ouvrier est alors la première victime de son imprudence.

**1166** — *Défauts de fonctionnement*. — L'une des situations les plus dangereuses dans lesquelles puisse se trouver un générateur provient de la négligence du chauffeur à observer l'indicateur de niveau pour alimenter en temps utile. C'est l'*abaissement du plan d'eau* au-dessous de la ligne des carneaux. Nous consacrerons à son examen la totalité du paragraphe 4.

Une *élévation progressive de la pression* peut naître d'une négligence semblable de cet agent à observer le manomètre, et à dégager les soupapes de sûreté. Cet effet est souvent très rapide, surtout pendant un chômage momentané, tel que l'arrêt d'une locomotive; le moteur cessant pendant cet intervalle de soulager la chaudière par ses appels. La tension peut s'élever quelquefois d'un demi-kilogramme par minute. L'accroissement est d'ailleurs d'autant moins rapide que la provision d'eau est plus considérable.

Indépendamment de la négligence, on a trop souvent à reprocher à des chauffeurs des manœuvres aussi coupables qu'insensées. Ils paralysent volontairement le jeu des appareils de sûreté, afin de pouvoir gouverner la marche à leur guise. C'est ainsi que l'on voit des *soupapes calées* ou *surchargées*, des *flotteurs attachés*, des *graduations faussées*, etc.

**1167** — *Causes fortuites*. — A côté des motifs classiques que nous venons d'énumérer, et qui se retrouvent constamment, à des degrés divers de fréquence, dans toutes les enquêtes adminis-

tratives, il se présente, quoique plus rarement, des *causes fortuites*, provenant d'un concours exceptionnel de circonstances contre lesquelles il était impossible de se tenir en garde.

On mentionne également des *causes inconnues* dans un très petit nombre de cas, pour lesquels l'instruction la plus attentive n'a pu réussir à mettre en évidence, avec quelque apparence de probabilité, une explication plausible de l'accident.

Il convient d'ajouter enfin les *causes mystérieuses*, que l'on a parfois mises en avant pour expliquer certains cas obscurs, mais qui restent contestées par la majorité des ingénieurs. C'est ainsi que l'on a invoqué l'intervention de l'*électricité*, de la *dissociation*, des *mélanges détonants*, de la *surchauffe de l'eau*. Cette dernière influence a été toutefois assez discutée pour que je croie devoir consacrer à son examen le paragraphe 5 ci-après.

### § 3

#### ALTÉRATIONS DE LA TÔLE

**1168** — *Coups de feu*. — L'affaiblissement de la tôle peut tenir à une *usure générale* qui augmente avec le temps, ou à des causes accidentelles : *coups de feu*, *fentes* ou *corrosions*. Examinons successivement ces dernières.

Les importantes expériences de M. Hirsch (\*) ont montré qu'une tôle ordinaire, assurée d'un contact complet avec l'eau, peut supporter le feu le plus ardent sans que la température d'aucun point dépasse sensiblement celle du liquide. Mais si le moindre obstacle vient s'opposer à la conductibilité, il détermine alors le coup de feu. Nous avons déjà cité parmi ces obstacles : les pailles, les dédoubleures, les chambres de vapeur, l'entartrement, les dépôts gras, l'oubli d'un chiffon dans les visites intérieures.

On doit cependant éviter soigneusement la production de dards de chalumeau frappant toujours au même point, surtout s'ils

(\*) *Annales du Conservatoire*, 2<sup>e</sup> série, t. I, p. 51. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 4<sup>e</sup> série, t. V, p. 302.

sont formés de flammes particulièrement oxydantes (n° 1058).

La résistance d'une tôle qui a subi le coup de feu diminue quelquefois jusqu'au sixième de sa valeur. La surface prend un aspect caractéristique connu sous le nom de *fer brûlé*. On observe d'abord une teinte bleuâtre, due à une mince pellicule d'oxyde des battitures, qui se change bientôt en rouille. Le métal s'emboutit, et se gerce au sommet du mamelon.

**1169** — *Fentes*. — Les fentes, criques, fissures, gerçures sont dues à l'aigreur de la tôle, native ou acquise.

La bande étroite qui borde les clouures y est particulièrement exposée, surtout quand la rivure est mal exécutée. Mais des fissures qui s'étendent seulement d'un rivet au bord de la virole sont peu dangereuses. Celles qui vont d'un rivet à l'autre sont plus redoutables, et risquent de se propager au delà.

Les fentes en pleine tôle sont plus rares, mais beaucoup plus inquiétantes. Si on les voit augmenter, il faut immédiatement arrêter la marche et mettre l'appareil en réparation. Ces fissures sont difficilement visibles à froid. Sous pression, elles s'accusent par des fuites. Le cintrage en travers en est souvent l'origine; parfois aussi la congélation de l'eau en hiver<sup>(1)</sup>.

**1170** — *Corrosions*. — On distingue les corrosions extérieures ou intérieures<sup>(2)</sup>. Le métal résiste à cette influence d'une manière

(1) Cornut. Effet de la gelée sur les chaudières pleines. *Cinquième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Lyon, 1881, p. 41.

(2) Payol. Corrosion des chaudières. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'Industrie minérale de Saint-Étienne*, décembre 1876, p. 4. — Larbalétrier. Sur les corrosions des chaudières à vapeur. *Chronique industrielle*, avril 1890, p. 120. — Klein et Berg. Causes de corrosion des générateurs. *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, t. CII, p. 1170. — Meurgey. Corrosions extérieures. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'Industrie minérale de Saint-Étienne*, novembre 1876, p. 12. — Durand. Corrosions intérieures. *Ibidem*, février 1877, p. 12. — Ledieu. Causes d'altération intérieure des chaudières. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 26 juillet 1880. — Lodin. Sur les causes d'altération intérieure des chaudières à vapeur. *Ibidem*, 26 juillet 1880, p. 217. — Olivier. *Note sur les défauts, corrosions et incrustations des chaudières à vapeur*, 1883. — Gruner. Corrosion du fer et de l'acier. *Annales des mines*, 1883. — Richard. *La chaudière locomotive*, p. 349. — Stoclet. Emploi des eaux des houillères dans les générateurs à vapeur. *Revue industrielle des*

variable avec sa nature (fig. 716). Certains fers puddlés sont détruits

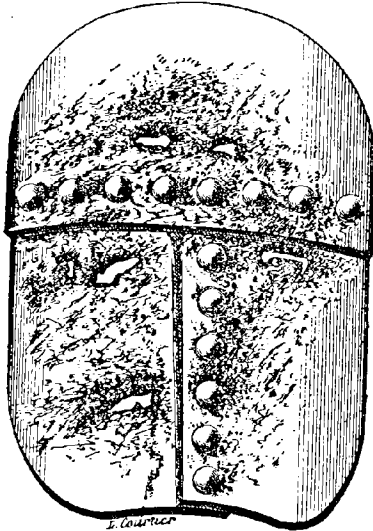


Fig. 716. — Corrosion générale.

en 10 ou 12 ans; d'autres résistent 25 et 30 ans. Quelques praticiens ont énoncé la crainte que l'acier s'use plus vite que le fer, surtout s'il renferme du phosphore. Une certaine durée sera nécessaire pour permettre d'asseoir une opinion définitive sur cette matière. Ces altérations affectent divers types caractéristiques.

Les *corrosions en surface* peuvent altérer des plages plus ou moins étendues, et arriver à réduire l'épaisseur à un degré de ténuité difficile à imaginer. On a vu des tôles de 7 à 8 millimètres se réduire à 1 milli-

mètre, et même encore un peu moins, de manière à se trouver à

*mines*, t. XIX, p. 432. — *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 421. — Bour. *Société industrielle de Lyon*, 9 novembre 1881. — *Comptes rendus des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*; collection précieuse en ce qui concerne les explosions. — Lavezzari. Note sur la recherche des défauts des générateurs de vapeur, et remèdes à y apporter. *Annales du Travail*, 1891. — Scheurer-Kestner et Meunier. *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, mai 1871. — Mila. *Revue maritime et coloniale*, mars 1875, p. 910. — Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 112. — Hanet-Cléry. *Annales des Mines*, 7<sup>e</sup> série, t. IX, p. 455. — De Grossouvre. *Ibidem*, t. XI, p. 366. — Bour. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'Industrie minière de Saint-Étienne*, 1887, p. 254. — *Revue industrielle*, 1877, p. 306. — *Quatrième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, p. 72, 81. — *Treizième Congrès*, p. 169, 175, 184.

Hallet. On the causes and remedies of corrosions in marine boilers. *Institution of mechanical Engineers*, août 1884, p. 351. — Milu. On the corrosion of boilers. *Proceedings of the Institution of civil Engineers*, 9 octobre 1875. — Isherwood. On the corrosion of plate iron feed water heaters for steam boilers. *Journal of Franklin Institute*, août 1879, p. 80. — Navy. *On the causes of deterioration of boilers*, 1877. — Swinburnking. Internal corrosion and scale in steam boilers. *Van Nostrand's Engineering magazine*, juin 1884, p. 509. — Phillips (On the comparative dururances of iron and mild steel when exposed to corrosive influences. *Institution of civil Engineers*, t. LXV, 5<sup>e</sup> partie, p. 30. — On the effect of liquids on iron. *Ibidem*, 1885, p. 86). — Rowan. On boiler incrustation and corrosion. *British Association*, septembre 1876. —



la merci du moindre incident. Parfois la partie amincie reste mamelonnée; mais ce caractère manque souvent. Une surface lisse sera dans ce cas particulièrement dangereuse; car rien ne vient la signaler directement à l'attention que le son du marteau, indication bien précaire. Ce genre d'altération se rencontre le plus ordinairement dans la partie inférieure de la chaudière, ou aux environs du plan d'eau.

Les *corrosions en pustules* sont fréquentes et assez difficiles à expliquer (fig. 717). La surface est alors *grêlée* de cavités petites et profondes, assez irrégulièrement réparties, mais cependant le plus souvent concentrées dans le bas du générateur. L'acier y semble plus prédisposé que le fer. Ces perforations peuvent échapper à l'attention. Après un nettoyage, la plombagine dont on enduit la chaudière bouche les trous. Ils peuvent aussi être remplis d'oxyde, ou recouverts de tartre. Ce type d'altération est d'ailleurs moins à craindre que le précédent.



Fig. 717. — Corrosion par pustules.

Les *corrosions par vermicures* procèdent probablement d'une cause analogue et aussi obscure. Elles peuvent devenir dangereuses, lorsqu'elles sont profondes.

Les *corrosions par sillons*, quand elles sont dues à des effets statiques, suivent les lignes de la chaudière qui se trouvent soumises aux plus grands efforts, telles que les congés d'emboutissage et les clouères. Dans certains cas exceptionnels, des courants gazeux peuvent également entamer les métaux, notamment le cuivre <sup>(1)</sup>.

A. Paget. On the wear and tear and steam boilers. *Journal of Arts*, avril 1865, p. 40. — Dana et Hayes. *Journal of the chemical Society*, t. XIII, p. 294. — Croce Calvert. *Philosophical Society of Manchester*, 5<sup>e</sup> série, t. V. — Adamson et Rogerson. *Journal of iron and steel Institute*, novembre 1878. — *Steam manual*, 26 mai 1879. — Murray. *Journal of the royal united Service*, t. XXIV, p. 260. — *Engineering*, 28 juin 1878.

Wochenschrift des österreichische Ingenieuren und Architekten Vereines. — Flimmers. *Sur les avaries et les accidents de chaudière, et la manière de les prévenir*, 1884, Leipzig.

<sup>(1)</sup> Bour. Corrosion d'une communication par le frottement d'un courant de vapeur. *Neuvième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Paris, 1886, p. 126.

**1171** — Parmi les causes capables de produire ces divers résultats, il faut citer d'abord les agents atmosphériques. L'oxydation due à l'air est favorisée par l'humidité, qui se trouve maintenue par la capillarité sur divers points en dehors du bain liquide, tels que le bûillement des rivures ou le contact des maçonneries. Elle est activée par les courants thermo-électriques, auxquels peuvent donner lieu certains défauts d'homogénéité. Les chômages sont surtout nuisibles. On ne doit jamais laisser des flaques d'eau dans une chaudière refroidie.

Les acides agissent encore plus activement, surtout à la ligne d'eau, attendu que le liquide qui mouille la tôle, quand le niveau s'abaisse, voit son acidité se concentrer par l'évaporation. A l'intérieur on est exposé à la production d'acides gras, en raison de la saponification des lubrifiants qui ont été apportés dans la chaudière par les eaux du condenseur. Les sulfates de fer ou d'alumine sont oxydants. Les chlorures attaquent vivement le fer <sup>(1)</sup>, surtout le sel marin en présence du carbonate de soude, et encore plus le chlorure de magnésium.

A l'extérieur, les fumées peuvent être chargées d'acides organiques, ou d'acide sulfurique provenant des pyrites. On doit reconnaître que le principe de la circulation méthodique est défavorable à cet égard, attendu qu'il favorise la condensation de ces vapeurs dans les suies dont il détermine le dépôt sur les parties les moins chaudes de l'appareil.

**1172** — Les remèdes que l'on peut opposer à ces causes de destruction sont avant tout des visites régulières et attentives. On gratte l'oxyde de fer, et l'on enduit la place de goudron ou de pétrole. Le zinc agit comme anti-corrosif, en même temps que comme anti-incrustant. Plus oxydable que le fer, il concentre sur lui-même l'action des acides dissous.

M. Feldbacher a proposé, pour empêcher la corrosion de la tôle, un doublage en cuivre ou en laiton de 1 millimètre et demi d'épais-

<sup>(1)</sup> Bour. Corrosion produite par le chlorure de baryum. *Cinquième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Lyon, 1881, p. 53.

seur. M. Mac Dounal, M. Ehme la recouvrent de zinc et ensuite de plomb. Ce dernier métal n'adhérerait pas de lui-même au fer. On peut craindre que, dans les nettoyages, de tels revêtements viennent à être endommagés par le choc des outils.

Pendant les chômages, on fera bien de remplir la chaudière d'eau chargée de carbonate de soude. On en éprouve la teneur en y plaçant des morceaux de fer bien décapés. S'ils sont rouillés au bout de quelques jours, il faut ajouter encore du carbonate. On peut aussi mettre dans le générateur de la chaux vive pour absorber l'humidité, et y brûler du charbon de bois afin de remplacer l'air par de l'acide carbonique; après quoi l'on ferme toutes les ouvertures. L'intérieur se trouve ainsi garanti contre les influences oxydantes. On a conseillé également l'emploi d'une couche de peinture au minium <sup>(1)</sup>.

#### § 4

#### ABAISSEMENT DU NIVEAU

**1173** — *Causes de l'abaissement.* — Diverses causes peuvent concourir à l'abaissement de la surface liquide. C'est d'abord la négligence du chauffeur à observer l'indicateur de niveau, pour alimenter en temps utile.

Mais en outre son action peut être déçue par des circonstances ignorées de lui, au moins dès l'abord, telles que : le mauvais fonctionnement des pompes, l'obstruction de la conduite d'alimentation, une fuite de la chaudière, un défaut du tube de communication de l'indicateur avec l'intérieur, soit comme longueur soit comme diamètre, un dérangement des repères, une avarie du flotteur d'alarme.

**1174** — L'importance relative de la disparition d'un volume donné ne sera d'ailleurs pas la même pour toutes les chaudières. L'abaissement qui en résultera se limitera évidemment

<sup>(1)</sup> *Quatrième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Rouen, 1881, p. 84.

d'autant plus que l'étendue de la surface liquide sera plus notable.

De là une supériorité des chaudières horizontales sur les générateurs verticaux. Les appareils les plus exposés sous ce rapport seront les inexplosibles, en raison du faible volume qu'ils renferment, dont la perte subie représentera une fraction plus sensible. C'est surtout pour eux que sont utiles les régulateurs d'alimentation.

**1175** — *Durée de l'abaissement.* — En supposant que la consommation de vapeur par le moteur se continue de manière que la pression conserve sa valeur, il peut être utile de déterminer la plus ou moins grande rapidité de cet abaissement, soit pour une étude *a priori*, soit en vue d'apporter, le cas échéant, avec toute la prudence nécessaire en aussi grave matière, un élément d'appréciation à l'instruction qui suit un accident (1).

On doit pour cela distinguer deux cas, suivant que l'amplitude d'abaissement se trouve comprise au-dessus ou au-dessous de la ligne des carneaux. Si elle passe d'un côté à l'autre, on envisagera séparément chacune de ses deux parties.

La première question ne donne lieu à aucune difficulté. Il suffit de cuber, par les moyens que fournit le Calcul intégral, le volume disparu, et de le diviser par le produit de la surface *invariable* de chauffe et du coefficient spécifique d'évaporation rapporté au mètre carré.

Le second cas nécessite au contraire une recherche spéciale, la surface de contact du métal avec le liquide variant incessamment pendant l'abaissement du plan d'eau. Nous supposerons que l'on parte pour cela de la ligne des carneaux; d'un côté parce que c'est en effet ainsi que les choses se passent dans la réalité, et que d'ailleurs la considération d'un intervalle quelconque résulterait de la différence de deux semblables évaluations.

Rapportons l'équation de la surface du générateur à trois axes

(1) Guchez. *Note sur un problème relatif à l'évaporation de l'eau dans les chaudières cylindriques simples*, 1881. — Haton de la Goupillière. Sur la durée de l'évaporation dans les générateurs non alimentés. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 4 et 11 mai 1891.

rectangulaires  $x, y, z$ . A une altitude fixe  $z_0$ , se trouve le plan horizontal de la ligne des carneaux, au-dessous duquel s'étend la surface totale de chauffe  $S_0$ . Quand le niveau s'abaisse à une hauteur  $z$ , cette superficie se réduit à  $S$ , et au-dessus d'elle règne une zone surchauffée  $S_0 - S$ . Le générateur se termine à sa partie inférieure par un ou plusieurs points minima situés à une hauteur  $z_1$ , parfois par une ligne horizontale (<sup>1</sup>), autrefois même par un fond plat.

Nous appellerons  $v$  le volume d'eau en mètres cubes que vaporise par seconde le mètre carré de surface métallique.

Cette *conductibilité directe* constitue le facteur prépondérant du phénomène, mais non le seul. Une certaine *conductibilité indirecte* s'effectue entre le métal rougi et la zone adjacente de tôle mouillée (<sup>2</sup>). Nous admettrons de ce chef un supplément d'efficacité  $w$  par mètre courant du périmètre  $\sigma$  du plan d'eau.

Enfin la surface échauffée exerce par son rayonnement sur le liquide une action spéciale  $u$ , que nous rapportons en bloc, comme la première, au mètre carré de la superficie  $S_0 - S$ . On peut considérer ce troisième élément comme résumant en même temps dans son influence l'accroissement d'activité que devrait convenablement subir le coefficient  $v$ , lorsque, par l'abaissement du niveau, son application se concentre sur des portions attaquées de plus en plus directement par les flammes.

Les expressions  $S, s, \sigma$  se déduiront de l'équation proposée à l'aide des méthodes que fournit le Calcul intégral. Quant aux coefficients  $u, w$ , ils ne paraissent pas avoir été encore pris en considération, et il serait sans doute prématuré de leur attribuer ici des valeurs numériques déterminées. La plupart du temps on se contentera sans doute de les annuler. Cependant il serait désirable de voir l'attention des praticiens se porter sur cette lacune.

Il nous est maintenant facile de former l'équation différentielle du phénomène. La valeur absolue —  $sdz$  de la tranche qui dispa-

(<sup>1</sup>) Sauf une légère inclinaison en vue de la vidange, que nous négligerons dans cette recherche.

(<sup>2</sup>) D'après les expériences récentes de M. Witz, cette *conduction latérale* a un effet beaucoup plus considérable qu'on ne le pensait jusqu'ici (A. Witz. *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 15 avril 1892, p. 242).

rait dans un temps  $dt$  représente le total des trois influences précédentes :

$$-s dz = [vS + w\sigma + u(S_0 - S)] dt,$$

$$dt = - \frac{s dz}{(v - u)S + w\sigma + uS_0},$$

$$t = \int_z^{z_0} \frac{s dz}{(v - u)S + w\sigma + uS_0},$$

expression dans laquelle  $u$ ,  $v$ ,  $w$  représentent, ainsi que  $S_0$ , des constantes numériques;  $S$ ,  $s$ ,  $\sigma$  des fonctions déterminées de  $z$ .

**1176** — Envisageons, comme première application, une chaudière verticale, constituée à l'aide d'un cylindre de forme quelconque, qui est foncé à sa partie inférieure par une surface arbitraire. Les chaudières verticales métallurgiques, ainsi que les types Field, Thirion, Chevalier, etc., rentrent dans cette donnée. Le périmètre  $\sigma$  et l'aire  $s$  de la section droite restent alors constants, si nous supposons que l'abaissement se maintienne dans le corps cylindrique sans atteindre la fonçure. On a, en outre :

$$S_0 - S = \sigma(z_0 - z),$$

$$S = (S_0 - \sigma z_0) + \sigma z.$$

Il vient, dans ces conditions :

$$t = \frac{s}{vS_0 + w\sigma} \int_z^{z_0} \frac{dz}{1 + \frac{(v - u)\sigma}{vS_0 + w\sigma} (z - z_0)},$$

et en intégrant avec un logarithme népérien :

$$t = \frac{s}{(u - v)\sigma} L \left[ 1 + \frac{(v - u)\sigma}{vS_0 + w\sigma} (z - z_0) \right].$$

Supposons en particulier un cylindre circulaire de hauteur  $h$ , de

rayon  $r$ , de périmètre  $\sigma = 2\pi r$ , de section  $s = \pi r^2$ , foncé à l'aide d'un hémisphère, de telle sorte que  $S_0 = 2\pi r^2 + 2\pi r h$ . On trouve, dans ce cas, pour un abaissement :  $z_0 - z = \eta$  :

$$t = \frac{r}{2(u-v)} L \left[ 1 + \frac{(u-v)\eta}{v(r+h)+w} \right].$$

Supposons, pour fixer les idées, la valeur  $v = 36$  (n° 955), en négligeant d'autre part l'influence de  $u$  et de  $w$ . Nous aurons ainsi :

$$t = -\frac{r}{2} \cdot 10^5 \cdot L \left( 1 - \frac{\eta}{r+h} \right).$$

Admettons, par exemple, que l'évaporation s'effectue sur toute la hauteur  $h$ , supposée égale au diamètre. Il vient alors :

$$T = \frac{r}{2} \cdot 10^5 \cdot L 3 = \frac{r}{2} \cdot 10^5 \cdot 2,3026 \cdot \log 3 = 54050 r,$$

et pour un diamètre égal à 1<sup>m</sup> (1) :

$$T = 27\,465^s = 7^h\,57^m\,45^s.$$

**1177** — Considérons en second lieu une chaudière horizontale à corps cylindrique, assez longue pour nous permettre de faire abstraction de l'influence des fonds. La durée étant alors indépendante de la longueur, nous pouvons supposer celle-ci égale à l'unité, ce qui donne :

$$\sigma = 2, \quad s = 2\sqrt{z(2r-z)}, \quad S = \pi r + 2r \arcsin \frac{z-r}{r};$$

$$(v-u)rt = \int_z^{z_0} \frac{\sqrt{z(2r-z)} dz}{\arcsin \frac{z-r}{r} + \frac{1}{v-u} \left( \frac{v\pi}{2} + \frac{w}{r} + u \arcsin \frac{z_0-r}{r} \right)}.$$

(1) Si l'on effectuait directement le calcul, en supposant constante la surface de chauffe, on obtiendrait un résultat trop faible dans le rapport 0,9102. Pour le diamètre de 1<sup>m</sup>, l'erreur absolue *en moins* serait : 41<sup>m</sup>5. Si, pour essayer de tenir grossièrement compte de la variation de  $S$  par un procédé élémentaire, on adoptait pour son éva-

Posons, pour abrégé :

$$a = \frac{2}{v-u} \left( \frac{v\pi}{2} + \frac{w}{r} + u \operatorname{arc} \sin \frac{z_0 - r}{r} \right),$$

$$\alpha = 2 \operatorname{arc} \sin \frac{z-r}{r} + a,$$

d'où il suit :

$$\frac{z-r}{r} = \sin \frac{\alpha-a}{2}, \quad dz = \frac{r}{2} \cos \frac{\alpha-a}{2} d\alpha,$$

$$\sqrt{z(2r-z)} = r \cos \frac{\alpha-a}{2};$$

$$\begin{aligned} 2 \frac{v-u}{r} t &= \int_{\alpha}^{\alpha_0} 2 \cos^2 \left( \frac{\alpha-a}{2} \right) \frac{d\alpha}{\alpha} = \int_{\alpha}^{\alpha_0} \frac{1 + \cos(\alpha-a)}{\alpha} d\alpha \\ &= \int_{\alpha}^{\alpha_0} \frac{(1 + \cos a) - \cos a(1 - \cos \alpha) + \sin a \sin \alpha}{\alpha} d\alpha. \end{aligned}$$

Les intégrales de ce type ne sont pas connues en termes finis; mais nous aurons, en employant le développement en séries :

$$\begin{aligned} 2 \frac{v-u}{r} t &= 2 \cos^2 \frac{a}{2} L \frac{\alpha_0}{\alpha} + \sin a \left( \alpha - \frac{1}{3} \frac{\alpha^3}{1.2.3} + \frac{1}{5} \frac{\alpha^5}{1.2.3.4.5} - \dots \right)_{\alpha}^{\alpha_0} \\ &\quad - \cos a \left( \frac{1}{2} \frac{\alpha^2}{1.2} - \frac{1}{4} \frac{\alpha^4}{1.2.3.4} + \frac{1}{6} \frac{\alpha^6}{1.2.3.4.5.6} - \dots \right)_{\alpha}^{\alpha_0}, \end{aligned}$$

avec des suites encore plus convergentes que celles du sinus et du cosinus.

Il vient, en particulier, pour l'hypothèse simplifiée,  $u=0$ ,  $w=0$  :

$$a = \pi, \quad \sin a = 0, \quad \cos a = -1, \quad \cos \frac{a}{2} = 0,$$

luation fixe la moyenne arithmétique entre ses valeurs initiale et finale, on trouverait un chiffre 1,2137 fois trop fort; et l'erreur *en plus* serait, pour l'exemple précédent : 4<sup>b</sup>37<sup>m</sup>49<sup>s</sup>.



d'où :

$$\frac{2(v-u)}{r} t = \left( \frac{1}{2} \frac{\alpha^2}{1.2} - \frac{1}{4} \frac{\alpha^4}{1.2.3.4} + \frac{1}{6} \frac{\alpha^6}{1.2.3.4.5.6} - \dots \right) \alpha_0.$$

Cette série donne, par ses six premiers termes :

$$\frac{\alpha^2}{4} - \frac{\alpha^4}{96} + \frac{\alpha^6}{4520} - \frac{\alpha^8}{522560} + \frac{\alpha^{10}}{56288000} - \frac{\alpha^{12}}{5748019200},$$

ou encore :

$$\begin{aligned} & 0,250\ 000\ 000\ 000\ \alpha^2 - 0,010\ 416\ 666\ 667\ \alpha^4 \\ & + 0,000\ 231\ 481\ 483\ \alpha^6 - 0,000\ 003\ 100\ 198\ \alpha^8 \\ & + 0,000\ 000\ 027\ 557\ \alpha^{10} - 0,000\ 000\ 000\ 173\ \alpha^{12}. \end{aligned}$$

La variable  $\alpha$  est croissante depuis zéro, pour le point le plus bas, jusqu'à  $2\pi$  au sommet. Mais le plan des carneaux ne dépassera guère en pratique le milieu du rayon vertical, pour lequel  $\alpha = \frac{4\pi}{3}$ .

Le quotient du septième terme  $0,000\ 000\ 000\ 000\ 745\ \alpha^{14}$  par l'ensemble des deux premiers, constitue une limite supérieure de l'erreur relative que l'on commet en s'arrêtant au sixième. Elle prend, dans ce dernier cas, le plus défavorable de tous, la valeur  $0,000\ 380$  dont l'extrême petitesse, pour une question de cette nature, montre que l'on pourra ordinairement se borner à un nombre de termes très restreint (1).

Si l'on place, en particulier, le plan des carneaux dans le méridien horizontal, en faisant  $\alpha_0 = \pi$ , il faudra pour la vidange complète  $0,825 \frac{R}{v}$ ; et avec le rayon de  $1^m$ , une durée de  $82500^s = 22^h 55^m$  (2).

(1) C'est surtout pour les valeurs de  $\alpha$  inférieures à l'unité que la convergence serait la plus accusée; mais elles ne seront jamais pratiques, car elles ne s'étendent pas au delà de  $29^{\circ}38'52''$  du point le plus bas.

(2) En calculant au moyen de la surface initiale, on trouverait un chiffre  $0,606$  fois trop faible, et un écart *en moins* de  $9^h 1^m 40^s$  pour le cas précédent. Avec la moyenne arithmétique, on obtient un résultat  $1,212$  fois trop fort, et pour le rayon de  $1^m$ , une erreur *en trop* de  $4^h 51^m 40^s$ .

**1178** — *Effets de l'abaissement.* — Tout le monde s'accorde à regarder comme dangereuse la situation d'une chaudière dont le chauffeur a laissé abaisser le niveau au-dessous de la ligne des carneaux (<sup>1</sup>). Les opinions ne diffèrent à cet égard que sur le degré du péril. On a été longtemps unanime à le regarder comme des plus graves. Depuis quelque temps cependant une atténuation sensible

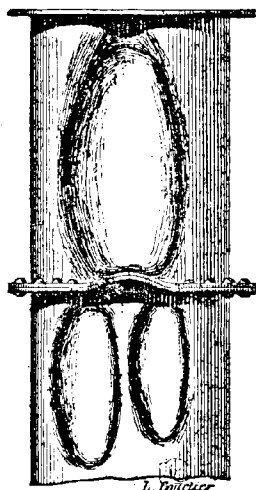


Fig. 718. — Emboutissage par manque d'alimentation.

s'est produite, ainsi que je l'indiquerai plus loin (n° 1180), dans la manière de voir d'un certain nombre d'ingénieurs, qui ne forment toutefois pas la majorité.

Le fait incontestable est que la tôle non mouillée est exposée à rougir rapidement. Sa résistance diminuant aux températures élevées, la rupture risque de se produire, malgré des dispositions qui pourraient être, à juste titre, considérées comme suffisantes dans les conditions normales. Si la catastrophe est écartée, on évitera difficilement le coup de feu, avec obligation de mettre la chaudière en réparation (fig. 718, 719).

La situation s'aggravera encore si l'on vient à mettre en marche une machine arrêtée, ou si le chauffeur soulage une soupape de sûreté. Le soulèvement de l'eau provoqué par la diminution de pression produira une secousse capable d'amener l'explosion (<sup>2</sup>).

Ce sera encore pis, si l'on alimente dans de telles conditions. La rétraction subitement déterminée dans une zone contiguë à une partie encore rouge, peut suffire à causer une déchirure. En outre, la quantité considérable de calories cédées par le métal surchauffé occasionne une formation instantanée de vapeur, en-

(<sup>1</sup>) A la vérité, on use de tolérance pour certaines parties qui se trouvent au contact de gaz déjà refroidis. Mais, au-dessus de 350 degrés, il est impossible d'admettre qu'aucune paroi métallique ne soit pas mouillée sur sa face opposée à l'action calorifique (Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 556).

(<sup>2</sup>) A ces motifs se joint, pour les chaudières marines, l'influence des mouvements du navire

trainant un accroissement de pression (1), qui vient précisément coïncider avec la diminution actuelle de résistance.

**1179** — On peut se rendre compte numériquement, bien que d'une manière approximative, de l'importance de ce dernier effet.

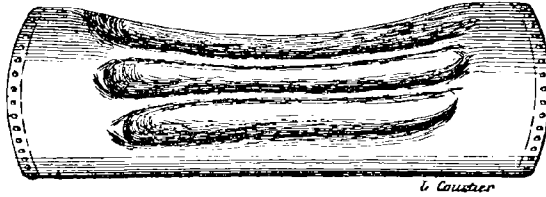


Fig. 719. — Écrasement d'un foyer intérieur.

Envisageons comme exemple un corps cylindrique horizontal mesurant 10 mètres suivant ses génératrices sur 1 mètre de diamètre, terminé par deux hémisphères, et à moitié plein d'eau. Le volume de vapeur sera dans ces conditions :

$$\frac{1}{2} \left( \frac{\pi d^2}{4} l + \frac{\pi d^3}{6} \right) = \frac{4}{3} \pi = 4^{\text{m}^3}, 1888.$$

Admettons une pression absolue de 5 kilogrammes par centimètre carré. La température correspondante est de 150°,99 (2) et le poids spécifique 2,667. Le poids de la vapeur contenue aura donc pour valeur :

$$2,667 \times 4,1888 = 11^{\text{kg}}, 17.$$

Supposons maintenant un abaissement de niveau de 10 centimè-

(1) C'est à ce moment, et non pendant l'abaissement du niveau, que l'on constatera en général une augmentation de tension d'après l'observation du manomètre. Ce n'est pas cet appareil, mais l'indicateur de niveau, qui peut avertir à coup sûr de l'état anormal des choses. On pourra ne pas voir monter le premier, et le voir même descendre, si la surface mouillée par l'eau arrive à se réduire sensiblement; car c'est elle qui est le principal agent de transmission du calorique des gaz à l'eau enfermée dans la chaudière.

(2) Voy. t. I, p. 778.

tres (1). Le pourtour de la surface liquide aura pour expression :

$$2l + \pi d = 20 + \pi = 23^m,14.$$

La surface surchauffée sera donc :

$$0,1 \times 23,14 = 2^m,314.$$

Admettons pour l'enveloppe une épaisseur d'un centimètre. Cette bande de tôle aura pour volume :

$$0,01 \times 2,314 = 0^{m5},02314;$$

et comme le poids spécifique du fer est 7 790, le poids du métal mis à découvert sera :

$$0,02314 \times 7790 = 180^{kg},261.$$

Bornons-nous à supposer qu'il atteigne la température du rouge sombre, qui représente environ 700 degrés (2). Il devra, par l'alimentation, retomber à celle de 151, en perdant par conséquent 549 degrés centigrades. La chaleur spécifique du fer est 0,11379. Chaque kilogramme laissera donc disponible le nombre de calories :

$$549 \times 0,11379 = 62^{cal},47.$$

Le poids considéré fournira dès lors :

$$180,261 \times 62,47 = 11\ 261^{cal}.$$

D'un autre côté, pour constituer un kilogramme de vapeur à la température de 151 degrés, il faut un nombre de calories  $r_{151}$  ou

(1) En confondant un arc aussi limité avec son sinus, et la zone découverte avec un cylindre vertical.

(2) Annuaire du Bureau des longitudes, 1891, p. 557.

500,08 (1). Il pourra donc, dans la circonstance actuelle, se former le poids de vapeur :

$$\frac{11\,261}{500,08} = 22^{\text{kg}},52.$$

Cette quantité viendra s'ajouter aux 11 kg. 17 qui préexistaient dans la chaudière, pour fournir le poids total 33 kg. 69 en triplant ainsi celui de l'atmosphère qui surmonte le liquide. Le volume, redevenant d'ailleurs le même en raison de l'alimentation, est de 4<sup>m</sup>3,1888; ce qui donne pour poids spécifique du nouveau fluide :

$$\frac{33,69}{4,1888} = 8,04.$$

La pression qui lui correspond est égale, en nombre rond, à 16 kilogrammes par centimètre carré.

A la vérité ce surcroît de vapeur se forme progressivement, et par conséquent sous une pression variable bien supérieure en moyenne à celle de 5 kilogrammes, en vue de laquelle nous avons fait le calcul, en adoptant pour  $r$  la valeur ci-dessus. Le chiffre obtenu n'est donc qu'approximatif; mais le véritable résultat ne peut que lui être supérieur, car  $r$  est une fonction décroissante. Le poids spécifique théorique est donc encore plus fort que nous ne l'avons trouvé, ainsi que la pression.

On voit par suite à quel point les prévisions peuvent être dépassées dans ces conditions critiques, sous le rapport des efforts en vue desquels la chaudière a été construite, et a subi l'épreuve réglementaire (n° 1189).

**1180** — Il est toutefois nécessaire d'ajouter que des calculs assis sur des bases aussi hypothétiques exigeraient, pour être acceptés comme définitifs, un certain contrôle expérimental. On croyait le trouver suffisamment dans le grand nombre d'accidents qui accompagnent manifestement les défauts d'alimentation, sans pouvoir à la

(1) Voy. t. I, p. 778.

vérité y faire avec clarté la part respective de chacune des influences énumérées ci-dessus. Or nous devons dire que des expériences directes viennent d'être exécutées sur ce sujet par M. Fletcher <sup>(1)</sup>, pour l'Association des propriétaires d'appareils à vapeur de Manchester, et qu'elles ont semblé établir un résultat précisément inverse.

En alimentant sur des tôles déjà rouges, on ne constatait pas, conformément aux idées reçues, une élévation rapide de la pression. Au contraire celle-ci, après avoir monté légèrement, mais non d'une manière inquiétante, arrivait à diminuer progressivement, au fur et à mesure qu'augmentait l'injection d'eau. Il y a donc là une indication d'une grande importance, qui appelle sans doute une révision et des discussions attentives, mais qui explique assurément la réserve que certains esprits ont cru devoir apporter dès à présent aux anciennes assertions relatives à l'augmentation de pression due à l'alimentation à niveau bas. On ne devra cependant pas perdre de vue à cet égard les expériences encore plus récentes de M. Witz, dont il sera question plus loin (n<sup>o</sup> 1183), et qui sont de nature à introduire dans cette discussion un sérieux élément de préoccupation en sens contraire.

**1181** — Dans tous les cas, comme on ne saurait nier, en dehors de l'altération de pression dû à une alimentation intempestive, les autres inconvénients d'une telle situation, il y a lieu d'éviter avec le plus grand soin tout ce qui peut y conduire.

Si néanmoins un pareil état de choses a pris naissance, on ne doit y chercher remède, d'après ce qui précède, ni dans l'alimentation <sup>(2)</sup>, ni dans l'ouverture des soupapes. Il faut, à l'instant même où l'on s'en aperçoit, jeter bas le feu, et ouvrir en grand les portes du foyer, pour que le courant d'air frais entretenu par l'accumu-

<sup>(1)</sup> Fletcher (*Engineering*, 1891, 1<sup>er</sup> sem., p. 202, 290, 321. — *Annales industrielles*, 31 mai 1891, p. 674). — *Moniteur industriel*, 26 janvier 1892. — Sauvage. *Annales des mines*, 8<sup>e</sup> série, t. XIX, p. 348. — Alimentation d'une chaudière dont les surfaces de chauffe sont découvertes. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, octobre 1891, p. 432.

<sup>(2)</sup> Il est assurément conforme à la prudence de s'en tenir à ces règles classiques, et de ne pas s'en départir, jusqu'à ce que le jour soit fait définitivement sur les vues nouvelles auxquelles nous venons de faire allusion.

lation de chaleur arrive à faire tomber le plus rapidement possible la température.

**1182** — *Eau surchauffée*. — Il s'agit ici d'un point douteux et très discuté, qui semble cependant aujourd'hui tranché définitivement dans un sens négatif <sup>(1)</sup>.

On a depuis longtemps été frappé du nombre considérable d'explosions survenues immédiatement, ou peu après la remise en marche qui suit un arrêt momentané, tel que l'instant du repas des ouvriers d'une usine à vapeur. Les chauffeurs expérimentés ne mettent alors en marche qu'avec quelque lenteur.

Certains esprits <sup>(2)</sup> ont rapproché l'action calorifique que subit dans un tel intervalle l'eau en repos <sup>(3)</sup>, des phénomènes de *surchauffe* qui ont été étudiés par De Luc, Gay-Lussac, Magnus, Donny, Dufour de Lausanne, Krebs, et particulièrement M. Gernez, ainsi que des remarquables expériences de Boutigny, Leidenfrost, Pouillet, Melsens, relatives à ce que l'on a nommé l'état *sphéroïdal* <sup>(4)</sup>.

Il est en effet incontestable que, pour des essais de précision exécutés dans le calme du laboratoire et sur de petites quantités d'eau, l'on arrive à porter ce liquide jusqu'à la température de 157 degrés à l'air libre <sup>(5)</sup>. Cet état d'équilibre éminemment instable prend alors fin par une sorte de déflagration relativement violente.

**1183** — La persistance d'un certain courant d'opinion à rap-

<sup>(1)</sup> Fayol. De la surchauffe dans les machines à vapeur. *Bulletin de la Société de l'industrie minière de Saint-Étienne*, 2<sup>e</sup> série, t. XIII, p. 621. — Melsens. État sphéroïdal dans les chaudières à vapeur. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 3<sup>e</sup> série, t. X, p. 507. — Richard. *La chaudière locomotive*, p. 310.

<sup>(2)</sup> Mangin. *Mémorial du Génie maritime*, 1862, 4<sup>e</sup> livraison. — Commandant Trèves. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 18 septembre 1882, 9 et 22 avril 1883. — Obé. *Revue industrielle*, 14 décembre 1881. — Thurston (*Journal of Franklin Institute*, décembre 1884, janvier 1885. — *The Engineer*, 26 juin 1885).

<sup>(3)</sup> *Bouillantage* à petit feu.

<sup>(4)</sup> *Catéchisme du chauffeur de chaudières sphéroïdales*, in-8°, Saint-Étienne, 1858. — Chameroy (*Chaudière à vaporisation instantanée*, autographié. — *Machine à explosion de vapeur*, autographié).

Les appareils fondés sur ces principes auraient avant tout à être mis en règle avec les prescriptions administratives, avant tout fonctionnement industriel.

<sup>(5)</sup> M. Dufour a été jusqu'à 200 degrés (Richard. *La chaudière locomotive*, p. 310).

porter à cet ordre de faits des *explosions fulminantes* d'une grande intensité, qu'il paraissait difficile d'expliquer autrement, ont décidé la Commission centrale des machines à vapeur à déléguer à une sous-commission prise dans son sein, le soin d'effectuer sur ce sujet des expériences présentant un caractère industriel aussi rapproché que possible des conditions de la pratique. M. Hirsch a rédigé en son nom, à la date du 5 février 1884, un savant rapport <sup>(1)</sup> qui conclut dans les termes suivants :

« Il n'est nullement démontré, quant à présent, que la surchauffe de l'eau ait causé aucune explosion de chaudière, ni qu'elle se soit jamais produite dans les générateurs de l'industrie. Si elle se produit, ce n'est que dans des cas extrêmement rares, et par un concours de circonstances qui ne sont ni définies ni connues. Il n'y a donc pas lieu, pour le moment, d'examiner les remèdes qui ont été proposés pour combattre la surchauffe de l'eau dans les chaudières <sup>(2)</sup>. »

M. Aimé Witz a repris encore plus récemment <sup>(3)</sup> des expériences du même genre, et il arrive à cette conclusion que l'effet Boutigny ne se produit pas dans les chaudières sur les tôles rougies. La production de l'état globulaire y est impossible en pleine masse d'eau, à cause des courants qui prennent naissance. Mais des phénomènes de tension superficielle interviennent sans doute, car la vaporisation y devient d'une activité extraordinaire, qui mérite d'attirer l'attention des savants et des ingénieurs. Cet expérimentateur, dont on connaît la grande compétence, a constaté en effet qu'une tôle rougie à sec reste rouge sous l'eau, si le feu est poussé avec assez d'intensité. Son pouvoir de vaporisation peut alors atteindre le chiffre colossal, qui eût été inimaginable avant ces essais, de 994 kilogrammes d'eau par mètre carré et par heure; c'est-à-dire

<sup>(1)</sup> *Annales des mines*, 8<sup>e</sup> série, t. V, p. 471. — *Portefeuille économique des machines*, janvier, février 1885.

<sup>(2)</sup> Déjà en septembre 1881, le Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur avait émis l'avis suivant : « Il ne paraît pas démontré jusqu'à présent qu'il puisse se trouver, dans les chaudières en fonctionnement industriel, de l'eau à une température supérieure à celle qui correspond à la pression. »

<sup>(3)</sup> Aimé Witz. Recherches sur la réalisation de l'état sphéroïdal dans les chaudières à vapeur. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 22 février 1892, p. 411.



presque le décuple de ce que les anciennes expériences autorisaient à admettre pour les conditions ordinaires (1).

## § 5

### STATISTIQUE

**1184** — L'Administration publie chaque année, dans les *Annales des mines* et dans la *Statistique de l'industrie minérale et des appareils à vapeur en France et en Algérie*, le relevé détaillé des accidents qui ont été occasionnés par ces derniers.

Le tableau suivant résume pour une durée de vingt années, qui s'étend de 1866 à 1885, les *moyennes annuelles* relatives aux divers intervalles quinquennaux successifs (2). Il comprend tous les appareils à vapeur en service en France, ainsi que les générateurs de locomotives, mais non ceux de la Marine militaire, de l'Algérie, ni des colonies. On n'a fait figurer comme blessés que les victimes ayant subi une incapacité de travail d'au moins vingt jours. Les accidents ont été répartis d'après les catégories qui nous ont servi ci-dessus, et qui sont conformes aux cadres administratifs. On ne s'étonnera pas de ne pouvoir en opérer la vérification d'après la colonne du total des explosions, car certains accidents rentrent à la fois dans plusieurs classes.

Le premier groupe horizontal se rapporte aux *chaudières* proprement dites, qui subissent le contact des flammes; le second aux *réipients* de plus de cent litres chauffés uniquement par la vapeur. La troisième présente, pour ordre, l'ensemble des deux catégories précédentes, bien qu'il y ait peu d'analogie entre les risques que toutes les deux font courir.

Le premier groupe vertical contient les *totaux absolus*. On les voit tout naturellement s'accroître avec les développements progressifs de l'industrie. La seconde partie renferme des *nombres pro-*

(1) Voy. ci-dessus, p. 551, note.

(2) On ne perdra pas de vue que les chiffres inscrits en regard de ces intervalles représentent, non pas le total des accidents survenus dans ce laps de temps, mais le cinquième de ce total, c'est-à-dire la *moyenne annuelle*.

INTERVALLES QUINQUENNAUX	APPAREILS EN SERVICE	ACCI- DENTS	RÉPARTITION DES ACCIDENTS				VICTIMES			MOYENNE POUR 10000 APPAREILS			
			DÉFAUTS de construc- tion	DÉFAUTS d'en- tretien	DÉFAUTS de fonctionne- ment	CAUSES de indéter- minées	Tués	Blessés	Total	ACCI- DENTS	Tués	Blessés	Total
CHAUDIÈRES													
1866-70 .	55 295	14,0	2,6	4,0	7,0	1,8	18,8	21,2	40,0	4,0	5,4	6,2	11,6
1871-75 .	44 017	21,0	8,2	8,6	7,4	2,0	25,0	31,6	56,6	4,7	5,5	7,0	12,5
1876-80 .	57 558	25,8	5,4	10,0	9,2	1,2	26,8	34,4	41,2	4,2	4,7	6,0	10,7
1881-85 .	72 617	24,6	5,6	10,8	12,6	1,0	50,8	59,8	70,6	5,4	4,2	4,1	8,5
RÉCIPENTS													
1866-70 .	25 820	5,2	0,6	0,0	2,4	0,0	2,0	1,8	5,8	1,2	0,8	0,7	1,5
1871-75 .	23 205	4,8	2,4	0,8	2,4	0,2	4,2	4,2	8,4	2,1	1,8	1,7	3,5
1876-80 .	22 155	5,6	1,8	1,2	2,6	0,6	6,0	5,4	11,4	2,6	2,6	2,2	4,8
1881-85 .	22 429	6,8	1,8	2,2	3,8	0,2	3,2	2,6	5,8	5,0	1,4	1,1	2,5
TOTAL													
1866-70 .	61 115	17,2	5,2	4,0	9,4	1,8	20,8	25,0	45,8	2,8	5,4	5,8	7,2
1871-75 .	67 222	25,8	10,6	9,4	9,8	2,2	29,2	35,8	65,0	3,8	4,2	5,1	9,3
1876-80 .	79 691	29,4	7,2	11,2	11,8	1,8	52,8	59,8	72,6	5,6	4,4	4,9	9,5
1881-85 .	95 046	51,4	7,4	15,0	16,4	1,2	54,0	42,4	70,4	5,5	5,5	5,5	6,8

*portionnels*, qui tendent au contraire à diminuer, en mettant par là en évidence les progrès réalisés par le personnel et par la surveillance.

**1185** — En ce qui concerne le Royaume-uni d'Angleterre <sup>(1)</sup>, on peut indiquer les chiffres suivants pour un laps de temps de dix-huit années, presque égal au précédent <sup>(2)</sup>.

Les nombres d'accidents ont été les suivants :

Défauts de construction. . . . .	558
Défauts d'entretien. . . . .	268
Défauts de fonctionnement. . . . .	534
Causes diverses. . . . .	76
TOTAL. . . . .	<u>1 016</u>

et les nombres de victimes :

Tués. . . . .	1 255
Blessés. . . . .	1 945
TOTAL. . . . .	<u>3 196</u>

**1186** — Pour les locomotives en particulier <sup>(3)</sup>, dans le même intervalle de temps que ci-dessus (1866 à 1885), on a enregistré les totaux suivants :

<sup>(1)</sup> Marten. *Records of steam boiler explosions*, 1880.

<sup>(2)</sup> S'étendant du 30 juin 1861 au 30 juin 1879.

<sup>(3)</sup> Walckenaer. Explosions des chaudières locomotives. *Annales des mines*, 1887, 2<sup>e</sup> semestre, p. 361.

PAYS	ACCIDENTS	VICTIMES		
		TUÉS	BLESSÉS	TOTAL
France et Algérie. . . . .	14	6	20	26
Belgique . . . . .	7	3	3	6
Hollande . . . . .	1	2	0	2
Angleterre . . . . .	64	34	93	127
États-Unis <sup>1</sup> . . . . .	271	355	369	702

1. Pour permettre d'établir la comparaison, les nombres concernant les États-Unis devraient être majorés d'environ 1/3, car l'intervalle de temps s'étend seulement pour eux du 1<sup>er</sup> octobre 1867 au 31 décembre 1885, et en outre cette statistique risque d'être incomplète.

Une appréciation équitable ne pourrait d'ailleurs s'établir avec rigueur que sur des chiffres *proportionnels*, d'après les nombres de locomotives en mouvement dans ces divers pays. Cependant le résultat s'accuse suffisamment *a priori* en faveur de la France. On n'y compte qu'une seule explosion pour 40 000 années de service.

La sécurité, en France du moins, est donc beaucoup plus satisfaisante en ce qui concerne les locomotives que pour les machines fixes. Un tel résultat est bien propre à mettre en évidence l'influence salutaire de la régularité des soins et de la surveillance; car ces machines ont un système de construction plus compliqué et plus gêné, ainsi qu'un service d'une nature plus violente que les moteurs fixes.

## CHAPITRE LXII

### RÉGLEMENTATION

#### § 1

#### REGLEMENTS

**1187** — Les chaudières à vapeur pouvant créer un danger considérable, non seulement pour ceux qui s'en servent, mais pour les tiers qui habitent ou qui passent à proximité, le législateur et l'administration sont intervenus dans tous les pays pour en réglementer l'emploi. La sévérité des prescriptions, aussi bien que la part laissée à la liberté, ont d'ailleurs varié aux époques successives, d'après les progrès accomplis par les constructeurs, et l'habitude qui tend à familiariser la population avec un tel voisinage.

En ce qui concerne la France, MM. Hirsch et Debize ont présenté, dans leur remarquable traité <sup>(1)</sup>, un répertoire chronologique des principaux textes relatifs à la matière. On y trouve une analyse sommaire de 87 textes de lois, ordonnances royales ou décrets, circulaires ou instructions ministérielles.

M. Delaunay-Belleville a publié de son côté un volume <sup>(2)</sup> renfermant les textes, annotés par lui, des lois et règlements concernant les chaudières à vapeur en France, ainsi qu'en Allemagne, Alsace-Lorraine, Angleterre, Autriche, Belgique, Danemark, Espagne, États-Unis, Hollande, Italie, Hongrie, Norvège, Portugal, Suède et Suisse <sup>(3)</sup>.

<sup>(1)</sup> *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 1016.

<sup>(2)</sup> Paris, un fort volume grand in-8°, de 886 pages, Bernard, 1886.

<sup>(3)</sup> Schmidt. *Législation des appareils à vapeur*, in-8°, 1881. — Coret. *La nouvelle législation des machines à vapeur*, in-16, 1881.

Indépendamment des textes de droit commun renfermés dans les Codes français <sup>(1)</sup>, et de la loi pénale du 21 juillet 1856 concernant spécialement les contraventions aux règlements sur les appareils et bateaux à vapeur, il y a lieu de distinguer, pour l'application des textes encore en vigueur en France, les trois cas suivants :

1<sup>o</sup> Pour les *appareils fonctionnant à terre* : les décrets des 30 avril 1880 <sup>(2)</sup>, et 29 juin 1886 <sup>(3)</sup>.

2<sup>o</sup> Pour ceux de la *navigation fluviale* : le décret du 9 avril 1883 <sup>(4)</sup>.

3<sup>o</sup> Pour ceux de la *navigation maritime* : l'ordonnance royale du 17 janvier 1846 <sup>(5)</sup>.

On pourra trouver au besoin ces textes, ainsi que les instructions ministérielles destinées à les développer, dans la *partie administrative des Annales des mines*. Devant l'impossibilité d'insérer ici un tel nombre de documents et de commentaires, qui modifieraient complètement le caractère technique de ce Cours, nous nous bornerons à transcrire les deux décrets qui forment la base essentielle des prescriptions administratives pour les appareils fonctionnant à terre.

1<sup>o</sup>

## DÉCRET DU 30 AVRIL 1880

Le Président de la République française,  
 Sur le rapport du Ministre des travaux publics ;  
 Vu le décret du 25 janvier 1865, relatif aux chaudières à vapeur autres que celles qui sont placées sur des bateaux ;  
 Vu les avis de la Commission centrale des appareils à vapeur ;  
 Le Conseil d'État entendu,

<sup>(1)</sup> MM. Hirsch et Debize rappellent spécialement à cet égard les articles 1582, 1583, 384 du Code civil, ainsi que les articles 319, 320, 463, 471, 474, 484 du Code pénal.

<sup>(2)</sup> Commenté par le rapport au Président de la République qui lui est relatif, et par les circulaires des 21 juillet 1880, 15 février, 20 octobre 1883, 13 février 1884, 31 mars, 20 juin 1885, 23 août 1887, 14 août 1888.

<sup>(3)</sup> Avec circulaire du 6 septembre 1887.

<sup>(4)</sup> Avec circulaire du 30 avril 1883.

<sup>(5)</sup> Avec instructions des 5 et 6 juin de la même année, et un grand nombre de circulaires ultérieures sur ce sujet, qui échappe à notre cadre (voy. p. 389).

Décède :

ART. 1<sup>er</sup>. — Sont soumis aux formalités et aux mesures prescrites par le présent règlement : 1° les générateurs de vapeur autres que ceux qui sont placés à bord des bateaux; 2° les récipients définis ci-après (Titre V).

## TITRE 1<sup>er</sup>

### MESURES DE SURETÉ RELATIVES AUX CHAUDIÈRES PLACÉES A DOMEURS

ART. 2. — Aucune chaudière neuve ne peut être mise en service qu'après avoir subi l'épreuve réglementaire ci-après définie. Cette épreuve doit être faite chez le constructeur et sur sa demande.

Toute chaudière venant de l'étranger est éprouvée avant sa mise en service, sur le point du territoire français désigné par le destinataire dans sa demande.

ART. 3. — Le renouvellement de l'épreuve peut être exigé de celui qui fait usage d'une chaudière :

1° Lorsque la chaudière, ayant déjà servi, est l'objet d'une nouvelle installation ;

2° Lorsqu'elle a subi une réparation notable ;

5° Lorsqu'elle est remise en service après un chômage prolongé.

A cet effet, l'intéressé devra informer l'ingénieur des mines de ces diverses circonstances. En particulier, si l'épreuve exige la démolition du massif du fourneau ou l'enlèvement de l'enveloppe de la chaudière et un chômage plus ou moins prolongé, cette épreuve pourra ne point être exigée, lorsque des renseignements authentiques sur l'époque et les résultats de la dernière visite, intérieure et extérieure, constitueront une présomption suffisante en faveur du bon état de la chaudière. Pourront être notamment considérés comme renseignements probants les certificats délivrés aux membres des associations de propriétaires d'appareils à vapeur par celles de ces associations que le Ministre aura désignées.

Le renouvellement de l'épreuve est exigible également lorsque, à raison des conditions dans lesquelles une chaudière fonctionne, il y a lieu, par l'ingénieur des mines, d'en suspecter la solidité.

Dans tous les cas, lorsque celui qui fait usage d'une chaudière contestera la nécessité d'une nouvelle épreuve, il sera, après une instruction où celui-ci sera entendu, statué par le préfet.

En aucun cas, l'intervalle entre deux épreuves consécutives n'est supérieur à dix années. Avant l'expiration de ce délai, celui qui fait usage d'une chaudière à vapeur doit lui-même demander le renouvellement de l'épreuve.

ART. 4. — L'épreuve consiste à soumettre la chaudière à une pression hydraulique supérieure à la pression effective qui ne doit point être dépassée dans le service. Cette pression d'épreuve sera maintenue pendant le temps nécessaire à l'examen de la chaudière, dont toutes les parties doivent pouvoir être visitées.

La surcharge d'épreuve par centimètre carré est égale à la pression effective, sans jamais être inférieure à un demi-kilogramme ni supérieure à 6 kilogrammes.

L'épreuve est faite sous la direction de l'ingénieur des mines et en sa présence, ou, en cas d'empêchement, en présence du garde-mines opérant d'après ses instructions.

Elle n'est pas exigée pour l'ensemble d'une chaudière dont les diverses parties, éprouvées séparément, ne doivent être réunies que par des tuyaux placés, sur tout leur parcours, en dehors du foyer et des conduits de flamme, et dont les joints peuvent être facilement démontés.

Le chef de l'établissement où se fait l'épreuve fournit la main-d'œuvre et les appareils nécessaires à l'opération.

ART. 5. — Après qu'une chaudière ou partie de chaudière a été éprouvée avec succès, il y est apposé un timbre, indiquant en kilogrammes par centimètre carré la pression effective que la vapeur ne doit pas dépasser.

Les timbres sont poinçonnés et reçoivent trois nombres indiquant le jour, le mois et l'année de l'épreuve.

Un de ces timbres est placé de manière à être toujours apparent après la mise en place de la chaudière.

ART. 6. — Chaque chaudière est munie de deux soupapes de sûreté, chargées de manière à laisser la vapeur s'écouler dès que sa pression effective atteint la limite maximum indiquée par le timbre réglementaire.

L'orifice de chacune des soupapes doit suffire à maintenir, celle-ci étant au besoin convenablement déchargée ou soulevée, et quelle que soit l'activité du feu, la vapeur dans la chaudière à un degré de pression qui n'excède pour aucun cas la limite ci-dessus.

Le constructeur est libre de répartir, s'il le préfère, la section totale d'écoulement nécessaire des deux soupapes réglementaires entre un plus grand nombre de soupapes.

ART. 7. — Toute chaudière est munie d'un manomètre en bon état placé en vue du chauffeur et gradué de manière à indiquer, en kilogrammes, la pression effective de la vapeur dans la chaudière.

Une marque très apparente indique sur l'échelle du manomètre la limite que la pression effective ne doit point dépasser.

La chaudière est munie d'un ajutage terminé par une bride de 0<sup>m</sup>,04 de diamètre et 0<sup>m</sup>,005 d'épaisseur disposée pour recevoir le manomètre vérificateur.

ART. 8. — Chaque chaudière est munie d'un appareil de retenue, soupape ou clapet, fonctionnant automatiquement et placé au point d'insertion du tuyau d'alimentation qu'il lui est propre.

ART. 9. — Chaque chaudière est munie d'une soupape ou d'un robinet d'arrêt de vapeur, placé autant que possible à l'origine du tuyau de conduite de vapeur, sur la chaudière même.

ART. 10. — Toute paroi en contact par une de ses faces avec la flamme doit être baignée par l'eau sur sa face opposée.

Le niveau de l'eau doit être maintenu, dans chaque chaudière, à une hauteur de marche telle qu'il soit, en toute circonstance, à 0<sup>m</sup>,06 au moins au-dessus du plan pour lequel la condition précédente cesserait d'être remplie. La position



limite sera indiquée, d'une manière très apparente, au voisinage du tube de niveau mentionné à l'article suivant.

Les prescriptions énoncées au présent article ne s'appliquent point :

- 1° Aux surchauffeurs de vapeur distincts de la chaudière;
- 2° A des surfaces relativement peu étendues et placées de manière à ne jamais rougir, même lorsque le feu est poussé à son maximum d'activité, telles que les tubes ou parties de cheminées qui traversent le réservoir de vapeur, en envoyant directement à la cheminée principale les produits de la combustion.

ART. 11. — Chaque chaudière est munie de deux appareils indicateurs du niveau de l'eau indépendants l'un de l'autre, et placés en vue de l'ouvrier chargé de l'alimentation.

L'un de ces deux indicateurs est un tube en verre, disposé de manière à pouvoir être facilement nettoyé et remplacé au besoin.

Pour les chaudières verticales de grande hauteur, le tube en verre est remplacé par un appareil disposé de manière à reporter, en vue de l'ouvrier chargé de l'alimentation, l'indication du niveau de l'eau dans la chaudière.

## TITRE II

### ÉTABLISSEMENT DES CHAUDIÈRES A VAPEUR PLACÉES A DEMEURE

ART. 12. — Toute chaudière à vapeur destinée à être employée à demeure ne peut être mise en service qu'après une déclaration adressée, par celui qui fait usage du générateur, au préfet du département. Cette déclaration est enregistrée à sa date. Il en est donné acte. Elle est communiquée sans délai à l'ingénieur en chef des mines.

ART. 13. — La déclaration fait connaître avec précision :

- 1° Le nom et le domicile du vendeur de la chaudière ou l'origine de celle-ci;
- 2° La commune et le lieu où elle est établie;
- 3° La forme, la capacité et la surface de chauffe;
- 4° Le numéro du timbre réglementaire;
- 5° Un numéro distinctif de la chaudière, si l'établissement en possède plusieurs;
- 6° Enfin le genre d'industrie et l'usage auxquels elle est destinée.

ART. 14. — Les chaudières sont divisées en trois catégories :

Cette classification est basée sur le produit de la multiplication du nombre exprimant en mètres cubes la capacité totale de la chaudière avec ses bouilleurs et ses réchauffeurs alimentaires, mais sans y comprendre les surchauffeurs de vapeur, par le nombre exprimant, en degrés centigrades, l'excès de la température de l'eau correspondant à la pression indiquée par le timbre réglementaire sur la température de 100 degrés, conformément à la table annexée au présent décret.

Si plusieurs chaudières doivent fonctionner ensemble dans un même emplacement, et si elles ont entre elles une communication quelconque, directe ou indirecte, on prend, pour former le produit, comme il vient d'être dit, la somme des capacités de ces chaudières.

Les chaudières sont de la première catégorie quand le produit est plus grand que 200; de la deuxième, quand le produit n'excède pas 200, mais surpasse 50; de la troisième, si le produit n'excède pas 50.

**ART. 15.** — Les chaudières comprises dans la première catégorie doivent être établies en dehors de toute maison d'habitation et de tout atelier surmonté d'étages. N'est pas considérée comme un étage, au-dessus de l'emplacement d'une chaudière, une construction dans laquelle ne se fait aucun travail nécessitant la présence d'un personnel à poste fixe.

**ART. 16.** — Il est interdit de placer une chaudière de première catégorie à moins de 3 mètres d'une maison d'habitation.

Lorsqu'une chaudière de première catégorie est placée à moins de 10 mètres d'une maison d'habitation, elle en est séparée par un mur de défense.

Ce mur, en bonne et solide maçonnerie, est construit de manière à défilier la maison par rapport à tout point de la chaudière distant de moins de 10 mètres, sans toutefois que sa hauteur dépasse de 1 mètre la partie la plus élevée de la chaudière. Son épaisseur est égale au tiers au moins de sa hauteur, sans que cette épaisseur puisse être inférieure à 1 mètre en couronne. Il est séparé du mur de la maison voisine par un intervalle libre de 30 centimètres de largeur au moins.

L'établissement d'une chaudière de première catégorie à la distance de 10 mètres ou plus d'une maison d'habitation n'est assujéti à aucune condition particulière.

Les distances de 3 mètres et de 10 mètres, fixées ci-dessus, sont réduites respectivement à 1<sup>m</sup>,50 et à 5 mètres lorsque la chaudière est enterrée, de façon que la partie supérieure de ladite chaudière se trouve à 1 mètre en contre-bas du sol du côté de la maison voisine.

**ART. 17.** — Les chaudières comprises dans la deuxième catégorie peuvent être placées dans l'intérieur de tout atelier, pourvu que l'atelier ne fasse pas partie d'une maison d'habitation.

Les foyers sont séparés des murs des maisons voisines par un intervalle libre de 1 mètre au moins.

**ART. 18.** — Les chaudières de troisième catégorie peuvent être établies dans un atelier quelconque, même lorsqu'il fait partie d'une maison d'habitation.

Les foyers sont séparés des murs des maisons voisines par un intervalle libre de 0<sup>m</sup>,50 au moins.

**ART. 19.** — Les conditions d'emplacement prescrites pour les chaudières à demeure, par les précédents articles, ne sont pas applicables aux chaudières pour l'établissement desquelles il aura été satisfait au décret du 25 janvier 1863, antérieurement à la promulgation du présent règlement.

**ART. 20.** — Si, postérieurement à l'établissement d'une chaudière, un terrain contigu vient à être affecté à la construction d'une maison d'habitation, celui qui fait usage de la chaudière devra se conformer aux mesures prescrites par les articles 16, 17 et 18, comme si la maison eût été construite avant l'établissement de la chaudière.

ART. 21. — Indépendamment des mesures générales de sûreté prescrites au titre I<sup>er</sup>, et de la déclaration prévue par les articles 12 et 13, les chaudières à vapeur fonctionnant dans l'intérieur des mines sont soumises aux conditions que pourra prescrire le préfet, suivant les cas et sur le rapport de l'ingénieur des mines.

### TITRE III

#### CHAUDIÈRES LOCOMOBILES

ART. 22. — Sont considérées comme locomobiles les chaudières à vapeur qui peuvent être transportées facilement d'un lieu dans un autre, n'exigent aucune construction pour fonctionner sur un point donné, et ne sont employées que d'une manière temporaire à chaque station.

ART. 23. — Les dispositions des articles 2 à 11 inclusivement du présent décret sont applicables aux chaudières locomobiles.

ART. 24. — Chaque chaudière porte une plaque sur laquelle sont gravés, en caractères très apparents, le nom et le domicile du propriétaire et un numéro d'ordre, si ce propriétaire possède plusieurs chaudières locomobiles.

ART. 25. — Elle est l'objet de la déclaration prescrite par les articles 12 et 13. Cette déclaration est adressée au préfet du département où est le domicile du propriétaire.

L'ouvrier chargé de la conduite devra représenter à toute réquisition le récépissé de cette déclaration.

### TITRE IV

#### CHAUDIÈRES DES MACHINES LOCOMOTIVES

ART. 26. — Les machines à vapeur locomotives sont celles qui, sur terre, travaillent en même temps qu'elles se déplacent par leur propre force, telles que les machines des chemins de fer et des tramways, les machines routières, les rouleaux compresseurs, etc.

ART. 27. — Les dispositions des articles 2 à 8 inclusivement, et celles des articles 11 et 24 sont applicables aux chaudières des machines locomotives.

ART. 28. — Les dispositions de l'article 25, paragraphe 1<sup>er</sup>, s'appliquent également à ces chaudières.

ART. 29. — La circulation des machines locomotives a lieu dans les conditions déterminées par des règlements spéciaux.

### TITRE V

#### RÉCIPIENTS

ART. 30. — Sont soumis aux dispositions suivantes les récipients de formes diverses d'une capacité de plus de 100 litres, au moyen desquels les matières à

élaborer sont chauffées, non directement à feu nu, mais par de la vapeur empruntée à un générateur distinct, lorsque leur communication avec l'atmosphère n'est point établie par des moyens excluant toute pression effective nettement appréciable.

ART. 31. — Ces récipients sont assujettis à la déclaration prescrite par les articles 12 et 13.

Ils sont soumis à l'épreuve, conformément aux articles 2, 3, 4 et 5. Toutefois la surcharge d'épreuve sera, dans tous les cas, égale à la moitié de la pression maximum à laquelle l'appareil doit fonctionner, sans que cette surcharge puisse excéder 4 kilogrammes par centimètre carré.

ART. 32. — Ces récipients sont munis d'une soupape de sûreté réglée pour la pression indiquée par le timbre, à moins que cette pression ne soit égale ou supérieure à celle fixée pour la chaudière alimentaire.

L'orifice de cette soupape, convenablement déchargée ou soulevée au besoin, doit suffire à maintenir pour tous les cas la vapeur dans le récipient à un degré de pression qui n'excède pas la limite du timbre.

Elle peut être placée, soit sur le récipient lui-même, soit sur le tuyau d'arrivée de la vapeur, entre le robinet et le récipient.

ART. 33. — Les dispositions des articles 30, 31 et 32 s'appliquent également aux réservoirs dans lesquels de l'eau à haute température est emmagasinée, pour fournir ensuite un dégagement de vapeur ou de chaleur quel qu'en soit l'usage.

ART. 34. — Un délai de six mois, à partir de la promulgation du présent décret, est accordé pour l'exécution des quatre articles qui précèdent.

## TITRE VI

### DISPOSITIONS GÉNÉRALES

ART. 35. — Le Ministre peut, sur le rapport des ingénieurs des mines, l'avis du préfet et celui de la Commission centrale des machines à vapeur, accorder dispense de tout ou partie des prescriptions du présent décret dans tous les cas où, à raison soit de la forme, soit de la faible dimension des appareils, soit de la position spéciale des pièces contenant de la vapeur, il serait reconnu que la dispense ne peut pas avoir d'inconvénient.

ART. 36. — Ceux qui font usage de générateurs ou de récipients de vapeur veilleront à ce que ces appareils soient entretenus constamment en bon état de service.

A cet effet, ils tiendront la main à ce que des visites complètes, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur, soient faites à des intervalles rapprochés pour constater l'état des appareils et assurer l'exécution en temps utile des réparations ou remplacements nécessaires.

Ils devront informer les ingénieurs des réparations notables faites aux chau-

dières et aux récipients, en vue de l'exécution des articles 3 (1°, 2° et 3°) et 31, § 2.

ART. 37. — Les contraventions au présent règlement sont constatées, poursuivies et réprimées conformément aux lois.

ART. 38. — En cas d'accident ayant occasionné la mort ou des blessures, le chef de l'établissement doit prévenir immédiatement l'autorité chargée de la police locale et l'ingénieur des mines chargé de la surveillance. L'ingénieur se rend sur les lieux, dans le plus bref délai, pour visiter les appareils, en constater l'état et rechercher les causes de l'accident. Il rédige sur le tout :

1° Un rapport qu'il adresse au procureur de la République et dont une expédition est transmise à l'ingénieur en chef, qui fait parvenir son avis à ce magistrat ;

2° Un rapport qui est adressé au préfet, par l'intermédiaire et avec l'avis de l'ingénieur en chef.

En cas d'accident n'ayant occasionné ni mort ni blessure, l'ingénieur des mines seul est prévenu ; il rédige un rapport qu'il envoie, par l'intermédiaire et avec l'avis de l'ingénieur en chef, au préfet.

En cas d'explosion, les constructions ne doivent point être réparées et les fragments de l'appareil rompu ne doivent point être déplacés ou dénaturés avant la constatation de l'état des lieux par l'ingénieur.

ART. 39. — Par exception, le Ministre pourra confier la surveillance des appareils à vapeur aux ingénieurs ordinaires et aux conducteurs des ponts et chaussées, sous les ordres de l'ingénieur en chef des mines de la circonscription.

ART. 40. — Les appareils à vapeur qui dépendent des services spéciaux de l'État sont surveillés par les fonctionnaires et agents de ces services.

ART. 41. — Les attributions conférées aux préfets des départements par le présent décret sont exercées par le préfet de police dans toute l'étendue de son ressort.

ART. 42. — Est rapporté le décret du 25 janvier 1865.

ART. 43. — Le Ministre des travaux publics est chargé de l'exécution du présent décret, qui sera inséré au *Journal officiel* et au *Bulletin des lois*.

Table de température.

VALEURS CORRESPONDANTES		VALEURS CORRESPONDANTES		VALEURS CORRESPONDANTES	
de la PRESSION EFFECTIVE en kilogrammes	de la TEMPÉRATURE en degrés centigrades	de la PRESSION EFFECTIVE en kilogrammes	de la TEMPÉRATURE en degrés centigrades	de la PRESSION EFFECTIVE en kilogrammes	de la TEMPÉRATURE en degrés centigrades
0.5	111	7.5	173	14.5	199
1.0	120	8.0	175	15.0	200
1.5	127	8.5	177	15.5	202
2.0	133	9.0	179	16.0	203
2.5	138	9.5	181	16.5	205
3.0	143	10.0	183	17.0	206
3.5	147	10.5	185	17.5	208
4.0	151	11.0	187	18.0	209
4.5	155	11.5	189	18.5	210
5.0	158	12.0	191	19.0	211
5.5	161	12.5	193	19.5	213
6.0	164	13.0	194	20.0	214
6.5	167	13.5	196	»	»
7.0	170	14.0	197	»	»

20

DÉCRET DU 29 JUIN 1886

Le Président de la République française,  
 Sur le rapport du Ministre des Travaux publics;  
 Vu la loi du 21 juillet 1856;  
 Vu le décret du 30 avril 1880 relatif aux chaudières à vapeur autres que celles  
 qui sont placées sur des bateaux;  
 Vu l'avis de la Commission centrale des machines à vapeur, en date du 4 fé-  
 vrier 1886;  
 Le Conseil d'État entendu,

Decrète :

Arr. 1<sup>er</sup>. — Lorsque plusieurs générateurs de vapeur, placés à demeure, sont  
 groupés sur une conduite générale de vapeur, en nombre tel que le produit,  
 formé comme il est dit à l'article 14 du décret du 30 avril 1880, en prenant  
 comme base du calcul le timbre réglementaire le plus élevé, dépasse le nombre  
 1800, lesdits générateurs sont répartis par séries correspondant chacune à un

produit au plus égal à ce nombre. Chaque série est munie d'un clapet automatique d'arrêt, disposé de façon à éviter, en cas d'explosion, le déversement de la vapeur des séries restées intactes.

ART. 2. — Lorsqu'un générateur de première catégorie est chauffé par les flammes perdues d'un ou plusieurs fours métallurgiques, tout le courant des gaz chauds doit, en arrivant au contact des tôles, être dirigé tangentiellement aux parois de la chaudière.

A cet effet, si les rampants destinés à amener les flammes ne sont pas construits de façon à assurer ce résultat, les tôles exposées aux coups de feu sont protégées, en face des débouchés des rampants dans les carneaux, par des murettes en matériaux réfractaires, distantes des tôles d'au moins 50 millimètres, et suffisamment étendues dans tous les sens pour que les courants de gaz chauds prennent des directions sensiblement tangentielles aux surfaces des tôles voisines, avant de les toucher.

ART. 3. — Les dispositions de l'art. 35 du décret du 30 avril 1880 sont applicables aux prescriptions du présent règlement.

ART. 4. — Un délai de six mois est accordé aux propriétaires des chaudières existant antérieurement à la promulgation du présent règlement pour se conformer aux prescriptions ci-dessus.

ART. 5. — Le Ministre des Travaux publics est chargé de l'exécution du présent décret, qui sera inséré au *Journal officiel* et au *Bulletin des lois*.

## § 2

### EMPLACEMENT DES CHAUDIÈRES

**1188** — Les ingénieurs des mines sont chargés en particulier de l'instruction des affaires concernant l'établissement des appareils à vapeur, et les demandes de dérogations. Il s'en faut en effet de beaucoup que le choix de l'emplacement et des dispositions soit laissé à l'arbitraire de chacun. Le décret du 30 avril 1880 impose à cet égard de nombreuses prescriptions, dont il ne sera pas inutile d'esquisser un résumé, en renvoyant d'ailleurs aux textes eux-mêmes.

A cet égard, les appareils à vapeur soumis à la réglementation publique (n° 1187) sont distingués en deux sortes : les *chaudières* proprement dites et les *réceptifs*. Ces derniers sont définis par l'article 30, comme des vases de forme quelconque et d'une capacité de plus de 100 litres, chauffés, non à feu nu, mais à l'aide de

la vapeur d'un générateur distinct, lorsque leur communication avec l'atmosphère n'est point établie par des moyens excluant toute pression effective nettement appréciable.

Les générateurs sont de leur côté répartis par l'article 14 en trois catégories. Cette classification est basée sur la valeur numérique du produit de la capacité totale évaluée en mètres cubes, par l'excès sur le nombre 100 de la température centigrade qui correspond à la pression du timbre <sup>(1)</sup>. On comprend dans cette capacité les bouilleurs et les réchauffeurs alimentaires, mais non les surchauffeurs de vapeur. Pour une batterie de plusieurs générateurs fonctionnant ensemble dans un même emplacement, où ils ont entre eux une communication quelconque, on ajoute ensemble toutes les capacités.

Les chaudières sont de première catégorie, si le produit en question est supérieur à 200 <sup>(2)</sup>. Pour la seconde, il n'excède pas 200, mais il est supérieur à 50. Pour la troisième, il ne dépasse pas 50.

Les chaudières de première catégorie doivent être établies en dehors de toute maison d'habitation, et de tout atelier surmonté d'étages. Toutefois l'on ne considère pas comme un étage une construction située au-dessus d'un générateur, et dans laquelle il ne se fait aucun travail nécessitant la présence d'un personnel à poste fixe. Ces générateurs ne peuvent se mettre à moins de 3 mètres d'une maison d'habitation; et si la distance ne dépasse pas 10 mètres, l'exploitant doit élever un mur de défense, dont l'article 16 définit en détail les proportions (p. 798).

Les chaudières de seconde catégorie peuvent être placées dans l'intérieur de tout atelier, pourvu qu'il ne fasse pas partie d'une maison d'habitation. Leurs foyers seront séparés des murs des maisons voisines par un intervalle libre d'un mètre au moins (voy. article 17).

<sup>(1)</sup> Voir la table de températures annexée au texte du décret (p. 802). Il est bien essentiel de ne pas confondre ce tableau de *pressions effectives* avec les tables de *tensions de vapeur* (voy. t. I, p. 777).

<sup>(2)</sup> Le décret du 29 juin 1886 a prévu en outre, dans son article 1<sup>er</sup>, le cas où le produit total dépasserait 1800. Il exige alors la subdivision de l'ensemble en séries, de produit caractéristique au plus égal à ce nombre. Chacune d'elles doit être munie d'un clapet automatique d'arrêt, disposé de façon à éviter, en cas d'explosion, le déversement de la vapeur des séries restées intactes.



Les chaudières de troisième catégorie ne sont plus astreintes à la même prohibition; et, pour elles, l'intervalle est réduit à 0 m. 50 (voy. article 18).

Si l'on vient à construire ultérieurement des maisons d'habitation sur les terrains contigus, l'exploitant est tenu de se mettre à nouveau en règle avec les prescriptions précédentes (voy. article 20).

D'après l'article 35, le Ministre des Travaux publics peut, dans des formes déterminées, accorder certaines dispenses pour des cas spéciaux où il est reconnu qu'elles ne peuvent offrir d'inconvénients.

La mise en service d'un appareil à vapeur est nécessairement précédée d'une déclaration qui est adressée au Préfet, et dont le détail est défini par les articles 12, 13 et 31.

### § 3

#### ÉPREUVE RÉGLEMENTAIRE

**1189** — Le décret du 30 avril 1880 prescrit, par ses articles 2, 3, 4, 5 et 30, une épreuve <sup>(1)</sup> que tout appareil à vapeur doit subir réglementairement à divers moments, à savoir : 1° chez le constructeur, quand il est neuf <sup>(2)</sup>; 2° si cet appareil, ayant déjà servi, devient l'objet d'une nouvelle installation; 3° lorsqu'il a subi une réparation notable; 4° quand il est remis en service après un chômage prolongé; 5° lorsque, à raison des conditions dans lesquelles une chaudière fonctionne, il y a lieu, par l'ingénieur des mines, d'en suspecter la solidité; 6° dans tous les cas, au bout de dix ans après la dernière épreuve subie <sup>(3)</sup>.

L'essai est effectué sous la direction de l'ingénieur des mines, ou du contrôleur des mines délégué par lui.

<sup>(1)</sup> Huet. Notice historique sur l'épreuve des chaudières à vapeur (*Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 511. — *Congrès de mécanique appliquée de 1889*, t. III, p. 77). — Bonnet. Emploi de l'injecteur pour les épreuves des chaudières. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1885, p. 25.

<sup>(2)</sup> Si le générateur vient de l'étranger, le destinataire indique lui-même dans sa demande le point du territoire sur lequel il désire que soit effectuée l'épreuve.

<sup>(3)</sup> Sauf ce dernier cas, il peut être usé de tolérance pour dispenser de l'épreuve dans les conditions déterminées par l'article 3 du décret du 30 avril 1880.

Il consiste à soumettre l'appareil à une pression hydraulique à froid, prolongée pendant le temps nécessaire à l'examen de la chaudière, dont toutes les parties doivent pouvoir être visitées <sup>(1)</sup>.

La pression d'épreuve dépend de celle en vue de laquelle sera timbré le *générateur*, sur la demande de l'intéressé. La *surcharge* d'épreuve par centimètre carré est égale à la pression effective elle-même, sans jamais devenir inférieure à un demi-kilogramme, ni supérieure à six kilogrammes <sup>(2)</sup>. Pour les *réceptifs* définis par l'article 30 du décret du 30 avril 1880, la surcharge est égale à la moitié de la pression maximum, sans pouvoir toutefois excéder 4 kilogrammes par centimètre carré.

Cette pression est observée à l'aide d'un manomètre, gradué lui-même par pression à froid <sup>(3)</sup>. Chaque chaudière sera munie à cet effet d'un ajutage, dont les dimensions sont déterminées par l'article 7, et qui est destiné à recevoir le manomètre de l'Administration.

On réalise la tension voulue au moyen d'une pompe de compression, qui doit être fournie par l'industriel, ainsi que la main-d'œuvre nécessaire. La chaudière est remplie d'eau d'une manière complète. On évite avec soin la formation de chambres d'air, qui entraîneraient des inconvénients, et parfois même des accidents; l'air en tension pouvant, en cas de rupture, déterminer des projections que l'on n'a pas à redouter avec le liquide. Il faut pomper doucement, surtout vers la fin.

<sup>(1)</sup> En ce qui concerne la démolition des maçonneries, qui est toujours exigible, la circulaire ministérielle du 23 août 1887 autorise une tolérance dans certains cas particuliers, lorsque les carneaux, très larges et ouverts de place en place, laissent réellement voir toutes les parties de la chaudière, sans que l'on soit forcé de s'y glisser dans une situation rendant impossible tout examen approfondi.

<sup>(2)</sup> L'ancien décret du 25 janvier 1865 imposait des surcharges qui pouvaient devenir excessives, et risquaient alors de fatiguer abusivement le métal et les assemblages, en allant ainsi directement contre le but que l'on s'était proposé. M. Vinçotte n'a pas craint d'énoncer dans le Congrès de 1877 des ingénieurs en chef des associations de propriétaires d'appareils à vapeur, que des explosions dues à un manque de résistance étaient fréquemment signalées dans les premiers temps qui suivent l'épreuve.

<sup>(3)</sup> Autrefois on calait l'une des soupapes de sûreté, en chargeant l'autre au degré correspondant à la pression voulue. Puis l'on foulait, jusqu'à ce que l'eau sortît en nappe bien jaillissante, que l'on maintenait pendant toute la durée de l'examen. Cet état dynamique ne présentait pas les mêmes garanties de précision qu'un mode purement statique (Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 169).

L'expérimentateur examine attentivement toutes les parties du générateur. Des fuites ou des déformations permanentes font refuser le timbre. Les suintements que l'on peut étancher au marteau, les altérations légères qui rentrent ensuite d'elles-mêmes dans la forme normale peuvent être tolérés.

Un timbre est apposé sur la chaudière, et poinçonné par le contrôleur des mines. Il indique la pression effective qui ne doit pas être dépassée, et porte trois nombres désignant le jour, le mois et l'année de l'épreuve. Il faut que ce timbre reste apparent après la mise en place de l'appareil.

Un procès-verbal est rédigé; une expédition en est remise à l'intéressé. L'ingénieur y signale les incidents qui se sont produits, ainsi que les détails de construction qui lui paraîtraient défectueux, tels que armatures insuffisantes, assemblages mal exécutés, épaisseurs d'eau trop restreintes, etc.

En outre un état d'épreuve est adressé par l'ingénieur en chef des mines à son collègue par l'intermédiaire des préfets, lorsque la chaudière doit être utilisée en dehors de son propre service. L'instruction ministérielle du 18 juillet 1890 en a défini le type.

#### § 4

### ENQUÊTES SUR LES EXPLOSIONS

**1190** — Un troisième devoir essentiel du Corps des Mines, en ce qui concerne le service des appareils à vapeur, consiste dans l'enquête réglementaire qui doit toujours suivre un accident.

Le chef de l'établissement qui en a été le théâtre a, en pareil cas, le devoir d'avertir immédiatement l'ingénieur des mines <sup>(1)</sup>. L'emplacement doit rester en l'état. En dehors du sauvetage des personnes, rien n'y sera déplacé, dénaturé ou réparé avant l'arrivée de l'ingénieur. Celui-ci se rend sur les lieux dans le plus bref délai possible, pour constater l'état des choses et rechercher les causes de la catastrophe. Il rédige à ce sujet en premier lieu un rapport

<sup>(1)</sup> Et en outre, s'il y a mort ou blessure, l'autorité chargée de la police locale.

sommaire, qu'il adresse à la fois au procureur de la République (1) et à l'ingénieur en chef des mines, afin que celui-ci fasse également parvenir son appréciation au parquet; et ultérieurement un rapport technique détaillé, que l'Administration supérieure reçoit par l'intermédiaire du préfet, avec l'avis de l'ingénieur en chef.

L'enquête doit être conduite avec prudence et célérité, afin que l'état des lieux ne puisse être modifié par l'action du temps ou des personnes, et peut-être même les témoins sollicités et circonvenus. L'audition de ces derniers, et au besoin leurs confrontations les uns avec les autres, réclament beaucoup de soin et de patience. Elles apporteront souvent la lumière, mais parfois aussi des obscurités dues à une émotion naturelle en un pareil moment, à l'illusion, à l'inintelligence, autant qu'à la dissimulation et à la crainte de se compromettre. L'interrogatoire des blessés exige encore plus de précautions et de réserve.

L'examen des objets matériels fournira généralement des résultats plus précis et plus sûrs. A l'aide des plans, on reconstitue la scène avant l'accident. On note les emplacements des débris, la violence des effets mécaniques, qui peut éclairer sur la quantité d'eau restant dans l'appareil au moment de l'explosion. On relève la forme des déchirures, en pleine tôle ou suivant les clouures. On examine la tranche des fragments, pour y découvrir, s'il y a lieu, la trace d'anciennes fissures au milieu des ruptures fraîches, et pour juger de la nature du métal, et des corrosions qu'il peut avoir subies. On constate le degré d'entartrement (si les incrustations n'ont pas été détachées de la tôle par la violence du choc), ainsi que les traces de coup de feu pour les pièces qui ne sont pas restées exposées à l'action du foyer après l'explosion.

Les appareils de sûreté doivent être recherchés et examinés minutieusement, afin de permettre de constater si leur état est de nature à disculper le chauffeur, ou tout au contraire à lui être opposé comme charge d'accusation. Les renseignements verbaux fournis par les témoins pourront parfois éclairer sur les indications que présentaient ces appareils un peu avant le désastre.

(1) En cas de mort ou de blessure.

Il y aura lieu d'essayer à loisir, par les procédés en usage, des éprouvettes prélevées dans le métal avec les précautions convenables, afin de se fixer sur sa nature originaire ou progressivement altérée. On aura soin de les prendre en dehors des parties manifestement affectées par les effets de l'explosion. On pratiquera des coupes dans les assemblages suspectés. On exécutera des dessins soignés d'ensemble et de détail. Il faudra rechercher également l'historique de la chaudière, les dates de sa construction, de ses réparations, des épreuves qu'elle a subies, ainsi que les noms de leurs auteurs. On mentionnera, s'il y a lieu, l'association de propriétaires d'appareils à vapeur à laquelle l'établissement est affilié.

Les rapports des ingénieurs formulent des conclusions relativement aux suites, tant judiciaires qu'administratives, que l'affaire leur paraît comporter. La Justice remplit de son côté sa mission souveraine, et le dossier administratif est soumis d'autre part à l'examen de la Commission centrale des machines à vapeur, qui en dégage les enseignements, approuve ou critique les conclusions des ingénieurs, et décide en particulier si cet événement doit, à son avis, figurer ou non à la statistique des accidents des appareils à vapeur.

## § 5

### ASSOCIATIONS DE PROPRIÉTAIRES DE CHAUDIÈRES A VAPEUR

**1191** — Nous avons vu à quel point la sécurité des appareils à vapeur est étroitement liée à une active surveillance, dirigée par des ingénieurs spécialement compétents. On doit donc signaler comme l'une des plus utiles créations, sous ce rapport, celle des *Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur* (\*).

(\*) Aguillon. Sur les associations de propriétaires d'appareils à vapeur. *Annales des mines*, 7<sup>e</sup> série, t. XVII, Bulletin, p. 527. — Bour. Conférence sur les progrès réalisés par les associations de propriétaires d'appareils à vapeur. *Congrès de mécanique appliquée de 1889*, t. III, p. 19. — Compère. *Congrès international des accidents du travail*, septembre 1889. — Jourdain (*Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, 1881, t. I, p. 505. — *Portefeuille économique des machines*, 1882, p. 118). — *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 419, 453. — *Associazione fra i proprietari di caldaie a vapore nella provincia di Ferrara*, schema di statuto. Ferrara, in-8°, 1891.

Ces Sociétés sont absolument libres, et nul n'est tenu d'y entrer. Une cotisation annuelle, proportionnée au nombre des générateurs de chaque établissement industriel, procure à ce matériel la surveillance d'inspecteurs expérimentés, dirigés par l'ingénieur en chef de l'association. Leurs visites sont en général annuelles. On en fait même autant que possible deux par an, l'une complète, l'autre extérieure seulement. Une note remise au propriétaire lui indique l'état de ses générateurs, ainsi que les réparations qu'il est urgent d'y apporter. Les ingénieurs donnent également des conseils relatifs au bon emploi des appareils, et à l'économie en ce qui concerne soit le combustible, soit les réparations faites à temps sans laisser s'aggraver l'état des choses. Ils peuvent aussi se charger de missions spéciales, sur la demande des intéressés.

La plupart de ces Sociétés publient un bulletin ; et des réunions périodiques de leurs ingénieurs en chef deviennent, sous le nom de congrès, l'occasion de délibérations qui sont résumées dans des publications fort instructives.

**1192** — L'idée première de ces associations est née en Angleterre, avec la *Manchester steam Users Association*, créée en 1855 par Fairbairn. En 1867, fut fondée en France l'association de Mulhouse, puis à sa suite dix autres, dont le tableau suivant présente la situation au 1<sup>er</sup> mai 1889 (1).

Les chaudières du territoire français ne figurent guère que pour un tiers dans le chiffre de l'Association alsacienne, qui étend en outre son action sur l'Alsace-Lorraine et sur le grand-duché du Luxembourg. Pour l'ensemble de la France, les chaudières affiliées représentent environ le huitième du total des générateurs en service.

(1) Hirsch et Debize. *Leçons sur les machines à vapeur*, t. I, p. 1011, d'après les indications de Cornut. — *Revue technique de l'Exposition universelle de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 477.

FONDATION	ASSOCIATIONS	SIÈGE SOCIAL	ADHÉRENTS	CHAUDIÈRES
1873	du Nord de la France . . . .	Lille	750	3 021
1867	Alsacienne . . . . .	Mulhouse	668	2 729
1876	Lyonnaise . . . . .	Lyon	420	1 512
1874	Parisienne . . . . .	Paris	391	1 105
1874	de la Somme, de l'Aisne et de l'Oise . . . . .	Amiens	505	1 075
1874	Normande . . . . .	Rouen	222	710
1878	de l'Ouest . . . . .	Nantes	215	613
1882	du Sud-Est . . . . .	Marseille	80	511
1882	du Nord-Est . . . . .	Reims	153	510
1879	du Sud-Ouest . . . . .	Bordeaux	102	340
1889	Méridionale . . . . .	Montpellier	76	146
	TOTAUX . . . . .	. . . . .	3 382	12 272

**1193** — Les associations ont obtenu d'excellents résultats, et bien qu'elles ne suppriment pas juridiquement la responsabilité des exploitants, elles améliorent la situation de ces derniers, et allègent leurs préoccupations dans une large mesure.

En présence de cette situation, ainsi que de la charge écrasante et toujours croissante que la surveillance des appareils à vapeur impose au personnel et aux agents du Corps des Mines, en raison des développements de l'industrie, l'Administration a reconnu en principe à celles des associations qui auront donné des preuves suffisantes, une sorte de caractère officiel qui les associe, dans une certaine mesure, aux opérations des ingénieurs des mines. L'article 3 du décret du 30 avril 1880 stipule en effet que :

« Si l'épreuve (non décennale) exige la démolition du massif du fourneau, ou l'enlèvement de l'enveloppe de la chaudière, et un chômage plus ou moins prolongé, cette épreuve pourra ne pas être exigée, lorsque des renseignements authentiques sur l'époque et les résultats de la dernière visite, intérieure et extérieure, constitueront une présomption suffisante en faveur du bon état de la chaudière. Pourront être notamment considérés comme renseignements probants les certificats délivrés aux membres des associa-

tions de propriétaires d'appareils à vapeur, par celles de ces associations que le ministre aura désignées. »

La circulaire ministérielle du 21 juillet 1880, accompagnant l'envoi aux préfets du décret précité, renferme en outre le passage suivant (1) :

Depuis plusieurs années, des associations de propriétaires d'appareils à vapeur se sont formées sur divers points du territoire, pour se procurer une surveillance efficace au point de vue de la sécurité et de l'économie; il convient d'encourager cette tendance salutaire, et d'appeler dans une certaine mesure les institutions de ce genre à prêter leur concours à l'Administration. Dès maintenant, il y a lieu de prendre acte du nouvel état de choses, et d'en constater l'existence sous la forme d'une obligation de visites faites à la diligence des industriels, ainsi que d'une dispense d'épreuve toutes les fois que les résultats de cette inspection complète constitueront une présomption du bon état du générateur.

Aussi l'article 36 (2) en fait-il, non pas une simple recommandation, mais bien une obligation, et l'article 3 autorise à ne pas procéder au renouvellement de l'épreuve, lorsque les résultats d'une pareille visite établiront d'une manière positive que l'appareil est en bon état. Les ingénieurs des mines doivent porter une attention particulière sur ce point, et faire en sorte que la pratique de ces visites soit, partout, fidèlement suivie. Ils devront se renseigner sur les visites effectuées, et se faire représenter les certificats qui auront dû être délivrés à la suite de chacune d'elles. Si ces visites ne sont pas faites assez fréquemment, ou si l'ingénieur a des motifs de croire qu'elles ne sont pas faites sérieusement et utilement, en un mot, si l'appareil ne paraît pas être soumis, par celui qui en fait usage, à une surveillance suffisante, l'ingénieur devra, si les conditions dans lesquelles fonctionne la chaudière laisse des doutes sur son bon état, user des pouvoirs que donne l'article 3, et provoquer sans hésitation le renouvellement de l'épreuve.

Dans le cas où, par suite de contestation de la part de l'intéressé, la question serait portée devant vous, vous pourrez au besoin me transmettre d'urgence le dossier de l'affaire, afin que je le communique à la Commission centrale des machines à vapeur.

Lorsqu'une association de propriétaires voudra faire profiter ses membres, dans votre département, des facilités prévues par le décret, elle devra vous en faire la demande; vous consulterez les ingénieurs des mines, et vous me transmettez cette demande avec le rapport de ces fonctionnaires et votre avis personnel. Après avoir pris l'avis de la Commission centrale des machines à vapeur, je vous ferai connaître la suite dont cette affaire me paraît susceptible, et les relations qui pourront s'établir, en conséquence, entre ces associations et l'Administration.

En principe, et sous réserve des cas spéciaux qui pourraient se présenter, il me paraît que le rôle principal, vis-à-vis de l'Administration, des sociétés qui

(1) *Annales des mines*, 7<sup>e</sup> série, t. XVIII, partie administrative, p. 257.

(2) Du décret du 50 avril 1880.



seront agréées par elle, devra être de faire la preuve, par leurs certificats, que les visites intérieures et extérieures prescrites par l'article 36 sont bien et dûment faites, et par suite, de conférer, le cas échéant, aux appareils ainsi surveillés, la dispense du renouvellement d'épreuve stipulée par l'article 3.

Les mêmes considérations s'appliquent à la mise à exécution immédiate de la règle prescrivant l'épreuve décennale. Un très grand nombre de chaudières doivent, dès aujourd'hui, être éprouvées de nouveau; comme il n'est pas possible de tout entreprendre à la fois, il est juste de commencer par celles dont la dernière épreuve est la plus ancienne, mais il est en même temps prudent et non moins juste d'éprouver toutes les chaudières non visitées, avant celles munies de bons certificats de visites récentes, quand même la date de la dernière épreuve de celles-ci serait antérieure à celle des autres.

Il va de soi que la surveillance officieuse ainsi exercée ne dispense nullement les ingénieurs des mines d'exercer la surveillance officielle. Il convient d'ailleurs qu'ils se rendent compte par eux-mêmes de la façon dont fonctionnent ces associations, et sachent le degré de confiance que mérite leur intervention.

Dans les régions où se trouveraient des associations présentant toute garantie, l'attention des ingénieurs devra naturellement se porter de préférence sur les appareils non surveillés officieusement.

Pour faciliter les rapports qui doivent s'établir entre les associations et les ingénieurs des mines, j'ai l'intention de demander à celles qui réclameraient le bénéfice de l'article 3 du décret, d'adresser directement aux ingénieurs :

- 1° Chaque année, la liste générale des membres ;
- 2° Tous les mois, la liste des mutations ;

- 3° Tous les six mois, la liste des générateurs visités intérieurement et extérieurement, avec toute facilité pour les ingénieurs des mines de s'assurer de l'exactitude de ces documents, soit au siège des associations, soit auprès des industriels, qui devront, à toute demande des ingénieurs, représenter les procès-verbaux qui leur sont adressés à la suite de chaque visite.

Les visites d'appareils à vapeur existant en dehors des associations peuvent être faites par toute personne compétente, c'est-à-dire ayant les connaissances et l'expérience nécessaires.

Toutes les fois que ces visites ne seront pas faites par les agents d'une association agréée par l'administration, lorsque notamment elles seront faites par les propres agents des propriétaires, les ingénieurs des mines devront se préoccuper de la valeur qui peut être attribuée aux certificats de visite.

S'il y a lieu, ils attireront sur ce point l'attention des intéressés, et en tiendront tel compte qu'ils estimeront devoir le faire dans l'application, le cas échéant, dans l'application des dispositions prévues par l'article 3.

Toute épreuve d'un appareil neuf ou tout renouvellement d'épreuve doit, outre l'inscription sur des registres tenus au bureau de l'ingénieur des mines, être constatée par un procès-verbal délivré par l'ingénieur à l'intéressé.

L'épreuve et le renouvellement de l'épreuve étant les seules mesures dont puisse disposer l'Administration pour vérifier la solidité des appareils, il importe que cette opération soit toujours faite avec la plus grande attention. Il faut s'assurer, non seulement que l'appareil reste étanche, mais encore, et s'il y a lieu

par des mesures directes, qu'il ne subit aucune déformation permanente appréciable. Aussi, vous remarquerez que le paragraphe 3 de l'article 4 du décret veut que ce soit toujours sous la direction de l'ingénieur, et, partant, sous sa responsabilité, que l'opération ait lieu...

La circulaire ministérielle du 23 août 1887 renferme également les passages suivants (1) :

L'épreuve est exigible après réparation notable ou chômage prolongé ; mais elle peut être remplacée par des renseignements authentiques constituant une présomption suffisante en faveur du bon état de la chaudière. Les certificats délivrés par les associations de propriétaires d'appareils à vapeur autorisées peuvent être considérés comme renseignements probants....

Les relations du service des mines avec les agents des associations de propriétaires d'appareils à vapeur autorisées donnent également lieu à diverses observations. Les termes du paragraphe 5 de l'article 3 précité permettent de considérer les certificats délivrés par ces associations comme renseignements probants, constituant une présomption suffisante en faveur du bon état de la chaudière et pouvant, à l'occasion, permettre de dispenser les industriels d'une épreuve autre que l'épreuve décennale.

Plusieurs associations délèguent un de leurs agents pour assister à l'épreuve réglementaire, avec mission de parcourir les carneaux et d'éviter, autant que possible, une démolition complète de la maçonnerie, même en cas d'épreuve décennale. En outre, cet agent passe une visite intérieure après l'épreuve, et cette visite fait l'objet d'un certificat spécial.

Cette manière de procéder, d'ailleurs toujours facultative et acceptée à titre de tolérance spéciale à chaque cas, n'a rien de contraire à l'esprit du règlement et paraît atteindre, en général, le but que se propose l'administration de sauvegarder efficacement la sûreté publique.

On ne saurait même trop recommander aux industriels de ne pas se fier exclusivement aux résultats de l'épreuve hydraulique, et de la visite extérieure qui l'accompagne : la visite intérieure des générateurs, d'ailleurs exigée par l'article 36 du décret du 30 avril 1880 à des intervalles suffisamment rapprochés, permet parfois de constater des avaries dangereuses qui n'ont pas été révélées lors de l'épreuve hydraulique et qui, cependant, nécessitent la réparation ou le remplacement des appareils.

(1) *Annales des mines*, 8<sup>e</sup> série, t. XII, partie administrative, p. 271.

## CHAPITRE LXIII

### APPAREILS DE SURETÉ

--

#### § 1

#### CLAPET DE RETENUE D'ALIMENTATION

**1194** — *Généralités.* — Les décrets réglementaires exigent la présence sur le générateur de divers *appareils de sûreté*, à savoir, dans le cas le plus étendu, et sauf des réductions plus ou moins particulières : un clapet de retenue d'alimentation <sup>(1)</sup>, un clapet obturateur de vapeur <sup>(2)</sup>, deux indicateurs de niveau <sup>(3)</sup>, un manomètre <sup>(4)</sup>, deux soupapes de sûreté <sup>(5)</sup>.

Il est loisible à chaque industriel d'ajouter à cet ensemble, sous sa responsabilité, les appareils qui lui paraissent utiles comme supplément de sécurité, par exemple des sifflets d'alarme, des chevilles fusibles <sup>(6)</sup>, etc. Mais il est de règle que les indications fournies par ces derniers doivent concorder avec celles des appareils réglementaires, quand elles sont de même nature.

**1195** — *Clapet de retenue d'alimentation.* — Nous avons vu (n° 1158) que l'eau renfermée sous pression dans une chaudière constitue un réservoir formidable d'énergie, capable d'exercer les

(1) Décret du 30 octobre 1880, article 8.

(2) Décrets du 30 octobre 1880, article 9, et du 20 juin 1886, article 1<sup>er</sup>.

(3) Décret du 30 octobre 1880, article 11.

(4) *Id.*, article 7.

(5) *Id.*, article 6.

(6) Voy. ci-après, § 6.

plus grands ravages. De plus, en dehors de ses effets mécaniques en cas de rupture, elle agit d'une manière fatale sur les hommes qu'elle atteint, en leur infligeant des brûlures trop souvent mortelles (1). Lorsque c'est le corps de chaudière lui-même qui fait explosion, rien ne saurait évidemment soustraire le voisinage à ses effets destructeurs. On a cherché du moins à les prévenir, quand la rupture a lieu en quelque point du système de l'alimentation.

Le décret du 30 avril 1880 a, dans ce but, fait par son article 8 une obligation de placer, au point d'insertion du tuyau d'alimentation, un appareil de retenue

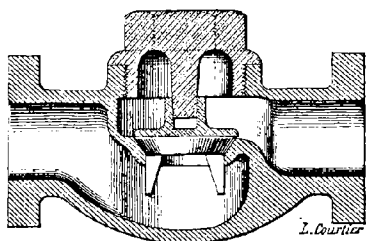


Fig. 720. — Clapet de retenue d'alimentation. (Coupe verticale).

fonctionnant automatiquement (2). De cette manière, si la conduite se trouve rompue, le contenu de la chaudière tendant à s'échapper par cette ouverture, plaque immédiatement le clapet sur son siège (fig. 720), et se trouve par là isolé de l'extérieur.

L'utilité de cet organe devient encore plus grande lorsqu'il s'agit de batteries de chaudières. Autrefois tous les générateurs se vidaient entièrement par suite de l'éventrement d'un seul d'entre eux, en exerçant ainsi d'inoubliables ravages (n° 1153). Aujourd'hui le générateur avarié répand seul son contenu dans l'atmosphère, chacun des autres restant clos par son clapet de retenue.

Ce dernier ne sert pas d'ailleurs que pour le cas d'un désastre.

(1) Un mètre cube d'eau, supposée à la pression effective de 5 kilogrammes, est capable de jeter dans l'atmosphère 170 mètres cubes de vapeur. Si l'on prend comme exemple une batterie de 6 chaudières contenant chacune 10 mètres cubes d'eau, sans clapets de retenue, elle répandrait plus de 10 000 mètres cubes de vapeur, c'est-à-dire de quoi remplir intégralement un hémisphère de 17 mètres de rayon tout autour du point d'émergence.

(2) Walther-Meunier. *Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, Lyon, 20 octobre 1880. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 3<sup>e</sup> série, t. XII, p. 256. — *Comptes rendus mensuels de la Société de l'Industrie minérale de Saint-Etienne*, 1881, p. 8.

Clapets de retenue d'alimentation : LETHUILLIER-PINEL. Armengaud. *Publication industrielle*, 2<sup>e</sup> série, t. VIII, p. 437. — MULLER et ROGER. *Ser. Physique industrielle*, t. II, p. 193.

Dans le service normal, il pourrait arriver que des jeux de pression vinssent exercer sur l'une des chaudières une sorte d'aspiration, provoquant un retour du liquide dans la conduite d'alimentation, et l'abaissement du plan d'eau, en exposant les tôles à rougir. Ce danger disparaît avec l'emploi du nouvel organe.

**1196** — Le clapet de retenue doit avoir une faible levée et un guidage assuré. Il est rare qu'il soit assez étanche pour pouvoir servir de fermeture normale. Mais on lui adjoint à cet égard un robinet d'arrêt manœuvré à la main.

La situation précise à donner au clapet résulte des termes mêmes du décret. Le but de cette prescription est de ne pas ajouter, aux chances de rupture du générateur lui-même, celles du bout de tuyau que l'on viendrait à laisser entre lui et le clapet. Cependant on tolère l'interposition d'un robinet, permettant de visiter ce dernier, même sous pression.

La question s'est posée, à l'occasion des réchauffeurs d'alimentation, de savoir s'ils doivent être considérés à ce point de vue comme faisant, ou non, partie de la chaudière. Mais la réponse ne comporte pas d'hésitation, et le clapet doit être installé au delà du réchauffeur, à l'insertion sur la chaudière même, ou individuellement sur chacun des générateurs qui seraient desservis par un même réchauffeur. Rien n'empêche d'ailleurs les constructeurs qui s'y trouveraient disposés, d'en placer un second entre la pompe et le réchauffeur.

On pourrait de même en mettre dans les cuissards, afin que si un bouilleur se crève, son contenu se répande seul au dehors, sans entraîner avec lui celui du corps cylindrique. Cependant on ne devra pas perdre de vue le danger de la formation de chambres de vapeur sous ces organes, ainsi que celui de l'entartrement.

On s'est également demandé si le clapet de refoulement de la pompe alimentaire peut être considéré comme satisfaisant à la prescription de l'article 8. Ce ne peut être évidemment qu'à la condition qu'il se trouve placé précisément au point d'insertion du tuyau d'alimentation.

## § 2

**CLAPET OBTURATEUR DE VAPEUR**

**1197** — *Généralités.* — Il s'attache à la segmentation des atmosphères de vapeur d'une batterie de chaudières, à l'aide de *clapets obturateurs de vapeur* <sup>(1)</sup>, un intérêt du même genre qu'à l'isolement de leurs bains liquides respectifs au moyen de clapets de retenue d'alimentation <sup>(2)</sup>. L'article 1<sup>er</sup> du décret du 29 juin 1886 en a fait une obligation dans certains cas (n° 1187). Un très grand nombre de dispositifs différents ont été proposés à cet égard <sup>(3)</sup>.

On doit, dans la construction des clapets obturateurs, s'attacher à remplir plusieurs conditions.

Il est nécessaire de concilier une fermeture nette et prompte, en cas de rupture, avec un degré suffisant de paresse à céder sous des oscillations d'importance médiocre, inévitables dans toute marche normale.

<sup>(1)</sup> Hirsch. Rapport sur les clapets obturateurs de vapeur. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 4<sup>e</sup> série, t. II, p. 257. — Dubiau. Clapets automatiques d'arrêt de vapeur. *Société scientifique industrielle de Marseille*, 15 décembre 1887. — *Bulletin de l'Association parisienne des Propriétaires d'appareils à vapeur*, 1884, p. 61. — *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1887, p. 7, 32, 41, 48, 121. — Michel Lévy. *Annales des mines*, novembre-décembre 1886.

<sup>(2)</sup> L'importance maxima des groupes d'isolement a été déterminée par l'article 1<sup>er</sup> du décret du 29 juin 1886 (n° 1187).

<sup>(3)</sup> Clapets obturateurs de vapeur : ARTIGE. *Revue industrielle*, 5 février 1885, p. 55. — BOVIN (*Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. XII, p. 41. — *Chronique industrielle*, 14 novembre 1886, p. 545). — BROYER et DELORD. *Écho des mines et de la métallurgie*, 1887. — BUISSON. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1886, p. 264. — FARGOT (*Revue industrielle*, 13 mai 1886, p. 196. — *Bulletin de l'Association parisienne des Propriétaires d'appareils à vapeur*, 1884, p. 62). — FLEUTOR. Hirsch. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 4<sup>e</sup> série, t. III, p. 405. — FRANCK et MESNARD. *Ibidem*. 4<sup>e</sup> série, t. III, p. 264. — FRYER. *Ser. Physique industrielle*, t. II, p. 200. — JEANTIN. *Bulletin de la Société industrielle du Nord de la France*, 14<sup>e</sup> année, p. 64. — LETHUILLIER-PINEL (*Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. XII, p. 10. — *Les inventions brevetées*, octobre 1886. — *Revue industrielle*, 14 avril 1887, p. 145). — LOZAI. *Ibidem*, 20 janvier 1887, p. 25. — OLIVIER. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1886, p. 251. — PASQUIER (*Bulletin de la Société d'encouragement*, 4<sup>e</sup> série, t. I, p. 333. — *Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. XII, p. 154). — RISLER. *Génie civil*, 10 novembre 1888, p. 29. — SCHEFFER et BUDENBERG. *Revue industrielle*, 3 février 1887, p. 43.

Il est nécessaire d'éviter les étranglements, en raison des pertes de charge qui en seraient la conséquence.

Il convient de soustraire ces appareils à l'intervention des chauffeurs, qui pourraient être tentés d'en paralyser l'effet; et cependant il est bon qu'on en puisse contrôler au besoin le fonctionnement, et se trouver informé par quelque signe extérieur de la position occupée par le clapet.

Celui-ci doit se rouvrir nettement de lui-même, lorsque la cause adventice de fermeture a disparu. Il importe par suite de surveiller les causes d'oxydation, d'entartrement, etc., et d'épargner autant que possible au mécanisme leur influence.

Il n'y a pas lieu d'ailleurs d'ajouter à toutes ces exigences celle d'une fermeture absolument étanche, comme cela est nécessaire par exemple pour la prise de vapeur. Un certain jeu du clapet obturateur, n'ajouterait pas sensiblement aux conséquences d'une explosion.

On peut répartir ces organes en trois classes, suivant qu'ils fonctionnent de dedans en dehors, de dehors en dedans, ou dans les deux sens. Les appareils qui appartiennent à cette dernière catégorie s'installent ordinairement sur la conduite générale; les autres sur les branchements qui la rattachent à chacun des générateurs individuellement.

Passons en revue les propriétés de ces divers modes de fonctionnement.

**1198** — *Clapets Hirsch, Belleville, Labeyrie.* — J'envisagerai d'abord un clapet susceptible de jouer de dedans en dehors, c'est-à-dire vers l'aval du courant normal. Le système de M. Hirsch <sup>(1)</sup> appartient à cette catégorie. La figure 721 en montre le mode d'action.

Si la conduite vient à se rompre, tous les clapets s'appliquent sur leurs sièges, en raison de l'entraînement subit que communique à la vapeur la dépression ainsi produite. Le désastre est donc immédiatement localisé. Si c'est au contraire l'une des chaudières qui

<sup>(1)</sup> *Portefeuille économique des machines*, 1885, p. 35. — *Revue industrielle*, 1885, p. 55. — *Bulletin de l'Association parisienne des Propriétaires d'appareils à vapeur*, t. II, p. 60, 1884.

crève, le même phénomène se produit dans tous les autres branchements. Quant à celui qui est adjacent au générateur avarié, il ne

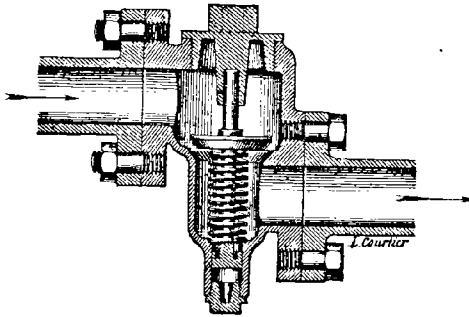


Fig. 721. — Clapet obturateur de vapeur Hirsch.  
(Coupe verticale).

exercée par le courant, et ses inégalités inévitables, sans quoi celui-ci se plaquerait à chaque instant, en rendant impossible le fonctionnement du système. Ces agents servent en outre à rame-

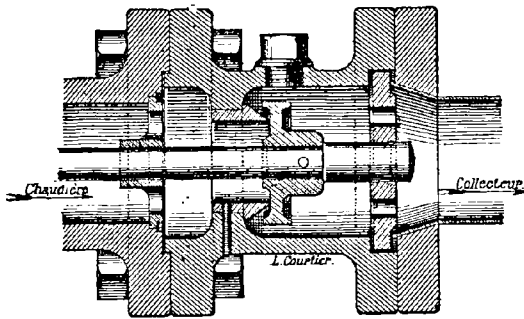


Fig. 722. — Clapet obturateur de vapeur Belleville.  
(Coupe verticale).

l'amont. Le système Belleville <sup>(1)</sup> en fournit un exemple (fig. 722).

Si la chaudière correspondante se déchire, l'obturateur fonctionne immédiatement; ce récipient se vide, mais non le reste de la batterie. Il subsiste cependant la chance que la violence d'une explosion, qui sera en général très voisine, ne fausse le jeu de cet organe

<sup>(1)</sup> *Revue industrielle*, 17 décembre 1883, p. 506. — *Bulletin de l'Association parisienne des Propriétaires d'appareils à vapeur*, 1884, p. 61.

saurait être d'aucun secours, et le collecteur se videra en même temps que cette chaudière.

Pour les appareils de ce genre, un ressort, ou un poids d'une importance modérée sont nécessaires, pour soutenir l'obturateur contre la pression normale

exercée par le courant, et ses inégalités inévitables, sans quoi celui-ci se plaquerait à chaque instant, en rendant impossible le fonctionnement du système. Ces agents servent en outre à ramener le clapet en place, lorsque la cause qui l'avait appliqué sur son siège a cessé d'intervenir.

**1199** — Soit en second lieu une soupape jouant de dehors en dedans, c'est-à-dire vers



délicat. D'autre part, si c'est la conduite générale qui vient à crever, tous les clapets resteront en place, et la catastrophe suivra son cours dans toute son étendue.

Ce système est donc *a priori* moins parfait que le précédent. On peut, à la vérité, invoquer en sa faveur la simplification résultant de la suppression du ressort et du contrepoids, qui n'ont plus ici de raison d'être. Ce type semble en outre plus propre à la réalisation des desiderata généraux que nous énoncerons plus loin. Mais il sera sans doute permis de penser qu'au point de vue général on ne saurait trouver là une compensation suffisante. Toutefois ce sera surtout une question d'espèce, d'après l'appréciation des circonstances spéciales à chaque cas (\*).

**1200** — Considérons enfin des appareils capables de jouer dans

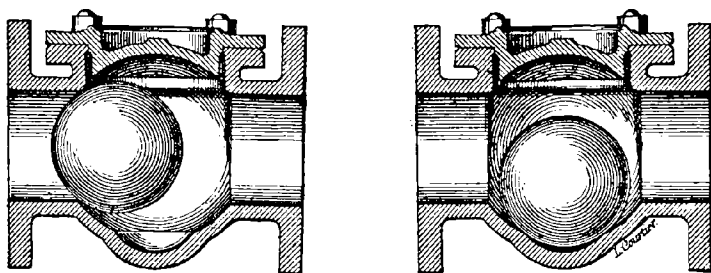


Fig. 723 et 724. — Clapet obturateur de vapeur Labeyrie (coupes verticales).

les deux sens. Je citerai comme exemple (fig. 723, 724) le clapet Labeyrie (\*\*).

Nous les supposons établis en divers points de la conduite. Ils la sectionnent en tronçons, dont chacun correspond à un branchement et à l'un des générateurs. Si une rupture se produit dans cette chaudière, dans le branchement, ou dans le tronçon

(\*) Circulaire ministérielle du 11 avril 1891.

(\*\*) *Revue industrielle*, 2 décembre 1886, p. 485. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, mai 1887, p. 265. — *Bulletin technologique de la Société des anciens Elèves des Ecoles d'arts et métiers*, juin 1889.

Ce système peut invoquer en sa faveur sa grande simplicité, l'absence de ressorts et de contrepoids. Enfermé dans une boîte scellée, le boulet est placé hors de l'atteinte du chauffeur, sauf pour les visites réglementaires

lui-même, les deux clapets qui limitent ce dernier se plaqueront suivant deux sens contraires, de manière à isoler ce segment, et à localiser l'expansion.

Quelquefois le diamètre considérable du collecteur s'oppose à ce mode d'installation. On peut, en ce cas, placer les clapets à double effet sur les branchements eux-mêmes.

**1201** — *Clapets Carette, Vaultier, Pile.* — Indépendamment des exemples que nous venons de rattacher directement à la défini-

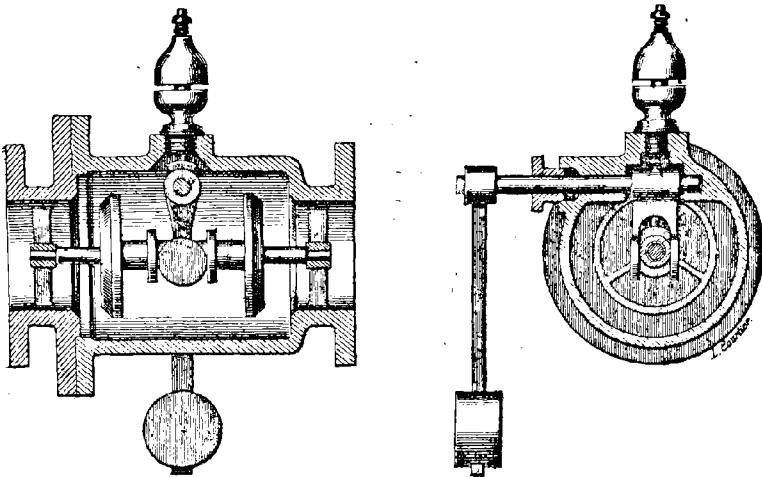


Fig. 725 et 726. — Clapet obturateur de vapeur Carette (coupes longitudinale et transversale).

tion des trois catégories d'obturateurs, je citerai encore les suivants.

On peut rapporter à la troisième classe le *type-pendule*, dont le jeu symétrique se prête également au fonctionnement dans les deux sens.

M. Carette emploie l'oscillation circulaire du pendule (fig. 725, 726) à produire une translation rectiligne de l'obturateur <sup>(1)</sup>.

<sup>(1)</sup> *Bulletin de la Société d'encouragement*, 5<sup>e</sup> série, t. II, p. 257. — *Écho des mines et de la métallurgie*, 1887. — *Les inventions brevetées*, 1887, p. 53. — *Ser. Physique industrielle*, t. II, p. 199. — *Revue industrielle*, 8 décembre 1887, p. 483.

L'influence de la gravité maintient le passage ouvert en temps ordinaire. La valeur que l'on donnera au poids du pendule permettra de régler l'action en vue de telle ou telle vitesse de courant. L'index extérieur renseigne sur la position du clapet, que l'on

M. Vaultier l'utilise directement (fig. 727, 728) pour plaquer le clapet contre des sièges inclinés<sup>(1)</sup>.

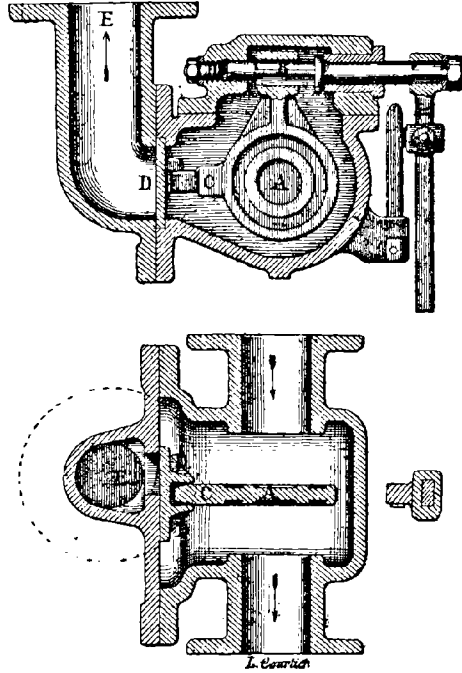


Fig. 727 et 728. — Clapet obturateur de vapeur Vaultier (coupe et plan).

Nous rangerons dans le premier type l'obturateur Pile (fig. 729).

peut en outre munir d'un sifflet, pour avertir des contacts accidentels qui risqueraient de faire monter la pression. En manœuvrant à la main cet index de temps à autre, on peut prévenir l'entartement,

(<sup>1</sup>) Le clapet A oscille autour de l'axe B. Des rondelles de plomb sont employées pour amortir le choc, et garantir l'étanchéité. En outre un bossage C agit (à l'aide d'un galet pour diminuer le frottement) sur une plaque D, recouvrant un échappement à l'air libre E. La position de ce dernier est dissymétrique, ce qui entraîne les conséquences suivantes.

Si le clapet bat du côté de la chaudière, D ne démasque pas E. Par conséquent, en cas de non-pression accidentelle, le générateur n'achèvera pas de se vider, et rétablira progressivement sa tension, en laissant les autres chaudières fournir aux besoins des moteurs.

Lorsque au contraire A vient se plaquer du côté du collecteur de vapeur, le conduit E se trouve ouvert. Si donc la pression s'élève trop rapidement, elle se dégorge de cette manière. De même, si c'est le collecteur général qui se trouve fermé, la vapeur, au lieu d'envahir l'atelier, se déversera au dehors.

L'inventeur, sans se refuser le concours de l'entraînement produit par l'accélération que détermine dans le courant de vapeur une

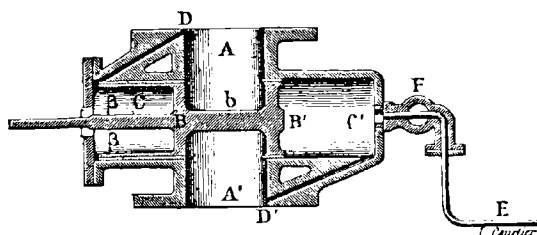


Fig. 729. — Clapet obturateur de vapeur Pile (figure schématique).

rupture des enveloppes, a cherché à se procurer en même temps la garantie d'une action statique<sup>(1)</sup>.

## § 5

### INDICATEUR DE NIVEAU

**1202 — Généralités.** — Nous avons vu (n° 1178) quelle extrême importance s'attache à ce que le chauffeur soit à chaque instant exactement renseigné sur la position du niveau de l'eau, afin de ne jamais le laisser s'abaisser au-dessous de la ligne des carneaux.

<sup>(1)</sup> *Bulletin de la Société d'encouragement*, 4<sup>e</sup> série, t. II, p. 594.

Sur le trajet AA' de la vapeur, se trouve interposé un double piston BB', dont les deux parties sont unies par la tige *b*, en même temps que l'une d'elles B se prolonge sous la forme d'un cylindre creux  $\beta$ . Cet ensemble peut se transporter de l'une à l'autre des chambres C et C'. Ces deux enceintes communiquent respectivement, par les canaux D et D', avec les conduites d'amont et d'aval A et A'. On doit surveiller attentivement ces pertuis, au point de vue de l'entartrement.

En temps ordinaire, le passage reste libre entre A et A', la tige C n'obstruant la voie que dans une proportion insignifiante. Mais si une accélération vient à se produire, elle a pour effet de refouler par le tube D dans la chambre C, et d'aspirer par D' dans l'espace C'. De là une différence de pression qui porte les pistons vers la droite, et met le cylindre  $\beta$  en travers du passage AA', qu'il intercepte.

Si l'accélération reste insuffisante, le même effet se produira néanmoins par l'influence du tube E, qui fait communiquer la prise de vapeur AA' avec toutes les autres chaudières. Une dépression brusque s'y produisant par l'éventrement de l'une de ces dernières, ou de la rupture du tube E lui-même, la différence de tension entre C et C' portera encore l'organe mobile dans le même sens. Un robinet F sert à isoler l'appareil, quand cela devient nécessaire.

L'article 11 du décret du 30 avril 1880 exige à cet effet que chaque chaudière soit munie de deux *indicateurs de niveau* <sup>(1)</sup>, indépendants l'un de l'autre, et placés en vue de l'ouvrier chargé de l'alimentation. L'un de ces appareils doit être nécessairement un tube de verre, sur lequel une ligne très apparente marque, à *six centimètres au-dessus de la ligne des carneaux*, la position-limite au-dessous de laquelle l'eau ne doit pas s'abaisser, d'après les termes de l'article 10.

**1203** — *Tube de cristal*. — Le *tube de cristal* (fig. 750, 751) est en effet, de tous les indicateurs de niveau <sup>(2)</sup>, le plus simple et

(<sup>1</sup>) Obturateur automatique de niveau brisé. Hanet Cléry. *Annales des mines*, 7<sup>e</sup> série, t. IV, p. 25. — Indicateur de niveau à distance. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 3<sup>e</sup> série, t. XII, p. 471. — Dieudonné. Indication automatique à distance de niveau et de pression. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 2<sup>e</sup> série, t. XVI, p. 167. — Indicateur de niveau pour chaudière verticale. *Neuvième Congrès des Ingénieurs en chef des associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, 1886, p. 77. — Chevalet. Nettoyage en marche des tubes de niveau. *Annales industrielles*, 6 mars 1890, p. 424. — Avertisseur électrique de niveau. *La Lumière électrique*, t. XI, p. 297. — Sifflet d'alarme. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1872, p. 77. — Sifflet avertisseur. *Annales industrielles*, 1884, t. II, p. 18.

(<sup>2</sup>) Indicateurs de niveau d'eau : AGNES. *Annales industrielles*, 1885, t. I, p. 550. — AMOUREUX. *La Nature*, 14 octobre 1886, p. 172. — ASHLEY. *American machinist*, 29 janvier 1891, p. 11. — BARBEY. *La lumière électrique*, 1882, p. 220. — BARR et MAC WHIRTER. *Ibidem*, t. XXXI, p. 589. — BATEMAN. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 298. — BAUDOUIN. *La métallurgie*, 26 avril 1891, p. 1326. — BAYLEY. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 297. — BERGMARSH. *Ibidem*, p. 298. — BLACHE. Rapport Lorieux. *Annales des mines*, 1852. — BOURDON (*Bulletin de la Société d'encouragement*, 1845, p. 295. — ARMENGAUD. *Publication industrielle*, juillet 1891, p. 61). — BROWN. *Scientific american*, 23 février 1884, p. 125. — BURGERMEISTER. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 295. — CARETTE. Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 152. — CHAUDRÉ (*Annales des mines*, 7<sup>e</sup> série, t. IX, p. 78. — *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 353). — CHAUSSENOT. Pécelet. *Traité de la chaleur*, t. II, p. 56. — CROOK. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 296. — CUMMING. *American journal of railway appliances*, 1<sup>er</sup> septembre 1884, p. 156. — DAGAUD. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 295. — DAMOURETTE. Armengaud. 1878, p. 448. — DESBORDES. Rapport Lorieux. *Annales des mines*, 1852. — DESCHAMPS. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 295. — DEWRANCE. *Ibidem*, p. 300. — DEWURST. *Chronique industrielle*, 4 juin 1886, p. 509. — DIETZ. *Annales des mines*, 1852, t. I, p. 120. — DIXON. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 501. — DREYER. *Ibidem*, p. 297. — DUFUCH (*Annales des mines*, 7<sup>e</sup> série, t. IV, p. 25. — *Revue industrielle*, 1880, p. 295). — ELLIS. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 298. — FAIRBAIRN. *Ibidem*, p. 301. — FARCOT. *Annales des mines*, 1842, t. I, p. 425. — FERRARIS. *La lumière électrique*, t. XII, p. 463, hydrométoph. — FIELD. *Engineering*, 26 août 1881, p. 210. — GEORGES. Armengaud, t. XXIV, p. 450. — GERKINE et LEDENT. *Revue industrielle*, 29 septembre 1880, p. 384. — GREGAN

le plus complet. La fragilité proverbiale du verre n'implique pas nécessairement un manque de résistance statique. Son allongement élastique, souvent méconnu, est parfois supérieur à celui du cuivre. Sa fragilité, pour l'emploi qui nous occupe en ce moment, provient surtout de la mauvaise conductibilité, qui laisse dans un fâcheux

(*La lumière électrique*, t. XXIII, p. 142; 30 octobre 1886, p. 251. — *The electrical Engineer*, 3 décembre 1890, p. 619). — GOBARD, Richard. *La chaudière locomotive*, p. 295. — GUIBERT. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, avril 1877, p. 18. — GUILBERT MARTIN. *Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. X, p. 188. — HALLER. *La lumière électrique*, t. XXXIV, p. 481. — HAMEL. *Publication industrielle*, 24<sup>e</sup> volume. — HAWTHORNE. *American machinist*, 30 juillet 1891, p. 4. — HEURTIER, Richard. *La chaudière locomotive*, p. 297. — HORSIN DÉON. Armengaud. Juillet 1891, p. 65. — JARRAUT. *Journal des ouvriers inventeurs*, 5 décembre 1891, p. 4. — JENKINS. *The railroad Gazette*, 6 février 1891, p. 91. — JOHNSON, Richard. *La chaudière locomotive*, p. 295. — JULIUS SAX. *Annales industrielles*, 4 novembre 1888, p. 580. — KENIOT. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, mars 1877, p. 15. — KILGOYLE. *Scientific American*, 11 janvier 1890, p. 20. — LADRY. *Génie civil*, 1881, p. 275. — LEFÈVRE et RENAUX (*La Nature*, 8 mars 1884, p. 237. — *Bulletin de la Société industrielle du Nord de la France*, 14<sup>e</sup> année, p. 29). — LEMPERT. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 5<sup>e</sup> série, t. XII, p. 471. — LÉPINE. *Génie civil*, 17 mai 1890, p. 47. — LEROY. *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 352. — MACABIÈS. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1879, p. 148. — MAC-FARLANE. *Scientific American*, 6 juin 1891, p. 355. — MAC KEUNER et CARLEY. *Ibidem*, 29 décembre 1883. — MACPHERSON. *Engineering*, 10 novembre 1871, p. 311. — MARSHALL et MAC CARTER. *Scientific American*, 21 février 1891, p. 115. — MAY. *La lumière électrique*, t. XI, p. 212. — MORLEY, Richard. *La chaudière locomotive*, p. 296. — MEENIER. Péclet. *Traité de la chaleur*, t. II, p. 29. — MORRISON. *American machinist*, 29 octobre 1891, p. 11. — MOSELEY. *Chronique industrielle*, 31 juillet 1887, p. 354. — MURRIE. *Publication industrielle*, juillet 1891, p. 63. — NUNN et CLOUGH, Richard. *La chaudière locomotive*, p. 298. — PARKER et TUPPER. *Scientific American*, 4 février 1888, p. 66. — PERROTTE (Hirsch). *Rapport sur l'Exposition de 1878*, p. 116. — *Septième Congrès des Ingénieurs en chef des associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, 1882, p. 72). — RAFFARD (*La métallurgie*, 1889, p. 10. — *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles des Arts et Métiers*, IIII 1889, p. 377). — REICHLING. *La lumière électrique*, 24 juillet 1886, p. 177. — REIMANN. Armengaud. Juillet 1891, p. 63. — RIEDER. *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 1875, p. 328. — ROBERT GUÉRIN. *La lumière électrique*, t. XIV, p. 229. — SAINTE (*Revue industrielle*, 12 février 1885, p. 65. — *La Nature*, 10 juin 1882, p. 26. — *L'Ingénieur moniteur des brevets*, 15 avril 1888, p. 74). — SCHNEIDER, Richard. *La chaudière locomotive*, p. 295. — SCHWARZKOPF. *La lumière électrique*, 20 septembre 1884, p. 451. — SIEMENS et HALSKE. *Ibidem*, t. XLIII, p. 125. — SINCLAIR. *American machinist*, 4 avril 1885, p. 5. — SLATER, Richard. *La chaudière locomotive*, p. 296. — SPENCER. *Chronique industrielle*, 24 février 1889, p. 105. — STROSDLEY, Richard. *La chaudière locomotive*, p. 298. — STRUBBS. *Publication industrielle*, juillet 1891, p. 62. — TOULIER. *Revue industrielle*, 2 avril 1884, p. 153. — *Universal American machinist*, 8 mai 1890, p. 11. — VACTIER. *Annales industrielles*, 1884, t. I, p. 337. — WARD, Richard. *La chaudière locomotive*, p. 293. — WEBB. *Ibidem*, p. 298. — WICKERSHAM. *Scientific American*, 30 mai 1885, p. 358. — WILSON. Armengaud. *Publication industrielle*, juillet 1891, p. 61.

état de tension interne des verres mal refroidis<sup>(1)</sup>. Ce serait par suite une faute de chercher la solidité dans un excès d'épaisseur. La plus convenable est de 2 millimètres à 2<sup>mm</sup>,5. C'est une autre erreur de proportionner, comme on est quelquefois tenté de le faire, le diamètre du tube à celui de la chaudière. Il vaudrait mieux faire l'inverse, à cause des conditions de résistance (n° 993). Le diamètre ne doit pas dépasser 16 à 22 millimètres. De son côté, la longueur n'excède pas 300 millimètres, afin de ne pas donner trop de prise aux dilatations. Des verres basiques à radicaux multiples, et en particulier au plomb, procurent le maximum de conductibilité avec le minimum de dilatation. Examinés dans leur tranche à la lumière polarisée, ils ne doivent pas fournir d'indices de trempe<sup>(2)</sup>.

Le tube est pris à ses extrémités dans des presse-étoupes, avec interposition de matières élastiques, destinées à permettre la dilatation. Pour assurer la rigidité de l'ensemble, on rend les deux

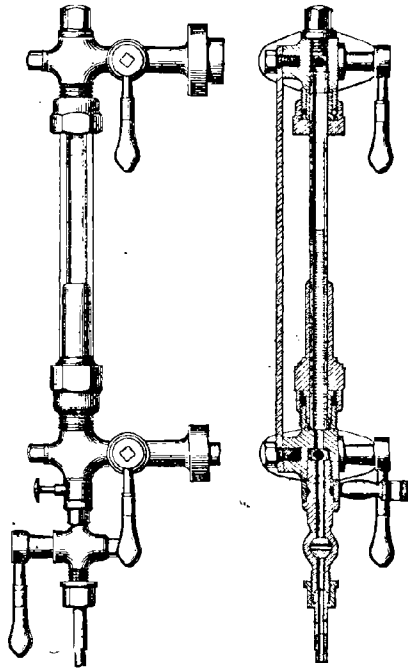


Fig. 730 et 731. — Indicateur de niveau d'eau.  
(Élévation et coupe verticale).

garnitures solidaires l'une de l'autre à l'aide d'une règlette, qui est parfois graduée. Un gros trait rouge sur fond blanc marque la ligne de foi qui est exigée par le règlement. Une partie du verre peut être émaillée pour rendre cette dernière plus visible. Pendant la nuit, on l'éclaire avec une lanterne.

<sup>(1)</sup> Les *larmes bataviques* en fournissent l'expression la plus excessive.

<sup>(2)</sup> Appert. Les tubes de niveau dans les chaudières à vapeur à haute pression. *Génie civil*, 30 mars 1889, p. 353.

Les ajutages sur lesquels se trouve assemblé le tube de verre, doivent être insérés en des points de la chaudière soustraits autant que possible à l'action des courants et de l'entartrement. Ces tubulures sont munies de robinets, permettant de les fermer en cas de rupture du tube. Il est bon de pouvoir effectuer cette manœuvre avec un levier assez long pour écarter le danger de brûlure, au milieu des jets de vapeur et d'eau bouillante qui s'échappent par cette issue. On emploie également à cet effet des boulets obturateurs, qui font, en pareil cas, l'office de clapets de retenue. Il faut toujours avoir à pied d'œuvre des tubes de rechange, avec tout ce qui est nécessaire à leur mise en place.

Pour supprimer l'agitation qui résulte de l'ébullition, et pour prévenir des invasions de boue, on interpose quelquefois un barillet, dans lequel ces effets s'amortissent. On a même employé une cloison percée de trous. Un purgeur placé à la partie inférieure permet de donner de petites chasses, afin de débarrasser l'appareil des obstructions.

**1204 — Indicateur Planche.** — La disposition du tube de verre présente une difficulté spéciale, quand il s'agit de chaudières verticales métallurgiques, dont le niveau se trouve reporté à une grande hauteur au-dessus du terre-plein où se tient habituellement le chauffeur. L'article 11 du décret réglementaire stipule qu'en ce cas le tube ordinaire est remplacé par un appareil disposé de manière à reporter, en vue de l'ouvrier chargé de l'alimentation, l'indication du niveau dans la chaudière.

Je citerai comme exemple l'appareil Planche<sup>(1)</sup>. Un long tube en U (fig. 732, 733, 734) renferme du mercure dans son coude inférieur en AB. Ses deux branches *a*, *b* sont remplies d'eau, l'une directement par le bain liquide, l'autre par la condensation de la vapeur résultant du contact de l'air extérieur. La dénivellation du métal, mesurée à l'aide d'une graduation, permet d'apprécier la position du niveau dans le générateur.

Appelons en effet *Z* cette dénivellation, *z* la distance de l'ajutage

<sup>(1)</sup> *Annales des mines*, 6<sup>e</sup> série, t. XVIII, p. 379. — Haton de la Goupillière. *Bulletin de l'Association scientifique de France*, t. IX, p. 292.



supérieur à la surface de l'eau,  $h$  la hauteur du même point fixe au-dessus du ménisque inférieur du mercure;  $\Pi$  et  $\varpi$  les poids

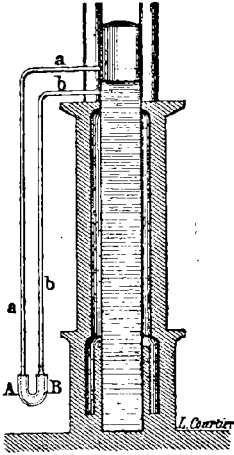


Fig. 752.  
Indicateur de niveau Planche.  
(Coupe verticale).

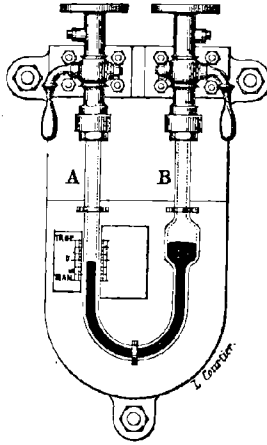


Fig. 753.  
Indicateur de niveau Planche.  
(Détail).

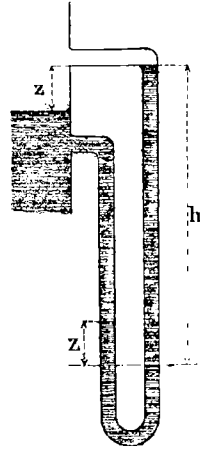


Fig. 754.  
Indicateur de niveau Planche.  
(Figure schématique).

spécifiques de ce métal et de l'eau. Nous aurons, en exprimant de deux manières différentes la pression sur ce ménisque, et représentant par  $p$  la tension de la vapeur :

$$p + \varpi h = p + \varpi (h - z - Z) + \Pi Z,$$

d'où l'on tire :

$$z = \left( \frac{\varpi}{\Pi} - 1 \right) Z,$$

c'est-à-dire :

$$z = 12,6 Z.$$

**1205** — *Robinets de jauge.* — En dehors du tube de cristal, qui est rigoureusement réglementaire, le choix du second indicateur de niveau prescrit par le décret reste arbitraire. L'un des types les plus simples est connu sous le nom de *robinets de jauge*.

Ce système est formé de trois robinets étagés. Celui du haut doit toujours fournir de la vapeur quand on l'interroge ; celui du bas, toujours de l'eau. Quant au robinet intermédiaire, il renseigne sur l'état des choses, suivant qu'il donne de l'eau ou de la vapeur. Il est vrai que ses indications présentent parfois quelque obscurité.

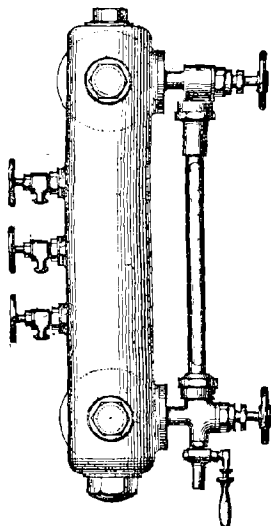


Fig. 755. — Clarinette.  
(Élévation).

Cet ensemble est monté, soit sur la chaudière même, soit sur une *clarinette* (fig. 755), sorte de dépendance qu'on lui rattache pour porter à la fois plusieurs appareils de sûreté, quand les dimensions du générateur ne permettent pas facilement d'y trouver la place nécessaire pour pratiquer autant de trous distincts. On ne saurait se dissimuler que ce dispositif tendrait à rendre illusoire l'indépendance des appareils que les règlements exigent en double, si on les installait tous les deux sur la clarinette.

**1206** — *Indicateur magnétique Lethuillier-Pinel.* — L'indicateur magnétique Lethuillier-Pinel<sup>(1)</sup> évite la perforation de l'enveloppe de la chaudière. Un flotteur aimanté à talon monte ou descend le long d'une verticale (fig. 736). Ses pôles sont appliqués par un léger ressort contre une paroi de bronze. L'influence magnétique commande au dehors le mouvement d'une aiguille d'acier, le long d'une réglette graduée protégée par une glace.

On peut au besoin organiser l'appareil de telle sorte que, en arrivant à certaines positions extrêmes, supérieure et inférieure, le système ferme un circuit électrique, qui met en mouvement des sonneries avertisseuses.

<sup>(1)</sup> *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1855, p. 3. — *Revue industrielle*, 1<sup>er</sup> septembre 1887, p. 83. — *La lumière électrique*, 20 septembre 1884, p. 450. — *Scientific american supplement*, 10 mars 1885, p. 5975.

**1207** — *Indicateur d'alarme.* — Cette dernière disposition se rattache au principe des *indicateurs d'alarme*, qui avertissent au moyen d'une sonnerie électrique, et plus souvent encore à l'aide du *sifflet à vapeur*. Par là, non seulement le chauffeur se trouve informé du danger qui commence à naître, mais tout le monde l'est avec lui. Sa négligence se trouve donc connue du personnel préposé

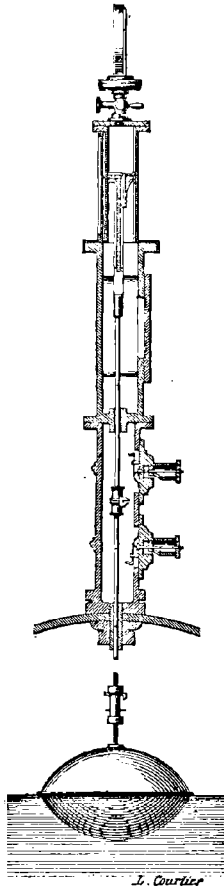


Fig. 756.  
Indicateur magnétique  
Lethuillier-Pincl.  
(Coupe verticale).

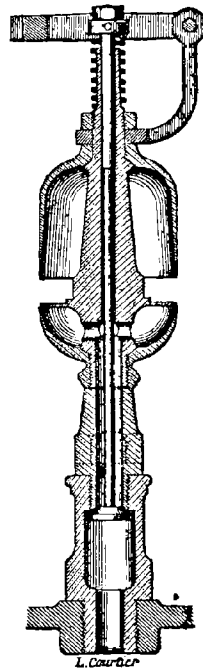


Fig. 737.  
Sifflet à vapeur.  
(Coupe verticale).

à la surveillance ce qui fournit une garantie pour tenir son attention en éveil.

Le sifflet (fig. 737) est constitué par un timbre métallique en forme de cuvette renversée. Sur son arête circulaire vient se briser

une lame cylindrique de vapeur, au moment où l'issue se trouve ouverte, soit à la main, soit par la tige de l'appareil.

L'organe qui commande ici cette tige est le plus souvent un flot-

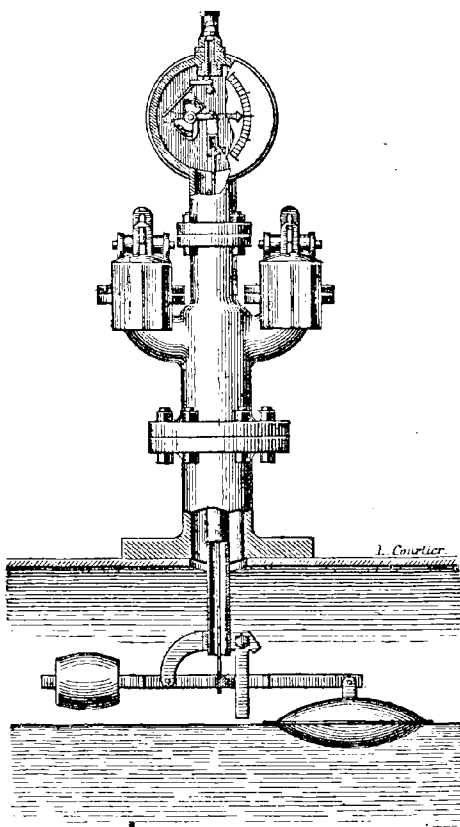


Fig. 758. — Sifflet d'alarme Édouard Bourdon.  
(Élévation).

teur, formé d'une lentille métallique creuse. Pour éviter le danger des rentrées d'eau, qui viendraient fausser les indications à l'insu du personnel, on emploie aussi une grosse pierre partiellement équilibrée par un contrepoids.

Afin d'écarter le danger de coincements, ou simplement la dureté du mouvement rectiligne de la tige, M. Edouard Bourdon<sup>(4)</sup> utilise, pour la transmission, la rotation du levier qui réunit le flotteur à son contrepoids, et dont l'axe sort de la chaudière à travers un collier à étoupes facile à entretenir en bon état de service (fig. 758).

Le flotteur peut d'ailleurs, comme nous l'a-

avons vu pour les régulateurs d'alimentation (n° 1127), être remplacé par un tube horizontal extérieur, qui se dilate plus ou moins suivant qu'il se trouve rempli d'eau ou de vapeur, d'après les variations du niveau.

On atteint encore le même but avec un avertisseur électrique,

(4) Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 150.

formé d'un flotteur en bois carbonisé recouvert de caoutchouc, et terminé aux deux bouts par un cône creux en platine. Une tige de laiton traverse tout le système pour en solidariser les extrémités. Le flotteur vient fermer un circuit en arrivant au contact de pièces métalliques, et il met alors en mouvement une sonnerie.

## § 4

## MANOMÈTRE

**1208** — *Généralités.* — L'article 7 du décret du 30 avril 1880 prescrit que toute chaudière doit être munie d'un manomètre en bon état. Ce serait donc une contravention d'en installer un seul pour tout un groupe de générateurs.

Cet appareil est placé en vue du chauffeur, et une marque très apparente indique sur l'échelle la limite que la pression effective ne doit pas dépasser. Toutefois la graduation se prolonge un peu au-delà, pour permettre d'apprécier les situations dangereuses.

Cette graduation indique la *pression effective* en kilogrammes par centimètre carré. Elle commence donc par zéro, pour le moment où la chaudière est froide, et ouverte à l'air libre. Les anciens manomètres indiquaient la tension absolue en atmosphères, et leur graduation commençait par l'unité. Ce serait également une contravention d'en employer encore.

Un ajutage terminé par une bride de 40 millimètres de diamètre, sur une épaisseur de 5 millimètres, est disposé pour recevoir le manomètre vérificateur. Cette tubulure est munie d'un robinet, que l'on a soin de manœuvrer prudemment afin de ne pas détériorer l'instrument, au moment où on le met en contact avec la tension.

**1209** — *Manomètre à air libre.* — Le seul système qui fournisse de lui-même des indications indiscutables est le *manomètre hydrostatique à air libre*. L'instruction ministérielle du 23 juillet 1843 renferme sur sa construction des détails circonstanciés, que l'on trouve d'ailleurs dans les traités de physique.

Toutefois ces appareils ont disparu de la pratique courante. Ils présentent en effet divers inconvénients. Le métal s'oxyde, et son ménisque perd alors sa convexité. Il ronge les garnitures. Il ne mouille pas le verre; la graisse s'insinue par cet interstice, ternit le verre et entrave les lectures. Par-dessus tout, la hauteur de la colonne mercurielle devient impraticable pour les hautes pressions <sup>(1)</sup>. Le manomètre hydrostatique ne sert plus aujourd'hui qu'à permettre de tarer et de vérifier fréquemment les appareils plus usuels <sup>(2)</sup>.

J'indiquerai cependant deux dispositions ingénieuses qui avaient été proposées pour éviter l'inconvénient de la hauteur.

Dans les appareils Galy-Cazalat <sup>(3)</sup>, Thomas <sup>(4)</sup>, Journeux <sup>(5)</sup>, Cornu <sup>(6)</sup>, un double piston se trouve en contact, par deux sections

<sup>(1)</sup> On ne saurait, à ce propos, passer sous silence, au point de vue scientifique, la manière dont cette difficulté a été vaincue dans les deux remarquables installations de M. Gailletet à la tour Eiffel (*Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 1891), et de M. Amagat (*Annales de chimie et de physique*, 5<sup>e</sup> série, t. XIX) au puits Verpilloux des houillères de Saint-Étienne.

Tresca. Note sur les moyens d'estimation des grandes pressions. *Annales du Conservatoire*, 20 novembre 1868. — Marié. Mesure exacte des hautes pressions. *Annales des mines*, 7<sup>e</sup> série, t. XIX, p. 104.

<sup>(2)</sup> Manomètres : BOSSUET. Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 557. — CHALLETON (Denfer). *Traité pratique des chaudières à vapeur*, p. 28. — PÉCLET. *Traité de la chaleur*, t. II, p. 51). — CHARTON. Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 556. — CLAIR. *Ibidem*, p. 556. — CLÉMENCEAU. *La lumière électrique*, t. XIII, p. 450. — COLLARDEAU. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1827, p. 118. — DEDIEU. Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 155. — DESBORDES (*Bulletin de la Société d'encouragement*, 1856, p. 589. — PÉCLET. *Traité de la chaleur*, t. II, p. 51). — DECOMET. *Scr. Physique industrielle*, t. II, p. 159. — GIROUD. Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 555. — JOHNSON. *Ibidem*, p. 556. — LEBLANC et LOISEAU. *Annales des Mines*, 8<sup>e</sup> série, t. I, p. 355. — LÉON et GUICHARD (*Bulletin de la Société d'encouragement*, 1866, p. 515. — *Portefeuille économique des machines*, 1874, pl. 29. — *Revue industrielle*, 25 avril 1884, p. 161. — MALDANT. *Ibidem*, 3 mai 1890, p. 175. — MELVIN. *American machinist*, 21 mai 1881, p. 1. — MEYER. Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 556. — MIGNOT (*Bulletin de la Société d'encouragement*, septembre 1890, p. 625. — *Revue industrielle*, 19 septembre 1891, p. 576. — *Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. IX, p. 62). — MULLER. *La lumière électrique*, 1<sup>er</sup> octobre 1887, p. 44. — PFITZENREITER. Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 556. — RIVALS. *Ibidem*, p. 554. — SCHNITZ. *Ibidem*, p. 557. — TOURSAN. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CX, p. 450.

<sup>(3)</sup> PÉCLET. *Traité de la chaleur*, t. II, p. 46. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1846, p. 526, 596.

<sup>(4)</sup> *Ibidem*, 1845, p. 85.

<sup>(5)</sup> *Ibidem*, 1850, p. 449.

<sup>(6)</sup> *La science pour tous*, 27 mars 1869, p. 129.

notablement différentes, avec la vapeur sur son petit diamètre, et avec le mercure sur sa grande base (fig. 739). La hauteur de ce métal se trouve d'après cela réduite dans le rapport inverse des sections.

Le manomètre Richard (<sup>1</sup>), dont le principe avait été déjà indiqué par Frimot (<sup>2</sup>), présente un tube sinueux (fig. 740, 741), qui renferme, dans ses divers coudes inférieurs, des indexes de mercure, reliés entre eux par des tampons d'eau interposés. Tous se dévient à la fois de la position normale, pour équilibrer la tension de vapeur. La hauteur de chacune des dénivellations est par suite très amoindrie. On peut s'en rendre compte à l'aide du calcul suivant (fig. 742).

La droite CC' correspond à la situation de non-pression. Les ménisques inférieurs A s'abaissent par-dessous,

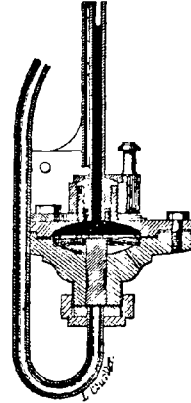


Fig. 739. — Manomètre Galy-Cazalat. (Coupe verticale).

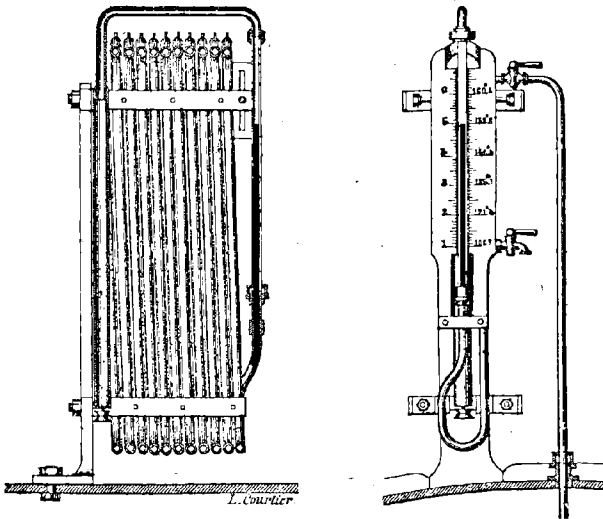


Fig. 740 et 741. — Manomètre Richard (élevations antérieure et latérale).

(<sup>1</sup>) Combes. *Annales des mines*, 1845, 1<sup>er</sup> sem., p. 481. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1845, p. 223.

(<sup>2</sup>) *Ibidem*, 1831, p. 534

et les plans supérieurs B s'élèvent au-dessus, d'une même quantité  $h$ . La hauteur mercurielle est donc  $2h$  dans chaque branche. Il suit de là que le ménisque  $A_n$  supporte d'un côté la pression  $p$  de la vapeur, et de l'autre l'influence réunie de la pression atmosphérique  $p_0$ , plus  $n$  colonnes métalliques, et moins les  $n - 1$

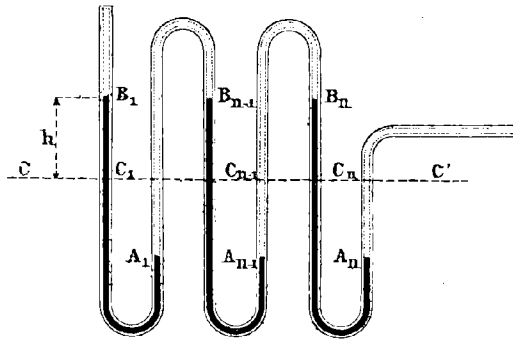


Fig. 742. — Manomètre Richard (figure schématique).

colonnes d'eau qui sont interposées entre ces dernières, et dont le poids tend à contre-balancer en partie les hauteurs mercurielles. On aura, par conséquent, en appelant  $\Pi$ ,  $\varpi$  les poids spécifiques des deux liquides :

$$p = p_0 + 2n\Pi h - 2(n-1)\varpi h.$$

Si donc  $H$  désigne la hauteur de mercure qui mesurerait, dans un manomètre ordinaire, la pression effective :

$$\Pi = \frac{p - p_0}{\Pi},$$

on peut écrire :

$$\Pi H = 2h [n(\Pi - \varpi) + \varpi],$$

d'où, en remplaçant  $\Pi$  par  $13,6 \varpi$  :

$$\frac{h}{H} = \frac{6,8}{12,6n + 1}$$



Si, par exemple, on emploie dix colonnes mercurielles, on aura :

$$\frac{h}{H} = 0,0555;$$

de telle sorte que chaque kilogramme de pression effective s'accusera par une différence de niveau de 4 centimètres, de part et d'autre de la ligne de foi.

**1210** — *Manomètre Bourdon*. — On n'emploie plus aujourd'hui pour les chaudières à vapeur que le *manomètre élastique*, qui est tout à la fois économique, sensible et très commode. Vidie <sup>(1)</sup> avait imaginé autrefois de faire fléchir sous l'action de la pression un disque d'acier. Le degré passager d'emboutissage de cette membrane, convenablement amplifié, était transmis à une aiguille indicatrice.

Bourdon <sup>(2)</sup> a donné au principe toute sa valeur, par son invention du tube spiral aplati (fig. 743, 744). La section transversale de ce tuyau est une sorte d'ellipse très allongée; son profil longitudinal, une spirale d'Archimède. La vapeur étant admise dans l'intérieur tend, en raison de sa

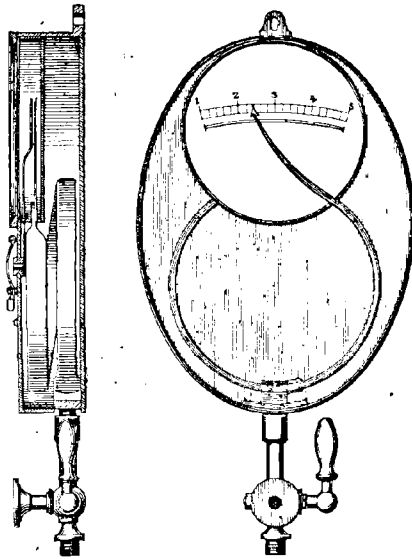


Fig. 743 et 744. — Manomètre Bourdon.  
(Élévations latérale et antérieure).

<sup>(1)</sup> *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1886, p. 515.

<sup>(2)</sup> *Ibidem*, 1851, p. 197. — Résal (*Mécanique générale*, t. IV, p. 200. — *Annales des mines*, 6<sup>e</sup> série, t. XI, p. 581). — Armengaud (*Publication industrielle*, t. XXIV, p. 161. — *Machines-outils et appareils*, t. VII). — *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 304, 311. — Péclot. *Traité de la chaudière*, t. II, p. 50. — Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*, traduction Richard, p. 118.

pression, à occuper le plus grand volume possible et, par suite, à rapprocher la forme de la section de celle qui renferme la plus grande surface sous un même périmètre, à savoir, le cercle. Les rayons de courbure se modifient donc aux sommets de l'ellipse. Si nous continuons, dans ce raisonnement, à faire abstraction de l'extensibilité tangentielle du métal, le théorème de Gauss relatif aux déformations des surfaces flexibles nous apprend que le produit des deux rayons de courbure principaux doit rester constant en un même point. Or, les sections principales de la surface tubulaire sont évidemment, aux sommets de l'ellipse, son plan de section droite et le plan de symétrie générale. Le rayon de courbure de la première ayant changé, celui de la spirale doit se modifier en raison inverse. La courbe s'ouvrira par conséquent d'une manière variable avec la pression. Mais l'une de ses extrémités est fixe, et sert à mettre l'appareil en communication avec la chaudière. L'autre bout parcourra donc une certaine excursion, que l'on utilise pour actionner une aiguille le long d'un arc gradué.

M. Édouard Bourdon a porté, par ses soins, l'œuvre de son père à une grande perfection. Il est bon d'éviter l'admission directe de la vapeur chaude dans le tube spiral, à cause des altérations qui pourraient en résulter. On établit à cet effet la communication à l'aide d'un conduit assez long. Il se remplit d'eau de condensation, et celle-ci transmet la pression. Un robinet permet d'isoler ce liquide, et de détacher l'appareil sans laisser tomber la pression, quand il peut y avoir intérêt, pour un motif quelconque, à le déplacer en cet état.

**1211** — *Manomètres divers.* — Je mentionnerai encore rapidement un certain nombre d'appareils, dont la plupart n'existent plus guère qu'à l'état de souvenir.

Le *manomètre à air comprimé* est fondé sur l'élasticité de ce gaz. Son emploi avait été autorisé par l'ordonnance de 1843 pour les locomotives et les locomobiles. Mais il a depuis longtemps disparu de la pratique. Il présentait en effet un grave défaut. D'après la loi de Mariotte, la graduation se resserre de plus en plus aux grandes tensions. On obtient donc, dans les lectures, d'autant moins de

précision que le danger augmente davantage. On avait, il est vrai, proposé de remédier à cet inconvénient par l'emploi de tubes coniques.

Le *thermomanomètre*<sup>(1)</sup> a joué un rôle éphémère. On désignait sous ce nom un thermomètre à mercure qui était plongé dans la vapeur, et dont la tige, sortant de la chaudière, était graduée en kilogrammes de pression, d'après la loi de correspondance des

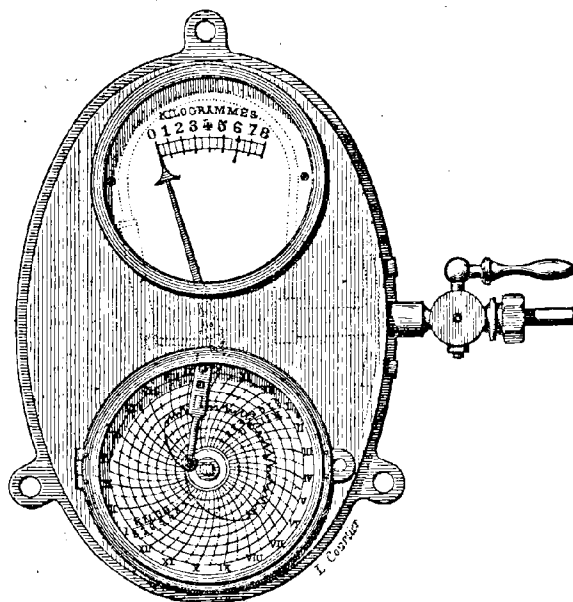


Fig. 745. — Manomètre enregistreur Bourdon (élévation).

tensions et des températures. Le réservoir de verre était préservé de toute déformation par une enveloppe métallique, remplie d'une matière conductrice telle que la limaille de cuivre.

Le *thalpotasimètre*<sup>(2)</sup> de Schœffer et Budenberg est également un thermomètre à tension, qui peut jouer à volonté les deux rôles, fournissant la pression en fonction de la température, ou réciproquement.

<sup>(1)</sup> Michel Lévy. *Annales des mines*, janvier-février 1884. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1827, p. 118.

<sup>(2)</sup> *Génie civil*, t. VII, p. 157. — *Revue des questions scientifiques de la Société de Bruxelles*, 20 octobre 1886, p. 640.

Le *télémanomètre* <sup>(1)</sup> est destiné à transmettre à distance l'indication des pressions.

Le *manomètre à maxima* <sup>(2)</sup> a pour objet la constatation des fautes du chauffeur. Un index est poussé par l'aiguille, sans pouvoir de lui-même rétrograder. Une serrure plombée le soustrait à l'action de l'ouvrier. Sa position accuse donc la plus grande élévation qu'ait subie la tension, dans l'intervalle de deux contrôles.

Le *manomètre enregistreur* <sup>(3)</sup> remplit la même mission d'une manière bien plus complète (fig. 745), car il renseigne à la fois sur toutes les circonstances du fonctionnement, au moyen du tracé d'une courbe. A cet effet l'aiguille porte une pointe traçante qui, sous l'influence des oscillations de la tension, s'éloigne plus ou moins du centre d'un disque de papier, animé d'un mouvement uniforme de rotation qui s'accomplit en vingt-quatre heures.

Il existe des *manomètres à vide* pour le service des condenseurs, dont la pression est inférieure à celle de l'atmosphère.

## § 5

### SOUPAPE DE SÛRETÉ

**1212** — *Généralités.* — D'après l'article 6 du décret du 30 avril 1880, chaque chaudière est munie de deux *soupapes de sûreté* <sup>(4)</sup>, chargées de manière à laisser la vapeur s'écouler dès que

<sup>(1)</sup> *American machinist*, 20 août 1887, p. 4.

<sup>(2)</sup> *Annales des ponts et chaussées*, 1859, 2<sup>e</sup> semestre, p. 49. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1889, p. 572.

<sup>(3)</sup> Manomètres enregistreurs : BOURDON. Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 160. — EUSON. Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*, traduction Richard, p. 605. — NACDIN. *Revue industrielle*, 27 février 1884, p. 91. — RICHARD. Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 161.

<sup>(4)</sup> Bour. Les soupapes de sûreté. *Annales de la Société des sciences industrielles de Lyon*, 1887, p. 197. — Delaporte. Calcul des soupapes de sûreté. *Revue industrielle*, 1881, p. 104. — Thomard. Diamètre des soupapes de sûreté. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXX, p. 51. — Léauté. Soupapes de sûreté. *Génie civil*, 26 juillet 1884. — G. Richard (*Revue générale des chemins de fer*, 1881, 1<sup>er</sup> semestre, p. 169. — *La chaudière locomotive*, in-4<sup>e</sup>, p. 247. — Claudel. *Aide-mémoire*, p. 622. — *Génie civil*, t. II, p. 411 ; V, 210, 265. — *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, septembre 1875, p. 9 ; 1881, 69,

sa pression effective atteint la limite maximum indiquée par le timbre réglementaire (1).

218 ; 1885, 41. — *Portefeuille économique des machines*, 1874, pl. 53, 54 ; 1879, pl. 5, 6. — Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*, traduction Richard, p. 126.

Flannery. On safety valves. *Institution of naval architects*, avril 1877. — Buell. *Safety valves*. 1 vol. New-York, 1875. — Brownley. Report on safety valves. *Institution of Engineers and Shipbuilders in Scotland*, décembre 1874. — Robson. On the advantages of springs for loading safety valves. *Ibidem*, février 1874. — Report on safety valves and steam ganges. *Journal of Franklin Institute*, décembre 1867. — Wilson. On the construction of safety valves. *Institution of mechanical Engineers*, juillet 1877. — The sticking of safety valves. *Engineering*, 29 septembre 1876, p. 277. — Mac Farlane Gray. On safety valves and steam in motion. *Nautical Magazine*, juillet 1872. — Calcul des soupapes de sûreté. *The Engineer*, 26 juin 1891, p. 513. — Messenger. *Complete instructions for the designs of spring and other safety valves*, 1 vol. — Soupapes à charge constante. *The Engineer*, 27 février 1874. — Parker. Explosion du « Thunderer ». *Engineering*, 1876, 2<sup>e</sup> vol., p. 216.

Burg. Ueber die Wirksamkeit der Sicherheitsventile. *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences de Vienne*, t. XLV, p. 312.

(1) Soupapes de sûreté : ASCHROFT. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 274. — ASHTON. *Ibidem*, p. 292. — ATTOCH. *Ibidem*, p. 275. — BAILLIE. Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 151. — BARÇOS (*Annales des mines*, avril 1887, p. 171. — *Revue industrielle*, 10 novembre 1887, p. 444 ; 9 novembre 1889, p. 446). — BATEMAN. *Iron*, 7 mai 1880, p. 328. — BAYLEY. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 282. — BLAKE. *Ibidem*, p. 281. — BODMER et LABEYRIE. *Annales des mines*, 1859, 1<sup>er</sup> semestre, p. 439. — Ed. BOERDON. *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 514. — BRIERLEY et MITCHELL. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 279. — CASTELNAU. *Génie civil*, 6 février 1886, p. 215. — COCKBURN. *Annales des mines*, 8<sup>e</sup> série, t. XVI, p. 143. — CHAUSSINOT. Péclet. *Traité de la chaleur*, t. II, p. 62. — CORET (*Annales des mines*, 8<sup>e</sup> série, t. XI, p. 179. — *Revue industrielle*, 13 octobre 1887, p. 405). — CORRENS. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 268. — COURTIN. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1875, t. I, p. 346. — CROLL. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 266. — CRÉPIS. *Annales industrielles*, 1883, t. I, p. 201. — M. DEPREZ (Marié. *Institution of mechanical Engineers*, août 1880. — Cailletet. *Annales de chimie et de physique*, 5<sup>e</sup> série, t. XIX, p. 388). — DUNKEL. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 288. — EAVES. *Ibidem*, p. 281. — FALK et FRAZIER (*Scientific american*, 10 janvier 1885, p. 48. — *American journal of railway appliances*, 1<sup>er</sup> avril 1885, p. 164). — FENTON. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 281. — FIELD. *Ibidem*, p. 266. — FOSTER. *Ibidem*, p. 278. — GILES. *Ibidem*, p. 275. — GIQUET DENVAN. *Bulletin de la Société industrielle du nord de la France*, 14<sup>e</sup> année, n<sup>o</sup> 54, p. 48. — GUÉNET (*Revue industrielle*, 27 janvier 1887, p. 35. — *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, 1886, p. 81). — HAFNER. Ser. *Physique industrielle*, t. II, p. 168. — HALLAM. *Annales des mines*, 8<sup>e</sup> série, t. XVI, p. 143. — HARTMANN. *Ibidem*, p. 275. — HAST. *Ibidem*, p. 290. — HAWTHORNE. *Ibidem*, p. 288. — HOLT. *Ibidem*, p. 288. — HOPKINSON. *Annales industrielles*, 1885, t. I, p. 348. — JENKIN'S. *American machinist*, 8 avril 1882, p. 4. — KAPPEYS. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1875, t. I, p. 401. — KIMBLE. *Scientific american*, 14 mars 1891, p. 165. — KITSON. Couche. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 153. — LABEYRIE. *Annales des mines*, 1869. — LAESOE-MEYER. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 268. — LAVINGTON. *The Engineer*, 1876, t. II, p. 147. — LEMONNIER et VALLÉE (Phillips. *Annales des mines*, 5<sup>e</sup> série, t. I, p. 337. — *Bulletin de la Société*

Cet organe, inventé par Papin<sup>(1)</sup>, se compose (fig. 746) d'un disque en bronze reposant sur un siège de même nature. Des ailettes disposées en dessous guident son mouvement suivant la verticale. Un pointeau biconique exerce l'effort voulu au centre du clapet, où se trouve pratiquée une petite mortaise conique plus évasée que l'angle du pointeau. Un levier horizontal oscille autour d'une forte goupille. Il supporte à son extrémité un poids, et appuie sur le cône supérieur du pointeau. Un cadre empêche les soulèvements excessifs, qui risqueraient de produire le déversement du système. Le levier présente plusieurs encoches, pour permettre de rapprocher le poids, dans les instants où l'on veut soulager la soupape. Il est bon que le point où s'exerce la charge soit placé aussi bas que possible, et au-dessous du centre de gravité, afin d'assurer la stabilité.

*d'encouragement*, 1852, p. 581. — COUCHE. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 151). — LETRUELLIER-PINEL (*Annales des mines*, 8<sup>e</sup> série, t. XVI, p. 144. — *Revue industrielle*, 9 avril 1884, p. 144. — *Annales industrielles*, 1884, t. I, p. 450. — *Portefeuille économique des machines*, 1885, p. 56. — ARMENGAUD. *Publication industrielle*, 2<sup>e</sup> série, t. X, p. 125. — *Bulletin de la Société industrielle du Nord de la France*, 1884, 1885). — LYNDE. *American machinist*, 25 décembre 1886, p. 3. — MANCEL. *Portefeuille économique des machines*, 1885, p. 165. — MARTY ROBERTS. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 282. — MAUREL et TRUËL (Bienaymé). *Les machines marines*, p. 499. — *Portefeuille économique des machines*, 5<sup>e</sup> série, t. VIII, p. 164). — MEGGENHOFEN. COUCHE. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 151. — MELLING. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 288. — MÉNARD. *Ibidem*, p. 290. — MONTUPET. *Ibidem*, p. 285. — MUFFLER. *Scientific american*, 26 juin 1886, p. 402. — NASMITH (Rankine). *Manuel de la machine à vapeur*, traduction Richard, p. 495. — *Engineering*, 1876, t. II, p. 395). — NAYLOR (*La Nature*, 29 octobre 1887, p. 547. — *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, septembre 1875, p. 9). — NICHOLSON. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 286. — PARSON. *Ibidem*, p. 281. — PEARSON. *American machinist*, 17 janvier 1885, p. 1. — PETERS. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 275. — POLLET et WIGZELL. *Ibidem*, p. 285. — POP (*Engineering news*, 10 septembre 1881, p. 362. — *American machinist*, 27 août 1891). — RAILING. *Scientific american*, 20 juin 1885, p. 390. — RAMSBOTTOM. COUCHE. *Voie, matériel roulant, exploitation technique des chemins de fer*, t. III, p. 150. — RICHARDSON. *Ibidem*, p. 951. — ROCHFORD. *Annales des mines*, 8<sup>e</sup> série, t. XVI, p. 145. — ROCHOW. *Ibidem*, p. 296. — ROSAYE. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, 1888, p. 906. — SCHMIED. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 5<sup>e</sup> série, t. III, p. 515. — SCOWELL. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 290. — SEATON et CAMERON. *Engineering*, 25 novembre 1881, p. 551. — SMITH. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 290. — SOREL-PÉCLET. *Traité de la chaleur*, t. II, p. 67. — STUART. Richard. *La chaudière locomotive*, p. 291. — TURNBULL. *Ibidem*, p. 283. — TURTON. *Ibidem*, p. 268. — WEBB. *Ibidem*, p. 286. — WEIR. *Ibidem*, p. 290.

(1) Denis Papin. *A new digester*, 1681.

Désignons par  $P$  le poids suspendu, par  $p$  celui de la soupape,  $\Pi$  celui du levier, et par  $L$ ,  $l$ ,  $\lambda$  les distances de l'axe de rotation aux centres de gravité correspondants. Si  $F$  représente l'effort anta-

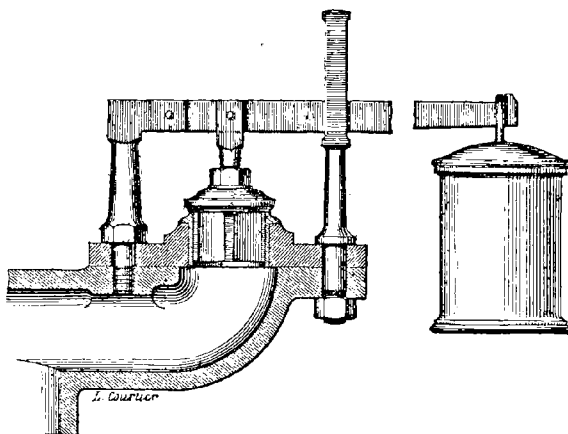


Fig. 746. — Soupape de sûreté (coupe verticale).

goniste qui est opposé en dessous par la vapeur<sup>(1)</sup>, avec le même bras de levier  $l$ , on aura, en posant pour l'équilibre l'équation des moments :

$$Fl = PL + pl + \Pi\lambda,$$

c'est-à-dire :

$$F = p + \frac{PL + \Pi\lambda}{l}.$$

On reste donc maître de faire jouer la soupape sous l'action d'efforts variables  $F$ , en disposant de  $L$  par le rapprochement du poids dans les divers crans.

(1) Cet effort est le produit de la pression rapportée à l'unité de surface par une aire dont la valeur reste un peu incertaine, selon le degré de précision de la portée. L'ordonnance de 1845 prescrivait à cet égard de ne pas dépasser, pour l'épaisseur  $e$  de la couronne d'appui,  $\frac{1}{56}$  de la valeur du diamètre  $d$ . Le rapport de cette portée  $\pi de$  à l'aire théorique  $\frac{\pi d^2}{4}$  étant  $\frac{4e}{d}$ , pouvait ainsi atteindre  $\frac{4}{56}$ . Or une incertitude de 13 % sur la pression serait déjà des plus fâcheuses. Le plus sûr est de faire le calcul d'après le diamètre intérieur, et de réduire le plus possible le portage.

Sur les locomotives et dans les machines de navigation, les balottements de ce poids seraient gênants et enlèveraient toute précision. On le remplace alors par un ressort spiral <sup>(1)</sup>, protégé par un étui en laiton (fig. 747). Il convient d'en mettre deux, en cas de rupture. On les appelle *balances*. Ces appareils sont difficiles à

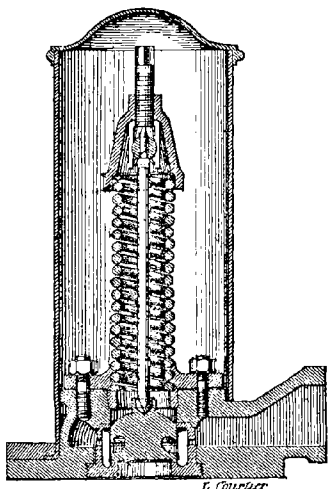


Fig. 747. — Soupape de sûreté Lethuillier-Pinel à ressort (coupe verticale).

régler, et se dérèglent ensuite facilement. Leur tension est marquée par un index mobile devant une échelle graduée. Pour empêcher que le chauffeur ne puisse les tendre abusivement, on dispose un arrêt de butée.

L'inconvénient évident de ce système est le remplacement d'une force constante, capable de satisfaire à l'équation précédente, par un effort qui varie avec les allongements, aux divers instants de la levée. Pour cette raison, outre que les soulèvements sont très réduits, on prend des ressorts très longs, afin de diminuer l'allongement relatif, qui règle la valeur de la force élastique.

**1213** — *Calage des soupapes.* — Tout ce qui tend à coincer, caler ou surcharger les soupapes de sûreté, doit être écarté avec la plus grande sollicitude.

C'est quelquefois la malveillance extérieure. C'est trop souvent l'imprudence du chauffeur <sup>(2)</sup>, qui veut rester maître de sa pression, et empêcher les soupapes de *souffler* <sup>(3)</sup>, ou encore sa négligence à

<sup>(1)</sup> Quelquefois par des rondelles Belleville.

<sup>(2)</sup> On a imaginé diverses soupapes dites *incalables* : CORET, NICHOLSON et ALLCOCK, RAMSBOTTOM et WEBB, TURNBULL. Elles sont pour la plupart fort ingénieuses, mais assez compliquées. En outre on se trouve entravé, quand on veut toucher aux appareils pour s'assurer qu'ils jouent librement.

<sup>(3)</sup> A la mer, pour ne pas être gêné par la vapeur des soupapes, et pour ne pas perdre inutilement de l'eau distillée, on a proposé (système MAUREL) de conduire cet échappement au condenseur.



entretenir les appareils en bon état, de telle sorte que le cambouis vient en entraver le jeu, surtout après un long chômage.

Ce peut être également la déformation des pièces, ou le coincement des ailettes. Pour éviter cet inconvénient, il faut les faire assez longues<sup>(1)</sup>, en les alésant sur un diamètre un peu moindre que celui de l'ajutage. On a imaginé<sup>(2)</sup> l'emploi d'un galet en développante de cercle, afin d'exercer l'effort dans une direction bien verticale. On a enfin proposé, pour écarter radicalement les chances de coincement, des soupapes *sphériques*<sup>(3)</sup>.

Par-dessus tout, il faut éviter les dispositions qui tendent à gêner les dilatations du siège métallique, et à les forcer de s'effectuer *vers l'intérieur*. L'explosion désastreuse du Thunderer (n° 1153), dont les chaudières étaient neuves, n'a pas eu d'autre cause<sup>(4)</sup>.

**1214** — *Section d'écoulement.* — La détermination de la section qu'il y a lieu d'offrir à l'écoulement de la vapeur, constitue le point essentiel de la théorie des soupapes de sûreté. L'article 6 du décret du 30 avril 1880 exige deux appareils distincts, afin d'écarter autant que possible les conséquences fatales de la mise hors de service accidentelle d'un système unique. Mais chacun d'eux doit être en état de suffire à lui tout seul. Le texte réglementaire autorise d'ailleurs le constructeur à répartir à son gré la section d'écoulement nécessaire des deux soupapes exigées, sur un plus grand nombre. Pour les récipients, au contraire (article 32), une seule soupape est exigible.

Cette section d'écoulement doit être particulièrement large pour les foyers à air forcé. Elle dépend directement de la levée; mais d'une manière dont on peut augmenter l'efficacité au moyen d'artifices semblables à ceux que nous avons étudiés (p. 159) à propos de

(1) Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 381.

(2) Système MONTUPET.

(3) Systèmes BLAKE, EAVES, FENTON, HOPKINSON, PARSON. Dans le type NASMYTH, les boulets sont munis d'ailettes qui plongent dans l'eau, toujours agitée, ce qui leur imprime un mouvement incessant, dont l'effet est de les roder et d'assurer l'étanchéité. On leur communique en même temps par là une certaine stabilité, qui manque trop aux simples boulets flottant sur la vapeur (Richard. *La chaudière locomotive*, p. 281.

(4) *Engineering*, 1876, 2<sup>e</sup> vol, p. 216.

la distribution de la vapeur : soupapes à plusieurs sièges <sup>(1)</sup>, à grille <sup>(2)</sup>, à piston <sup>(3)</sup>, clapets différentiels dont deux parties se meuvent dans des sens opposés <sup>(4)</sup>.

**1215** -- Il n'y a pas d'ailleurs à compter uniquement sur la levée spontanée, pour dégorger efficacement la pression. Lorsque les soupapes viennent à souffler, le chauffeur ne doit pas rester inactif. Il faut qu'il les soulage pour aider à l'écoulement, en même temps qu'il tient compte de cette circonstance dans la conduite de son feu.

Sous ce rapport, la soupape de sûreté devient un avertisseur. L'article 6 du décret du 30 avril 1880 s'exprime en effet ainsi : « L'orifice de chacune des deux soupapes doit suffire à maintenir (celle-ci étant au besoin convenablement déchargée ou soulevée, et quelle que soit l'activité du feu) la vapeur dans la chaudière à un degré de pression qui n'excède pour aucun cas la limite fixée. » En outre la circulaire ministérielle du 21 juillet 1880, dans son 25<sup>e</sup> alinéa, renferme le passage suivant : « La soupape de sûreté doit être considérée, non comme un appareil automatique limitant au degré voulu la tension de la vapeur, mais comme un appareil indiquant matériellement que cette tension a atteint le maximum qui ne doit pas être dépassé, et qui le serait, la plupart du temps, si la soupape n'était pas déchargée ou soulevée de manière à offrir à la vapeur un écoulement suffisant. »

**1216** — La détermination de la section nécessaire pour remplir ces conditions reste à l'appréciation de chacun, sous sa propre responsabilité, depuis que le décret du 25 janvier 1865 est venu abroger l'ordonnance du 23 juillet 1852, qui avait édicté à cet égard une formule réglementaire. Celle-ci peut d'ailleurs être encore consultée à titre de renseignement très utile.

(1) BLAKE, CHURCH, FINDLEY, FRIEDMANN, HALLAM, HAWKLEY-WILKE, HOLT, HOPKINSON, HOSRING, MELLING, ROXBY (Richard. *La chaudière locomotive*, p. 289).

(2) DUNKEL, HAWTHORN.

(3) HASTE, MAUREL et TRUËL, MÉNARD, SCOWELL, STEART, WEIR.

(4) ALIBON et MAMBRE, BULLOUGH, FRANKLIN, GEDGE, GILES, HUDSON, LEES, MINOT, ROBERTS, SMITH, STOREY, WYSE.

Elle était donnée sous la forme :

$$d = 2,6 \sqrt{\frac{S}{n - 0,412}},$$

mais  $n$  y représentait la pression *absolue*, en *atmosphères*,  $d$  le diamètre en *centimètres*,  $S$  la surface de chauffe en mètres carrés. Pour employer de préférence des unités homogènes et conformes à la réglementation actuelle, nous appellerons  $D$  le diamètre en *mètres* :

$$D = \frac{d}{100}, \quad d = 100 D;$$

et  $N$  la pression *effective* en *kilogrammes par centimètre carré* :

$$1,033(n - 1) = N, \quad n = \frac{N}{1,033} + 1.$$

Il vient par cette substitution :

$$D = 0,0264 \sqrt{\frac{S}{N + 0,607}}.$$

**1217** — Considérons comme exemple un générateur de 25 mètres carrés de surface de chauffe, timbré à 4 kilogrammes :

$$N = 4, \quad S = 25.$$

La formule donne alors :

$$D = 0^m,0607.$$

La section d'écoulement à travers l'ajutage sera donc :

$$\frac{\pi}{4} (0,0607)^2 = 0^m,002\ 826.$$

Il convient toutefois de réduire ce nombre de  $\frac{1}{60}$  de sa valeur, pour

tenir compte de la place occupée par les ailettes, et de l'affecter en outre du coefficient de contraction 0,93 (1) :

$$\frac{59}{24} \times 0,93 \times 0,002\ 826 = 0^{\text{m}^3},002\ 583.$$

Or nous avons vu ci-dessus (2) que la vitesse d'écoulement de la vapeur, dans ces conditions, est de 734 mètres par seconde. Le débit aura donc comme valeur :

$$0,002\ 583 \times 734 = 1^{\text{m}^3},896.$$

Si nous admettons d'autre part que chaque mètre carré de surface de chauffe vaporise par heure 20 kilogrammes d'eau (n° 955), nous aurons, pour les 25 mètres carrés et par seconde :

$$\frac{20 \times 25}{60 \times 60} = 0^{\text{kg}},139.$$

L'expansion que subit un kilogramme liquide par sa vaporisation, sous une pression qui peut ici être confondue avec 5 atmosphères, est :  $\mu = 0^{\text{m}^3},\ 5617$  (3). Le volume effectif qu'il s'agit d'écouler sera donc :

$$0,5617 \times 0,139 = 0^{\text{m}^3},050.$$

Le rapport de ces deux débits a pour valeur :

$$\frac{1,896}{0,050} = 37,92.$$

Il semble par suite que le conduit d'évacuation sera 38 fois plus que suffisant. Mais il y a beaucoup à rabattre de cet aperçu.

Ce n'est pas en effet seulement l'ajutage qui sert à l'écoulement,

(1) Voy. t. I, p. 444.

(2) Voy. t. I, p. 805.

(3) Voy. t. I, p. 784.

mais aussi la couronne annulaire qui a pour hauteur  $H$  la levée du clapet. Sa section est égale à  $\pi dH$ . Logiquement elle devrait offrir le même débouché que le tuyau lui-même, ce qui exigerait :

$$\pi D H = \frac{\pi D^3}{4}, \quad H = \frac{D}{4},$$

c'est-à-dire une levée égale à la moitié du rayon. Tout au contraire, on n'en donne que de très faibles : un millimètre par exemple. Le débit parallèlement à la paroi se trouve dès lors réduit dans le rapport de 0,001 à  $\frac{D}{4}$ , c'est-à-dire, pour le cas précédent :

$$\frac{0,0040}{0,0607} = 0,065.$$

Le rapport d'efficacité surabondante devient par suite :

$$0,065 \times 57,92 = 2,465.$$

Il convient d'ailleurs, conformément aux termes du décret, d'envisager la possibilité d'un surmenage du feu capable, par exemple, d'une production deux fois plus active que celle que nous avons admise pour des conditions normales; et alors le rapport tombe définitivement à la valeur :

$$0,5 \times 2,465 = 1,235.$$

On voit, par ce cas particulier, que la formule satisfait convenablement, mais sans excès déraisonnable, aux nécessités de la question.

**1218** — Il reste toutefois une dernière difficulté qui, avec raison, a beaucoup préoccupé les constructeurs. Une section, théoriquement suffisante pour permettre l'écoulement, risque en effet de l'assurer fort mal dans la réalité, en raison de la circonstance suivante.

Lorsqu'une masse gazeuse s'écoule entre deux enceintes, c'est en vertu d'une différence de pression, qui s'échelonne d'une manière continue sur tout le parcours de la veine, entre les parties assez éloignées du débouché, et assez étendues en section transversale, pour que l'on puisse les considérer comme immobiles, et soumises aux tensions ambiantes de ces enceintes, à savoir dans le cas actuel la pression  $p_1$  de la chaudière et celle  $p_2$  de l'atmosphère. Les environs immédiats du clapet présentent donc une tension  $p$  intermédiaire entre ces deux dernières.

Or, avant le soulèvement, la masse était en repos, et la force élastique uniforme dans toute son étendue. C'est par conséquent la pression  $p_1$  qui a été capable de soulever la soupape; et dès que le fluide contigu ne se trouve plus qu'à la tension moindre  $p$  <sup>(1)</sup>, il ne pourra plus la soutenir. Celle-ci retombera et refermera l'ouverture. L'équilibre se rétablissant, la pression  $p_1$  se reconstituera, et se retrouvera capable de soulever de nouveau le clapet. Puis les mêmes phénomènes se reproduiront. C'est donc un régime de ballottements et d'instabilité, bien différent de l'écoulement continu, qui va prendre naissance, dès que la tension intérieure atteindra le degré  $p$ , que l'on ne doit pas dépasser. Par suite les dimensions calculées d'après la valeur de  $p_1$  se trouveront pratiquement insuffisantes, et dans une mesure qu'il serait fort difficile d'apprécier théoriquement <sup>(2)</sup>. Divers moyens ont été proposés pour remédier à ce défaut.

**1219** — *Soupape Bodmer et Klotz*. — Dans le système Bodmer et Klotz <sup>(3)</sup>, le chapeau A de la soupape (fig. 748, 749) est soulevé par une atmosphère de vapeur qui puise sa tension à une grande distance, au pied du tube B. Dès que l'écoulement se prononce en C, la tension diminue dans la région environnante D; mais cette

<sup>(1)</sup> Avec les soupapes à ressort, cet effet s'accroît encore de l'augmentation de tension élastique produite par le soulèvement.

<sup>(2)</sup> M. Walckenaer a exécuté sur ce sujet une importante série d'expériences (*Annales des mines*, 8<sup>e</sup> série, t. XVI, p. 124).

<sup>(3)</sup> *The Engineer*, 1877, t. II, p. 61. — *Proceedings of the Institution of mechanical Engineers*, 1877. — Richard. *La chaudière locomotive*, in-4<sup>e</sup>, p. 277. — *La Nature*, 6 octobre 1877, p. 293. — *The Railroad Gazette*, 2 décembre 1881, p. 724.

variation ne saurait se faire sentir sous le clapet A par l'intermédiaire du tuyau B, qu'après s'être transmise à travers toute la masse. La soupape restera donc statiquement supportée jusqu'à ce qu'elle ait rempli son office, en déterminant une détente générale de la pression dans toute l'enceinte.

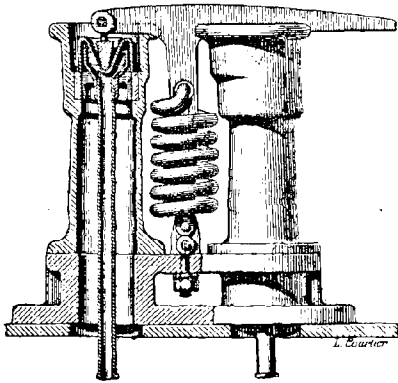


Fig. 748. — Soupape de sûreté Klotz. (Élévation.)

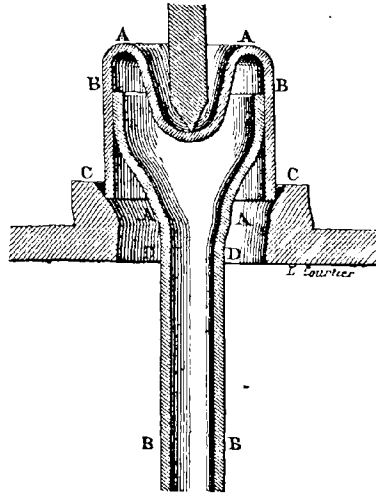


Fig. 749. — Soupape de sûreté Klotz. (Coupe verticale schématique.)

**1220** — *Soupape Codron.* — Dans le système Codron<sup>(4)</sup>, l'on accepte au contraire la diminution de pression avoisinante, mais

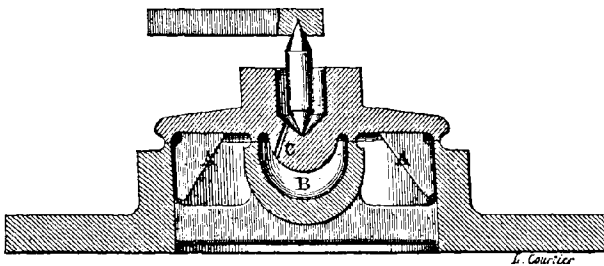


Fig. 750. — Soupape de sûreté Codron (coupe verticale schématique).

on augmente, dès les premiers instants de l'ouverture, l'étendue

<sup>(4)</sup> Olry. *Annales des Mines*, 8<sup>e</sup> série, t. I, p. 107. — *Portefeuille économique des machines*, 3<sup>e</sup> série, t. VIII, p. 164. — *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, juillet 1888, p. 735.

de la surface d'action (fig. 750). Le chapeau est en effet soulevé statiquement par le contact de la vapeur avec l'anneau A; tandis que, dès qu'il quitte son siège, le fluide se répand dans l'espace supplémentaire B, pour compenser, par cette addition d'étendue, la raréfaction dynamique due à l'écoulement. Lorsque le dégorgeement est terminé, et que la soupape est définitivement retombée sur sa base, le sifflet C sert à l'évacuation de la petite quantité de vapeur qui remplissait l'espace B. Le rapport des diamètres détermine le degré de sensibilité de l'appareil. Il est malheureusement assez difficile de dresser avec une suffisante précision les diverses surfaces d'appui.

**1221** — *Soupape Dulac*. — Le fonctionnement de la soupape Dulac <sup>(1)</sup> repose sur un principe analogue (fig. 751). Seulement la

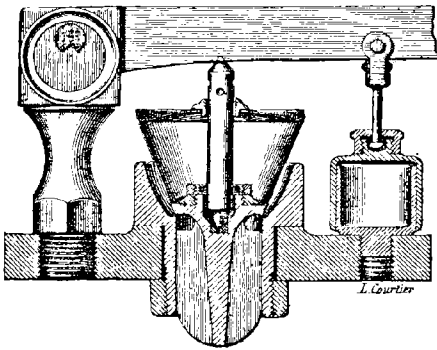


Fig. 751. — Soupape de sûreté Dulac (coupe verticale).

surface supplémentaire de soutien forme une sorte de prolongement latéral de la face interne du chapeau. On peut le comparer à un tronc de cône; cependant son profil est en réalité curviligne, et résulte d'études expérimentales attentivement poursuivies. La vapeur, obligée de s'écarter

le long de cet obstacle évasé, lui imprime des forces dont la composante verticale vient en aide pour supporter ce corps.

**1222** — *Soupape Adams*. — Dans le système Adams <sup>(2)</sup>, plus nettement encore que dans le précédent, on cherche le remède de

<sup>(1)</sup> *Annales des mines*, 1889, p. 124. — *Le Technologiste*, juillet 1887, p. 119. — *Bulletin de la Société d'encouragement*, 25 mars 1892.

<sup>(2)</sup> Vicaire. *Annales des mines*, 7<sup>e</sup> série, t. XIX, p. 92. — *Portefeuille économique des machines*, 5<sup>e</sup> série, t. VIII, p. 164. — Brustlein. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minière de Saint-Étienne*, 1881, p. 144. — *Le Technologiste*, 8 novembre 1879, p. 707.



la difficulté dans son principe même, qui est la substitution de l'état dynamique à celui de repos. Lorsque le clapet A se soulève (fig. 752, 753), la vapeur passe en B, C, D, en décrivant une trajectoire convexe vers le haut, et d'un très faible rayon de courbure  $\rho$ . Son rabattement vers le bas exige une force centripète qui, rapportée à l'unité de masse, a pour valeur  $\frac{v^2}{\rho}$ . Elle s'accompagne nécessairement d'une réaction égale sur le chapeau, tendant à le soutenir malgré son poids. Plus la vitesse est grande, plus la pression du fluide diminue, il est vrai, mais plus cet appoint  $\frac{v^2}{\rho}$  augmente de son côté.

Ce principe des soupapes de sûreté à gorge se retrouve également dans un certain nombre d'autres appareils (\*).

**1223** — *Soupape Barbe*. — On a fait un certain bruit, lors de son apparition, autour de la soupape Barbe (\*\*), dont l'inventeur s'était proposé d'évacuer, non plus la vapeur, mais l'eau chaude directement.

Un clapet à contrepoids est placé à la partie inférieure du générateur, au lieu de se trouver, comme à l'ordinaire, sur le sommet. On l'installe à l'arrière, du côté de la cheminée. D'après la disposition du levier, le contrepoids tend à plaquer le clapet de bas en haut. Le pointeau qui exerce cette pression est lui-même mobile autour d'un axe traversant ce levier.

Lorsque la résistance du contrepoids se trouve vaincue, la sou-

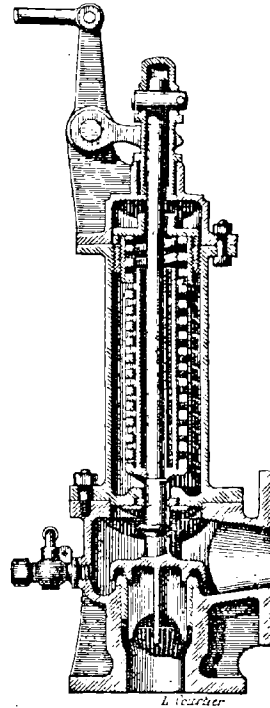


Fig. 752.  
Soupape de sûreté Adams.  
(Coupe verticale.)

(\* ) ASHCROFT, ATTOCK, BLACK, BIERLEY et MITCHELL, COULTHARD, DICKINSON, GILES, HALLAM, LETRUILIER-PINEL, PARSON, PETERS, POOLE, RICHARDSON, ROCHFORD, ROCHOW.

(\*\*) ARINGAUD. *Publication industrielle*, 1885, p. 451. — *Annales industrielles*, 1885, t. I, p. 437, 746. — *Bulletin de la Société industrielle de Rouen*, 1886, p. 446.

pape, que rien ne retient plus, tombe dans la fosse; le pointeau charvirant sans pouvoir par un mouvement de bascule, ressaisir le clapet dès que celui-ci a commencé son mouvement.

Cette invention a été combattue par l'Administration et par diverses autorités scientifiques ou industrielles. Elle paraît avoir aujourd'hui disparu de la scène. Elle présente en effet des défauts très graves.

La rapidité de la mise en liberté d'une pareille quantité d'eau surchauffée semble faite pour reproduire en diminutif les effets dynamiques de l'explosion elle-même. Il faut, dans tous les cas,

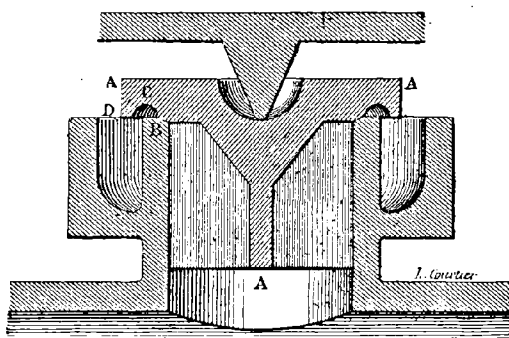


Fig. 753. — Soupape de sûreté Adams (coupe verticale schématique)

recevoir ce liquide dans une fosse profonde, avec des moyens préparés à l'avance pour l'évacuation de la vapeur d'expansion. La secousse imprimée par un phénomène aussi brusque à toute une batterie de chaudières déjà placée près de la limite d'instabilité qui constitue le danger, pourrait provoquer un dénouement fatal. En outre, un simple incident aussi facile ordinairement à faire rentrer dans l'ordre qu'une montée de pression, se trouve ici amener le désarmement complet de la chaudière et la mise en chômage de l'atelier. Il faut ensuite attendre que le générateur soit refroidi, pour pouvoir replacer la soupape, remplir de nouveau la chaudière, et la remettre en marche. On risque, dans l'intervalle pendant lequel le métal n'est plus protégé par le contact du liquide sans que la température soit encore amortie, de voir la tôle recevoir un coup de feu.

Quant au bénéfice sur lequel comptait l'inventeur, à savoir un dégagement beaucoup plus rapide de la puissance dynamique devenue dangereuse, il semble reposer sur une illusion. En effet la vaporisation de l'eau à l'émergence commencerait à s'effectuer dans l'orifice même, en ralentissant beaucoup le débit, que l'on aurait peut-être évalué dans les prévisions comme celui d'un liquide ordinaire. D'un autre côté, la température n'ayant pas de motifs pour se modifier rapidement dans l'intérieur, l'atmosphère de vapeur qui surmonte le bain liquide conserverait sensiblement, pendant la vidange, sa tension redoutée.

**1224** — *Reniflard*. — On a prévu, dans la construction des chaudières à vapeur, le problème inverse de celui des soupapes de sûreté, pour le cas où la force élastique viendrait, dans une fausse manœuvre de vidange, à tomber au-dessous de la tension atmosphérique (<sup>1</sup>). A la vérité une telle pression effective serait, en valeur absolue, presque toujours bien moindre que celle qui, en temps ordinaire agit en sens contraire sur l'enveloppe. Cependant, pour des chaudières à basse pression, on peut redouter de placer le corps cylindrique sous l'influence d'un effort s'exerçant de dehors en dedans.

C'est sous l'empire de cette préoccupation, que l'on a quelquefois installé un *reniflard*, c'est-à-dire une soupape s'ouvrant de l'extérieur vers l'intérieur, de manière à permettre au moment opportun la rentrée de l'air.

## § 6

### CHEVILLES FUSIBLES

**1225** — C'est vers 1831 que Frimot, ingénieur en chef des ponts et chaussées, proposa l'emploi des rondelles fusibles (<sup>2</sup>). L'attention

(<sup>1</sup>) Muller et Roger. *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 551. — W. Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*, traduction Richard, p. 479.

(<sup>2</sup>) Frimot. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1851, p. 552. — Recherches sur les plaques fusibles. *Le Devis Papin*, novembre 1889, p. 5. — Bouchons fusibles. *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-*

était alors portée vers des alliages dont on parvenait à déterminer, pour ainsi dire à volonté, les points de liquéfaction, en associant, dans des proportions convenables, l'étain, le plomb et le bismuth. On peut juger du degré d'abaissement de la température de fusion d'après le tableau suivant, dont les trois dernières colonnes présentent, comme points de comparaison, la fusion de ces trois métaux simples <sup>(1)</sup> :

MÉTALX	N° 1	N° 2	N° 3	N° 4	N° 5	°	°	°
Étain. . . . .	5	4	1	5	2	1	—	—
Plomb . . . . .	5	1	—	2	—	—	—	1
Bismuth . . . . .	8	5	1	—	1	—	1	—
Tempér <sup>re</sup> de fusion.	98	419	141	167	219	230	256	354

Il était dès lors naturel de concevoir la pensée d'ouvrir ainsi spontanément la chaudière par le seul jeu des températures, dès qu'elle atteint la pression limite que l'on ne doit pas dépasser <sup>(2)</sup>.

On se trouvait de même garanti contre les conséquences de l'abaissement du niveau de l'eau au-dessous de la ligne des carneaux. Il suffisait pour cela d'installer à ce niveau une plaque, dont la fusion se fût produite dès que la tôle se serait trouvée surchauffée, en raison de l'absence d'eau sur sa face opposée.

**1226** — Malheureusement divers obstacles sont venus s'opposer à la réussite de ce procédé.

Étienne, 1881, p. 127. — Pécelet. *Traité de la chaleur*, t. II, p. 67. — Mazzotto. *Sur les chaleurs d'échauffement et de fusion des alliages facilement fusibles*. in-8°, Turin, 1882. — Bour. *Chronique industrielle*, 10 avril 1889, p. 178. — Delaunay. *Étude sur les générateurs à haute pression*, in-8°, p. 62.

Avertisseurs en alliage fusible : BAILEY. *American machinist*, 31 mars 1888, p. 1. — ROSENKRANTZ. *Dingler's polytechnisches Journal*, t. CCLXIV, 1<sup>re</sup> livraison. — UEBERMUELEN. *Revue industrielle*, 25 août 1887, p. 355. — WITSCHER. *Ibidem*, 10 janvier 1885, p. 16.

<sup>(1)</sup> Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*, traduction G. Richard, p. 251.

<sup>(2)</sup> On a même proposé, pour limiter la pression, l'emploi de plaques dont la résistance était déterminée en vue de rompre à ce point. Cette solution n'offrait que des inconvénients, sans aucun avantage.

Avant tout la chaudière se trouvait par là complètement désemparée, tout travail interrompu, et la mise en réparation rendue nécessaire.

En second lieu, le principe lui-même s'est trouvé défectueux, l'expérience ayant montré que ces alliages n'avaient aucune fixité. Même dans des conditions ordinaires, et plus rapidement encore avec les variations de température qui provoquent des déplacements moléculaires, il s'y opère des liquations, des cristallisations de composés divers, qui se rapprochent du caractère des combinaisons en proportions définies, et non plus arbitraires. Le point de fusion de l'ensemble se trouve par là complètement modifié; toute sécurité disparaît, et l'on se trouve en face de l'inconnu.

**1227** — Il a donc fallu abandonner les anciennes *rondelles fusibles*, qui présentaient des dimensions notables en surface, et une épaisseur de 15 millimètres soutenue par un grillage en fer.

On a essayé de leur substituer des *bouchons fusibles*, fondant à une température plus élevée que celle de la vapeur, et destinés uniquement à prévenir de l'abaissement du plan d'eau, ou à préserver contre les coups de feu le ciel du foyer des locomotives. Mais on a encore été forcé d'en rabattre, à cause des inconvénients du jet d'eau bouillante destiné à éteindre le feu, et parce qu'il n'est pas possible de remplacer ces bouchons en marche.

Avec ce dispositif, un boisseau de bronze est vissé à poste fixe sur la tôle de coup de feu. L'alliage occupe l'intervalle compris entre le boisseau et un cône intérieur. Ce dernier présente un rebord protecteur, destiné à empêcher les gaz d'attaquer directement le métal fusible, et à retenir un peu celui-ci en place. Sans cela, un commencement de fusion donnerait lieu à une fuite, qui aurait pour résultat de rafraîchir ce cône et d'arrêter la liquéfaction. Il faut au contraire obtenir une coulée complète, pour que le cône lui-même se détache, en déterminant un jet capable d'éteindre le foyer. Lorsque cette éventualité se présente, on met bas le feu, et on laisse refroidir. S'il reste un peu d'alliage,

on le fond à l'aide d'un fer rouge pour achever de dégager le boisseau. Celui-ci doit être entièrement refroidi avant de recevoir le nouveau cône.

On se sert actuellement de *chevilles fusibles*, qui n'ont plus que 3 à 4 millimètres, et sont faciles à remplacer en marche, surtout dans les chaudières inexplosibles. En effet elles ne fondent que si le liquide a disparu de leur face postérieure, et ne donnent lieu dès lors qu'à un sifflement de vapeur et non à un jet d'eau bouillante. En outre la température de la surchauffe étant moins nettement déterminée, l'on se trouve dispensé d'obtenir une aussi grande rigueur dans la stabilité de l'alliage.

## CHAPITRE LXIV

### CONDENSEUR

#### § 1

#### CONDENSEUR DE SURFACE

**1228** — *Généralités.* — Nous avons déjà rappelé (p. 525) que la machine à vapeur n'est que l'intermédiaire entre une source chaude et une source froide. La première, sous le nom de chaudière, nous a occupés pendant les onze chapitres qui précèdent. Nous consacrerons celui-ci à l'étude de la source froide, ou *condenseur*.

Ce nom est plus spécialement réservé à l'appareil de *condensation artificielle* que renferment les *machines à condensation*. Mais dans un grand nombre de cas, la source froide ne réclame pour sa réalisation aucun organe spécial. Elle se réduit alors à l'atmosphère terrestre, dans laquelle vient se déverser librement la vapeur de l'échappement. C'est le cas des *machines sans condensation*, que l'on appelle aussi, bien que d'une manière moins claire : *machines à haute pression*.

C'est le *principe de la paroi froide* qui intervient pour cette opération. La vapeur ne peut maintenir dans toute l'étendue de l'enceinte qui lui est offerte que la tension correspondant à la plus faible des températures des divers points. En effet, l'élément le plus froid opère immédiatement la condensation du fluide qui le touche, jusqu'au degré de tension qui correspond à sa propre température; puis le degré de vide ainsi produit détermine

un afflux de vapeur des parties avoisinantes, qui vient subir le même sort tant que la température ne change pas en ce point; ce qui suppose d'ailleurs, ou une masse immense comme celle de l'atmosphère, ou des moyens artificiels de rafraîchissement, pour lutter contre l'influence des calories que la condensation remet en liberté.

On comprend donc qu'il en sera ainsi pour toute détente incomplète, que l'on n'a pas poussée jusqu'à la pression du condenseur, tant que, à partir de l'ouverture de l'échappement, la tension de la vapeur n'aura pas atteint celle de cet organe. Il n'y a plus ensuite de motif pour le transport du reste du fluide, du cylindre au réfrigérant; mais, dans son mouvement rétrograde, le piston achève d'y refouler la vapeur raréfiée.

**1229** — Quand on dispose d'eau froide en quantité suffisante<sup>(1)</sup>, on peut abaisser la contre-pression notablement au-dessous de celle de l'atmosphère, et bénéficier ainsi d'une partie importante de l'échelle des tensions. Nous avons vu<sup>(2)</sup> à quel point on améliore par là le rendement du moteur. Ce perfectionnement, toujours utile, est surtout indiqué pour les moteurs à basse pression, où son importance *proportionnelle* acquiert plus de valeur. Aussi rencontre-t-on ces dernières presque uniquement dans les conditions pour lesquelles l'eau se trouve à discrétion, c'est-à-dire dans la marine. Par contre certaines catégories de machines, telles que les locomotives et les locomobiles, excluent *a priori* le matériel encombrant qui est inhérent à la condensation artificielle.

L'emploi de l'eau froide pour activer la condensation de la vapeur peut s'effectuer de deux manières très différentes : par mélange immédiat, ou par influence indirecte à travers une paroi conductrice séparant les deux fluides. Nous nous occuperons tout d'abord de ce dernier mode, qui se rattache étroitement aux considérations déjà envisagées pour l'échange de chaleur dans le sens inverse, à savoir la production de la vapeur par les chaudières.

<sup>(1)</sup> Nous verrons plus loin (n° 1256) que cette quantité est considérable.

<sup>(2)</sup> Voy. t. I, p. 816.



**1230** — *Condenseur de surface*. — On appelle *condenseurs secs*, ou *condenseurs de surface* <sup>(1)</sup>, ceux dans lesquels on évite le contact de l'eau distillée provenant de la condensation de la vapeur avec le liquide réfrigérant. Cette combinaison se recommande surtout dans la marine, où le refroidissement s'opère nécessairement avec de l'eau de mer, tandis qu'il s'attache un très grand intérêt <sup>(2)</sup> à recueillir à part l'eau distillée, afin d'alimenter les générateurs avec un liquide exempt de dépôts salins.

La nécessité de ces dispositifs s'impose plus étroitement encore dans les moteurs à vapeurs combinées <sup>(3)</sup>, où les liquides, véhicules de chaleur, doivent conserver leur autonomie dans une enceinte fermée, sans être noyés d'eau, afin de pouvoir resservir indéfiniment, et de ne pas émettre au dehors de vapeurs toxiques.

On a imaginé des *condenseurs mixtes*, dont le jeu commence par un système de surfaces réfrigérantes, et se complète par une injection d'eau froide. On attend de ces appareils une température plus élevée pour l'eau d'alimentation, que l'on recueille à part; mais leur efficacité a été contestée <sup>(4)</sup>.

**1231** — Il y a lieu de penser que l'action des condenseurs de surface est rapide, d'après ce que nous avons vu (p. 45) de l'influence des parois métalliques. Cependant il est prudent de ne pas les associer aux machines à très grande vitesse, et en outre de faire, quand on les emploie, une plus large part à l'avance à l'échappement.

On indique le chiffre de 2 mètres carrés par puissance de

<sup>(1)</sup> Audenet. Étude sur les condenseurs de surface. *Revue maritime et coloniale*, mai 1874. — Sédillot. *Condenseurs de surface*, 1863, in-8°. — Barreau. *Condenseurs de surface*, in-8°, Amiens, 1874. — Guédon. Application nouvelle des condenseurs de surface. *Bulletin technologique de la Société des anciens Elèves des Ecoles d'arts et métiers*, mai 1888. — Nickol. Expériences sur les condenseurs de surface. *Engineering*, 10 décembre 1875. — Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 595 à 475. — Zeuner. *Théorie mécanique de la chaleur*. Traduction Cazin et Arnthal, p. 580. — Bienaymé. *Les machines marines*, p. 270. — *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 364. — Composition condensers for the U.-S. Cruiser *Maine*. *American machinist*, 9 avril 1891, p. 11.

<sup>(2)</sup> Sous réserve de ce que nous avons dit de l'action des corps gras p. 758.

<sup>(3)</sup> Voy. t. I, p. 841.

<sup>(4)</sup> Sauvage. *Annales des mines*, novembre-décembre 1830, p. 542.

cheval. Mais il est plus rationnel de rattacher la superficie du condenseur à la surface de chauffe, qui est un élément de même nature, et qui a servi à former la vapeur à condenser. On adopte pour le rapport des surfaces du condenseur et du générateur, des nombres variant de 0,55 à 0,90. C'est souvent le coefficient  $\frac{5}{4}$  pour les moteurs terrestres. A la mer, on diminue la surface en forçant la vitesse de circulation.

Des expériences de Nickol<sup>(1)</sup> ont montré que la puissance de condensation varie comme la racine cubique du poids d'eau que l'on fait intervenir. Il en faut au moins 40 kilogrammes pour 1 kilogramme de vapeur à condenser, et l'on arrive même à 60 kilogrammes dans les mers chaudes.

**1232** — Il y a lieu d'employer des parois minces et très conductrices, bien décapées par des lavages au carbonate de soude, ou par des jets de vapeur. La question de la meilleure utilisation de ces surfaces pour le refroidissement ne diffère pas au fond de celle de l'échauffement; c'est toujours l'échange de chaleur, du fluide le plus chaud au plus froid. Il est donc naturel de reprendre, pour l'objet actuel, la solution que nous avons alors trouvée la plus efficace, à savoir le type tubulaire (fig. 754, 755).

On construit d'après cela une masse tubulaire, que l'on place, si rien ne s'y oppose, verticalement, afin que l'eau déposée par la vapeur sur les surfaces s'écoule directement en raison de son poids<sup>(2)</sup>. La vapeur arrive par le haut; mais il n'y a pas de solu-

<sup>(1)</sup> *Engineering*, 10 décembre 1875. — Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*, traduction Richard, p. 621.

<sup>(2)</sup> Condenseurs à surface : BENSON. *Scientific american*, 4 septembre 1886, p. 148. — BROWN. *Revue industrielle*, 1881, p. 145. — CAIRD. Leduc. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 415. — DANEY. *Engineering*, 1876, p. 54. — FRASER (*Revue industrielle*, 24 janvier 1885, p. 55. — *Annales industrielles*, 1885, t. I, p. 397). — HUMPHREYS. *Bienaymé. Les machines marines*, p. 500. — JOESSEL. *Ibidem*, p. 504. — KIRKALDY. *The Engineer*, 1885, p. 452. — MAUDSLAY. Leduc. *Nouvelles machines marines*, t. II, p. 406. — MIGNON et ROUART (*Revue industrielle*, 1880, p. 295. — *Portefeuille économique des machines*, 1881, p. 71. — *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, décembre 1880, p. 295). — NICKOL. Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*, traduction Richard, p. 621. — PENS. Bienaymé. *Les machines marines*, p. 500. — PERKINS. Leduc. *Les nouvelles machines marines*, t. II, p. 415.

tion fixe pour l'admettre à l'intérieur plutôt qu'à l'extérieur

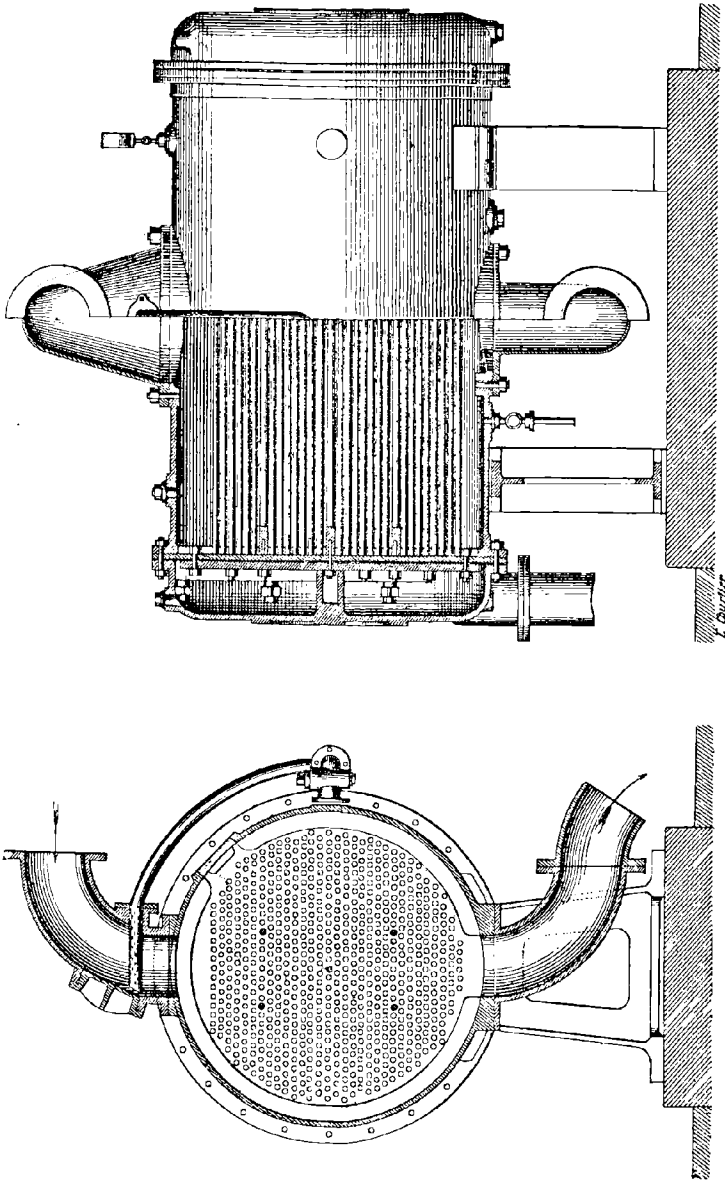


Fig 754 et 755. — Condenseur de surface (coupes transversale et longitudinale)

des tubes. En France, on engage de préférence l'eau dans les tubes,

afin de mieux guider son mouvement ; et pourtant, il serait plus rationnel de la faire agir sur leur surface externe qui est la plus grande, attendu que la conduction de la chaleur est plus facile de la vapeur au métal, qu'entre celui-ci et l'eau.

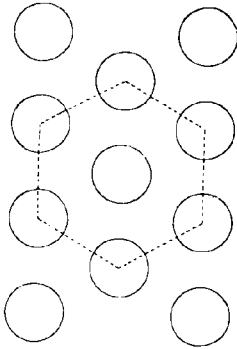


Fig. 756.

Le liquide est poussé par une *pompe de circulation*, à piston ou à force centrifuge. Quelquefois la pompe à air, dont nous parlerons bientôt, remplit également cette fonction. C'est le moteur principal qui met cet engin en action ; cependant on y affecte parfois un petit cheval spécial. On a également proposé d'utiliser pour cet effet le *filage* relatif du navire. Mais on ne resterait plus alors maître de l'opération, et il n'y aurait pas moyen de l'exécuter une fois que l'on aurait stoppé.

Les tubes ont un diamètre de 15 à 20 millimètres, une épaisseur de 1 millimètre à 1 millimètre et demi, une distance mutuelle de 50 millimètres d'axe en axe <sup>(1)</sup>. La section totale offerte à la vapeur doit être égale à celle du tuyau d'échappement, c'est-à-dire  $\frac{1}{16}$  du piston moteur. On s'attache à la disposer de manière que la

(1) Cherchons à déterminer le rapport des volumes offerts aux deux fluides, en les appelant, pour bien fixer le langage : volume tubulaire et volume extérieur.

On peut concevoir la section droite comme entièrement remplie d'hexagones de côté  $D$ , (fig. 756). Dans chacun d'eux, l'espace *tubulaire* occupe un cercle central de diamètre  $d$ , plus six fois un tiers de cercle, soit en tout trois cercles, ou :

$$\frac{3\pi d^2}{4}.$$

Comme l'hexagone a de son côté pour surface :

$$6 \cdot \frac{1}{2} D \sqrt{D^2 - \frac{D^2}{4}} = \frac{5\sqrt{3}}{2} D^2,$$

L'espace *extérieur* est formé de la différence :

$$\frac{5\sqrt{3}}{2} D^2 - \frac{3\pi}{4} d^2.$$

Le rapport  $n$  des espaces extérieur et tubulaire est donc, en appelant  $n$  celui de

vitesse soit la même dans tous les tubes, sans quoi le refroidissement s'y opérerait d'une manière inégale.

Les plaques tubulaires sont en fonte, pour des tubes de bronze ; ou en bronze, lorsque ceux-ci sont en cuivre. On se sert d'emboitements coniques, avec des bagnes de bois tendre, qui se gonflent dans l'humidité et assurent l'étanchéité. Certains joints se font aussi en caoutchouc.

**1233** — *Aéro-condenseur*. — Quand on ne dispose pas de la quantité d'eau nécessaire, il reste la ressource d'employer l'air comme réfrigérant <sup>(1)</sup>.

Dans l'aéro-condenseur Fouché <sup>(2)</sup>, la vapeur circule à travers un faisceau tubulaire (fig. 757), sur lequel un ventilateur lance un fort courant d'air, en même temps qu'on laisse couler un peu d'eau sur les surfaces, afin que son évaporation procure de la fraîcheur.

la distance d'axe en axe au diamètre :

$$(1) \quad m = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} n^2 - 1 = 1,1 n^2 - 1.$$

On tire de là inversement :

$$(2) \quad n = \sqrt{\frac{(m+1)\pi}{2\sqrt{3}}} = 0,95 \sqrt{m+1}.$$

Par exemple, avec des tubes de 2 centimètres, espacés de 3 centimètres, la formule (1) donne :

$$m = 1,46.$$

Si l'on veut réaliser pour l'extérieur un volume double de l'espace tubulaire :  $m=2$ , la formule (2) indique la valeur :

$$n = 1,65.$$

Si l'on demandait que le rapport de ces volumes fût le même que celui des dimensions en question, il faudrait prendre :

$$m = n = \frac{\pi}{4\sqrt{3}} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{8\sqrt{3}}{\pi}} \right) = 1,51 ;$$

c'est-à-dire sensiblement le rapport de 3 à 2. Le côté de l'hexagone serait alors égal à 3 rayons, et l'intervalle extérieur des tubes égal à un rayon.

<sup>(1)</sup> Nézeraux. *Annales du Conservatoire*, 16 août 1868. — Olivier. *Neuvième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, p. 100.

<sup>(2)</sup> *Génie civil*, t. VII, p. 136. — *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. II, p. 189. — *Engineering*, 1889, t. II, p. 246.

L'appareil peut être utilisé en hiver pour le chauffage de l'atelier. L'inventeur annonce un vide de 50 à 60 millimètres, pour un roulement de 100 kilogrammes de vapeur, 30 mètres

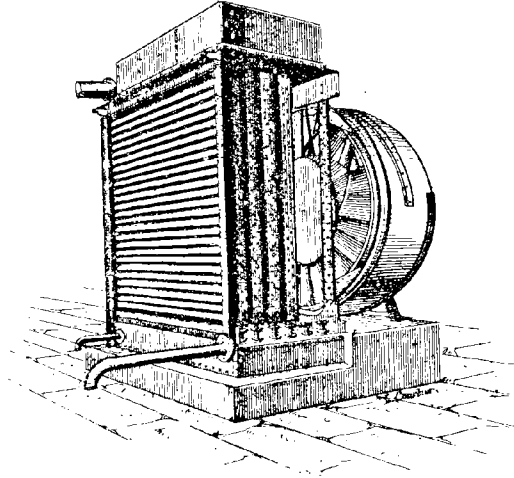


Fig. 757. — Aéro-condenseur Fouché (vue perspective).

carrés de surface, et une consommation de puissance d'un demi-cheval.

Dans le système Craddock, le refroidissement s'obtient au moyen d'un violent courant d'air *relatif*, que l'on réalise en imprimant une rotation rapide au faisceau tubulaire.

## § 2

### CONDENSEUR A INJECTION

**1234** — *Description.* — Le condenseur à injection <sup>(1)</sup> est une

(1) Costé. Étude sur la condensation dans les machines à vapeur. *Annales des mines* 6<sup>e</sup> série, t. XIV, p. 123. — Horsin-Déon (Étude sur les appareils de condensation. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, novembre 1887. — Haton de la Goupillière. *Revue des travaux scientifiques*, t. VIII, p. 219). — Dwelshauvers-Dery (*Étude calorimétrique de la machine à vapeur*, aide-mémoire Léauté. — Note sur la théorie des condenseurs. *Revue universelle des mines et des usines*, 1889). — Aimé Witz. *La*

capacité de forme quelconque, telle qu'une caisse métallique renforcée par des nervures à l'intérieur, ou un cylindre de fonte

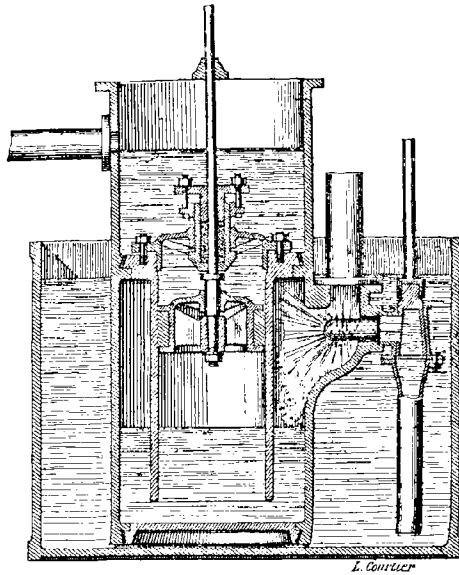


Fig. 758. — Condenseur et pompe à air (coupe verticale).

(fig. 758). On l'immerge dans la *bâche à eau froide*, pour éviter les rentrées d'air par les joints. Le condenseur de Watt (<sup>1</sup>) avait un

*machine à vapeur*, in-12, 1891, p. 165. — Sauvage. *Annales des mines*, 8<sup>e</sup> série, t. XVII, p. 559. — Haton de la Goupillière. *Ibidem*, juillet-août 1879, p. 177. — Callou. *Cours de machines*, t. II, p. 148, 252. — Wiedmann. *Étude des principes de la construction des machines marines*, p. 105. — Bienaymé. *Les machines marines*, p. 270. — Schmidt. Inutilité de la condensation. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 2<sup>e</sup> série, t. XII, p. 179. — Burgh. *On condensation of steam*. — Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction Richard, p. 554, 755. — *American machinist*, 24 septembre 1881, p. 7; 31 décembre 1881, p. 1. — Weiss. *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure*, 1888, p. 9; 1889, p. 768.

(<sup>1</sup>) Condenseurs à injection : BERGER ANDRÉ. *Annales des mines*, novembre-décembre 1890, p. 505. — CONOVER. *American machinist*, 24 octobre 1889, p. 4. — FRIKART. *Annales des mines*, novembre-décembre 1890, p. 505. — JOHNSON et ALLAN. *The Engineer*, 22 octobre 1875, p. 282. — KIRKALY. *Scientific american supplement*, 16 mars 1889, p. 11000. — DE QUELLACQ. *Annales des mines*, novembre-décembre 1890, p. 505. — *Ibid.* *Scientific american*, 13 avril 1889, p. 252. — Row. *Engineering*, 27 novembre 1891, p. 658. — WEISS. *Annales des mines*, novembre-décembre 1890, p. 544. — WORTHINGTON (fig. 760). *American machinist*, 5 janvier 1884, p. 1; 27 avril 1890, p. 1.

volume égal à  $\frac{1}{8}$  de celui du cylindre moteur. Aujourd'hui l'on est arrivé à doubler, et même à quadrupler cette proportion. Dans la marine, le volume du condenseur dépasse parfois d'un tiers celui du cylindre. Il y a en effet intérêt à ce que l'espace soit assez grand pour que la pression ne se trouve pas trop influencée par le dégagement de l'air que l'eau avait dissous dans les conditions atmosphériques, et qui ne rencontre plus ici une tension capable de le maintenir en dissolution. Un engin spécial, dont nous parlerons bientôt sous le nom de *pompe à air*, est destiné à entraîner ce gaz en même temps que l'eau chaude, au fur et à mesure de leur production.

Un orifice amène la vapeur d'échappement, à laquelle on laisse toujours, en fin de détente, un certain excédent de pression sur celle qui règne dans le condenseur. Un robinet réglé à la main fournit l'eau de la bêche, laquelle entre d'elle-même, en raison de l'excès de la pression atmosphérique sur la tension intérieure.

La section d'admission est ordinairement égale à  $\frac{1}{250}$  de celle du piston. Il est d'ailleurs facile de la déterminer théoriquement, connaissant le coefficient 0,62 de contraction, la charge motrice équivalente au *degré de vide intérieur*, et le débit à fournir, dont nous calculerons dans un instant la valeur.

Cette valve est munie d'un appendice destiné à épanouir le jet en nappe mince, ou en gerbe jaillissante, afin d'augmenter l'instantanéité du contact de l'eau et de la vapeur. M. Du Fay a proposé l'emploi d'ajutages coniques lançant des jets les uns contre les autres, de manière à les pulvériser en nuage fin.

**1235** — *Condenseur à eau récupérée*. — Lorsqu'on ne dispose que d'une quantité d'eau insuffisante, il reste cependant possible de pratiquer la condensation, au prix d'installations spéciales, qui permettent de refroidir rapidement le liquide, de manière à pouvoir le repasser dans l'appareil, qui prend alors le nom de *condenseur à eau récupérée* (1).

(1) Condenseurs à eau récupérée : BRUXON (*Portefeuille économique des machines*, 1880, pl. 5. — *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie miné-*



A cet effet, on fait couler l'eau sur des fascines étagées, comme dans les bâtiments de graduation des salines, ou sur des

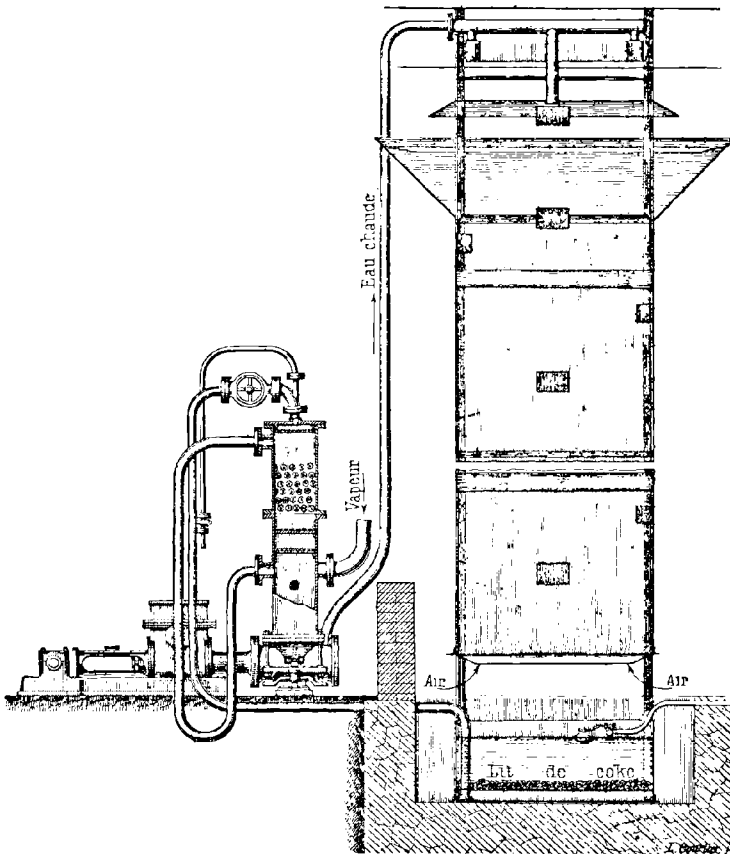


Fig. 759. — Condenseur Grangé à eau récupérée (élévation).

tôles perforées. Cependant, comme la buée qui s'en dégage est très gênante pour le voisinage, il est préférable d'employer l'action d'un ventilateur dans un espace fermé, avec cheminée de dégagement.

*rale de Saint-Étienne*, avril 1877, p. 82). — CHALLIGNY et GUYOT-SIONNEST (Hirsch. *Bulletin de la Société d'Encouragement*, 5<sup>e</sup> série, t. III, p. 454. — *Portefeuille économique des machines*, 5<sup>e</sup> série, t. XI, p. 66). — Yelner. Refroidissement artificiel des eaux de condensation (*Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, novembre 1884, p. 507. — *Österreichische Zeitschrift*, 1884).

Avec l'appareil Grangé <sup>(1)</sup>, le tirage naturel suffit à travers un château d'eau de quelques mètres de haut (fig. 759), dans lequel descend l'eau tiède sur un système de chicanes. Le liquide refroidi se dépouille des graisses à la partie inférieure, en traversant un lit de coke. Le condenseur est desservi par deux pompes, qui se répartissent avec plus de netteté les deux fonctions fondamentales de la pompe à air, destinée à évacuer à la fois l'eau et l'air. Une pompe à air proprement dite puise dans la partie supérieure, vers laquelle son action détermine un mouvement ascensionnel. Elle n'enlève que l'air, avec très peu d'eau. Une seconde pompe extrait l'eau dans la région inférieure. On obtient ainsi une circulation méthodique des fluides, et une répartition graduée des températures, de telle sorte que le condenseur, froid à la main à sa partie supérieure, atteint dans le bas la température de 60°.

**1236** — *Évaluation de l'eau de réfrigération.* — Nous pouvons facilement déterminer le rapport théorique de l'eau de réfrigération à celle qui résulte de la condensation de la vapeur <sup>(2)</sup>.

L'appareil étant envisagé dans un état de régime régulier, nous présenterons le raisonnement pour 1 kilogramme de la vapeur qui parvient en réalité au condenseur, en y comprenant, outre le fluide spécialement moteur, celui qui, par le jeu de l'influence des parois (p. 45), s'était momentanément déposé sous la forme de rosée liquide, pour se volatiliser de nouveau en reprenant dans le métal la chaleur qu'il y avait momentanément mise en dépôt.

Désignons par P le poids d'eau froide nécessaire pour en opérer la condensation, à la température  $\theta'$  qui règne dans cette enceinte. Le liquide possède, par unité de poids, la chaleur interne  $\mu_s$  au-dessus de celle qu'il renfermerait à la température zéro <sup>(3)</sup>. Le

<sup>(1)</sup> Hirsch. *Bulletin de la Société d'Encouragement*, 4<sup>e</sup> série, t. V, p. 555. — *Annales industrielles*, 18 août 1889, p. 194. — *Journal des usines à gaz*, 20 février 1889, p. 69.

<sup>(2)</sup> Dwelshauvers Dery. Théorie du condenseur. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 5<sup>e</sup> série, t. V, p. 225. — De Somer. Théorie du condenseur, d'après les expériences de Hirn. *Génie civil*, t. XVIII, p. 152. — Madamet. *Thermodynamique*, p. 149. — Bienaymé. *Les machines marines*, p. 270. — Zeuner. *Théorie mécanique de la chaleur*. Traduction Cazin et Aruthal, p. 580. — Callon. *Cours de machines*, t. II, p. 255.

<sup>(3)</sup> Voy. t. I, p. 775.

pois de l'ensemble  $P + 1$  contient donc la quantité de chaleur :

$$(P + 1) \mu_0.$$

C'est elle qui sort du condenseur avec cette eau. Nous devons donc évaluer à sa valeur la résultante des appoints que reçoit cette enceinte, sous diverses formes qu'il nous faut énumérer avec soin.

**1237** — Nous avons à distinguer à cet égard : 1° les actions de surface, 2° les actions de masse.

En ce qui concerne les actions de surface, on en peut indiquer deux : 1° la perte effectuée en raison de la conductibilité et du rayonnement de l'enveloppe du condenseur, laquelle peut être ici considérée comme tout à fait négligeable en pratique; 2° le transport de chaleur qui a été désigné par Hirn sous le nom de refroidissement au condenseur, et dont nous nous sommes longuement occupés ci-dessus (p. 53). Mais nous ne le mentionnons ici que pour mémoire, car c'est une action exercée par la surface du cylindre, et non pas du condenseur, et le poids de l'eau qui lui sert de véhicule vient d'être expressément compris dans celui de la vapeur à condenser. Dans des conditions défectueuses de marche, cette quantité peut devenir considérable. Mais nous nous attacherons de préférence, comme on le verra plus loin, au cas de la réalisation du desideratum théorique : la vapeur sèche en fin de détente (p. 50). Alors disparaît la revolatilisation qui est l'agent essentiel de ce transport de chaleur.

Quant aux actions du second genre, la masse à considérer arrive à la fois : 1° du cylindre moteur, 2° de la bache à eau froide. En outre, chacune de ces deux provenances introduit de l'énergie pour trois motifs distincts : 1° la chaleur interne déjà possédée par le corps (évaluée à partir de la même origine que ci-dessus); 2° la chaleur équivalente au travail de refoulement de la pression  $p'$  qui règne dans le condenseur; 3° le calorique correspondant à l'extinction de la force vive avec laquelle les fluides se sont précipités dans le condenseur, laquelle s'y perd par l'action du frottement et des tourbillonnements.

Envisageons d'abord les P kilogrammes d'eau froide. En appelant  $\theta''$  la température de la source à laquelle on les puise, nous aurons ce premier terme relatif à la chaleur interne :

$$P\mu_{\theta''}.$$

En second lieu, l'introduction de P litres, c'est-à-dire de  $\frac{P}{1000}$  mètres cubes, s'effectue malgré la pression antagoniste  $p'$  de l'atmosphère raréfiée, d'où la nécessité d'une fourniture de travail pour le refoulement de cette dernière. Elle s'y retrouvera en calories, avec la valeur :

$$\frac{1}{E} \cdot \frac{P}{1000} p'.$$

Il reste enfin la demi-force vive acquise pendant cette introduction, pour disparaître ensuite en frottements. Elle a été créée par le travail de l'excès de la pression atmosphérique  $p_a$  sur la tension intérieure  $p'$ ; et comme le volume engendré sous cette influence constante  $p_a - p'$  est  $\frac{P}{1000}$ , ce travail, numériquement égal à la demi-force vive en question, représente en calories le terme :

$$\frac{1}{E} \cdot \frac{P}{1000} (p_a - p').$$

L'ensemble de ces trois expressions nous donne par conséquent, pour l'eau froide :

$$P \left( \mu_{\theta''} + \frac{1}{E} \cdot \frac{1}{1000} p_a \right),$$

c'est-à-dire :

$$P \left( \mu_{\theta''} + \frac{10\,356}{424 \times 1000} \right),$$

ou enfin :

$$P(\mu_{\theta''} + 0,02451).$$

Envisageons d'autre part le kilogramme de vapeur détendue à la

température finale  $\theta$  <sup>(1)</sup>, que l'échappement met en communication avec le condenseur. On y peut distinguer un poids  $m$  de vapeur, associé avec la quantité  $1 - m$  d'eau liquide. Nous aurons par suite comme énergie calorifique interne :

$$\mu_{\theta} + m\rho_{\theta}.$$

En second lieu, ce corps doit refouler l'atmosphère raréfiée, de tension  $p'$ , pour y loger son propre volume  $mu_{\theta}$  (car on peut négliger le volume spécial au liquide). De là un travail qui a pour équivalent le nombre de calories :

$$\frac{1}{E} \cdot mu_{\theta} \cdot p'.$$

Quant à la force vive avec laquelle la vapeur se précipite dans l'enceinte, il n'y aurait pas lieu d'en tenir compte dans l'hypothèse de la détente complète, qui laisse la vapeur exactement à la pression du condenseur. Il ne se produirait en effet alors aucune tendance spontanée au mouvement, et celui-ci ne serait communiqué que par le retour du piston balayant le cylindre. Nous n'envisagerons donc ici ce terme que pour mémoire. L'ensemble nous donne dans ces conditions, pour le kilogramme de vapeur :

$$\mu_{\theta} + m\rho_{\theta} + \frac{mu_{\theta}p'}{E}.$$

**1238** — Nous pouvons maintenant poser l'équation :

$$(P + 1)\mu_{\theta'} = P(\mu_{\theta''} + 0,024) + \left( \mu_{\theta} + m\rho_{\theta} + \frac{mu_{\theta}p'}{E} \right),$$

d'où se dégage la valeur cherchée :

$$P = \frac{(\mu_{\theta} - \mu_{\theta'}) + m \left( \rho_{\theta} + \frac{p'u_{\theta}}{E} \right)}{(\mu_{\theta'} - \mu_{\theta''}) - 0,024}.$$

<sup>(1)</sup> Ce symbole représente, d'après l'échelle thermométrique usuelle, la température absolue  $t_2$  des théories que nous avons formulées dans la thermodynamique (t. I).

Mais il convient de la simplifier, en restant dans l'ordre d'approximation où nous nous trouvons déjà placés.

Pour cela nous supposons spécialement la vapeur sèche en fin de détente, c'est-à-dire  $m = 1$ . Confondons  $p'$  avec la pression finale de détente  $p_3$ . En fait, celle-ci représente la tension de vapeur qui correspond à une température  $\theta$  plus élevée que celle  $\theta'$  du condenseur. Mais en revanche la tension  $p'$  de cette enceinte est due tout à la fois à la vapeur et à l'air. On peut donc accepter cette assimilation. Dès lors le trinôme :

$$\left( \mu + \rho + \frac{pu}{E} \right)_{\theta}$$

se résume dans le symbole  $\lambda_0$  <sup>(1)</sup>, ce qui permet d'écrire simplement :

$$P = \frac{\lambda_0 - \theta'}{\theta' - \theta''}$$

en confondant encore la fonction  $\mu$  avec la température  $\theta$  <sup>(2)</sup>, et négligeant le terme insignifiant 0,024.

On voit par cette formule que la quantité d'eau froide croît avec la pression, à cause du terme  $\lambda$ , mais très lentement (n° 954). Elle augmente d'une manière bien plus sensible en vertu de l'abaissement de la température  $\theta'$  que l'on entreprend de réaliser dans le condenseur.

**1239** — Il n'y a pas lieu d'ailleurs de trop entreprendre sur ce point, et l'on gagnerait peu à chercher à maintenir l'état thermométrique du condenseur au-dessous de la limite généralement admise 50°. A la vérité l'on affaiblirait par là quelque peu la contre-pression sur le piston, mais comme on n'amène jamais, dans le cycle effectif, la tension du fluide jusqu'à celle du condenseur, on ne réaliserait pas tous les avantages de l'abaissement de cette dernière <sup>(3)</sup>.

<sup>(1)</sup> Voy. t. I, p. 775, 787.

<sup>(2)</sup> Voy. t. I, p. 775.

<sup>(3)</sup> Sauvage. *Annales des mines*, novembre-décembre 1890, p. 540.

Acceptons donc cette valeur  $\theta = 40^\circ$ , et pour la température de la source  $\theta'' = 10^\circ$ . Il vient alors :

$$P = \frac{\lambda - 40}{50}.$$

Or  $\lambda$  diffère peu de 620 dans ces conditions<sup>(1)</sup>. On a donc, tout calcul fait :

$$P = 19,5.$$

Nous pouvons par suite admettre, comme proportion théorique de l'eau froide, 20 fois le poids total de la vapeur. Toutefois il y a place ici pour une certaine majoration, en raison des divers effets que nous avons écartés de ce calcul. Dans la pratique, on emploie souvent 25, et même 50 fois le poids de la vapeur, pour les condenseurs à injection<sup>(1)</sup>.

### § 3

#### POMPE A AIR

**1240** — *Description.* — Dans les générateurs, la pression étant plus forte que celle de l'atmosphère, la vidange s'opère seule, mais l'alimentation exige une dépense de travail. Pour le condenseur, les conditions sont précisément inverses, la tension étant moindre qu'à l'extérieur. L'introduction de l'eau se fait alors d'elle-même ; mais son extraction nécessite une certaine production de travail par un engin spécial.

On l'appelle *pompe à air*, attendu qu'il s'agit, ainsi que nous l'avons déjà indiqué, d'enlever non seulement le liquide provenant à la fois de la condensation et de l'injection, mais en outre l'air qui se trouvait originairement dissous dans l'eau froide.

Pour ce double motif, cet appareil est beaucoup plus volumineux que la pompe alimentaire, puisqu'à la quantité que celle-ci

<sup>(1)</sup> Voy. t. I, p. 777.

a dû fournir à la chaudière, vient s'ajouter ici un poids 20 ou 30 fois plus grand d'eau froide, plus l'air dilaté aussi bien par la non-pression que par l'élévation de température, et plus encore un peu de vapeur. Afin de réduire ce volume, on emploie autant que possible, sans en faire cependant une règle, un appareil à double effet, dont le fonctionnement se trouve d'ailleurs mieux en rapport avec le double effet du moteur lui-même. Lorsqu'elle est au contraire à simple effet, cette pompe possède une capacité égale à  $\frac{1}{5}$  ou  $\frac{1}{6}$  de celle du cylindre moteur.

**1241** — La pompe à air est mue par la machine elle-même. Pour les moteurs à balancier qui sont lents, on prend la commande de la tige de pompe en un point à mouvement rectiligne du parallélogramme articulé (\*). Si la machine fait plus de 20 à 25 tours, il faut souvent établir dans la transmission un ralentissement, car on ne saurait mener vite des fluides. Une vitesse de 3 mètres à 3<sup>m</sup>,50 suffit à cet égard. Cependant on réussit à en activer l'allure par l'emploi de pistons plongeurs à extrémités effilées, et de clapets nombreux et légers.

La pompe à air est ordinairement placée dans une fosse, en contre-bas du moteur, afin de gagner de la place. On la dispose aussi *en tandem* sur la tige du piston moteur, lorsque l'allure de ce dernier est acceptable pour la pompe.

Dans les grands ateliers, où plusieurs moteurs fonctionnent d'une manière indépendante, on trouve souvent avantage à leur affecter un condenseur commun, dont on soustrait la manœuvre à leurs causes d'irrégularités individuelles, en faisant commander sa pompe par un moteur spécial. Cet organisme porte le nom de *machine condensante*, ou *condenseur séparé* (fig. 760).

**1242** — La pompe à air présente un *clapet de pied*, par lequel s'introduit l'eau du condenseur. Toutefois dans l'appareil Frikart, il n'y a pas de clapet d'aspiration. Le piston, qui a une épaisseur presque égale à la valeur de sa course, démasque des fentes placées

(\*) Haton de la Goupillière *Traité des mécanismes*, p. 197.



au milieu de la longueur des génératrices, et découvertes par suite vers la fin de la course. Elles donnent entrée tout à la fois à l'eau et à l'air.

Des *clapets de refoulement* servent pour l'évacuation dans la

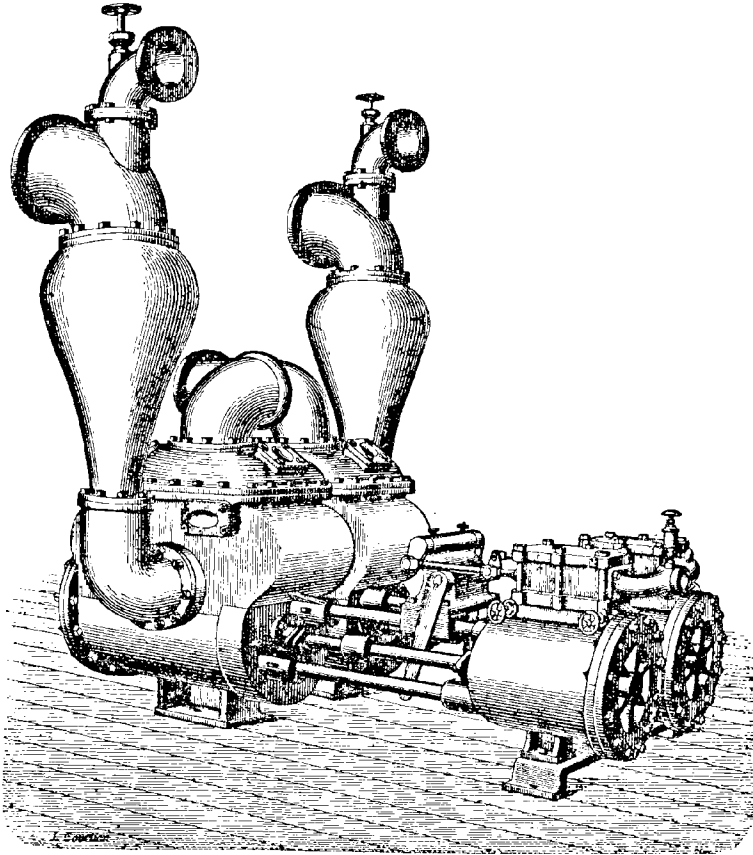


Fig. 760. — Condenseur indépendant Worthington (vue perspective).

*bâche à eau chaude*. Leur section totale peut atteindre celle du corps de pompe, ou se réduire jusqu'au tiers de cette valeur. On les fait en caoutchouc, de 15 millimètres d'épaisseur, battant sur des grillages de soutien. On emploie également de petits disques métalliques très légers, maintenus par de faibles ressorts.

Dans certains condenseurs<sup>(1)</sup>, on fait figurer une soupape de sûreté, ou *reniflard*, destinée à laisser rentrer l'air en comblant le vide, si celui-ci vient à s'exagérer d'une manière inquiétante, et à faire monter l'eau en menaçant de noyer le moteur. Un flotteur manœuvre alors la soupape en temps utile.

Dans la pompe De Quillacq, les clapets sont placés sous une glace qui en laisse voir le jeu. L'action de ces organes est ordinairement accompagnée de battements, attendu qu'ils ne se soulèvent pas dès le point mort comme pour les appareils hydrauliques, mais doivent auparavant, ainsi que dans les machines à fluides élastiques<sup>(2)</sup>, laisser préparer la tension.

Avec le condenseur Weiss<sup>(3)</sup>, la pompe n'extrait que l'air. L'eau sort d'elle-même à la partie inférieure, par un tube de 10 mètres de hauteur qui plonge dans une bêche, de manière à constituer un véritable baromètre à eau. La pompe à *air seul* extrait ce gaz du point le plus haut de l'appareil, où il se dégage avec son maximum de tension au sortir du liquide, dont l'admission se fait en ce point. Celui-ci descend sur un système de chicanes, pendant que la vapeur monte à sa rencontre. La pression de cette dernière décroît donc de bas en haut. Le refroidissement s'opère d'une manière méthodique, et par suite avec le moins possible d'eau.

**1243** — *Calcul des dimensions.* — On peut admettre que ce liquide dissout dans les conditions ordinaires  $\frac{1}{15}$  de son volume d'air. Pour chaque kilogramme de vapeur, on introduit dès lors dans le condenseur  $\frac{P}{15}$  litres, ou  $\frac{1}{1000} \cdot \frac{P}{15}$  mètres cubes d'air atmosphérique (en conservant au symbole P sa signification précédente). Nous raisonnerons comme si cette quantité se dégorgeait toute entière dans l'enceinte, et devait être ensuite évacuée par la pompe.

(1) BRASSEUR, BERGER-ANDRÉ, etc.

(2) Voy. t. I, p. 510.

(3) *Annales des mines*, novembre-décembre 1890, p. 544. — *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure*, 1888, p. 9; 1889, p. 768.

Le gaz, entré à 10°, rencontre une température de 40°. Il se dilate donc d'après le rapport des températures absolues, et son volume devient :

$$(1) \quad \frac{1}{1000} \cdot \frac{P}{45} \cdot \frac{40 + 273}{10 + 273} = 0^{\text{m}3},000\,075\,P.$$

Une seconde dilatation est provoquée par le passage de la pression atmosphérique à une tension moindre, qu'il nous faut d'abord évaluer. D'après la loi de Dalton, les vapeurs acquièrent en présence des gaz la même tension que dans le vide à la même température. Celle-ci étant de 40°, la tension correspondante est de 747 kilogrammes par mètre carré, d'après les tables de Regnault. On sait en second lieu que la force élastique du mélange est égale à la somme de celles qu'auraient séparément le gaz et la vapeur, si chacun d'eux occupait seul l'espace en question. Admettons comme résultat effectif le *vide au dixième*, c'est-à-dire la pression  $p' = 1033$ . La différence nous donnera pour l'air :

$$1033 - 747 = 286^{\text{kg}}.$$

Il s'ensuit comme rapport de dilatation, d'après la loi de Mariotte :

$$\frac{10\,335}{286} = 36,12;$$

ce qui porte le volume à :

$$36,12 \times 0,000\,075\,P = 0,0026\,P.$$

En adjoignant cette capacité à celle de l'eau 0,001 (P + 1), il vient pour le total à évacuer :

$$0,0056\,P + 0,001,$$

c'est-à-dire sensiblement le quadruple du volume d'eau froide introduit<sup>(1)</sup>.

(1) Il y a lieu dans la réalité de tenir compte de certains effets accessoires. Armen-

Si nous admettons la valeur  $P = 30$  (p. 100), le résultat est de 109 litres par kilogramme de vapeur en roulement.

**1244** — Désignons actuellement par  $x$  le rapport entre les dimensions du corps de la pompe à air et celles du cylindre moteur, en supposant ces deux capacités géométriquement semblables pour fixer les idées, et les deux fonctionnements à double effet. Le rapport des volumes sera  $x^3$ . Dans chaque cas on connaîtra la pression en fin de détente, et l'on terminera exactement le calcul que nous ne pouvons achever ici, comme exemple, qu'en faisant une hypothèse spéciale.

Nous adopterons celle de la détente complète, qui nous donnera évidemment un minimum sensiblement inférieur à la réalité. La tension finale de la vapeur étant alors égale à celle du condenseur, qui est d'un dixième d'atmosphère, ou de 1033 kilogrammètres, son volume spécifique <sup>(1)</sup> a pour valeur 14<sup>m5</sup>,900. Nous poserons donc l'égalité :

$$0,109 = x^3 \times 14,900,$$

$$x = \sqrt[3]{\frac{0,109}{14,900}} = 0,194.$$

Si l'on supposait le simple effet, ce résultat deviendrait :

$$x \sqrt[3]{2} = 0,194 \times 1,260 = 0,254.$$

**1245** — *Calcul du travail.* — Le poids total d'eau à extraire par kilogramme de vapeur en roulement est  $P + 1$ , et son volume  $\frac{P + 1}{1000}$ . On le prend à une pression égale à  $\frac{1}{10}$  d'atmosphère, et on le rejette dans l'atmosphère elle-même. Le travail nécessaire a par conséquent pour expression :

$$0,9 \times 10\,356 \times \frac{P + 1}{1\,000} = 9^{\text{kgm}},502 (P + 1).$$

gaud conseille (*Traité des machines à vapeur*, t. II, p. 520) de donner au volume *utilement engendré* par la pompe à air une valeur égale à 8 fois celui de l'eau froide.

<sup>(1)</sup> Voy. t. I, p. 777.

Quant à l'air, qui se trouve mélangé avec de la vapeur à la tension de 747 kilogrammes, ses pressions extrêmes sont 10 336 — 747 et 1033 — 747. Leur rapport a pour valeur :

$$\frac{10\ 336 - 747}{1\ 033 - 747} = \frac{9\ 589}{286}.$$

Pour évaluer le travail nécessaire à cette compression, il est nécessaire de fixer ici par une hypothèse le mode d'opération. Nous le supposons isotherme. Dès lors il nous faudra : 1° prendre le logarithme *népérien* de ce rapport <sup>(1)</sup>, qui revient à :

$$2,5026 \log \frac{9\ 589}{286} = 3,508;$$

2° le multiplier par le produit de la pression et du volume correspondant. Si nous employons pour ce calcul la pression atmosphérique 10 336, le volume qu'il y aura lieu de lui associer sera celui qui s'est dégagé de la dissolution sans changement de pression, mais en tenant compte du changement de température, tel en un mot que nous l'avons évalué ci-dessus (1) :

$$0,000\ 075\ P.$$

L'expression du travail devient par là :

$$3,508 \times 10\ 336 \times 0,000\ 075\ P = 2,647\ P.$$

En réunissant ces deux termes, on obtient :

$$9,302 (P + 1) + 2,647\ P = 11,949\ P + 9,302.$$

Si nous rendons à P sa valeur 30 (p. 875), il viendra définitivement :

$$367^{\text{kgm}}, 77.$$

<sup>(1)</sup> Voy. t. I, p. 411.

On ne doit toutefois voir là qu'un résultat théorique, et il y a encore lieu de tenir compte du rendement de la pompe. En admettant qu'il soit des trois quarts, nous devons majorer le chiffre précédent d'un tiers de sa valeur, ce qui le porte à :

$$490^{\text{kgm}}.$$

Examinons l'influence qu'il exercera sur le rendement final. Nous supposons pour cela que le moteur fonctionne en brûlant 1 kilogramme de charbon par cheval-heure, c'est-à-dire pour une production de  $75 \times 60 \times 60 = 270\ 000$  kilogrammètres. Admettons en même temps qu'un kilogramme de combustible volatilise 6 kilogrammes d'eau. Chaque unité de poids de vapeur fournira dans ces conditions :

$$\frac{270\ 000}{6\ n} = \frac{45\ 000}{n}.$$

Par conséquent la perte proportionnelle due au travail de la pompe à air sera :

$$\frac{490\ n}{45\ 000} = 0,011\ n.$$

Avec un moteur soigné, consommant 2 kilogrammes de charbon par cheval-heure, on n'aurait donc à sacrifier qu'environ 2 % de l'effet utile pour se procurer les avantages du condenseur, qui se traduisent par un chiffre tout autrement important.

#### § 4

### CONDENSEUR DES MACHINES DE CORNOUAILLES

**1246** — *Condenseur Létoret.* — Lorsqu'il s'agit spécialement de la machine de Cornouailles (p. 351), on dispose pour la condensation d'un intervalle de temps nettement appréciable, dû à l'inter-

mittence du moteur. Divers dispositifs (\*) ont été introduits en vue de supprimer, dans ces conditions spéciales, la pompe à air.

Avec le *condenseur Létoret* (fig. 761) la vapeur d'équilibre arrive seule, et sans injection d'eau froide. On a réglé la détente de manière à laisser au fluide assez d'énergie pour donner une chasse, de manière à expulser d'un seul coup la plus grande partie de l'eau et de l'air qui sont restés depuis la course précédente. Dès que la pression tombe au-dessous d'une atmosphère, la soupape d'évacuation se referme, et l'on ouvre celle d'injection. On a évidemment alors beaucoup moins d'eau à fournir que dans les conditions ordinaires, pour achever la condensation jusqu'au même degré de vide, puisqu'une grande partie de la vapeur est sortie seule.

Il est clair qu'il résulte de la suppression du mécanisme de la pompe une grande simplification, ainsi que l'économie d'une certaine quantité de travail parasite. On n'a d'ailleurs pas la prétention, bien entendu, de supprimer le travail théoriquement nécessaire pour l'évacuation du contenu d'une enceinte dans une autre à pression supérieure. Celui-ci se retrouve dans le reliquat d'énergie qu'on laisse en fin de course à la vapeur motrice. Mais cette portion du travail n'en est pas moins diminuée de son côté, puisque la quantité d'eau injectée se trouve elle-même réduite.

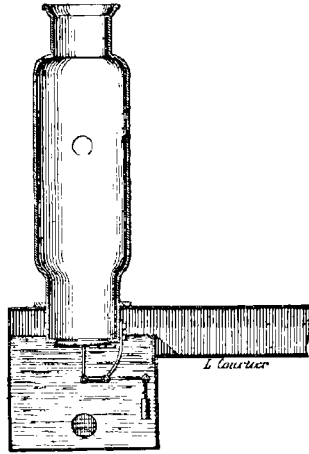


Fig. 761. — Condenseur Létoret.  
(Coupe verticale.)

**1247** — *Condenseur Devillaine*. — M. Devillaine a fait un pas de plus dans cette voie (fig. 762). Il s'agissait de pompes d'exhaure de mines mues par une machine de Cornouailles. Le peu de profon-

(\*) Condenseurs sans pompe à air : BROSSARD. *Annales des mines*, juillet-août 1879, p. 179. — HOLLMANN. Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction Richard, p. 755. — SAXBY. *Engineering*, 1875, p. 452.

deur du puits permettait d'employer l'eau d'épuisement à la condensation de la vapeur motrice.

Au lieu d'élever ce liquide seulement jusqu'au niveau du sol,

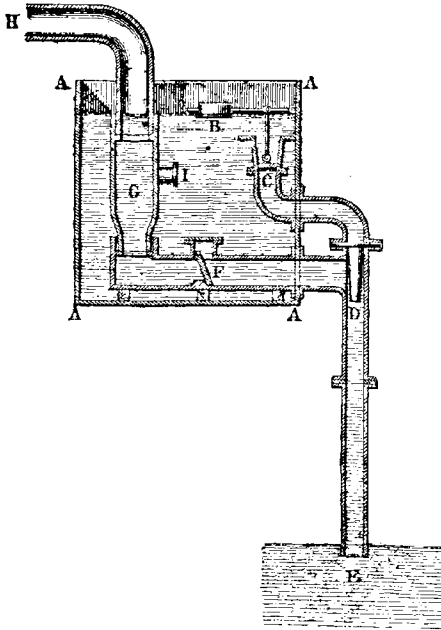


Fig. 762. — Condenseur Devillaine.  
(Coupe verticale schématique.)

on le fit monter à un niveau supérieur, à l'intérieur d'une bûche A, d'où un flotteur B, un clapet C, et une tuyère D le laissaient retomber dans une conduite DE latérale au condenseur. Ce dernier communiquait avec ce tuyau par des sifflets étroits, analogues à ceux des trompes (<sup>1</sup>). De là une aspiration aidant à l'évacuation, à travers le clapet F, du condenseur G. Ce dernier recevait la vapeur par le tuyau H, et l'eau froide par l'orifice I.

Encore une fois, un tel appoint ne saurait se créer sans travail. On

peut même affirmer que ce mode spécial d'utilisation, à l'aide d'une trompe, du travail de surélévation effectué par le moteur est loin d'être le plus fructueux qui se puisse concevoir. Mais il s'agissait avant tout, dans ce cas particulier, de réaliser la simplicité. L'économie de quelques charbons de qualités invendables ne passant alors qu'au second plan.

(<sup>1</sup>) Voy. t. I, p. 91.



## § 5

## ÉJECTEURS

**1248** — L'eau d'injection poussée par la pression atmosphérique  $p_a$  dans une enceinte soumise à la tension  $p'$  s'y précipite avec la vitesse (<sup>1</sup>) :

$$v = \sqrt{2g \frac{p_a - p'}{\gamma}}$$

c'est-à-dire, en supposant un degré de vide au dixième :

$$v = \sqrt{2 \times 9,81 \cdot \frac{10}{100} \frac{10\,556}{1\,000}} = 13^m,50;$$

résultat considérable. La force vive correspondante reste sans aucun effet utile. Tout au contraire elle devient nuisible, puisqu'elle ne s'emploie qu'à développer de la chaleur dans une enceinte où l'on s'applique à entretenir le froid. Ensuite on va demander d'autre part au moteur une partie de son action, pour remettre en état de sortir ce liquide dont on a brisé l'impulsion.

Ce sont là des conditions d'application d'autant plus fâcheuses, que théoriquement cette énergie serait précisément suffisante pour faire sortir l'eau d'injection (<sup>2</sup>), qui forme de beaucoup la partie la plus importante de la masse à évacuer. Quant à l'appoint nécessaire pour ce qui concerne l'eau de condensation, l'air et les pertes accessoires, on en trouverait l'équivalent en conservant une différence suffisante entre la tension en fin de détente et la pression barométrique.

La difficulté consiste en ce que, au contraire du travail potentiel

(<sup>1</sup>) Voy. t. I, p. 47.

(<sup>2</sup>) Comme un pendule qui trouve, pendant la seconde moitié de son oscillation, le moyen de gravir la pente et de remonter à son niveau initial, dans la force vive acquise pendant sa descente sous l'action de la force qui, alors motrice, est depuis devenue résistante.

et de la chaleur, la force vive ne peut attendre pour son utilisation<sup>(1)</sup>. On ne saurait la mettre en œuvre dans le cas actuel qu'en rendant continue l'opération<sup>(2)</sup>, essentiellement alternative, qui consiste à introduire de l'eau, à la laisser reposer, et à entreprendre seulement alors de la faire sortir.

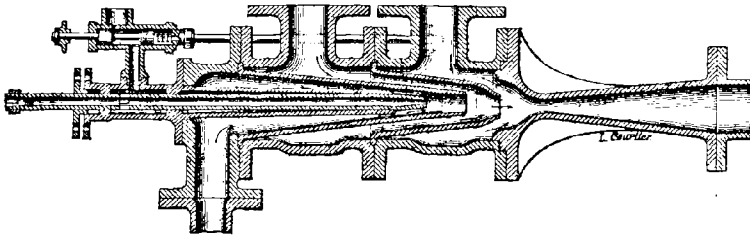


Fig. 765. — Éjecteur Morton (coupe verticale).

Dans cette nouvelle conception, le liquide ne fera plus que *traverser* l'enceinte réfrigérante, au lieu d'y *séjourner*. La force vive que lui a communiquée son entrée sous l'impulsion de la pression atmosphérique est employée du même coup à effectuer sa sortie malgré cette pression. On a soin seulement, ainsi qu'il a été dit, de limiter assez la détente pour laisser à la vapeur la puissance d'assu-

(1) L'énergie potentielle se conserve indéfiniment. Si, par la pensée, on laissait, de nos jours, redescendre dans un appareil récepteur les blocs qui couronnent le faite des pyramides d'Égypte, on recueillerait aujourd'hui le travail développé par les fellahs contemporains des Pharaons; et leurs descendants à la centième génération pourraient, sans effort personnel, accomplir une besogne industrielle dont le re-sort effectif ne serait autre que la peine prise par leurs ancêtres.

L'énergie calorifique peut également, mais sans aucune comparaison avec la forme précédente, se conserver pendant quelque temps, et ne se dissipe que peu à peu par le rayonnement et la conductibilité.

L'énergie actuelle, ou force vive, ne peut se conserver que si l'on accompagne le long de sa trajectoire, comme dans une rivière, la masse qui en est actuellement dépositaire. Lorsque celle-ci est, comme pour le cas actuel, un liquide enfermé dans une enceinte, la force vive s'use presque immédiatement en divers frottements et tourbillonnements, et sa perte est définitive.

(2) On en dénaturant cette force vive de manière à la faire repasser sous la forme d'énergie potentielle, qui permet alors d'attendre pour la remettre en œuvre. On a en effet proposé d'installer le condenseur en contre-haut. Alors le travail de l'atmosphère se trouve employé autant que possible à faire gravir au liquide cette hauteur. L'équivalent se retrouve ultérieurement sous forme de succion, comme dans le cas du condenseur Devillaine (n° 1247), quand on laisse les matières redescendre au niveau inférieur.

rer la réussite complète de l'opération. Cet artifice employé dans les *éjecteurs* actuels <sup>(1)</sup> est en effet plus économique que l'intervention d'un jet de vapeur spécial, comme on l'avait fait à l'origine (fig. 763) pour l'éjecteur Morton <sup>(2)</sup>.

A la vérité l'on ne peut voir, dans tout ce qui précède, qu'un enchaînement logique d'idées. Il restait à trouver l'organe qui en assurerait effectivement la réalisation <sup>(3)</sup>. Cet organe s'est manifesté de lui-même par la belle découverte de Giffard (p. 718), qui permet avec tant de netteté de faire franchir à une veine liquide l'obstacle d'un clapet, derrière lequel se trouve une pression supérieure. C'est en effet à l'aide de systèmes analogues d'ajutages convergents-divergents, dont l'expérience a révélé les meilleures dispositions, que l'on a construit les nouveaux condenseurs-éjecteurs (fig. 764).

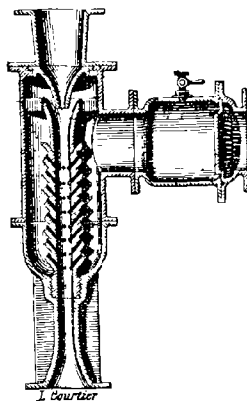


Fig. 764. — Éjecteur Kœrting.  
(Coupe verticale.)

<sup>(1)</sup> Éjecteurs : BOHLER. *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 564. — BROSSARD (*Revue industrielle*, 1880, p. 261. — *Portefeuille économique des machines*, 1880, p. 120). — KÆRTING (*Bulletin de la Société d'encouragement*, 5<sup>e</sup> série, t. II, p. 550; 4<sup>e</sup>. IV, 451. — *Les Mondes*, t. XLIII, p. 612. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXXVIII, p. 198. — *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, décembre 1875, janvier 1876, février 1877, avril 1878). — MAC CARTER (*Institution of mechanical Engineers*, 1876. — *The Engineer*, 1876, p. 110).

<sup>(2)</sup> *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1870, p. 546. — *Annales des mines*, 6<sup>e</sup> série, t. XV, p. 85. — *Comptes rendus mensuels des séances de la Société de l'industrie minérale de Saint-Étienne*, mai 1877. — HIRSCH. *Rapport sur l'Exposition de 1878*, p. 127. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXV-XXVI, p. 415. — RANKINE. *Transactions of the Institution of Engineers in Scotland*, 1869. — *The Engineer*, 5 octobre 1885. — *Engineering*, décembre 1885, p. 577. — *American machinist*, 4 juin 1881, p. 5.

<sup>(3)</sup> Sabathier. Suppression de la pompe à air. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, février 1885. — *Revue technique de l'Exposition de 1889*, 6<sup>e</sup> partie, t. I, p. 564. — A new condenser. *American machinist*, 22 janvier 1881, p. 5.



ingénieux appareil qui permet d'étudier en détail les diverses phases de l'action de la vapeur sur le piston, en fournissant une représentation graphique de ce fonctionnement.

Il se compose (fig. 765) d'un petit corps de pompe A, que l'on visse sur une tubulure ménagée dans ce but en un point du cylindre (\*). Un robinet B permet d'y admettre la vapeur qui remplit ce dernier. On reçoit sa pression sur un petit piston, dont la face supérieure est toujours à l'air libre. Sa tige C sort au dehors; elle est repoussée par un ressort D, et porte un bras rectangulaire, qui parcourt une fenêtre longitudinale pratiquée dans la paroi. Cette potence conduit le style chargé de tracer la courbe, et une arti-

Congrès, p. 256, 262, 269, 271; Quatorzième Congrès, p. 185, 189, 194, 202, 205. — Tresca. Essais de machines à vapeur. *Annales du Conservatoire*, machines Gache, 28 juin 1865; Benjamin Normand, 15 octobre 1865; Leclercq, 15 octobre 1864; Balian, 50 janvier 1865; Lédiard et Joly, 18 juillet 1865; Aveling et Porter, 15 janvier 1868; Allen, 26 janvier 1868. — Isambert. Essai d'une machine à triple expansion. *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, mars 1892, p. 585.

Osborne Reynolds. On the Theory of the indicator and the errors in indicator diagrams. *Institution of civil Engineers*, 19 mai 1885. — Burgh. *The indicator diagram practically considered*. — The steam Engine indicator. Hanging the reducing levers. *Journal of Franklin Institute*, mai 1884. — Improvement in steam Engine indicator springs. *American machinist*, 19 novembre 1881. — Graham. *An elementary treatise on steam and the use of the indicator*, 1877, in-8°. — Hemenway. The indicator diagrams. *American machinist*, 16 février, 5, 19, 26 juillet, 9 août, 29 novembre 1884; 14, 28 février 1885. — Application of the indicator to locomotives (*The railroad Gazette*, 6 juillet 1883, p. 441. — *American Journal of Railway Appliances*, 1<sup>er</sup> avril 1885, p. 152). — Grunslaw. Abstract of paper on the comparison of indicator Rigs. *Journal of Franklin Institute*, juillet 1885. — Thurston. *A handbook of Engine and Boiler trials and of the indicator and Prony break*. New-York, 1890, in-8°. — Standard. Method of steam Boiler Trials. *Van Nostrand's Engineering Magazine*, 1885, p. 211, 508. — Copeland. On the comparative economy of condensing and non condensing engines. *American machinist*, 30 décembre 1882, p. 6. — Isherwood. On experimental inquiry into the relative economic efficiencies of a Corliss condensing and a Corliss non condensing Engine. *Journal of Franklin Institute*, septembre 1881, p. 170.

Bauschinger. Indicator Versuche in Lokomotiven. *Civil Ingenieur*, Band. 13, 14. — Moritz Ritter von Pichler. *L'indicateur du travail et du fonctionnement des machines à piston, et son diagramme*. Traduction Seguela, in-8°. — Riedler. Expériences à l'indicateur sur les machines d'épuisement. Munich, in-folio, 1882. — Zeuner. Calorimétrische Untersuchungen der Dampfmaschinen. *Civil ingenieur*, 1881, 1882. — Schröter. Calorimetrische Untersuchungen einer Compoundmaschine. *Ibidem*, 1881. — Lüders. Zur Theorie des Indicator diagrammes. *Ibidem*, 1881. — Fliegner (Bestimmung der Hauptpunkte eines Indicator diagrammes. *Schweizerische Bauzeitung*, 1882. — Untersuchung einiger Indicator diagramme. *Ibidem*, 1888).

(\*) Quand les communications sont prises de plus loin, elles doivent être établies à l'aide d'une section suffisante pour que la pression se transmette sans pertes sensibles.

culation permet de l'appliquer contre le papier ou de l'en écarter à volonté.

On voit dès lors que les ordonnées, représentées par les valeurs variables du refoulement du ressort, sont proportionnelles à sa tension, c'est-à-dire à l'effort qui lui fait équilibre, ou enfin à la pression par unité de surface.

La feuille destinée à recevoir le tracé est appliquée sur un cylindre F, à l'aide de deux pinces G, G' qui font ressort pour l'y maintenir. Une ficelle II détermine, par sa traction tangentielle, le mouvement alternatif de rotation de ce rouleau autour de son axe. Il s'ensuit un déroulement en abscisses, que l'on peut considérer comme variant en raison du déplacement du piston moteur. En effet, cette cordelette s'attache, sinon directement à la tige de ce dernier qui éprouverait de trop grands déplacements, du moins en un point du balancier, ou de toute autre manière qui permette une réduction proportionnelle. Un ressort renfermé dans le ba-

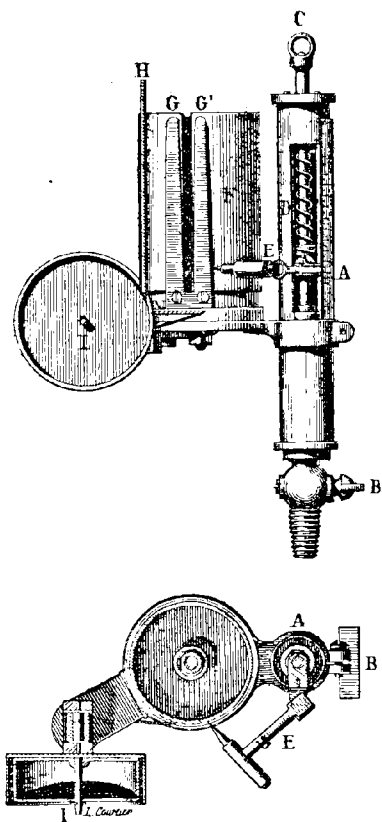


Fig. 765 et 766. — Indicateur de Watt.  
(Plan et élévation.)

rillet I ramène le système en sens contraire, pendant la contre-course du piston-moteur qui cesse de tendre la ficelle.

Il suit de ces explications que l'aire élémentaire du diagramme représente, à une certaine échelle, le produit de la force par l'élément de chemin que décrit son point d'application, en un mot la différentielle du travail. La branche supérieure de la courbe fermée

donne par suite la mesure du travail moteur durant la course directe : la branche inférieure fournit celle du travail résistant qui s'oppose à la course rétrograde ; et enfin l'aire du noyau central représente la différence de ces deux quantités, c'est-à-dire le travail effectivement recueilli par le piston dans une course simple. On l'appelle le *travail indiqué* <sup>(1)</sup> ; on l'exprime en *chevaux indiqués*.

Ces principes très simples prêtent le flanc à plusieurs objections, qui ont donné carrière à la sagacité des inventeurs <sup>(2)</sup>. Nous signalerons les principaux points sur lesquels ont porté les perfectionnements :

(1) Par analogie avec le mot *indicateur*. On distingue, d'autre part, le *travail-frein* et les *chevaux-frein*, mesurés directement au frein de Prony sur l'arbre de la machine. La différence représente la perte dynamique subie dans les organes du moteur à vapeur.

(2) Indicateurs : ASHTON et STOREY (Habets. *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXXV, p. 25. — *Scientific american supplement*, 13 février 1856 p. 8430. — BACHELDER. *La lumière électrique*, 13 février 1892, p. 510. — BOYE. *Ibidem*, 29 novembre 1884, p. 535. — BROWN (*Mechanical Progress*, avril-mai 1890. — *Sheffield Society of Engineers*, 13 mars 1890). — CASARELLI et POTTER. *La lumière électrique*, 22 novembre 1884, p. 290. — CROSBY (*Revue industrielle*, 30 juillet 1884. — *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 15 mai 1890, p. 266. — *Neuvième Congrès des Ingénieurs en chef des Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur*, p. 120). — DABSE. *La lumière électrique*, 22 novembre 1884, p. 292. — DUVERGIER. *Congrès de l'Association française pour l'avancement des sciences*, Le Havre, 1877, p. 219. — ELLIOTT. Von Pichler. *L'indicateur du travail*, etc. Traduction Seguella, p. 7. — PAUL GARNIER. Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. III, p. 256. — HAMBRUCK. *La lumière électrique*, 6 décembre 1884, p. 366. — HINE et ROBERTSON (fig. 768). *The Engineering and mining Journal*, 2 août 1890, p. 122. — HOPKINSON. *La lumière électrique*, 22 novembre 1884, p. 286. — KENIG. *Ibidem*, 29 novembre 1884, p. 552. — KRAFT. Von Pichler. *L'indicateur du travail*, etc. Traduction Séguella, p. 7. — LEA. Buchetti. *Guide pour l'essai des machines*, p. 31. — LEFEBVRE. *Revue industrielle*, 9 août 1890. — MAC-JONES. *La lumière électrique*, 13 février 1892, p. 504. — MAC-NAUGHT. *Ibidem*, 23 novembre 1884. — MALLET. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXXXII, p. 1351. — MARTIN. Buchetti. *Guide pour l'essai des machines*, p. 10. — MINNE. *Engineering*, 2 août 1889, p. 158. — PIMBLEY. *La lumière électrique*, 6 décembre 1884, p. 566. — PRUSSMANN. *Ibidem*, p. 565. — RICHARDSON. Buchetti. *Guide pour l'essai des machines*, p. 20. — RIG (*American machinist*, 1<sup>er</sup> avril 1882, p. 2. — *American journal of railway appliances*, 15 novembre 1884, p. 260). — ROSENKRANTZ. Buchetti. *Guide pour l'essai des machines*, p. 15. — SCHAEFFER et BUDENBERG. *La lumière électrique*, décembre 1884, p. 528. — SMITH. *Ibidem*, 22 novembre 1884, p. 290. — STANEK. *Revue industrielle*, 1880, p. 215. — STORES. Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction Richard, p. 585. — SWEET. *La lumière électrique*, 22 novembre 1884, p. 291. — TABOR. *Engineering*, 7 juin 1889. — THOMPSON. *La lumière électrique*, 22 novembre 1884, p. 289. — VERNON BOYS. *Revue industrielle*, 5 décembre 1883. — WILLIAMS. *Ibidem*, 15 août 1885, p. 521.

**1250** — *Indicateur Clair*. — On a été bientôt frappé de dissemblances très sensibles que présentaient divers diagrammes tirés avec l'indicateur de Watt dans des courses successives. Quand on laissait le crayon parcourir plusieurs fois le profil, au lieu de repasser exactement dans le même tracé, il suivait quelquefois des routes voisines, et l'ensemble aboutissait à une sorte de brouillage d'une certaine épaisseur, au lieu d'un trait fin. On en concluait (à tort, comme nous le verrons) que la machine à vapeur manquait de constance, et que ses diverses courses n'étaient pas identiques entre elles. Il semblait dès lors qu'il y eût utilité à les détacher les unes des autres, de manière à en obtenir des représentations graphiques distinctes et consécutives.

Dans l'appareil de Clair <sup>(1)</sup>, qui a été conçu et ingénieusement disposé pour cet ordre d'idées, on substitue au mouvement d'allée et venue d'un carré de papier le déplacement continu d'une bande. Celle-ci se déroule d'un cylindre, pour se réenrouler sur un second, en passant tangentiellement devant un rouleau intermédiaire. Ce dernier sert de point d'appui pour la pointe traçante, dont le mouvement vertical s'opère le long de la génératrice de contact. La partie inférieure du diagramme doit alors se retourner sur elle-même pour cheminer, non plus en retour, mais en prolongement de la branche supérieure, jusqu'à ce qu'elle se soude plus loin au graphique d'une course nouvelle, qui fait suite au précédent.

Pour obtenir ce résultat, on dispose sur l'axe oscillant des saillies représentant ce qui resterait d'une vis à filet triangulaire, si on la faisait tarauder par une vis de sens contraire, identique comme dimensions, et montée sur le même noyau. On fait engrener cette pièce assez originale avec deux portions de tore, filetées respectivement comme les écrous de chacune de ces vis.

Chaque oscillation de l'axe imprime à ces roues des rotations contraires, qui changent de sens l'une et l'autre en même temps que l'axe. Ces organes actionnent l'axe de l'appareil à bande, par l'intermédiaire de deux encliquetages Dobo <sup>(2)</sup> disposés en même sens. Par là elles n'agissent sur cet axe que dans un même sens,

<sup>(1)</sup> Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 350.

<sup>(2)</sup> Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 384.



et de plus il y en a toujours une, et une seule, qui transmet le mouvement.

**1251** — Cette tentative devait être mentionnée ici pour son ingéniosité. Cependant elle était condamnée à ne pas se répandre, parce qu'elle reposait sur une appréciation erronée de la difficulté.

L'on n'a pas tardé, en effet, à reconnaître que les inégalités que l'on s'attachait avec tant de soin à mettre en lumière, constituaient de véritables perturbations parasites, dues à une cause tout à fait étrangère; et que l'on devait au contraire s'attacher avec le même soin à les faire disparaître.

Cette influence est celle du *lancé* du ressort, c'est-à-dire la substitution de son état dynamique aux conditions statiques que supposent les raisonnements précédents, pour que sa forme géométrique puisse à chaque instant servir de mesure à la pression de la vapeur. Tout au contraire, dans la rapidité de l'allure, le ressort prend des mouvements désordonnés qui lui font dépasser le but dans les deux sens, et greffer, sur son mouvement général, diverses petites vibrations qui viennent en altérer la continuité et en fausser l'interprétation.

Il s'agissait donc de débarrasser de cette influence les indications de l'appareil, en commençant par lui rendre son ancien fonctionnement à mouvement alternatif. C'est, en conséquence, de ce côté que se sont portés les efforts des novateurs.

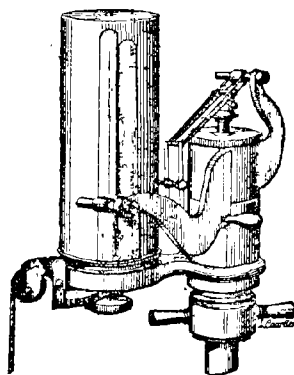


Fig. 767. — Indicateur Richard. (Vue perspective).

**1252** — *Indicateur Richard.* —

L'indicateur Richard (\*) est l'un des modèles les plus répandus dans

(\*) Porter. *A Treatise on the Richard's steam engine indicator*, London, in-8°. — *La lumière électrique*, t. XIV, p. 286, 327, 365, 406. — Buchetti. *Guide de l'essai des machines à vapeur*, p. 7. — Ledieu. *Nouvelles machines marines*, t. III, p. 261. — *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, t. XXV-XXVI, p. 168.

la pratique (fig. 767). L'auteur s'est attaché à mettre son appareil en état de résister aux causes de lancé. Pour cela il emploie un ressort relativement dur. Mais comme il en résulte que les déformations restent très petites, il amplifie ces dernières au moyen d'un appareil analogue au pantographe (4). Le piston fonctionne librement, mais avec un faible jeu. L'influence du frottement s'en trouve d'ailleurs d'autant plus atténuée. Une enveloppe préserve

le petit cylindre des chocs et du refroidissement, en même temps qu'elle le rend, pendant les expériences, plus maniable malgré la chaleur.

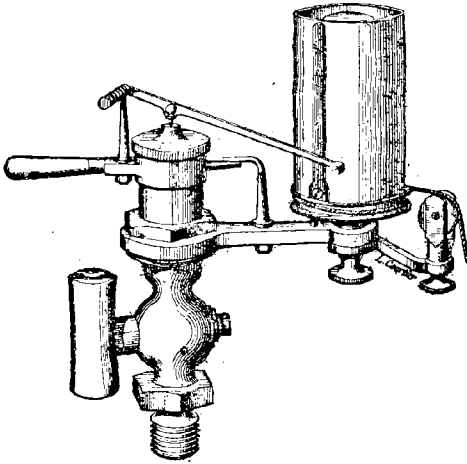


Fig. 768. — Indicateur Hine et Robertson (vue perspective).

**1253** — *Indicateur Martin-Garnier.* — M. Martin-Garnier s'est placé au point de vue inverse, en cherchant à diminuer les causes mêmes du lancé. L'efficacité du moyen employé à cet effet a toutefois été révoquée en doute (2).

Quoi qu'il en soit, au lieu de faire arriver directement la vapeur sous le piston, l'auteur l'introduit dans une chambre qui en est séparée par une soupape. Le choc du fluide se trouve ainsi amorti. Un purgeur permet d'évacuer l'eau qui peut se former dans cette capacité au-dessous du clapet. Le ressort de rappel, au lieu d'être adapté au tambour, est fixé à un pignon hélicoïdal engrenant avec ce dernier. En variant le diamètre de la poulie sur laquelle s'enroule la corde, on obtient un réducteur arbitraire de courses, qui permet de mettre l'appareil en rapport avec l'amplitude des divers moteurs.

(4) Haton de la Goupillière. *Traité des mécanismes*, p. 198.

(2) Buchetti. *Guide de l'essai des machines à vapeur*, p. 55.

**1254** — *Indicateur Marcel Deprez.* — Une solution absolument nette a été indiquée par M. Marcel Deprez pour écarter les effets du lancé (\*).

Dans ce but, l'inventeur ne laisse tracer, dans toute l'étendue d'une course du moteur, qu'un simple élément de la courbe (un seul point, en quelque sorte), et prend pour cela le ressort à l'état

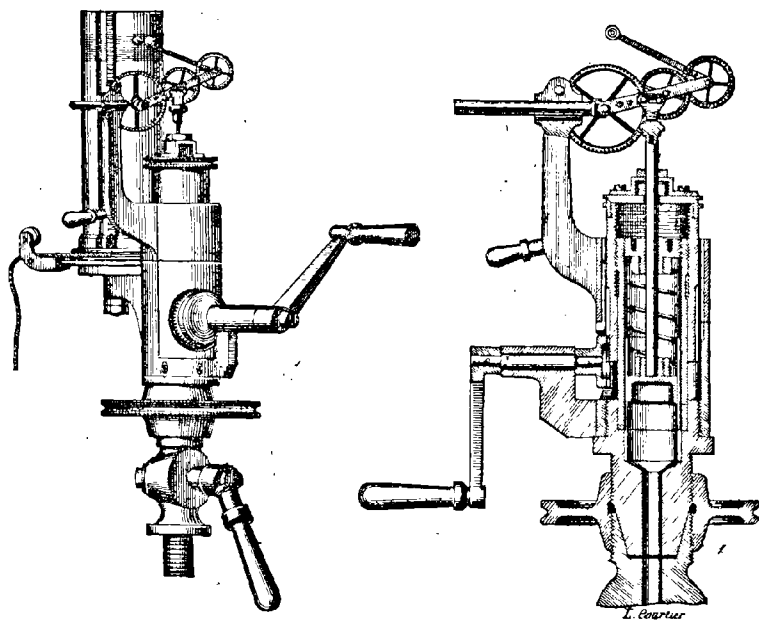


Fig. 769 et 770. — Indicateur Marcel Deprez (élévation et coupe).

de repos. Seulement on réitère l'opération, en demandant aux diverses courses successives des éléments consécutifs dont l'ensemble constitue le tracé intégral, obtenu ainsi à l'abri de toute influence dynamique.

Le cylindre A (fig. 769, 770, 774) se visse sur la tubulure du cylindre. Il est lui-même fileté à son extérieur, et un chapeau B

(\* ) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LXXIII, p. 654; t. LXXXIX, p. 861. — *Annales industrielles*, 26 mai 1872. — *La Lumière électrique*, 25 août, 3 septembre 1881; 22 novembre 1884. — Hirsch. *Rapport sur l'Exposition de 1878*, p. 585. — Rankine. *Manuel de la machine à vapeur*. Traduction Richard, p. 585. — *Congrès de l'Association française pour l'avancement des sciences*, Clermont, 1876, p. 200.

vient se visser sur lui. Un ressort se trouve interposé, prenant son point d'appui sous le fond du chapeau et sur le piston. Au commencement la pleine pression, plus forte que ce ressort, le sou-

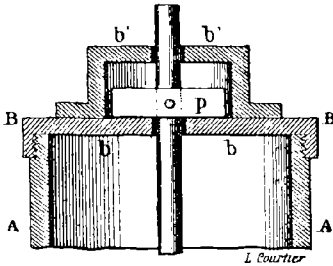


Fig. 771. — Indicateur Marcel Deprez.  
(Figure schématique).

lève; mais immédiatement la traverse  $p$  se plaque contre le fond  $b'$ . Une simple course de 2 millimètres lui est permise à cet égard. Lorsque la détente affaiblit progressivement la tension, il vient un moment où celle-ci équilibre exactement le ressort, puis elle diminue encore au delà : c'est à cet instant précis que l'élasticité rabat le système, en lui faisant effec-

tuer cette petite chute de 2 millimètres.

Pendant ce temps, le papier a effectué son mouvement. Le crayon immobile y a tracé une section droite du cylindre, qui se trouve déroulée en 12 sur la figure 772. Le décrochement 23 marque l'élément de diagramme qui correspond à l'instant d'équilibre. Puis le crayon trace une nouvelle horizontale 34 jusqu'au fond de course. En re-

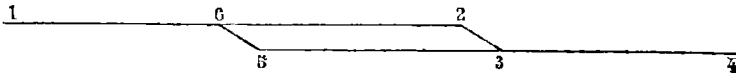


Fig. 772.

venant, la tension a encore diminué; c'est celle de l'échappement. L'arrêt  $p$  reste donc plaqué, et le crayon repasse dans le même trait 43. Puis, la phase de compression commençant, la tension se relève progressivement, et il vient un moment où elle se retrouve en état de faire équilibre au ressort, et d'en vaincre ensuite l'élasticité. A cet instant, le système se trouve reporté brusquement à 2 millimètres plus haut, et un nouveau décrochement 56 en conserve la trace. Puis la pointe repasse dans l'horizontale 61.

L'ensemble de la course a donc laissé sur le papier la figure 1234561. Si les choses restaient en cet état, le crayon la retracerait indéfiniment dans les courses ultérieures. Mais suppo-

sons que l'on tourne à la main le chapeau B, de manière à le visser d'une petite quantité sur son écrou A. D'une part, le système descendra dans l'espace, et viendra effectuer son tracé un peu au-dessous de l'ancien. D'un autre côté, le ressort ayant été comprimé davantage par ce resserrement, les deux instants d'équilibre ne seront plus les mêmes qu'auparavant, et les décrochements ne

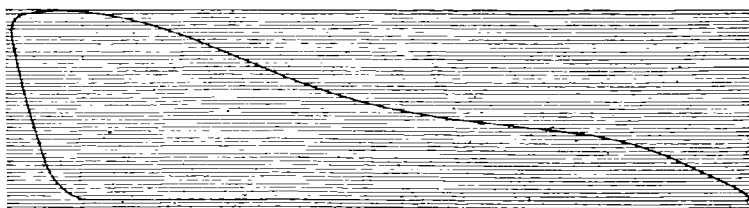


Fig. 773.

correspondront plus aux mêmes abscisses. On obtiendra d'après cela, en vissant progressivement le chapeau, une série de stries horizontales, ainsi qu'un ensemble de décrochements se faisant suite les uns aux autres (fig. 773), et dessinant nettement à l'œil, par leur ensemble, le diagramme rigoureux qu'il s'agissait d'obtenir.

**1255** — *Indicateur Cody*. — L'*indicateur* Cody <sup>(1)</sup> est destiné à remédier à un défaut qui est commun à tous les autres, car il est inhérent au principe même du tracé dynamométrique.

Si la compression n'est pas parfaite, la pression remonte si vite pendant l'échappement anticipé, que l'indicateur ne peut rien enregistrer d'utile pour cette phase, si intéressante cependant. Il trace toujours une verticale. En effet, en même temps que le mouvement en ordonnées est si rapide, la vitesse d'accroissement de l'abscisse reste rigoureusement nulle, car on se trouve au point mort, et sans vitesse appréciable du piston moteur ni du papier qu'il conduit.

Pour l'étude spéciale de cette phase, M. Cody emploie un mouvement chronométrique qui assure à la bande de papier un déroulement uniforme. L'abscisse est proportionnelle au temps, et non plus

<sup>(1)</sup> Buchetti. *Guide de l'essai des machines à vapeur*, p. 5.

au chemin parcouru par le piston ; et l'aire n'a plus rien de commun avec le travail. Une telle courbe sert seulement de document pour apprécier les circonstances de la marche, à cette extrémité de la course.

**1256** — *Indicateur Perry*. — Au lieu de tirer un diagramme isolé, M. Perry s'est proposé de maintenir sous les yeux du mécanicien une image permanente de ce diagramme, avec les fluctuations de formes qu'il peut à l'occasion traverser. Il y est arrivé par l'invention de son *indicateur optique* (\*). Ce n'est plus alors un tracé matériel et effectif que l'on obtient, mais une simple impression lumineuse due à la persistance des impressions produites sur la rétine par un point brillant, en mouvement rapide sur sa trajectoire.

La vapeur est admise à cet effet dans une boîte recouverte par un disque élastique, qui se gonfle d'une manière variable avec la pression. Un petit miroir est placé au milieu de l'un des rayons de ce cercle. Il prend ainsi des inclinaisons successives, qui renvoient un pinceau lumineux dans des directions incessamment modifiées, mais comprises en un même plan vertical.

D'un autre côté, la boîte, montée sur deux tourillons situés dans ce plan, exécute des balancements alternatifs en raison de sa liaison avec le moteur. En raison de ces deux mouvements composants orthogonaux, le point lumineux projeté sur un écran y parcourt un diagramme qui reste, ainsi qu'il a été dit, perpétuellement apparent aux yeux du mécanicien.

## § 2

### DIAGRAMME

**1257** — Nous avons déjà signalé la différence qui sépare le diagramme tracé par l'indicateur et le contour représentatif du cycle fermé suivi théoriquement par la vapeur.

(\* ) Raffard. *Bulletin technologique de la Société des anciens Élèves des Écoles d'arts et métiers*, septembre 1891, p. 642. — *La Nature*, 27 juin 1891. — *Industries*, 7 juin 1891.

Ce dernier (tome I, p. 814, note 1) nous a permis de traverser les diverses phases de l'évolution subie par 1 kilogramme de vapeur, que nous accompagnons par la pensée, sans que sa masse change jamais, à travers la chaudière, le sécheur, la tuyauterie, la boîte à vapeur, la lumière d'admission, le cylindre, la lumière d'échappement, le condenseur, la pompe à air, la bêche à eau chaude, et enfin l'injecteur qui le réintègre dans la chaudière. Ce cycle est représenté par un contour tel que ABCDEA (fig. 289, t. I, p. 814).

Toute autre chose est l'étude que l'indicateur nous permet de faire. Nous l'avons déjà résumée ci-dessus (t. II, p. 157, fig. 381). A l'inverse de la précédente, elle ne concerne qu'une seule enceinte : le cylindre, au lieu de toute la succession précédente. En outre les influences qui se trouvent enregistrées se rapportent à une quantité de vapeur essentiellement variable, au lieu que dans le premier cas celle-ci restait immuable. Cette matière comprend : 1° un stock invariable qui évolue de manière à remplir, à un certain moment, l'espace libre en pleine pression; 2° la cylindrée proprement dite, dont la masse varie au contraire incessamment, croissante à partir de zéro pendant l'admission, stationnaire pendant la détente, décroissante pendant l'échappement, jusqu'à zéro pour le moment où le stock seul est chargé de reconstituer la pression dans l'espace libre. Cette peinture fidèle de ce qui se passe dans le cylindre présente l'aspect théorique  $abcc'deff'a$  (t. II, p. 157, fig. 381), en relation avec la pleine pression AB, la détente BC, l'échappement anticipé CD, l'échappement proprement dit DE, la compression EF, l'admission anticipée FA. Dans la réalité, ce profil estompe ses contours anguleux sous une forme adoucie, telle que  $\alpha\beta\gamma\delta\epsilon\zeta\alpha$ . C'est à une telle courbe que nous réservons ici le nom de *diagramme*. C'est elle que fournit l'indicateur, et ses contours révèlent à un coup d'œil expérimenté les qualités et les défauts de la marche d'une machine.

**1258** — Pour *tirer* un diagramme, on commence par faire fonctionner l'indicateur pendant quelques instants, afin de lui laisser prendre la température normale. On ferme alors le robinet à deux voies, pour intercepter la vapeur du cylindre moteur et évacuer

celle du petit corps de pompe, puis on laisse effectuer le mouvement. Le piston n'est alors sollicité que par l'atmosphère, et le crayon trace la *ligne atmosphérique*. Cette horizontale correspond à une pression effective nulle, et sert de repère pour les autres tensions. On admet de nouveau la vapeur, et, en imprimant le mouvement sous pression, l'on tire un ou plusieurs diagrammes.

**1259** — Si l'indicateur n'est mis en rapport qu'avec une seule face du piston moteur, on obtient un diagramme unique (fig. 773). Si l'on veut étudier à la fois les deux faces, ce qui sera spécia-

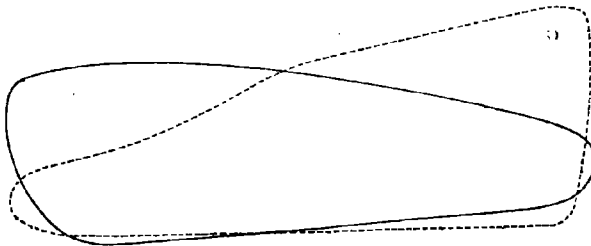


Fig. 774. — Diagramme d'une machine à double effet.

lement intéressant pour les machines verticales, on associe deux diagrammes en sens contraires (fig. 774).

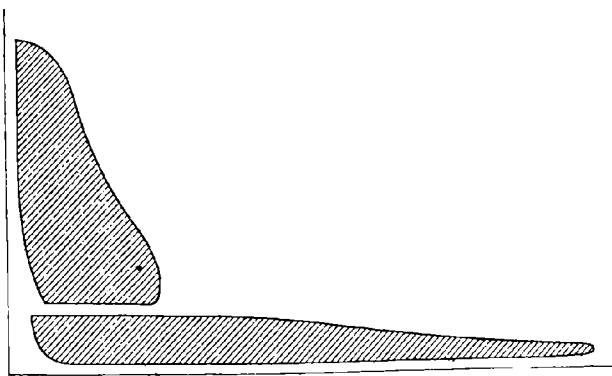


Fig. 775. — Diagramme d'une machine compound.

Avec les machines de Woolf, on superpose l'un au-dessus de l'autre deux noyaux relatifs] aux deux cylindres] (fig. 775). Une



petite bande intermédiaire les sépare. Sa largeur estimée parallèlement à l'axe des ordonnées représente, pour les diverses abscisses, la chute de pression que présente une même masse de vapeur, entre la face d'aval du piston qui la refoule et la face d'amont du piston suivant, qu'elle pousse en traversant des passages étroits, capables de déterminer des pertes de charge.

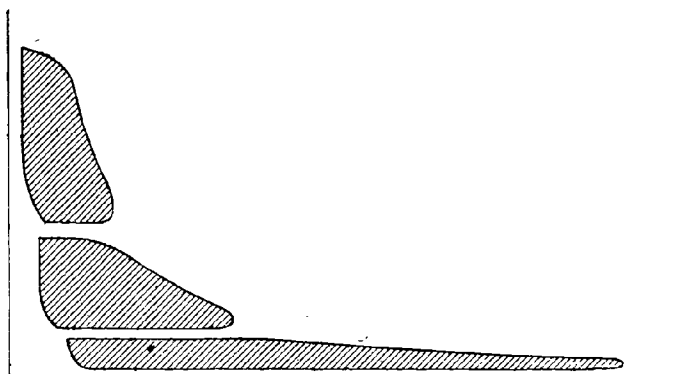


Fig. 776. — Diagramme d'une machine à triple expansion.

Dans les moteurs à triple ou à quadruple expansion, on échafaude de même (fig. 776) trois ou quatre noyaux étagés. On obtient à l'aide de ces courbes d'indicateur le diagramme totalisé d'une machine compound.

**1260** — Quand il s'agit d'évaluer la superficie du diagramme, on emploie les formules de quadratures approchées de Poncelet ou de Simpson, ou plus souvent encore le planimètre d'Amsler<sup>(1)</sup>.

Pour interpréter la signification dynamique du résultat géométrique ainsi obtenu, l'on possède, d'une part, l'échelle des espaces,

(1) Théorie du planimètre d'Amsler. *Annales des mines*, 1871, 1882, 1883, 1887. — Sébert. Note sur l'intégromètre Deprez et le planimètre d'Amsler. *Mémorial de l'artillerie de la marine*, t. XVIII, 1875. — Diagrammomètre Kozloff. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 21 juillet 1890, p. 166. — Intégrateur Puplus. *Revue industrielle*, 20 février 1884. — Abdank-Abakanowicz. *Les intégraphes*, Gauthier-Villars, 1886, in-8°. — Gieseler. The polar planimeter, its theory and use. *Scientific American supplement*, 17 mars 1888, p. 10174. — Shaw. *On mechanical integrators*. — Pearson. A new integrator. *Engineering*, 31 janvier 1890, p. 129.

c'est-à-dire le rapport de la course du piston moteur avec l'amplitude du mouvement du papier en abscisse, et de l'autre *l'échelle des forces*. En effet, l'on connaît les surfaces des pistons du moteur et de l'indicateur; et d'autre part on a taré directement le ressort, tout aussi bien pour les divers degrés de vide que pour les tensions supérieures à la pression atmosphérique. On peut donc graduer numériquement l'axe des ordonnées. Ce tarage doit être fréquemment vérifié, soit par comparaison avec un instrument-étalon, soit directement, en chargeant la tige de poids connus <sup>(1)</sup>.

(1) Je termine ici ce *Cours de machines*, seconde moitié de mon *Cours d'exploitation des mines et machines*, dont la première, le *Cours d'exploitation des mines*, a paru en 1883 et 1885. Depuis que j'ai commencé cette nouvelle publication, le programme de la Chaire (voy. t. I, p. 5) a été modifié par M. le Ministre des Travaux publics, sur la proposition du Conseil de l'École nationale supérieure des Mines. La théorie de la résistance des matériaux en a été détachée, et a été annexée au Cours de constructions, pour permettre de donner, dans un enseignement aussi chargé, plus de développements à la théorie des moteurs. C'est par suite dans cet esprit que j'ai achevé cet ouvrage, en le pliant à ce nouveau cadre, et cherchant à en faire un *Traité des moteurs hydrauliques et thermiques*. Plus tard encore, une nouvelle modification est intervenue. Le Cours a été divisé en deux autres, et deux Professeurs m'ont succédé à la fois, l'un pour l'*exploitation des mines*, l'autre pour les *machines*, au moment où j'ai été appelé à la Direction de l'École des Mines.

# TABLE DES MATIÈRES

---

## CINQUIÈME PARTIE — CHAUDIÈRES A VAPEUR

---

### CHAPITRE LIII. — COMBUSTION.

	Pages.
§ 1. — <i>Surface de chauffe</i> . . . . .	525
Influence de la température. . . . .	525
Surface de chauffe. . . . .	528
§ 2. — <i>Combustibles</i> . . . . .	535
Pouvoir calorifique. . . . .	535
Méthodes d'essai. . . . .	536
§ 3. — <i>Combustion</i> . . . . .	540
Quantité d'air. . . . .	540
Tirage . . . . .	542
Température initiale. . . . .	545
§ 4. — <i>Utilisation des flammes</i> . . . . .	545
Température finale. . . . .	545
Utilisation des flammes. . . . .	546
Circulation méthodique. . . . .	548
Conductibilité. . . . .	549
§ 5. — <i>Vaporisation</i> . . . . .	552
Vaporisation . . . . .	552
Rendement calorifique . . . . .	553
§ 6. — <i>Conduite du feu</i> . . . . .	556
Chauffeur . . . . .	556
Marche normale . . . . .	558
Mise en feu, mise hors feu . . . . .	560

## CHAPITRE LIV. — CORPS CYLINDRIQUE.

§ 1. — <i>Matériaux.</i> . . . . .	561
Cuivre, laiton . . . . .	561
Fonte . . . . .	561
Fer . . . . .	562
Acier . . . . .	563
§ 2. — <i>Corps cylindrique.</i> . . . . .	564
Corps cylindrique . . . . .	564
Viroles . . . . .	565
Fonds . . . . .	566
Armatures . . . . .	567
Dilatation . . . . .	568
§ 3. — <i>Rivures.</i> . . . . .	569
Soudure . . . . .	569
Lignes de rivets . . . . .	569
Tôles . . . . .	570
Trous . . . . .	571
Rivets . . . . .	571
Couvre-joints . . . . .	527
§ 4. — <i>Épaisseur de l'enveloppe.</i> . . . . .	575
§ 5. — <i>Dimensions des rivures</i> . . . . .	578

## CHAPITRE LV. — CHAUDIÈRES A CORPS CYLINDRIQUE.

§ 1. — <i>Généralités.</i> . . . . .	581
§ 2. — <i>Chaudières à foyer extérieur</i> . . . . .	582
§ 3. — <i>Chaudières à bouilleurs</i> . . . . .	585
Chaudière à bouilleurs . . . . .	585
Calcul des dimensions . . . . .	590
§ 4. — <i>Chaudières à foyer intérieur</i> . . . . .	595
Chaudière de Cornouailles . . . . .	595
Chaudière de Lancastre . . . . .	598
Chaudière de Fox . . . . .	600
Chaudière de Galloway . . . . .	602
Types divers . . . . .	605
Calcul des dimensions . . . . .	604
§ 5. — <i>Chaudières tubulaires.</i> . . . . .	605
Type locomotive . . . . .	605
Types divers . . . . .	608
Chaudière semi-tubulaire . . . . .	608

TABLE DES MATIÈRES. 905

Chaudière à faisceau tubulaire amovible. . . . .	610
Tubes . . . . .	614
Pose des tubes. . . . .	615
Tubes amovibles. . . . .	616

CHAPITRE LVI. — CHAUDIÈRES TUBULÉES.

§ 1. — <i>Généralités</i> . . . . .	618
§ 2. — <i>Chaudières à circulation</i> . . . . .	620
Chaudière Field. . . . .	620
Chaudière Thirion. . . . .	623
Chaudière De Dion, Bouton et Trépardoux. . . . .	623
Circulateur Weyr . . . . .	624
§ 5. — <i>Chaudières multitubulaires.</i> . . . .	625
Généralités . . . . .	625
Chaudière de Naeyer . . . . .	630
Chaudière Babcock et Wilcox . . . . .	634
Chaudières Lencauchez, Maniquet, Roser, Du Temple, Terme et Deharbe. . . . .	636
§ 4. — <i>Chaudières à serpentín.</i> . . . .	643
Chaudière Belleville . . . . .	645
Chaudière Serpollet . . . . .	647
Batteries de générateurs . . . . .	649

CHAPITRE LVII. — CHAUDIÈRES A COMBUSTIBLES SPÉCIAUX.

§ 1. — <i>Chaudières verticales métallurgiques.</i> . . . .	653
§ 2. — <i>Chaudières à gazogène.</i> . . . .	658
Chaudière à gaz. . . . .	658
Gazogène Siemens. . . . .	659
Gazogène Muller et Fichet. . . . .	661
Foyer fermé Du Fay . . . . .	662
§ 3. — <i>Chaudières à pétrole.</i> . . . .	664
§ 4. — <i>Chaudières à combustibles pauvres</i> . . . . .	667
§ 5. — <i>Chaudières sans feu.</i> . . . .	670
Chaudière à soude Honigmann . . . . .	670
Chaudière à eau surchauffée de Lamm et Francq. . . . .	671
Chaudière à huile. . . . .	673

CHAPITRE LVIII. — DÉTAILS DES GÉNÉRATEURS.

§ 1. — <i>Foyer.</i> . . . .	674
Porte du foyer. . . . .	674
Boîte à feu . . . . .	675
Registre . . . . .	676

§ 2. — <i>Grille</i> . . . . .	678
Généralités . . . . .	678
Grilles ordinaires . . . . .	680
Grilles à air . . . . .	681
Grilles à eau . . . . .	682
Grilles mécaniques . . . . .	685
§ 3. — <i>Fumivorie</i> . . . . .	684
Généralités . . . . .	684
Chargeurs mécaniques . . . . .	686
Grilles à gradins . . . . .	688
Fumivores pneumatiques . . . . .	690
§ 4. — <i>Vent forcé</i> . . . . .	695
§ 5. — <i>Trou d'homme</i> . . . . .	696
§ 6. — <i>Prise de vapeur</i> . . . . .	698
§ 7. — <i>Détendeurs</i> . . . . .	701
§ 8. — <i>Sécheurs de vapeur</i> . . . . .	703
§ 9. — <i>Réchauffeurs d'eau d'alimentation</i> . . . . .	705

## CHAPITRE LIX. — ALIMENTATION.

§ 1. — <i>Appareils d'alimentation</i> . . . . .	711
Généralités . . . . .	711
Pression hydrostatique . . . . .	713
Steam loop . . . . .	715
Pompe alimentaire . . . . .	714
Bouteille alimentaire . . . . .	716
§ 2. — <i>Injecteurs</i> . . . . .	718
Description . . . . .	718
Théorie . . . . .	723
§ 3. — <i>Régulateurs d'alimentation</i> . . . . .	726
Généralités . . . . .	736
Régulateur Belleville . . . . .	727
Régulateur Fromentin . . . . .	728
Régulateur Cleuet . . . . .	729

## CHAPITRE LX. — DÉPÔTS.

§ 1. — <i>Incrustations</i> . . . . .	750
§ 2. — <i>Composition chimique des incrustations</i> . . . . .	752
§ 3. — <i>Corps gras</i> . . . . .	757
§ 4. — <i>Sature</i> . . . . .	740
§ 5. — <i>Épuration</i> . . . . .	743

TABLE DES MATIÈRES.		907
Généralités . . . . .		743
Réactions chimiques . . . . .		745
Décantage . . . . .		747
§ 6. — <i>Désincrustants</i> . . . . .		750
§ 7. — <i>Entretien</i> . . . . .		752
Vidange . . . . .		752
Nettoyage extérieur . . . . .		753
Nettoyage intérieur . . . . .		755
Visites . . . . .		756
Réparations. . . . .		756

#### CHAPITRE LXI. — EXPLOSIONS.

§ 1. — <i>Effets des explosions.</i> . . . . .		758
Exemples. . . . .		758
Influence du volume d'eau . . . . .		761
Appréciation numérique. . . . .		763
§ 2. — <i>Causes d'explosion</i> . . . . .		766
Généralités . . . . .		766
Défauts de construction. . . . .		767
Défauts d'entretien. . . . .		768
Défauts de fonctionnement . . . . .		769
Causes fortuites . . . . .		769
§ 5. — <i>Altérations de la tôle.</i> . . . . .		770
Coups de feu . . . . .		770
Fentes . . . . .		771
Corrosions . . . . .		771
§ 4. — <i>Abaissement du niveau.</i> . . . . .		775
Causes de l'abaissement . . . . .		775
Durée de l'abaissement. . . . .		776
Effets de l'abaissement. . . . .		782
Eau surchauffée . . . . .		787
§ 5. — <i>Statistique.</i> . . . . .		789

#### CHAPITRE LXII. — RÉGLEMENTATION.

§ 1. — <i>Règlements</i> . . . . .	793
§ 2. — <i>Emplacements</i> . . . . .	805
§ 3. — <i>Épreuve réglementaire.</i> . . . . .	805
§ 4. — <i>Enquêtes sur les explosions.</i> . . . . .	807
§ 5. — <i>Associations de propriétaires d'appareils à vapeur.</i> . . . .	809

## CHAPITRE LXIII. — APPAREILS DE SURETÉ.

§ 1. — <i>Clapets de retenue d'alimentation</i> . . . . .	815
§ 2. — <i>Clapets obturateurs de vapeur</i> . . . . .	818
Généralités . . . . .	818
Clapets Hirsch, Belleville, Labeyrie . . . . .	819
Clapets Carette, Vaultier, Pile . . . . .	822
§ 3. — <i>Indicateurs de niveau</i> . . . . .	824
Généralités . . . . .	824
Tube de cristal . . . . .	825
Indicateur Planche . . . . .	828
Robinets de jauge . . . . .	829
Indicateur magnétique Lethuillier Pinel . . . . .	830
Indicateur d'alarme . . . . .	831
§ 4. — <i>Manomètres</i> . . . . .	835
Généralités . . . . .	835
Manomètres à air libre . . . . .	835
Manomètre Bourdon . . . . .	837
Manomètres divers . . . . .	838
§ 5. — <i>Soupapes de sûreté</i> . . . . .	840
Généralités . . . . .	840
Calage des soupapes . . . . .	844
Section d'écoulement . . . . .	845
Soupape Bodmer et Klotz . . . . .	850
Soupape Codron . . . . .	851
Soupape Dulac . . . . .	852
Soupape Adams . . . . .	852
Soupape Barbe . . . . .	853
Reniflard . . . . .	855
§ 6. — <i>Chevilles fusibles</i> . . . . .	855

## CHAPITRE LXIV. — CONDENSEUR.

§ 1. — <i>Condenseur de surface</i> . . . . .	859
Généralités . . . . .	859
Condenseur de surface . . . . .	861
Aéro-condenseur . . . . .	865
§ 2. — <i>Condenseur à injection</i> . . . . .	866
Description . . . . .	866
Condenseur à eau récupérée . . . . .	868
Évaluation de l'eau de réfrigération . . . . .	870



TABLE DES MATIÈRES.		909
§ 3. — <i>Pompe à air</i> . . . . .		875
Description . . . . .		875
Calcul des dimensions . . . . .		878
Calcul du travail . . . . .		880
§ 4. — <i>Condenseur des machines de Cornouailles</i> . . . . .		882
Condenseur Létoret . . . . .		882
Condenseur Devillaine . . . . .		883
§ 5. — <i>Éjecteur</i> . . . . .		885

CHAPITRE LXV. — INDICATEUR.

§ 1. — <i>Indicateur</i> . . . . .	888
Indicateur de Watt . . . . .	888
Indicateur Clair . . . . .	892
Indicateur Richard . . . . .	893
Indicateur Martin Garnier . . . . .	894
Indicateur Marcel Deprez . . . . .	895
Indicateur Cody . . . . .	897
Indicateur Perry . . . . .	898
§ 2. — <i>Diagramme</i> . . . . .	898



---

24412. — PARIS, IMPRIMERIE A. LAHURE  
9, rue de Fleurus, 9.

---