

11568
Q 5163

11568
Q 5163

Ecole Impériale des Ponts et Chaussées.

Notes
prises par les Elèves
au cours de
Machines à vapeur.

M. Clapeyron, professeur.



Edition 1853-1854.

Reimpression de 1858.

Exclu du prêt

BIBLIOTHEQUE DE L'USTL	
Cote	621.1
Niv.	3
Salle	MAG
Inv.	Q11568



Introduction	Théorie de l'écoulement de la chaleur comme force motrice	
Chapitre I	Histoire relative à l'invention des appareils à vapeur	1
— II	Propriétés des vapeurs au point de vue des machines	5
	1 Force élastique de la vapeur	
	2 Chaleur spécifique	
	3 Chaleur développée par la combustion de différents corps	
	4 Vitesses d'écoulement de la vapeur	
— III	Calcul direct de l'effet des machines à vapeur	
— IV	Description d'une machine à vapeur fixe, à basse pression et à condensation	51
	1 disposition générale	
	2 Sp. on à donner aux diff. parties	
	3 Détails de construction	
	4 Production de la vap.	
— V	Machines à vapeur fixes à haute pression	80
— VI	Machines appliquées à la navigation	85
	1 Résistance éprouvée par les bateaux	
	2 Description de la machine d'un bateau à roues	
	3 Matériel à l'étranger — le Napotéon	
	4 Navigation fluviale	
	5 Chaudières des bateaux à vapeur	
	6 Mach. à vapeur combinée — mach. à air chaud.	
— VII	Les locomotives	111
	1 Étude générale d'une locomotive	
	2 Calcul de C. produit.	
— VIII	Des roues et des essieux	119
	1 Des roues	
	2 Des essieux	
	3 Des boîtes à graisse	
	4 De la suspension	
— IX	Chaudronnerie	152
	1 Chaudières et tubes	
	2 Grilles	
	3 Insulation	
— X	Appareils de sûreté	185
— XI	Alévation des locomotives sur la piste de vapeur	193
— XII	Cylindres — Pistons — Bielles	199
— XIII	Sur le calcul de l'usure des parties d'une machine — Distribution et	206
— XIV	Quelques résultats économiques relatifs à l'exploitation de	220
	chemin de fer.	

Ecole Impériale des Ponts et Chaussées.

Notes prises par les Elèves au Cours de Machines à vapeur.



Introduction.

Théorie de l'emploi de la chaleur comme force motrice.

Le but du cours de Machines à vapeur est de donner sur les diverses classes de machines que l'on peut désigner par ce nom, et sur la construction de leurs pièces les plus importantes, des notions, sinon aussi complètes qu'on pourrait le désirer, du moins suffisantes pour initier les Elèves à une connaissance spéciale plus approfondie de ce sujet, connaissance que leur étude personnelle pourront alors plus facilement compléter.

Mais avant d'entrer en matière, il convient d'exposer quelques généralités sur l'emploi de la chaleur comme force motrice, envisagée sous le point de vue le plus général et indépendamment de l'agent qui sert à réaliser l'effet utile qu'on en veut tirer.

Cet agent a été, jusqu'ici, l'eau réduite en vapeur, ou l'éther, par exception. Mais rien ne dit qu'un jour on ne parviendra pas à faire usage de cette force à l'aide d'un autre agent que celui qui est usité aujourd'hui, et à en tirer ainsi un parti plus économique ou plus approprié aux fins que l'on peut se proposer.

Des expériences récentes faites par M. Regnault, au Collège de France*, donnent d'ailleurs à ce sujet un intérêt nouveau.

Dans la théorie ancienne de la chaleur, admise jusqu'ici, on admettait le fait suivant :

« la quantité de chaleur possédée par un corps, est une chose qui ne peut se perdre, et qui ne fait que passer successivement d'un corps à l'autre, par voie de conductibilité ou de rayonnement, ou bien de l'état apparent et sensible, à l'état latent et insensible, ou réciproquement... »

Mais aujourd'hui, et depuis quelques mois seulement, des expériences positives ont démontré

* Comptes rendus de l'Académie des Sciences, tome XXXVI, séance du 18 avril 1855.

que cette manière de voir devrait être modifiée et que l'on devrait dire :

« La chaleur ne se conserve pas toujours à l'état de chaleur proprement dite : Une portion en peut disparaître, notamment dans son passage à travers les organes d'une machine, et ne se retrouver sous aucune forme, ni latente ni apparente, à la sortie des conduits qu'elle a traversés. Les choses se passent comme si cette quantité de chaleur disparue se transformait directement en travail mécanique apparent, et le travail moteur produit par la machine est, dans tous les cas, proportionnel à cette quantité de chaleur perdue, et à cette chaleur seulement. »

Si donc il était démontré que, dans la réalité des applications, cette quantité de chaleur ainsi perdue, n'était jamais qu'une fraction très insignifiante de la quantité de chaleur totale dépensée, soit $\frac{1}{20}$ ou $\frac{1}{40}$, on verrait de suite que la simple connaissance de ce fait ouvre un champ immense et nouveau aux recherches industrielles, et que l'on peut espérer qu'à l'avenir les effets de la chaleur, mieux connus et mieux dirigés, réaliseront des effets mécaniques vingt ou quarante fois plus grands que ceux dont on les a vus capables jusqu'à présent.

Déjà, en 1824, S. Carnot, avait publié sous le titre de : « Réflexions sur la puissance motrice du feu » un ouvrage auquel on ne fit pas d'abord grande attention, et dans lequel il admit en principe que le travail moteur produit dans une machine à feu, est dû au passage de la chaleur de la source calorifique plus chaude qui émet la chaleur, au condenseur plus froid qui la recueille définitivement.

M. Clapeyron a développé par le calcul, l'hypothèse de Carnot, et en a déduit des conséquences conformes à un grand nombre de lois physiques admises jusqu'ici ; mais cette théorie, fondée sur le principe que la chaleur est une quantité qui reste constante et dont aucune partie ne disparaît, de quelque manière qu'elle se transmette d'un corps à un autre, ne peut être maintenue aujourd'hui.

Des expériences nombreuses et variées de M. Regnault ont démontré que dans beaucoup de circonstances la chaleur s'anéantit et ne se retrouve plus.

Or, dans toutes les circonstances qu'il indique, un travail mécanique est produit.

Les choses se passent donc comme si la chaleur se transformait directement en force vive, et c'est là un point de vue entièrement nouveau.

1.^{er} Exemple. Dans une machine, la vapeur entre dans les conduits sous une pression de 5 atmosphères, et 1 kilogramme de cette vapeur possède 653 calories, c'est-à-dire 653 fois la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1° la température apparente d'un litre d'eau prise à 0°. Or, cette vapeur est condensée sous la pression de 1 atmosphère et, à la sortie des conduits, la quantité de vapeur détendue, ne possède plus que 637 calories en tout, et il y a eu perte de 16 calories.

2.^o Exemple. Dans une autre machine, la condensation se fait à une plus basse température et à une plus basse pression. La même vapeur introduite à 5 atmosphères et possédant à son entrée 653 calories, sort et se condense sous la pression de 0.^m 055 de mercure seulement, et ne possède plus alors que 619 calories, c'est-à-dire qu'il y a eu 37 calories perdues.

Or, on remarque que les travaux moteurs produits, d'une manière apparente, par les engins adjoints à la seconde machine, produisent plus de force mécanique que la première, en sorte

que la force vive développée est en raison de la quantité de chaleur anéantie.

Voici maintenant d'autres expériences :

3^e Exemple. 1^o Une masse de gaz, sous la pression de 10 atmosphères, est renfermée dans un espace dont on double brusquement la capacité, en le mettant en rapport avec un deuxième espace de même grandeur qui est vide (Fig. 1).

L'un et l'autre sont renfermés dans un même calorimètre.

Le gaz du premier récipient s'élançe dans le second avec une vitesse très grande et le remplit presque instantanément en tourbillonnant, et la pression finale n'est plus que de cinq atmosphères.

En bien, le calorimètre, dont la température devrait s'abaisser considérablement, en vertu des idées admises jusqu'à présent, parce que le gaz se dilate subitement beaucoup, ne manifeste, au contraire, par le moindre changement de température.

2^o Une masse de gaz, sous la pression de 10 atmosphères, est renfermée dans un espace dont on double encore brusquement la capacité, mais par l'élevation d'un piston: la pression descend à 5 atmosphères, comme dans le premier cas, mais, ici, l'on observe un refroidissement considérable.

Si nous interprétons ceci au point de vue précité de la transformation directe des chaleurs perdues en travaux dynamiques apparents et réciproquement, nous remarquerons que, dans le premier cas, il n'y a pas eu de travail dynamique obtenu, tout s'est passé en vitesse acquise, en tourbillonnements intimes de la masse gazeuse, au passage d'un récipient dans l'autre; en même temps, aucune quantité de chaleur n'a disparu, il paraît que la vitesse acquise s'est, de suite, de nouveau transformée en chaleur dans l'intérieur même du calorimètre.

Dans le second cas, au contraire, où il y a eu mouvement apparent et utilisable, il y a eu chaleur perdue.

4^e Exemple. 1^o Une masse M de gaz traverse, sous la pression de l'atmosphère, un serpentin où elle s'échauffe à 100° , puis un calorimètre dont la température initiale est 0° . Elle élève la température de ce calorimètre de t degrés.

2^o La même masse de gaz traverse, sous la pression de 10 atmosphères cette fois, le même serpentin où elle s'échauffe de 100° , puis encore le calorimètre à 0° sous la même pression. Elle élève la température du calorimètre de t' degrés, mais t' est très peu différent de t .

3^o La même masse de gaz traverse, enfin, sous la pression de 10 atmosphères, le serpentin où elle s'échauffe à 100° ; mais en arrivant à l'orifice du calorimètre à 0° , ou à un point quelconque de son parcours, le gaz se dilate et revient à la pression de l'atmosphère, de sorte qu'il sort du calorimètre, à la fois à 0° et sous la pression atmosphérique. On observe une élévation de température t'' du calorimètre.

D'après les théories antérieurement admises, la quantité de chaleur abandonnée par le gaz, dans cette dernière expérience où le volume du gaz a décuplé, devrait être égale à celle du N^o 2 diminuée de la quantité de chaleur qu'il aurait absorbée pendant l'énorme dilatation qu'il a subie. Or, l'expérience donne, au contraire, pour t'' une valeur plus grande que t' et que t .

En même temps, la comparaison des deux premières expériences fait voir accessoirement que la chaleur spécifique à volume constant avec poids constant, est à très peu près la même, quelle que soit la pression, pour un même changement de température de 100° à 0° .

D'après M. Regnault, on pourrait multiplier ces citations, mais les exemples qui viennent d'être donnés suffisent pour mettre en évidence les principes dont il s'agit.

Ils montrent, en même temps, combien il faut être circonspect dans les conclusions que l'on tire d'expériences où les fluides élastiques sont en mouvement, subissent des changements d'élasticité et effectuent un travail mécanique souvent difficile à apprécier, car les effets calorifiques produits dépendent, en grande partie, de l'ordre et de la manière dont ces changements se sont opérés.

Nous terminerons ce sujet en énonçant une hypothèse déjà émise au sujet des phénomènes de la chaleur rayonnante, et qui paraît aujourd'hui se vérifier à son tour dans les autres phénomènes relative au calorique.

Cette hypothèse consisterait à admettre une analogie entre ceux-ci et les phénomènes lumineux, tels que les a compris Fresnel, en ce sens que les phénomènes calorifiques seraient dus, comme les phénomènes lumineux, à des mouvements intimes et invisibles des atomes des corps qui peuvent, dans des circonstances favorables, se transformer en mouvements visibles et utilisables, à des distances finies et apparentes.

Un corps chaud serait ainsi un amas de molécules douées de mouvements individuels excessivement rapides, sans doute, et représentant, en somme, une quantité de force vive énorme.

La théorie nouvelle qui consiste à assimiler complètement la chaleur, à de la force vive, n'est pas cependant encore établie sur des bases assez certaines pour qu'il convienne de laisser complètement dans l'oubli les idées proposées antérieurement sur l'emploi de la chaleur comme force motrice, et nous croyons utile de reproduire ici ce qui avait été dit sur ce sujet dans les premières conférences, faites à l'École, sur les machines à vapeur.

Pour utiliser la chaleur comme force motrice, « il ne suffit pas qu'il y ait production de
« chaleur; non plus que pour employer l'eau comme force motrice, il ne suffit pas de disposer d'une source
« d'eau, une chute est encore nécessaire. Ici, il faut de plus qu'il y ait écoulement de cette chaleur,
« d'un corps à une certaine température sur un autre à une température plus basse. Dans ce
« cas, la chaleur pourra être employée comme force motrice; car, entre les deux corps, l'un étant
« considéré comme le condenseur, l'autre comme le foyer, on pourra placer une machine à vapeur.

« Dans cette comparaison entre l'emploi de l'eau et celui de la vapeur, comme forces
« motrices, ce niveau plus bas nécessaire, dans le premier cas, pour qu'il y ait chute, répond dans
« le second à cette température plus basse, d'un des corps, nécessaire pour qu'il y ait écoulement de
« chaleur.

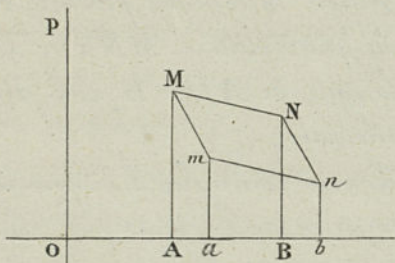
« Mais poussons plus loin le rapprochement, et sachant que, dans le cas de l'em-
« ploi de l'eau, la quantité d'action mécanique maxima est égale à la masse multipliée par la
« hauteur verticale décrite, cherchons la valeur de cette même quantité dans le cas de la chaleur;
« autrement dit, cherchons quel est le maximum théorique d'action mécanique que l'on peut obtenir
« avec une quantité donnée de chaleur s'écoulant d'un corps entretenu à une certaine température, à un corps
« entretenu à une température moindre; peut-être arriverons nous, par là, à voir pourquoi, au lieu de

« l'eau, on n'a pas employé pour cette transmission de la chaleur un autre corps, l'acide carbonique
« liquide, par exemple.

« Pour obtenir un effet maximum, une première condition de cet écoulement de la
« chaleur, c'est que non seulement il n'y ait pas contact entre deux corps, mais encore que dans
« le fait de cette transmission, le contact ait toujours lieu entre deux corps à même température;
« On pourrait, en effet, sans cela, placer entre eux une machine à vapeur qui transformerait en
« force motrice la chaleur qui s'écoulait au contact, et était par ce fait même perdue au point de vue
« dynamique.

« Il est inutile de répéter que cette condition est tout-à-fait théorique; la pratique
« doit pourtant chercher à la réaliser autant que possible; voyons comment on peut réaliser cette
« idée, comment on peut faire en sorte que, dans la série d'opérations ayant pour effet de trans-
« mettre la chaleur d'un corps chaud à un corps froid, on peut arriver à ce qu'il n'y ait contact
« qu'entre corps possédant la même température.

« Supposons que le corps A, fournissant la chaleur, soit à la température t , le corps
« B absorbant cette chaleur, à la température inférieure t' . Nous prendrons, pour transmettre cette
« chaleur, pour l'utiliser comme force motrice, un gaz, l'air atmosphérique, par exemple; supposons-
« le à t' et renfermé dans une enveloppe imperméable à la chaleur (c'est encore une hypothèse
« entièrement théorique, mais dont on doit approcher le plus possible dans la pratique; c'est ainsi
« que l'on adopte souvent pour les chaudières un système de deux enveloppes, dans l'intervalle
« desquelles on met soit de l'air, soit du charbon pilé, corps mauvais conducteurs du calorique).
« Ce gaz occupe un volume V sous une pression P ; je le suppose en contact avec le corps A et je le
« fais dilater, au moyen, par exemple, d'un piston adapté à l'enveloppe; sa température baisserait
« par le fait de la dilatation, si le corps A ne lui cédait de la chaleur; mais, moyennant ce
« contact, la température du gaz restera la même et nous aurons entre les volumes successifs
« que nous ferons prendre au gaz et les pressions correspondantes qu'il supportera, une relation
« que nous pourrions représenter par la courbe MN, en portant les volumes en abscisses et les
« pressions en ordonnées.



« OA représente le volume primitif et AM la pression, corres-
« pondante. A un instant quelconque, lorsque, par exemple,
« le volume est représenté par OB, j'écarte le corps A. Pendant
« cette première période, le gaz a été successivement à diffé-
« rentes pressions; or, à chacune de ces pressions répond
« une certaine action mécanique, un effet produit, qui, nous
« le savons, peut être représenté dans un instant infiniment
« court, par:

« La pression \times la surface du piston \times l'espace infi-
« niment petit parcouru.

« Or, le produit des deux dernières quantités, c'est l'accroissement infiniment
« petit du volume ou bien la différentielle du volume.

« L'effet produit dans un instant infiniment court, est donc égal à $P \cdot dv$, ou la

quantité totale d'action mécanique produite dans cette première période est donc représentée par
 $\int P dv$, ou bien par l'aire MNBA.

Je suppose maintenant le corps A écarté ; si je continue à augmenter le volume du gaz, sa température va diminuer, et en vertu de ces deux circonstances réunies, la pression va décroître en suivant une loi plus rapide que dans la première partie de l'opération, où la température était constante ; et en m'arrêtant lorsque le gaz sera à la température t' , on pourra représenter la courbe de variation des pressions en raison des changements de volume du gaz. J'approche alors le corps B et je comprime le gaz ; une partie du calorique qu'il renferme va passer de l'état latent à l'état sensible, mais sa température ne s'élèvera pas, le corps B absorbant ce calorique à mesure qu'il se produit. Seulement sa pression va augmenter ; je puis donc représenter par la courbe mn la loi de la variation des pressions. Lorsque le corps B a absorbé une quantité de chaleur égale à celle que dans la première partie de l'opération le gaz avait enlevée au corps A, j'écarte B. En ce moment le gaz renferme exactement la même quantité de chaleur qu'à l'instant initial, puisque nous supposons l'enveloppe tellement imperméable à la chaleur, qu'aucune partie n'ait pu se dissiper pendant l'opération. Je dirai que si je continue alors à comprimer le gaz jusqu'à ce qu'il ait repris son volume primitif, sa température et sa pression seront aussi les mêmes qu'à l'instant initial. En effet, les quatre quantités v , p , q et t , sont liées par les deux relations

$$pv = R (267 + t)$$

$$q = f (pv)$$

(La première est le résultat de la combinaison de la loi de Mariotte et de celle de Gay-Lussac). Or, v et q ont les mêmes valeurs qu'au commencement de l'opération, il en est donc ainsi de p et de t . La courbe représentant cette quatrième partie de l'opération ira donc se terminer au point M.

Mais maintenant ce que j'ai dit de l'action mécanique produite dans la première partie, je pourrais le répéter pour les trois autres et démontrer de même que les valeurs de ces effets produits sont représentées par les surfaces NnBb, mnab, MmAa. Mais si je remarque que la valeur de ces deux dernières doit être négative, puisque l'accroissement de volume a été négatif, j'en conclurai qu'il y a eu une certaine quantité d'action mécanique produite dans cette opération, et que cette quantité est représentée par la surface du quadrilatère MNnm. De plus, elle n'est due qu'au passage d'une certaine quantité de calorique de A sur B ; car rien d'ailleurs n'est changé dans l'état du gaz qui a servi d'intermédiaire.

Mais ceci ne nous a pas seulement servi à faire voir comment l'on pouvait réaliser cette condition du maximum d'effet, condition qui consiste en ce qu'il n'y ait pas contact entre des corps à des températures différentes ; nous allons encore en déduire le fait suivant : c'est que la quantité d'action mécanique maxima est la même, quel que soit le gaz servant d'agent intermédiaire, quelle que soit sa masse, sa pression initiale, dès que la quantité de chaleur passant du corps A sur le corps B est la même.

Pour cela, démontrons la réciproque du principe ci-dessus, c'est-à-dire que : On peut faire passer une certaine quantité de chaleur d'un corps sur un autre à plus haute tem-

« pérature, en dépensant une certaine quantité d'action mécanique.

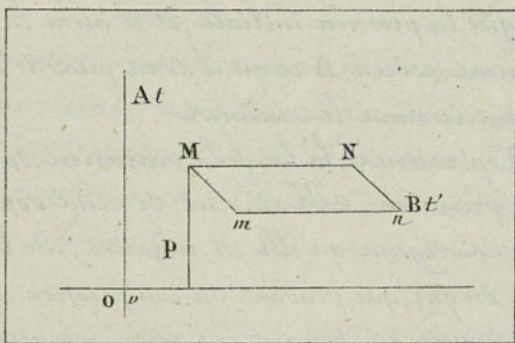
« En effet, prenons le même volume v de gaz à t° et sous une pression p et répétons la même
 « série d'opérations, mais en sens inverse, nous ferons dilater le gaz hors du contact de A , sa pression va
 « baisser rapidement; sa température, décroîtra aussi. Lorsque le gaz sera à t° , approchons B en continuant
 « à augmenter son volume; sa pression continuera à diminuer, mais moins rapidement; car, moyen-
 « nant le flux de chaleur qui passera de B au gaz, ce gaz gardera la même température t° ; je continue
 « cette opération jusqu'à ce que le gaz ait pris à B une quantité de chaleur égale à celle qu'il lui avait
 « cédée dans l'opération précédente. Cela fait, j'écarte B et je fais diminuer le volume. La température
 « va s'élever et, par ces deux motifs réunis, la pression va augmenter rapidement. Une fois le gaz revenu
 « à t° , j'approche A et je continue à comprimer le gaz; la pression augmentera, mais la température
 « ne s'élèvera pas, le gaz cédera simplement à A la partie de son calorique qui, de l'état latent, passe
 « par cette compression à l'état sensible. Et, par les mêmes raisons que ci dessus, lorsque le gaz aura
 « repris son volume primitif, la pression sera la même que la pression initiale, et il aura la même
 « quantité de chaleur, c'est-à-dire qu'il aura précédemment cédée à A ce qu'il avait pris à B . Cette
 « fois, c'est le volume et la température que l'on sait être redevenus les mêmes.

« On voit que, dans cette deuxième série d'opérations, la loi de la variation des pressions
 « et des volumes est exactement la même que dans la première. Mais, ici, si nous voulons de
 « même évaluer la somme des actions mécaniques, nous voyons qu'elle est négative, car les pressions
 « sont constamment plus faibles pendant la dilatation du gaz, que pendant sa compression. Il y a donc
 « une action mécanique dépensée. Il est, de plus, facile de voir, en suivant ces deux opérations par à
 « par, que pour une même quantité de chaleur passant soit de A vers B , soit de B vers A , on avait
 « la même quantité d'action mécanique, soit produite, soit dépensée, laquelle est toujours représentée
 « par le même quadrilatère curviligne $MNm'n$.

« Mais je suppose qu'il n'en est plus de même avec de l'hydrogène, si c'est de l'air
 « atmosphérique que j'ai employé dans le premier cas, ou même avec ce même air atmosphérique
 « à une pression différente. Qu'en résultera-t-il? Eh bien la quantité d'action produite est 2 avec l'air
 « et 3 avec l'hydrogène, je me servirai de l'hydrogène pour porter de la chaleur de A sur B , j'aurai
 « produit une quantité d'action mécanique représentée par 3; mais je n'ai besoin, en prenant pour
 « agent intermédiaire l'air atmosphérique, que de dépenser une quantité d'action représentée par 2,
 « pour rendre à A la quantité de chaleur portée tout-à-l'heure de A sur B ; lorsque cette double
 « opération est terminée, rien n'est changé, si ce n'est qu'il me reste une quantité d'action méca-
 « nique représentée par t , qui ne m'a rien coûté; c'est le mouvement perpétuel, c'est encore, si l'on
 « veut, créer de la chaleur, c'est absurde; nous concluons donc que: Quelque soit le gaz agent
 « intermédiaire de la transmission, l'on obtient toujours le même effet maximum par la transmission
 « de la chaleur d'un corps chaud à un corps froid; c'est-à-dire que, quels que soient les volumes
 « et les pressions du gaz employé, quelle que soit la nature de celui-ci, les courbes qui forment les
 « côtés du quadrilatère pourront bien changer, mais la surface du quadrilatère restera la même,
 « si A et B conservent la même température et si le flux de chaleur est le même.

« M. Brummel, qui a cherché à employer l'acide carbonique, n'est, en effet, arrivé
 « à aucun résultat.

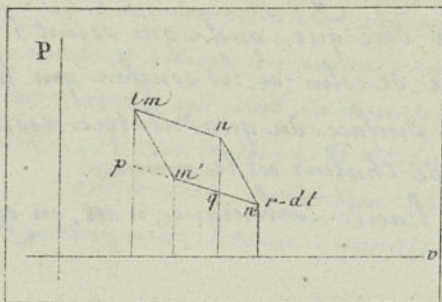
« Mais ce que nous avons dit des gaz peut s'étendre aux vapeurs; prenons, par exemple,
 « de l'eau. J'enferme cette eau dans une enveloppe imperméable à la chaleur; si j'augmente la
 « capacité de cette enveloppe, le vide va être rempli par une certaine quantité de vapeur qui se formera
 « aussitôt. Mais si, comme je le suppose, le corps A est en contact avec cette eau, sa température ne
 « baissera pas et c'est à cette source de chaleur que l'eau qui passera à l'état de vapeur, empruntera
 « la quantité de calorique qui lui est nécessaire dans cette transformation; de plus, la vapeur se formera
 « à la tension maxima qui correspond à cette température t , et comme cette température reste cons-
 « tante tant que le corps A est en contact avec l'eau, la tension de la vapeur, c'est-à-dire la pression
 « qu'elle exerce sur les parois de l'enveloppe qui la contient, restera la même lorsque je ferai varier
 « son volume. J'aurai donc une horizontale pour représenter la loi de variation des pressions en
 « fonction des volumes.



dilatation lorsque la température est descendue à t' ; j'approche alors B, et, si je condense, la va-
 « peur va repasser à l'état liquide; mais la température restant toujours la même, à cause du contact
 « de B, la pression restera constante et sera représentée par mn; j'écarterais le corps B lorsqu'il aura
 « absorbé toute la quantité de chaleur que l'eau avait empruntée à A; et continuant la compression
 « du volume, je démontrerais, comme ci-dessus, que la courbe MM doit aller passer par le point M; —
 « d'ailleurs les pressions augmentent, puisque la température s'élève de t' à t ; le corps aura repris
 « en entier l'état liquide qu'il avait à l'origine.

« Puisqu'un liquide peut, de même, servir d'intermédiaire dans la création de la
 « quantité maxima d'action mécanique que peut produire le passage d'une certaine quantité de
 « chaleur d'un corps sur un autre, j'en conclurais que cette quantité maxima est la même, que
 « l'agent intermédiaire soit un gaz ou un liquide et, cela, en réduisant, comme ci-dessus, à l'absurde

« Voyons, maintenant, à déterminer quelle est la valeur de cette action mécanique
 « développée et, pour cela, appliquons le calcul à la théorie ci-dessus.



« Je supposerais ici que les deux températures
 « des corps A et B ne diffèrent que d'une quantité
 « infiniment petite dt ; ainsi $t' = t - dt$. Nous devons
 « obtenir pour la quantité d'action mécanique produite,
 « une quantité constante, bien que fonction de p et de v ,
 « d'après ce que nous avons démontré.

« Je dis d'abord que dans ce cas d'une différence

« de température infiniment petite, je pourrai considérer le quadrilatère comme un parallélogramme. En
 « effet, si je considère le lieu géométrique des températures exprimées en fonction du volume v et de la pression
 « p , j'ai une surface. Attribuer à t deux valeurs infiniment voisines t et $t-dt$, c'est couper cette surface
 « par deux plans horizontaux infiniment voisins, donnant lieu à deux courbes infiniment rapprochées, dont
 « les éléments infiniment voisins $m n$ et $m' n'$ seront parallèles. Formant aussi de la même manière le
 « lieu géométrique de la quantité absolue de chaleur Q , les éléments $m m'$ et $n n'$ seront les projections
 « courbes d'égalité de quantité de chaleur infiniment voisines, $m m'$ et $n n'$ seront donc parallèles; le
 « quadrilatère $m n m' n'$ étant formé de côtés parallèles deux à deux, est un parallélogramme.

« La surface de ce parallélogramme est égale à celle du parallélogramme $m n p q$, c'est-à-dire
 « à $\dots \dots dv \cdot dp$.

« Telle est donc la valeur de l'effet produit maximum, or, $dp = nq$; c'est la différentielle de
 « la pression, quand on fait varier la température sans changer le volume. Or, on a :

$$pv = R (267 + t),$$

« d'où, $v dp = R dt$ et $dp = R \frac{dt}{v}$;

« d'où, l'effet maximum produit $= \frac{R}{v} dt dv$.

« Or, la quantité de chaleur dépensée est $dq = \frac{dq}{dp} dp + \frac{dq}{dv} dv$.

« Mais la condition que t reste le même pendant tout le temps que A cède de la chaleur
 « au gaz, donne

$$v dp + p dv = 0, \quad \text{d'où} \quad dp = -\frac{p}{v} dv$$

« D'où $dq = \left(\frac{dq}{dv} - \frac{dq}{dp} \frac{p}{v} \right) dv$.

« D'où le rapport de l'effet produit à la force dépensée, sera égal à

$$\frac{R dt}{v \frac{dq}{dv} - p \frac{dq}{dp}}$$

« R est un coefficient qui est connu, lorsqu'on connaît la masse du gaz. Cette quantité
 « ne devant dépendre que de la température t , j'ai

$$v \frac{dq}{dv} - p \frac{dq}{dp} = RC,$$

« C étant une fonction de t égal à une fonction $C(pv)$ car t est une fonction de pv ,

« d'où $v \frac{dq}{dv} - p \frac{dq}{dp} = RC(fv)$

« ce qui donne en intégrant

$$q = R (f(pv) - C(pv) \log. hyp. p), \quad f(pv) \text{ étant une fonction}$$

« arbitraire.

« En effet $\frac{dq}{dp} = R v f'(pv) - v \log. p C'(pv) - C(pv) \frac{1}{p}$

et

« et $\frac{dq}{dv} = R p f'(pv) - p \log p C'(pv)$

« D'où $v \frac{dq}{dv} - p \frac{dq}{dp} = R C(pv)$

« et $q = R (B - C \log p)$

« B et C étant des fonctions de t, puisque t est fonction du produit pv.

« Cette formule est susceptible d'une vérification. En effet, si, sans changer la température du gaz, je fais varier son volume, j'ai

$$q' = R (B - C \log p')$$

« D'où $q - q' = R C \log \frac{p'}{p} = R C \log \frac{v}{v'}$

« ce qui me donne la loi de Dulong, car il résulte de cette dernière égalité, qu'un gaz quelconque, à une température déterminée, dégage, lorsqu'il est contracté d'une même fraction de son volume, une quantité de chaleur qui est la même pour tous les gaz.

« Il y a plusieurs moyens de déterminer C; on le peut, entre autres, par l'expérience suivante de M. Dulong. Il a pris 1 ^{Kilog} d'air à 0° sous la pression atmosphérique, c'est-à-dire que l'on avait $v = 0,770$, $p = 10330$ ^{Kil.} par mètre carré; et il a trouvé qu'en le comprimant de $\frac{1}{267}$, ce qui donne $dv = -\frac{1}{267}$, on obtenait $dt = 0,421$, c'est-à-dire que la température s'élève de 0,421

« On introduit alors ces valeurs dans l'expression de C

$$\frac{1}{C} = \frac{R}{v \frac{dq}{dv} - p \frac{dq}{dp}}$$

« Enfin, s'appuyant sur ce que le calorique spécifique à volume constant est, dans les gaz, égal à 0,267 et remarquant, d'ailleurs, que ce calorique spécifique n'est autre que la différentielle de q par rapport à t, j'ai encore la relation.

$$dq = R \left(\frac{dB}{dt} - \frac{dC}{dt} \log p \right) = 0,267.$$

« J'arrive ainsi à

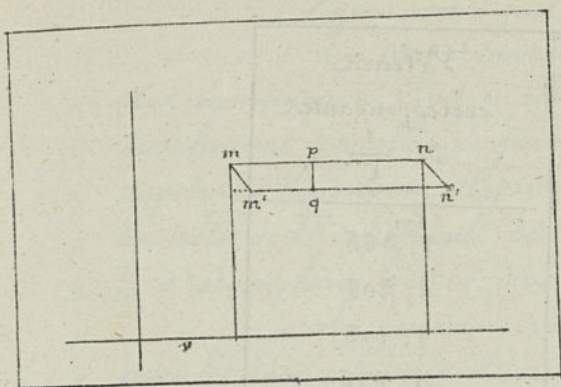
$$\frac{1}{C} = 1,41.$$

« Ce qui signifie que la quantité d'action mécanique maximum, produite par une unité de chaleur passant d'un corps à 0° à un corps à -1°, est égale à 1 ^{Kilog}, 41 élevé à 1 mètre.

« Telle est la valeur de C pour $t = 0$.

« Pour avoir cette même valeur à d'autres températures, il faut avoir recours à des liquides; alors la formule est différente.

« Je prends un volume v de liquide à une température déterminée, et j'augmente son volume en contact avec A; jusqu'à ce que la température restant la même, il passe tout entier à l'état de vapeur; j'aurai l'horizontale nm; j'écarte ensuite le corps A et j'augmente le volume dans une enveloppe imperméable à la chaleur, jusqu'à ce que l'abaissement de température soit



« de dt . Je comprime maintenant la vapeur en contact
 « avec le corps B, à la température $t - dt$; la vapeur se
 « condense, le calorique latent pris à A passe dans B, et
 « la loi des pressions est encore représentée par $m' n'$, pa-
 « rallèle à l'axe des volumes. Cette compression est
 « continuée jusqu'à ce que l'on ait rendu à B la chaleur
 « empruntée à A. Cela fait, on continue à réduire le
 « volume en écartant B, jusqu'à ce que le volume soit
 « redevenu ce qu'il était primitivement. L'élément
 « $m m'$ ici, étant distant d'une quantité finie de $n n'$,

« ne lui est pas parallèle; cependant le trapèze $m m' n' n$ en a par moins pour mesure $m n p q$,
 « en négligeant des infiniment petits de 2^e ordre.

« Or, $p q = \frac{dp}{dt} dt$; p étant la pression de saturation correspondant à une tempé-
 « rature t , pour le liquide que l'on considère. $m n$, c'est la quantité dont s'est accru le volume du
 « liquide par sa réduction en vapeur.

« Si donc on nomme ρ la densité du liquide et δ celle de la vapeur, v le volume du
 « premier et v' celui de la seconde, on a

$$\rho v' = \delta v \quad \text{d'où} \quad v' = \frac{\delta v}{\rho}$$

« L'effet produit maximum est donc égal à

$$v \left(1 - \frac{\delta}{\rho}\right) \frac{dp}{dt} dt.$$

« Maintenant la chaleur transmise, qui a produit cette quantité d'action méca-
 « nique est égale à la quantité de calorique latent que possède le volume de vapeur, on a $v K$, si
 « j'appelle K le calorique latent de la vapeur. Par conséquent, l'action mécanique produite par la
 « transmission d'une unité de chaleur, est représentée par

$$\left(1 - \frac{\delta}{\rho}\right) \frac{dp}{dt} dt = \frac{1}{C} dt;$$

« nous retrouvons ici la même fonction C de la température dont il vient d'être question. Mais
 « cette formule nous permet de calculer différentes valeurs de la fonction C .

« Des expériences faites par plusieurs physiciens, donnent pour différents liquides
 « les valeurs de K et de $\frac{dp}{dt}$ qui correspondent à la température de l'ébullition, ainsi que la densité
 « de leur vapeur à diverses températures.

« On forme ainsi le tableau suivant :

- Suit le tableau -

Nom du Liquide.	Température de l'ébullition en degrés centigrades.	Valeurs correspondantes de $\frac{1}{C}$
Ether sulfurique.....	35, 5	$1,365$
Alcool.....	78, 8	$1,208$
Eau.....	100, 0	$1,115$
Essence de térébenthine....	156, 8	$1,076$

« Il existe un autre moyen de calculer les K.m. valeurs de $\frac{1}{C}$ d'une manière approxi-
 « mative, entre des limites étendues de la température. Il faut admettre pour cela, ce qui est sensi-
 « blement exact, que la quantité de chaleur contenue dans un même poids de vapeur d'eau, est la
 « même, quelle que soient la température et la pression correspondantes, et, de plus, que les lois de
 « Mariotte et de Gay-Lussac s'appliquent aux vapeurs. On peut alors dans la formule

$$\frac{\left(1 - \frac{\delta}{\rho}\right) \frac{d}{p} dt}{K} = \frac{1}{C} \text{ exprimer aisément } \frac{\delta}{\rho} \text{ et } K \text{ en fonction de } t, \frac{dp}{dt} \text{ se déduira des}$$

« expériences de Dulong, Arago et Regnault, sur la pression de la vapeur, à l'état de saturation
 « à diverses températures.

« On trouvera ainsi d'autres valeurs de $\frac{1}{C}$ correspondantes aux mêmes valeurs de la
 « température, que l'on pourra comparer à celles qui précèdent. On dressera ainsi le tableau suivant:

Températures.	Valeurs de $\frac{1}{C}$
$t = 0,$	$1,58$
$t = 35,5$	$1,29$
$t = 78,8$	$1,14$
$t = 100$	$1,11$
$t = 156,8$	$1,07$

« L'accord de ces chiffres déduits d'expériences très différentes, est assez satisfaisant; ils
 « concourent à démontrer que la force motrice produite par la chaleur, décroît avec la température.

« Si l'on représente par une courbe la valeur de $\frac{1}{C}$, pour différentes températures, on
 « remarquera qu'elle se rapprochera de l'axe des températures, à mesure que celles-ci augmentent
 « (fig. 2). D'ailleurs, les expériences de M. Dulong sur la vapeur à de fortes pressions, vérifiées par
 « M. Regnault, donnent d'autres points plus éloignés. Maintenant la quantité d'action, pour
 « une différence dt de température, est représentée par la surface élémentaire $mnpq$; d'où il suit
 « que, dans le cas où les deux températures seront t et t' , $m p M P$ représentera la quantité d'action

« mécanique maximum que peut développer une unité de chaleur.

« Voyons jusqu'à quel point les résultats pratiques approchent de ce résultat théorique.

« On trouve dans le comté de Cornwall, les machines à vapeur les plus puissantes, les plus économiques. C'est, en effet, au centre de ces mines éloignées des gisements de houille et pour le dessèchement desquelles de grandes forces étaient nécessaires, qu'ont dû se faire les progrès les plus rapides. La vapeur est prise dans la chaudière à la pression de 2^{atm} , 75, c'est-à-dire que, d'après les tables de M. Regnault, sa température est de 130° ; la pression varie dans le condenseur de $\frac{1}{10}$ à $\frac{1}{15}$ d'atmosphère, c'est-à-dire que la température y est de 46° .

« La puissance motrice est donc théoriquement égale à la surface de la courbe comprise entre les deux ordonnées élevées par les points $t = 46$ et $t = 130^{\circ}$. Or, d'après les valeurs connues, 1,41 &c. des ordonnées de la courbe entre ces limites, on voit que la valeur moyenne est d'environ 1,20; d'un autre côté, la différence entre ces deux températures est de 84° . L'action mécanique est donc égale au produit $1,20 \cdot 84$ exprimant des Kilogrammes élevés à 1 mètre. Mais, dans la pratique, l'unité de chaleur est produite par la combustion du charbon, et 1^{Kilog} développe 7236 unités de chaleur. L'action mécanique produite par un Kilogramme de charbon est donc égale à $1,20 \cdot 84 \cdot 7236 = 728380$.

« Maintenant, dans le Comté de Cornwall, pour exciter le zèle des Ingénieurs, on établit entre eux un concours perpétuel, par la publication mensuelle des effets produits par les machines des différentes exploitations, et l'on trouve dans ces tableaux, pour maximum de l'effet produit par la combustion d'un Kilog. de charbon, suivant les uns 238,000, suivant les autres 322,150.

« Cette dissidence tient à ce que la quantité de charbon est évaluée en volume, et que sa densité est plus grande que celle du charbon ordinaire et encore peu fixée.

« Il est à remarquer, néanmoins, que ces machines de Cornwall sont bien supérieures à toutes les autres. En effet, la première consomme un Kilog. de charbon par heure et par force de cheval; la deuxième 0,84. Et les machines ordinaires consomment 4,5 et 6 Kilog. par heure et par force de cheval, selon l'intelligence qui a présidé à leur construction et leur état d'entretien.

« Quant à cette différence entre les résultats de la pratique et ceux de la théorie, elle s'explique naturellement par la perte qui résulte du contact inévitable de corps à des températures notablement différentes, pendant le mouvement de la vapeur.

« La théorie qui vient d'être exposée, a l'avantage de montrer de quel côté l'on doit diriger ses efforts, pour obtenir des effets plus puissants. D'abord, on n'obtiendra aucun résultat, comme nous l'avons vu, par l'emploi de tel gaz plutôt que de tel autre. Il faut chercher, la fig. 2 l'indique, à étendre les limites de la température. Du côté des basses températures, il y a peu à attendre, car la chaleur de l'eau, dans nos climats, est, en moyenne de 10° , et il est fort difficile d'avoir une source réfrigérante continue à cette température. De l'autre côté, le champ est illimité, mais il y a des difficultés de pratique; à des températures élevées, les corps en contact tendent à se souder, le frottement est rendu impossible; de plus, pour obtenir ces températures, il faut employer la vapeur à une très haute pression; d'où la nécessité d'appareils très résistants; c'est ici que l'emploi d'autres vapeurs pourrait présenter quelque avantage.»

Chapitre 1^{er}

Chapitre 1.

Historique de l'invention des Machines à vapeur.

§ 1^{er}.

Premières recherches sur l'application de la vapeur.

Nous allons maintenant résumer, avant de passer à l'étude des machines à vapeur actuelles, les diverses phases par lesquelles a passé cette industrie.

Le passé fournit peu d'exemples utiles pour la pratique. Ce n'est que de nos jours qu'on a tiré de l'emploi de la chaleur ces résultats étonnants que nous voyons se développer devant nous.

L'antiquité n'a laissé que des résultats peu importants. Les philosophes anciens avaient pourtant connaissance de la puissance développée par l'eau passant à l'état de vapeur, et Aristote et Sénèque attribuent les tremblements de terre à la transformation subite de l'eau en vapeur. Héron, dont il reste une machine connue sous le nom de Fontaine de Héron, et qui est employée aujourd'hui dans les mines de Schemnitz, comme moyen d'épuisement, a laissé des ouvrages qui sont arrivés jusqu'à nous. Ce fait, qu'on peut obtenir de la force motrice avec de la chaleur, s'y trouve consigné; sa machine est, d'ailleurs, une machine à réaction. Ainsi que le représentent les figures 3, de l'eau est contenue dans un vase sphérique pouvant tourner d'un axe; cette eau étant portée à la température d'ébullition, la vapeur sort par les orifices a et b, par sa pression sur les parois opposées à ces orifices, détermine la rotation.

Ce n'est ensuite qu'à l'époque de la renaissance, qu'on a repris ces questions.

En 1543, Blasco de Garay demanda à Charles-Quint son appui pour l'application qu'il voulait faire de la chaleur à la marche des vaisseaux. Une Commission fut nommée, un bateau de 200 tonneaux fut mis à sa disposition et, d'après le procès-verbal dressé par la Commission et trouvé dans les archives de l'Amirauté en Catalogne, ce bateau fit une ou deux lieues à l'heure. Une chaudière était placée dans son intérieur, et à l'extérieur se trouvaient des espèces de roues de moulin. Ce procès-verbal, où se trouvent consignés ces détails, est la seule trace qui reste de cette expérience qui, d'ailleurs, n'eut pas de suite.

En 1615, sous le règne de Louis XIII, Salomon de Caen publia en français, à Francfort, son ouvrage: *Des raisons des forces mouvantes*, dans lequel se trouve le passage suivant:

« La violence de la vapeur, qui cause l'eau de monter, est provenue de la dite eau, laquelle vapeur sortira après que l'eau sera sortie par le robinet, avec grande violence. »

Son appareil est représenté fig (4). L'eau est introduite par le tube t; si, ensuite, on ferme cette communication et qu'on porte l'eau à l'ébullition, la vapeur formée va presser sur le liquide,

le forcera à s'élever dans le tube t' , et lorsque le liquide sera sorti tout entier par ce tube, la vapeur s'échappera à son tour avec violence par la même issue.

On ne doit pas, du reste, s'étonner de la peine et du temps qu'il a fallu pour entrer dans cet ordre d'idées, si l'on songe que Galilée venait de découvrir tout récemment le fait de la pression de l'air, lorsque Salomon de Caus publiait son ouvrage.

En 1629, Branca fait chauffer de l'eau dans un vase et dirige la vapeur qui en sort avec force, sur les aubes d'une roue à palettes. Dans cette expérience, la chaleur est employée comme force mouvante.

En 1663, le marquis de Worcester, auquel les Anglais attribuent l'invention des machines à vapeur, fut mêlé à tous les événements politiques qui marquèrent cette époque; il remarqua, étant prisonnier à la tour de Londres, que le couvercle d'une bouilloire qu'il avait mise devant le feu, était soulevé avec violence par l'action de la chaleur. Frappé de cette force de la vapeur, il imagina un appareil qu'il a décrit dans un ouvrage intitulé: *Century of Inventions*.

Cet appareil, dont la description n'est pas très claire, paraît se rapprocher de celui de Salomon de Caus. On peut cependant supposer qu'il consiste, comme le représente la fig. (5), en un vase d'où sort la vapeur, qui va presser successivement sur l'eau contenue dans deux autres vases. Il dit, en effet, qu'un vase d'eau rarifiée par l'action du feu, élevait quarante vases d'eau froide.

En 1683, Samuel Moreland écrit que: l'eau étant évaporée par le feu, ses vapeurs occupent incontinent un plus grand espace, un espace, ajoute-t-il, environ 2000 fois plus grand. Ce chiffre est remarquable pour l'époque, car le véritable est 1700.

Enfin, en 1650, Denis Papin publie le résultat de ses expériences. Denis Papin naquit à Blois; il prit ses grades à Paris comme médecin, passa en Angleterre, où il fut nommé, en 1681, membre de la société royale, et revint dans son pays, que la révocation de l'édit de Nantes le força bientôt de quitter. Il se réfugia alors en Allemagne auprès du Landgrave de Hesse, et mourut en 1720, professeur de mathématiques à l'Université de Marbourg.

Papin, frappé du fait de la pression atmosphérique, chercha à utiliser cette force et se demanda s'il n'était pas possible, par exemple, de supprimer la pression atmosphérique agissant sur l'une des faces d'un piston; la pression agissant sur l'autre face, n'étant plus contrebalancée par l'action de la première, devrait alors avoir tout son effet. Il pensa d'abord à une chute d'eau qui aurait fait mouvoir des pompes faisant le vide sous le piston; mais il n'y avait rien là de bien avantageux, ce n'était qu'une transformation de forces motrices, un moyen de communiquer à distance la force mécanique de l'eau.

Il eut ensuite recours à la poudre à canon pour faire le vide. Il n'obtint que des résultats peu satisfaisants. Mais l'idée vraiment lumineuse est l'application de la vapeur à cet anéantissement de la pression atmosphérique; on savait, avant lui, que l'eau, à l'état de vapeur, occupait un grand volume, mais ce qu'on ignorait c'est que, par le refroidissement, la vapeur se condense et fait le vide.

Papin place une couche d'eau sous un piston équilibré à l'aide d'un contre-poids; l'eau chauffée, la vapeur se développe; le piston se soulève par l'effet du contre-poids et laisse, entre

lui et le fond du cylindre, un espace rempli de la vapeur qui s'est formée. Lapin enlève alors le foyer, la vapeur se condense et le piston baisse sous l'impulsion d'une force de 10,000 Kilog, en supposant que le piston ait une surface d'un mètre carré.

Tout ce qui précède est consigné dans les actes de Leipsick pour 1688, recueil de diverses pièces touchant quelques nouvelles machines, et dans un article intitulé: Comment l'aneantissement de la pression atmosphérique sous un piston peut produire de la force motrice.

On sait, au reste, que Lapin a réalisé son expérience à l'aide d'une petite machine dans laquelle le piston avait deux pouces et demi de diamètre, tandis que rien ne dit que Salomon de Caus et le marquis de Worcester aient construit leurs machines.

Enfin, en 1698, un Anglais appliqua, dans la pratique, ce mode de création de force motrice. C'est Savery. En admettant que le marquis de Worcester ait eu la pensée du vase séparé pour la production de la vapeur, Savery n'a apporté qu'un perfectionnement à l'idée de ce dernier et à celle de Lapin; c'est le remplissage de ces vases par le refroidissement extérieur, à l'aide de l'eau froide. La fig. (6) représente sa machine. Si nous supposons les vases remplis une première fois d'eau et que nous mettions l'un d'eux en communication avec la vapeur, celle-ci pressant sur la surface de l'eau, la soupape b sera soulevée et le liquide s'élèvera dans le tube central; l'eau se trouvera remplacée dans le vase par de la vapeur. Si alors nous fermons le robinet E et que nous condinions la vapeur par un jet extérieur d'eau froide, la pression va baisser considérablement dans le vase et, en vertu de la pression atmosphérique qui agit toujours à la surface du liquide à élever, ce liquide montera par le tube central, soulevra la soupape a, et viendra remplir le vase; pendant ce temps, la vapeur agira sur l'autre vase.

On voit que, dans cet appareil, Savery n'a fait qu'étendre l'idée du refroidissement de Lapin, en le provoquant par un jet extérieur d'eau froide.

Mais la construction d'une pareille machine était alors fort difficile, l'art de la chaudronnerie n'étant pas poussé très loin; elle fonctionnait à haute pression; pour élever l'eau de 60^m, par exemple, il fallait une pression de 6 atmosphères et, par suite les vases devaient avoir des parois suffisamment résistantes; un autre inconvénient de cette machine résultait de la grande quantité de vapeur qui se condensait au contact de l'eau, sur laquelle elle venait exercer sa pression.

En 1707, Lapin proposa, pour remédier, en partie du moins, à cette perte, un piston flottant aussi imperméable que possible à la chaleur.

Enfin, en 1711, Newcomen, forgeron, et Cowley, vitrier, tous deux habitants de Dartmouth, dans le Devonshire, établirent une machine plus perfectionnée et qui est la première qui ait rendu un véritable service à l'industrie. Ils avaient connaissance des travaux de Lapin et firent entrer deux éléments principaux dans leur machine. Le premier, emprunté à Lapin, était un piston se mouvant dans un cylindre; le second, la condensation par l'eau froide injectée extérieurement; ce dernier était emprunté à Savery. Ils s'associèrent, au reste, avec ce dernier qui formait opposition à la demande faite par eux d'une patente, comme condensant, lui aussi, par l'eau froide.

La première machine qu'ils construisirent date de 1711, et la réunion de ces

deux idées engendra un appareil bien plus pratique que celui de Savery. D'abord, la chaudière n'a besoin d'aucune force, la vapeur n'étant produite qu'à la pression atmosphérique; de plus, on n'a plus cette perte due à la condensation de la vapeur, tant au contact de l'eau, qu'au contact des parois du vase qui devaient être échauffés à mesure que le liquide baissait. Il n'y a ici qu'un refroidissement dû au contact de l'air atmosphérique et de l'eau appliquée extérieurement comme réfrigérant. Mais un grave inconvénient, sensible surtout dans la période de condensation de la vapeur, provenait surtout de la grande difficulté qu'on avait, à cette époque, d'obtenir une coïncidence tant soit peu convenable entre le corps du cylindre et le piston. Pour y remédier, ils placèrent une petite couche d'eau sur la surface supérieure du piston; l'avantage de cette disposition résultait de ce que l'eau passait plus difficilement que l'air, par les vides existants entre le cylindre et le piston. Elle les conduisit d'ailleurs, par le hasard, à un grand perfectionnement. Une de leurs machines était déjà établie, lorsqu'ils s'aperçurent, un certain jour, que le piston descendait plus vite que de coutume; en même temps, une fissure s'était produite dans le piston, et, par elle, l'eau filtrait dans le corps de pompe en plus grande quantité qu'à l'ordinaire; ils rapprochèrent ces deux faits, en conclurent que c'était cette eau introduite qui condensait la vapeur plus rapidement, et eurent alors l'idée d'employer un jet intérieur d'eau froide, pour effectuer la condensation.

Comme je l'ai dit plus haut, leur première machine date de 1711. Examinons ses différentes parties, lorsque, un peu plus tard, ils y eurent apporté quelques perfectionnements. Elle est, certainement, bien vieillie aujourd'hui; cependant, il n'est pas inutile de la connaître, car il lui reste toujours le mérite de la simplicité des moyens, et, par suite, elle peut être construite par des ouvriers peu habiles.

A est la chaudière (Figure 7) où se produit la vapeur; à la partie supérieure est une soupape de sûreté qui ne permet pas à cette vapeur d'atteindre jamais une pression sensiblement supérieure à la pression atmosphérique; de cette chaudière part un tube qui la fait communiquer avec le cylindre; une soupape peut intercepter en tout ou en partie cette communication. Quant au piston, il agit à l'extrémité d'un balancier, à l'autre extrémité duquel est attachée une poutre qui a toute la profondeur du puits et qui met en mouvement une série de pompes élevant l'eau du fond de la mine de bassin en bassin jusqu'au niveau du sol.

Lorsque le piston est au bas de sa course, on ouvre la soupape qui interceptait la communication entre la chaudière et le cylindre; par suite, la pression atmosphérique qu'on avait anéantie sur la surface inférieure du piston, est rétablie, et le piston s'élève, sollicité par le poids du système d'épuisement qui agit à l'autre extrémité du balancier. Lorsqu'il est en haut de sa course, on ferme la soupape et on injecte de l'eau froide en ouvrant le robinet r; elle est alors lancée sous une pression égale à la hauteur de la colonne d'eau élevée dans le tube latéral m; cette eau est prise dans un bassin d'épuisement et refoulée dans ce tube à l'aide d'une pompe foulante mise en mouvement par le balancier. La vapeur est condensée par cette injection, et la pression inférieure réduite à $\frac{1}{8}$ d'atmosphère; par suite, le piston va se trouver sollicité à descendre, par une pression égale à $\frac{7}{8}$ d'atmosphère. On comprend donc ce mouvement de va-et-vient. Mais, à chaque coup de piston, de l'air s'introduit avec la vapeur, de l'eau de condensation vient se réunir au fond du cylindre; le tube a a pour but de donner une issue, à ces deux éléments; lorsque la vapeur est introduite

elle les refoule et ils sortent avec bruit, en soulevant la soupape qui termine le tube a et qu'on appelle le reniflard; cette eau jetée hors du cylindre, est recueillie dans un réservoir et sert à alimenter la chaudière.

Le moyen qu'ils employaient pour connaître le niveau de l'eau, est le même que celui usité actuellement; c'étaient deux robinets placés à des hauteurs différentes, et dont l'un, pour que la machine marchât dans des conditions convenables, devait toujours donner de la vapeur, tandis que l'autre devait donner de l'eau.

Un ouvrier était toujours nécessaire pour ouvrir et fermer successivement la soupape qui donnait accès à la vapeur dans le cylindre, et le robinet qui donnait un jet d'eau froide. Un enfant, Humphrey Lotter, chargé de cet emploi, eut l'idée, de disposer un système de ficelle et de morceaux de bois qui faisait ouvrir et fermer le robinet et la soupape. Plus tard, en 1718, Beighton perfectionna ce mécanisme, en attachant au balancier une poutrelle b qui, à l'aide de deux chevilles horizontales rencontrant les tiges des robinets, ferme et ouvre ces robinets.

Ces machines se répandirent beaucoup et, pendant 50 ans, on n'apporta aucun perfectionnement important à leur construction.

En 1772 seulement, John Smeaton, célèbre ingénieur, y apporta quelques perfectionnements de détail, en calculant mieux les proportions.

En 1775, le Duc de Bridgewater, qui contribua beaucoup à donner une grande impulsion aux travaux publics, en Angleterre, secondé par un simple ouvrier, James Brindley, son ingénieur, y apporta de nouveaux perfectionnements. Sa chaudière était extérieurement composée de bois et de briques à la partie supérieure; la partie inférieure était en tôle et, comme l'indique la fig. (8), la cheminée passait à travers la chaudière et était formée d'un grand tube qui en occupait l'axe.

Brindley est l'auteur d'une disposition destinée à maintenir le niveau de l'eau constant dans la chaudière. C'est un flotteur, représenté figure (9), et qui, par un système de poulies, ouvre le robinet du réservoir d'alimentation lorsque le niveau de l'eau tend à baisser, et un contre poids referme ce robinet lorsque le niveau remonte. Cet appareil est encore usité.

§. 2.

Travaux de Watt.

Vint enfin Watt.

James Watt naquit à Greenock en 1736. La fortune plus que médiocre de sa famille, l'obligea d'abord à travailler chez un opticien de Londres qui faisait des instruments de mathématiques; mais sa mauvaise santé le força de revenir bientôt dans sa famille à Glasgow; là, il veut s'établir, mais ne pouvant vaincre les difficultés qu'on lui oppose, comme n'ayant pas un temps suffisant d'apprentissage, il est d'abord attaché à l'Université de Glasgow pour réparer les instruments de physique et autres. Plus tard, avec la protection des membres de l'Université, il s'établit et ouvre boutique à Glasgow. La réparation d'une machine de Newcomen, servant de modèle pour les élèves de l'Université, réparation dont il fut chargé, le conduisit à s'occuper d'une

manière spéciale des machines à vapeur.

Un des vices principaux de cette machine, provenait de la dépense énorme de combustible qu'elle exigeait ; à chaque coup de piston, une certaine quantité de vapeur était employée à réchauffer les parois du cylindre et du piston. Watt eut alors l'idée capitale d'opérer la condensation dans un vase séparé, espérant ainsi obtenir le même effet que par la condensation dans le corps même du cylindre.

À cet effet, il plaça un second cylindre communiquant avec le premier, par l'intermédiaire d'un tube muni d'un robinet (figure 10). Ce vase-condenseur était toujours maintenu à une basse température, tant par l'eau qui y était injectée constamment, que par celle qui l'enveloppait. Maintenant, lorsque le piston étant au haut de sa course, on ouvrait le robinet r, en vertu de la différence de pression, la vapeur se précipitait dans le vase inférieur et s'y condensait ; par suite, le piston s'abaissait ; on fermait alors le robinet et la pression était environ de $\frac{1}{8}$ d'atmosphère ; mais, pour que cette pression se maintint constamment dans le condenseur, il fallait, à l'aide d'une pompe aspirante, enlever l'air introduit avec la vapeur et l'eau de condensation qui arrivait à chaque coup de piston dans ce condenseur ; Watt plaça, à cet effet, la pompe représentée fig. 10 et appelée pompe à air, qui remplace le reniflard de la machine atmosphérique.

On voit que ce perfectionnement, comme, au reste, un perfectionnement quelconque, est accompagné d'une plus grande complication dans la machine ; il suppose donc et exige un progrès dans les arts mécaniques. On venait, d'ailleurs, d'obtenir par l'alésage, une coïncidence plus parfaite entre le piston et le corps du cylindre.

Watt eut aussi l'idée de faire une seconde enveloppe au cylindre, et de mettre l'intervalle compris entre elles, en communication avec la vapeur de la chaudière. Cette vapeur maintenait ainsi le corps du cylindre à une température élevée, et la partie qui s'en condensait venait retomber dans la chaudière.

Watt remarqua encore que l'on pourrait remplacer la pression de l'air atmosphérique qui, à chaque coup de piston, refroidissait le corps du cylindre, par la pression de la vapeur et, à cet effet, il ferma le cylindre. Faisant alors arriver la vapeur dans la partie supérieure, le piston baissait sous la pression de cette vapeur, comme sous celle de la pression atmosphérique, la partie inférieure étant en communication avec le condenseur. Maintenant pour produire le mouvement ascensionnel, il faisait arriver la vapeur sous le piston, au moyen du tube latéral a, en ouvrant le robinet r, fig. 11.

En conséquence de ces divers perfectionnements, Watt remplaça la machine de Newcomen par la machine représentée fig. 12.

Lors en bien saisir le mécanisme, supposons qu'elle sorte des mains du constructeur ; pour peu que la vapeur produite dans la chaudière, soit à une pression supérieure à celle de l'air atmosphérique, et si nous supposons qu'on ait ouvert les soupapes s et s', cette vapeur va se répandre dans l'appareil, en chassant devant elle l'air atmosphérique ; si, de plus, on a ouvert le robinet r, cet air trouvant une issue, va s'échapper dans l'atmosphère ; lorsque la vapeur commencera à sortir par ce même robinet, on pourra regarder l'appareil comme rempli de vapeur et privé d'air, et alors on fermera la soupape s et le robinet r. Si, de plus, on ouvre le robinet r', un jet d'eau froide viendra condenser la vapeur dont la pression agissait sur la face inférieure du piston ; ce jet, d'abord faible,

puisque (la vapeur étant à la pression atmosphérique) son intensité ne dépendra que de la différence du niveau du liquide, deviendra de plus en plus considérable, à mesure que la vapeur se condensant, aura une moindre pression. D'un autre côté, en vertu de cette diminution de pression, le piston va baisser, lorsqu'il sera au bas de sa course, l'on ouvrira *s* et l'on fermera *s'*; la vapeur pénétrera alors sous le piston; l'équilibre entre les pressions sur les deux faces sera rétabli, et il prendra un mouvement ascensionnel en vertu du contre-poids. Inversement, on ouvrira *s'* en fermant *s*, et ainsi de suite.

On entretenait le condenseur à une température environ de 40° , ce qui donnait à la vapeur une pression correspondante de $\frac{1}{10}$ d'atmosphère; quant à l'ouverture et à la fermeture des soupapes, elle se faisait à l'aide d'une pontrelle verticale, armée de chevilles, comme il a été expliqué dans la machine de Newcomen. La chaudière était alimentée, ainsi que l'indique la figure, par l'eau à 40° que la pompe à air retirait du condenseur. L'enveloppe, d'ailleurs, son cylindre d'une double enveloppe, dans laquelle circulait la vapeur de la chaudière; la seule conséquence de cette disposition est d'empêcher la condensation de la vapeur dans l'intérieur du cylindre; nous verrons, au reste, plus tard que cette double enveloppe a une grande utilité dans les machines à haute pression et à détente.

Watt eut ensuite l'idée des machines à haute pression, et il observa alors qu'il est inutile que la vapeur agisse, à haute pression, pendant toute la course du piston; « elle agira seulement pendant le quart de cette course » dit-il dans sa patente. La détente peut même se faire à une pression moindre que la pression atmosphérique, puisque la pression qui agit sous le piston, n'est que de $\frac{1}{10}$ d'atmosphère. D'ailleurs, comme physicien, il avait fait des expériences sur la détente de la vapeur, et avait bien observé que, par son moyen, on obtenait le même résultat mécanique, avec une quantité de vapeur beaucoup moindre. C'est donc à Watt qu'il faut encore rapporter la découverte de la détente et de ses avantages. Il remarqua, ensuite, que l'on pouvait encore employer la détente, lorsque la vapeur agissait simplement à la pression atmosphérique; seulement, dans ce cas, il faisait agir la vapeur pendant la moitié de la course du piston. Une seule modification était à apporter, à la machine représentée par la fig. 12, pour qu'elle put marcher avec détente; elle consistait à placer une soupape en *s''*, de manière que l'on pût introduire ou non, à volonté, la vapeur dans le cylindre.

Watt calcula encore la quantité de chaleur latente que renfermait la vapeur, afin de déterminer la quantité d'eau d'injection nécessaire à la condensation. Il découvrit cette loi, qui s'écarte peu à la vérité, que la vapeur à saturation renferme la même quantité absolue de chaleur, quelle que soit sa température.

C'est en 1769 qu'il prit patente pour sa machine, qui ne dépensait que le tiers du combustible consommé par les machines employées jusques-là; mais les premières applications de cette patente furent très-difficiles; il était sans fortune, et il fut obligé de former avec M. Roebuck, propriétaire d'une usine à fer, à Carron, une association d'après laquelle il cédait les $\frac{2}{3}$ des bénéfices à espérer. Ils traitèrent alors avec les seigneurs des mines de houille de la Duchesse d'Hamilton, et Watt dirigea lui-même la construction de sa machine qui réalisa, de suite, tout ce qu'il en attendait, malgré les difficultés de construction qu'il eut à vaincre; on ne savait pas

encore bien aléser les cylindres et construire les pistons; il fallait, de plus, obtenir un joint étanche entre la tige du piston et le couvercle du cylindre.

Ces difficultés empêchèrent ces machines d'avoir de suite une grande extension; puis, sur ces entrefaites, M. Roëbuck fit de mauvaises affaires, et l'association n'eut pas de suite. Heureusement le succès de cette première machine s'étant répandu, un grand manufacturier de Birmingham, Mathew Boulton, acheta la part de Roëbuck, en 1775; par son influence, il obtint d'abord des Membres du Parlement, la prorogation, jusqu'en 1800, du brevet de Watt, qui allait expirer, et, à dater de là, leur association prospéra.

Quant à l'immense économie du combustible qui résultait de l'emploi de la machine de Watt, elle n'est pas contestable et le fait suivant peut en donner une idée.

Watt, appelé en Cornwall pour remplacer, par trois de ses machines, trois machines de Newcomen, qui servaient à l'épuisement de l'eau dans la mine de Chacewater, Watt, dit-on, traita sur les bases suivantes, qui étaient celles qu'il proposait, en général: Un tiers de la valeur du charbon économisé par l'emploi de sa machine, lui revenait; on commençait par faire des expériences constatant la quantité de charbon économisé pour un même travail. Quant au travail de la machine pendant l'année, il était évalué, à l'aide d'un compteur imaginé par Watt et renfermé dans une boîte fermée à clé. Ce compteur, qui indiquait le nombre de coups de piston, était consulté à la fin de chaque année. Du nombre de coups de piston, on déduisait le travail, et du travail le charbon économisé, d'où la somme qui revenait à Watt. Or, cette somme était assez élevée pour cette seule mine de Cornwall, pour que la Compagnie ait racheté cette redevance moyennant une rente annuelle de 60,000 francs.

Plus tard, Boulton et Watt reconnurent la nécessité de fonder un établissement spécial pour la construction des machines à vapeur, et c'est encore l'un des plus célèbres de l'Angleterre.

Watt prit une patente, quelque temps après, pour une machine à double effet: il avait vu que l'on pouvait obtenir de la vapeur un effet continu, et qu'elle pouvait ainsi remplacer une force mécanique quelconque. Il suffisait, pour cela, de pouvoir faire communiquer aussi la partie supérieure du cylindre avec le condenseur. Cependant les machines à simple effet sont restées préférables dans plusieurs cas de la pratique, entre autres pour l'épuisement de l'eau dans les mines; ainsi, ce sont elles qu'on emploie encore aujourd'hui dans les mines de Cornwall.

Au reste, quelques difficultés de détail se sont présentées dans la réalisation de cette pensée.

Une chaîne, qui, dans le cas d'une machine à simple effet, était suffisante pour transmettre le mouvement du piston, ne convenait plus ici. La vapeur travaillait maintenant dans les deux sens, et une chaîne n'a de pouvoir transmissif que dans le sens de son extension.

Watt eut d'abord recours à une double chaîne, puis à une tige crémaillère engrenant avec le secteur du balancier; enfin les considérations suivantes l'amènèrent à proposer, en 1784, le système connu sous le nom de parallélogramme articulé de Watt: il imagina deux balanciers égaux OA , $O'A'$ (figure 13) et les supposant horizontaux, il relia leurs extrémités par la droite inextensible AA' . Ceci fait, il remarqua que, dans le système ainsi formé, et en égard au mouvement qu'il pourrait prendre, deux points de cette droite, les extrémités A et A' décrivaient des cercles égaux, mais de sens inverse. Quant aux autres points de cette droite, les courbes

qu'ils traçaient, participaient plus ou moins de ces courbures opposées; suivant leur distance aux points A et A'. Quant à la courbure de la ligne décrite par le point milieu, il n'y a pas plus de raison pour que sa courbure soit tournée dans un sens plutôt que dans un autre, d'où Watt conclut que c'était sensiblement une ligne droite; c'est ce que fait voir une construction géométrique qui donne un 8 très allongé, dont une des branches est sensiblement rectiligne. Mais il chercha s'il ne pouvait pas avoir d'autres points résolvant la question; or, en prolongeant la tige OA du balancier, d'une quantité égale à elle-même, et terminant le parallélogramme AB O'A', dont un des côtés est, dans cette position, confondu avec le balancier A'O', il remarqua que le point O' devait aussi décrire une ligne droite. En effet, $OO':OD::Oo':Od$. D'où les éléments Dd sont parallèles aux éléments O'o'. Il en serait de même du point O'', en formant les parallélogrammes articulés ae öf. Watt arrive, d'après cela, dans la pratique, au système représenté figure 14.

Le balancier OB recevant directement et transmettant l'action de la vapeur, a des dimensions considérables. Quant à l'autre O'A', ses dimensions sont beaucoup plus faibles. Watt, dans la pratique, attachait toujours en b la tige du piston, et en d celle de la pompe à air; cette solution du problème de la transformation d'un mouvement de va-et-vient, en un mouvement circulaire alternatif, bien qu'approchée seulement, est, toutefois, parfaitement satisfaisante dans les limites de la pratique.

De plus, pour que cet emploi de la vapeur pût remplacer une force mécanique quelconque, il fallait encore arriver à transformer le mouvement de va-et-vient en un mouvement de rotation continu.

Les premières tentatives furent faites par Lapin. Il proposa deux moyens. Le premier était une espèce d'engrenage; le mouvement de va-et-vient se transmettait par la tige recourbée en forme de crochets à son extrémité. Ce crochet, comme l'indique la figure 15, mordait sur la circonférence d'une roue armée de dents, et lui donnait un mouvement de rotation; maintenant, lorsque le piston remontait sous l'action du contrepoids, ce crochet se soulevait en glissant sur les dents, et allait en saisir une plus éloignée, et à l'aide de laquelle il faisait décrire à l'arbre une nouvelle fraction de tour, dans le mouvement descendant du piston.

Dans le second mode proposé par Lapin et représenté fig. 16, la roue était de même armée de dents; seulement il substituait à la tige mobile terminée en crochets, une tige fixe, la tige même du piston, qu'il arme de dents pouvant se coucher le long de la tige, lorsque le piston remonte, mais résistant dans l'autre sens, et faisant par suite tourner la roue lorsque le piston descend.

C'est un semblable engrenage qui fut employé sur un bateau à vapeur essayé sur la Seine, en 1817.

On oublie la machine du remouleur, comme de toute l'antiquité. Un anglais, Washbrough, de Bristol, proposa cette manivelle, et obtint une patente en 1778. Son appareil est représenté fig. 17.

Watt, pour se soustraire à l'effet de ce brevet, imagina un appareil différent qu'il désigna sous le nom d'appareil planétaire et que représente la figure 18. C'est un système de roues

dentées égales, l'une fixe, par rapport à la bielle, l'autre fixe par rapport à l'axe de la roue principale. Ces deux roues, engrenant l'une avec l'autre, ont d'ailleurs leur centre relié à l'aide d'une tige. Mais Watt, lui-même, renonça à ce système, dès que l'expiration du brevet lui permit d'adopter le moyen le plus simple.

Watt appliqua encore le principe du modérateur à force centrifuge, connu d'ailleurs avant lui. Depuis longtemps on savait que l'on pouvait augmenter ou diminuer la force d'une machine, en donnant un accès plus ou moins facile à la vapeur dans le cylindre; et l'on obtenait ce résultat à l'aide d'une espèce de vanne qu'on manœuvrait à la main. Si l'on voulait obtenir un mouvement constant de l'arbre tournant, on ouvrirait plus ou moins cette vanne, suivant que les résistances à vaincre étaient plus ou moins grandes.

Watt suppléa, par l'application du modérateur à force centrifuge, représenté fig. 19 à l'intelligence et à l'attention d'un mécanicien. Cet appareil se compose, comme on voit, d'un axe vertical, ayant un mouvement de rotation proportionnel à celui de l'arbre tournant; à son sommet sont articulées deux tiges, terminées à leur autre extrémité par deux boules pesantes. Du milieu de ces tiges, en partent deux autres qui viennent s'appuyer sur un collet pouvant monter et descendre le long de l'axe. On voit, tout d'abord, que les deux boules tendront d'autant plus à obéir à l'action de sa pesanteur, que la force centrifuge sera moindre, c'est-à-dire que le mouvement rotatoire sera plus lent; par suite, le collet descendra. Or, imaginons que ce collet communique avec la vanne qui peut intercepter plus ou moins l'orifice donnant accès à la vapeur, et que cette communication soit établie de telle sorte que, quand le collet baisse, la vanne augmente l'orifice; il en résultera nécessairement ceci: que, quand la machine tendra à se ralentir par suite de l'augmentation, par exemple, des résistances à vaincre, la force de cette machine augmentera par un accès plus facile de la vapeur et inversement; d'où l'arbre tendra à garder une vitesse constante. Cette vitesse pourra d'ailleurs être déterminée, en réglant convenablement la machine à l'avance.

De tout ce qui précède, on peut donc conclure, qu'une machine à haute pression, à condensation, à détente et à balancier, peut être considérée comme sortie des mains de Watt, et même que peu de perfectionnements de quelque importance y ont été apportés après lui.

Il faut pourtant dire que le seul génie d'un homme n'aurait pu sans le secours des circonstances, donner naissance à cette industrie, l'une de celles qui ont le plus d'influence sur le bien être de l'humanité. Il est venu à son moment, pouvant profiter et des travaux faits avant lui, et des progrès des arts mécaniques; plutôt, il eut passé pour un rêveur, ne trouvant pas autour de lui les moyens de réaliser son idée.

En 1801, le mécanisme du tiroir et celui de l'excentrique sont imaginés par Murray. Dans une machine à double effet, il faut que successivement la partie supérieure du piston soit en communication avec la chaudière, tandis que la partie inférieure est en communication avec le condenseur et inversement; or, le mécanisme du tiroir représenté fig. 19, donne ce résultat d'une manière simple. Le tiroir, c'est-à-dire la pièce *a a*, est placé dans un espace *A*, communiquant avec la chaudière. On voit, tout d'abord, qu'il satisfait à cette condition, qu'il n'y ait jamais communication entre la chaudière et le condenseur.

Supposons maintenant qu'il marche un peu vers la gauche, il va rétablir aussitôt

les communications qui étaient interceptées d'un côté entre la partie supérieure du piston et la chaudière, de l'autre entre la partie inférieure du piston et le condenseur. Le piston va donc marcher vers la gauche; le piston, arrivé à l'extrémité de sa course, supposons que le tiroir marche un peu vers la droite, les communications inverses s'établiront et le piston marchera de gauche à droite.

Maintenant, ce mouvement de va-et-vient du tiroir, s'obtient du mouvement de rotation de l'arbre, par une transformation du mouvement de rotation circulaire, en mouvement rectiligne alternatif, transformation que donne l'excentrique représentée fig. 20, comme il est facile de le voir.

En 1804, Woolf prend une patente pour l'emploi d'un double cylindre. Watt, tout en remarquant les avantages qu'il y aurait à utiliser la détente de la vapeur, en fit peu d'usage dans la pratique. D'un côté, c'est une force perdue qu'on emploierait; de plus, cet emploi peut donner plus d'uniformité dans l'intensité de la force motrice. Woolf en tira parti au moyen de deux cylindres représentés fig. 21, l'un d'eux, B, ayant un diamètre plus grand que l'autre. Dans A, la vapeur agit directement, successivement dessus et dessous le piston; lorsqu'elle agit dessous, on fait communiquer les deux cylindres par le tube dd; alors la vapeur contenue dans la partie supérieure du cylindre A, va être refoulée dans B, et agira sur le piston de B, mais elle s'y détendra par suite des différences de diamètre, et son intensité d'action diminuera à mesure que les pistons, solidaires l'un de l'autre, s'élèveront; il est entendu que, pendant ce temps, la partie supérieure de B communique avec le condenseur.

Quant au mouvement industriel imprimé par Watt en Angleterre; il ne se propagea que peu en France, à cause de la guerre que se faisaient les deux pays; et au rétablissement de la paix, la France emprunta de suite à l'Angleterre les machines considérées comme les meilleures, les plus perfectionnées, c'est-à-dire les machines à haute pression et à deux cylindres de Woolf. Quant aux machines à basse pression de Watt, elles sont, au contraire, peu répandues en France, et celles qui existent viennent d'Angleterre pour la plupart.

§. 3. Perfectionnements postérieurs à Watt jusqu'à nos jours.

Après avoir suivi, dans les différentes phases de leur développement, les machines à condensation, étudions sous le même point de vue historique, les Machines sans condensation, par conséquent à haute pression.

Les premières offraient, par suite de la grande masse d'eau qu'elles demandent pour la condensation, par suite de la pompe à air, &c., une complication qui, dans certains cas, pouvaient être un grand inconvénient.

C'est encore à Lapin qu'il faut remonter pour trouver l'origine de la machine à haute pression sans condensation. Il en donna une description en 1717. Sa machine se composait de deux cylindres, afin d'éviter la boîte à étouper; chacun d'eux ne représentait que le cylindre

d'une machine à simple effet. Il y appliqua, ainsi que l'indique la figure 22, un robinet à quatre fins. La suite, en lui faisant faire un quart de révolution, il changeait la communication. Dans la position actuelle, la chaudière communiquant avec le cylindre de gauche, la vapeur va soulever le piston, tandis que l'autre communiquant avec l'atmosphère, un contrepoids le fait descendre; une fois les pistons arrivés à l'extrémité de leur course, on tourne le robinet de 90° , et les communications inverses s'établissent.

Mais ce fut en 1802, que Trevithick et Vivian construisirent les premières machines à haute pression et sans condensation. La figure 23 représente un modèle de ces machines. Comme on le voit, le tuyau qui emmène la fumée du combustible, pénètre dans la chaudière et s'y recourbe pour en sortir; un robinet à quatre fins permet d'introduire la vapeur soit sur le piston, soit dessous (cas représenté dans la figure), tandis que l'autre face communique avec l'atmosphère; seulement cette communication se fait par l'intermédiaire d'un tube qui, d'abord, en jetant la vapeur qui sort dans le tuyau de la cheminée, accélère le tirage et, ensuite, en traversant un tube rempli d'eau, utilise une partie du calorique qu'entraîne cette vapeur pour élever la température de cette eau servant alors à alimenter la chaudière. La tige du piston est terminée en potence à deux bras, aux extrémités desquels des bielles travaillent, par l'intermédiaire de manivelles, sur un arbre, et produisent un mouvement de rotation continu.

S. 4.

Applications successives des Machines à vapeur et faits contemporains.

Après avoir examiné les perfectionnements successifs des machines à vapeur en elles-mêmes et, abstraction faite, en quelque sorte, des applications diverses auxquelles elles peuvent servir, nous allons maintenant passer en revue ces applications elles-mêmes, et les conditions à satisfaire alors, nous conduiront à des formes nouvelles et aux perfectionnements les plus récents.

Nous avons vu qu'à l'origine de l'invention des machines à vapeur, on les considérait uniquement comme des machines élévatoires.

On s'en servait pour tirer les eaux des mines, ou pour alimenter les villes et les grues hydrauliques. Plus tard, seulement, on les appliqua aux usines.

Elles remplacèrent avantageusement dans beaucoup de cas, les roues hydrauliques, ou aidèrent à en compléter l'effet quand les eaux manquaient. C'est encore à cet usage qu'elles sont presque exclusivement consacrées dans l'industrie.

Le moteur à feu est naturellement toujours plus cher que le moteur à eau.

Le premier dévore du combustible et demande une surveillance incessante.

Le second restitue le moteur après qu'il a passé dans ses organes et n'a besoin que d'un entretien secondaire.

Le choix à faire entre les machines à feu et les machines à eau, est donc rarement douteux, quand les eaux sont abondantes et les chutes suffisantes.

Mais

Mais l'application la plus importante des machines à vapeur, fut, sans contredit, leur emploi comme moteur de la locomotion rapide.

C'est par la navigation que le progrès débuta.

Les premières tentatives relatives à cette idée, ont été faites, comme nous l'avons vu, à Barcelone. Plus tard, en 1695, Papin reprit la question au point de vue théorique, et fit remarquer aussi que l'on pouvait déterminer la marche d'un bateau, à l'aide de palettes adaptées à l'extrémité d'un arbre tournant, mu par une tige à dents mobiles.

Pour éviter l'inconvénient de l'intermittence de l'action, il avait pensé à faire usage de plusieurs cylindres, agissant à une demi-circonférence les uns des autres.

Mais ce ne fut que beaucoup plus tard que l'on fit des applications réellement pratiques.

En 1737, Jonathan Hull prit une patente pour l'application de la machine de Newcomen à un procédé de navigation; mais il n'exécuta rien.

En 1775, M. Frier construisit un bateau à vapeur.

En 1778, M. le Marquis de Jouffroy fit, sur une plus grande échelle, des expériences à Beaume-les-Dames, et enfin construisit sur la Saône, en 1781, un grand bateau de 46^m de long et de 4^m 50 de large, renfermant deux machines distinctes.

Ces essais furent interrompus par les événements de 89.

En Angleterre, d'autres tentatives du même genre et toutes aussi infructueuses, sont faites en 1791, 1795 et 1801, par Miller, Lord Stanhope, et Symington.

En 1803, M. M. Livingston et Fulton, tous deux Américains, au moment où Napoléon projetait une descente en Angleterre, essayèrent, sur la Seine, un bateau qui marcha assez bien; mais Fulton, découragé par le premier Consul, retourna en Amérique, où il construisit, à New-York, en 1807, le premier bateau à vapeur auquel on n'ait pas renoncé après l'avoir essayé et qui ait été appliqué au transport des hommes et de marchandises.

Il fit le service sur l'Hudson, entre New-York et Albany.

En 1812, seulement, on en construisit un en Angleterre, à Glasgow, sur la Clyde.

Le système usité depuis cette époque jusqu'à vers 1840, consista en une machine fixe ordinaire, à basse ou haute pression, mettant en mouvement des roues à palettes, par l'intermédiaire de manivelles.

La disposition la plus généralement adoptée, sortie des ateliers de Watt, et qui est sa machine à basse pression ordinaire, plaçait le balancier trop haut, exposé aux coups de mer et aux projectiles ennemis. En outre, le centre de gravité de la machine se trouvait ainsi relevé et relevait celui du navire, d'où une moindre stabilité.

On mit le balancier au dessous des cylindres et de l'axe des roues.

Pour éviter l'effet des points morts, on employa deux machines travaillant sur un arbre à double vilebrequin, ayant ses coudes placés à angle droit.

Enfin, le dernier état des machines à palettes, est celui qu'on leur a donné en supprimant complètement les balanciers et en leur appliquant des cylindres à action directe, oscillants.

M. Cavé les employa, pour la première fois, en grand.

D'autres appareils à action directe, permettent également de réduire le poids des machines et l'emplacement qu'elles occupent.

Mais, malgré tous ces perfectionnements, les navires à palettes restaient sujets à de graves objections. Leur fournir un bon emploi de la force motrice, les palettes devaient, en effet, être immergées d'une quantité constante.

Or, quand la mer est houleuse, le navire est sans cesse penché.

L'une des roues est souvent immergée jusqu'à l'axe, l'autre fonctionne presque à vide.

La résistance énorme qu'éprouve la première, arrête la machine. Le développement de la force motrice est empêché au moment précis où son action est la plus indispensable.

De plus, l'appareil des roues gêne matériellement la manœuvre des voiles.

En temps d'orage, il donne trop de prise à l'action du vent.

En cas de guerre, un navire à roues peut être facilement mis hors de service, parce qu'il est exposé à tous les coups et à tous les abordages.

On dut, en conséquence, chercher des solutions nouvelles.

L'idée de l'emploi de la vis d'Archimède, comme propulseur sous-marin, parait plus particulièrement française.

En 1727, Du Quest, en France, émet le premier cette idée.

En 1768, l'Anglais Laucton la reproduit.

En 1791, le capitaine Dallery.

En 1823, le capitaine, du génie Delisle en donne une description plus précise, puis Sauvage, en 1832.

Enfin, en 1836, M. M. John et Georges Kennie, Ingénieurs Anglais, mettent à exécution les idées de Smith qui avait pris patente.

Leur machine consistait en un seul tour de spire, placé dans le faux étambot.

En 1838, Ericson prend patente pour une autre espèce de vis.

C'est une surface cylindrique sur laquelle sont enroulées des portions de surface hélicoïdale.

L'axe de la surface cylindrique est relié à la surface par des rayons également en forme de surface hélicoïdale. Enfin, on arriva à la suppression complète des surfaces extérieures et de la surface cylindrique.

Tout ce fait, il ne resta plus que les ailes de moulin solides qui servaient de rayons.

Les avantages des bâtiments à hélice sont nombreux.

Ils peuvent porter de puissantes voilures.

L'hélice ne donne prise ni au vent ni aux chocs destructeurs auxquels les roues à palettes sont exposées.

On n'a, de cette manière, recours à la vapeur que dans les calmes, ou dans les cas où l'on veut déployer une grande vitesse.

On appelle mixtes les navires où l'action de la voile et de la vapeur est ainsi

combinée.

Elle prend aujourd'hui une immense extension dans la marine militaire, aussi bien que dans la marine marchande des trois grands pays.

Machines locomotives terrestres. — Mais en même temps que l'idée de la marine à vapeur naissait dans les esprits, la pensée de l'employer par terre, pour traîner des charriots, occupait aussi les mécaniciens et se combinait avec l'idée plus ancienne des voies à rainures. Déjà, en 1646, on employait, dans les mines, des voies à rails de bois, sur lesquelles on posait des charriots chargés de charbon, et maintenus dans la direction qu'ils devaient parcourir, par une espèce de crosse engagée dans une rainure ménagée au milieu de la voie.

L'économie de force obtenue par ce moyen bien simple, engagea à essayer de l'appliquer à des transports plus considérables, effectués par des chevaux. La rainure centrale, destinée à maintenir la direction des charriots, fut remplacée par deux lignes de madriers armés de rebords, entre lesquels s'engageaient les roues des voitures.

Un cheval pouvait traîner, sur un chemin de cette nature, bien au delà de ce qu'il traîne sur une route ordinaire; mais la prompte détérioration des rails en bois était un grave inconvénient.

En 1767, Reynolds proposa de remplacer les madriers par des pièces en fonte portant, comme les pièces de bois auxquelles on les substituait, soit un rebord intérieur, soit un rebord extérieur, soit, enfin, un rebord extérieur et un rebord intérieur, pour maintenir les roues des wagons. Le tirage fut encore réduit de moitié par ce perfectionnement, et l'usage des chemins à ornières en fonte se répandit assez vite. Ils présentaient cependant un grave inconvénient: la poussière et la boue s'accumulaient dans l'ornière et s'opposaient à la facilité du roulage; mais ils avaient l'avantage de ne pas nécessiter l'emploi d'un matériel roulant spécial.

En 1789, Jessop imagina de remplacer les rails creux par les rails saillants, en mettant des rebords seulement aux roues.

Les rails en fonte n'avaient qu'une faible longueur, qui augmentait les difficultés de la pose, et multipliait outre mesure les joints et, par suite, les chocs, au moment du passage des wagons. La nature cassante de cette substance rendait d'ailleurs très fréquentes les ruptures des rails. En 1820, on commença à remplacer les rails en fonte par des rails en fer laminé, cinq ou six fois plus longs, et beaucoup plus résistants.

Depuis cette époque, les chemins de fer n'ont subi que de petites améliorations de détail relatives aux dimensions et à la pose des rails, et dans l'examen desquelles il est inutile d'entrer ici.

Les machines à vapeur peuvent être partagées en deux grandes classes parfaitement distinctes. Les unes sont à condensation, c'est-à-dire que la vapeur, après avoir rempli le cylindre où se meut le piston, est condensée par un refroidissement subit et produit un vide plus ou moins parfait, dans l'espace qu'elle occupait. La pression de l'air, ou de la vapeur qui agit sur l'autre face du piston, peut alors le pousser dans la direction suivant laquelle elle agit. C'est Lapin, dit M. Arago^(*), qui a combiné le premier, en 1690, dans une même machine à feu et à piston; la force

(*) Annuaire du bureau des longitudes, Année 1837, page 307.

élastique de la vapeur, d'eau avec la propriété dont cette vapeur jouit, de se précipiter par le froid, ce qui a proposé, à la même époque, la première machine à double effet, mais à deux corps de pompe.»

Cette première machine de Lapin était alimentée par une seule chaudière à vapeur, mise en communication, tantôt avec l'un des corps de pompe, tantôt avec l'autre, au moyen d'un robinet à quatre fins, de l'invention du même auteur.

Les machines à condensation exigent l'emploi d'un volume d'eau froide très considérable et, par conséquent, leur poids et leur volume sont très grands. On est donc forcé de renoncer à leur emploi pour les machines locomotives qui doivent se transporter d'un lieu à un autre avec tous les approvisionnements nécessaires à leur marche. Aussi, ne nous en occuperons nous pas davantage.

Dans les machines sans condensation, la vapeur agit toujours avec une tension considérable. Quand elle cesse de pousser une des faces du piston, elle est mise en communication avec l'air extérieur dont elle acquiert à peu près la force élastique, de sorte que la vapeur admise sur l'autre face, doit vaincre, pour faire avancer le piston, la résistance de la machine et, de plus, la pression de l'atmosphère, ce qui exige que sa tension soit elle-même beaucoup plus considérable.

« Avant 1710, Lapin, dit encore M. Arago^(**), avait imaginé la première machine à vapeur à haute pression sans condensation. »

Cette machine, décrite par Lempold, en 1724, se compose d'un cylindre dans lequel glisse un piston, dont on met alternativement les deux faces en communication avec la chaudière et l'air atmosphérique, au moyen d'un robinet à quatre fins.

L'idée d'appliquer la vapeur au transport des fardeaux, paraît être due principalement à des Anglais. Le docteur Robinson en conçut la possibilité dès l'année 1759. Watt, en 1784, donna la description d'une machine capable de se transporter sur une route. Toutefois, la première machine mise en activité sur les chemins de fer, et sur les routes ordinaires, fut construite par M. M. Erewithick et Kirian. Leur brevet date de 1802.

Quand une roue repose sur une surface solide, elle peut recevoir deux mouvements différents. Elle peut tourner en glissant sur place, ou bien rouler avec un mouvement de progression. On a cru longtemps que le premier mouvement serait seul possible à une roue de locomotive. Cette idée, fortement enracinée dans les esprits, fut un des obstacles qui s'opposaient le plus efficacement aux progrès de la construction de ces machines. Les inventeurs se fatiguaient à chercher les moyens de rendre l'adhérence plus considérable, et s'éloignèrent ainsi, de plus en plus du but atteint depuis.

On essaya d'abord de garnir la jante des roues de têtes de clous ou de parties acérées qui mordaient sur la voie. L'œuvre était très rapide et les résultats obtenus peu satisfaisants.

En 1811, M. Blewkinsop prit en Angleterre une patente pour l'emploi d'une crémaillère, placée parallèlement aux rails, et avec laquelle s'engrenait une roue dentée, portée sur la machine et mise en mouvement par la vapeur. Ce système fut appliqué sur le chemin de fer de Middleton à Leeds, pour le transport de la houille. Mais on fut bientôt forcé de l'abandonner. Les plus petites erreurs dans la pose du rail denté, et même le jeu inévitable de ces pièces métalliques, rendaient impossible la coïncidence des dents de la roue motrice avec les creux de la crémaillère. Deux

(**) Annuaire du bureau des longitudes, Année 1837, page 305.

parties saillantes venaient souvent se rencontrer, et il en résultait, des chocs et des ruptures continuelles.

On essaya aussi sans succès, une chaîne enroulée sur un treuil mis en mouvement par la machine et dont les extrémités étaient attachées à des points fixes.

Nous citerons encore ici une tentative malheureuse, quoiqu'elle soit de quelque années postérieures à celles dont nous venons de parler. On essaya, en 1816, une machine armée de patins qui, tour-à-tour, s'appuyaient sur le sol et se relevaient, en imitant, jusqu'à un certain point, le mouvement des jambes des animaux. Le croquis figure 24. peut faire concevoir cette singulière machine. Quand les pistons vont de droite à gauche, ils entraînent les grappins fixés à l'extrémité des bras articulés. Quand, au contraire, ils vont de gauche à droite, les grappins s'arçoquent sur le sol, et poussent la machine dans le sens de la flèche.

La difficulté que les constructeurs se créaient, en admettant que l'adhérence des roues n'était pas suffisante pour faire avancer la machine et contre laquelle ils luttaient vainement depuis longtemps, disparut enfin vers 1812, grâce aux expériences de M. M. Blakett, qui démontrèrent complètement la fausseté de l'opinion généralement admise.

M. Stephenson, père de Robert Stephenson put, dès lors, en 1814, exécuter une machine locomotive de beaucoup supérieure à toutes celles exécutées avant cette époque. La chaudière de cette machine était portée sur six roues, comme l'indique le croquis fig. 25. Deux cylindres, logés dans l'intérieur même de la chaudière, communiquaient au moyen de bielles, un mouvement de rotation aux roues. Une courroie, ou une chaîne sans fin, enroulée à la fois sur les deux roues placées du même côté de la chaudière, rendait leurs mouvements dépendants l'un de l'autre, de sorte que les manivelles étant à angle droit, l'une se trouvait à son point mort quand l'autre produisait la plus grande action, ce qui assurait la continuité du mouvement du système.

L'emploi de la chaîne sans fin présentait de nouveaux inconvénients; on aurait pu la remplacer avec avantage par une bielle ajustée sur deux tourillons fixés aux roues, comme l'indique la fig. 26.

On sentit, à la même époque, la nécessité d'établir des ressorts entre la machine et les essieux des roues. On essaya de reporter le poids de la machine sur des pistons, sur lesquels agissait, en sens contraire, la pression de la vapeur (fig. 25). Cette idée ne put recevoir d'applications sérieuses; on conçoit, en effet, que la force élastique de la vapeur, variant à chaque instant, n'est exactement capable de supporter le poids de la machine que pendant un moment, pour ainsi dire nul, tandis que pendant le reste du temps, la machine se trouve ou tout-à-fait soulevée, ou portée directement par la tête du piston.

Depuis 1814, époque de la construction de la machine qui vient de nous occuper, jusques vers 1828 ou 1829, aucune modification notable ne fut apportée aux locomotives. On avait fait un grand pas, en reconnaissant que l'adhérence des roues était suffisante pour entraîner un convoi. Il en restait à faire un autre non moins important, pour rendre les machines à vapeur capables de servir au transport des voyageurs. La machine de M. Stephenson termine la série des locomotives à petite vitesse.

Les machines locomotives dont nous avons parlé jusqu'à présent, ne pouvaient pas

dépasser une vitesse de 7 à 8000^m par heure. La faible puissance de vaporisation des chaudières dont on pouvait disposer, s'opposait à un mouvement plus rapide, et on n'aurait pu augmenter la production de la vapeur, qu'en donnant aux appareils un poids trop considérable. Cependant les travaux du chemin de fer de Liverpool à Manchester, concédés par un bill de 1826, avançaient rapidement. La Compagnie qui exécutait cette grande entreprise, ne savait pas encore quels seraient les moyens de traction employés sur la ligne. Les avis des Ingénieurs étaient partagés. M. M. Walker et Rastrick soutenaient que l'emploi des machines fixes était seul admissible. M. M. R. Stephenson et Locke, au contraire, confiant dans les progrès qu'ils espéraient réaliser dans la construction des machines locomotives, engageaient fortement à les employer sur la plus grande partie du chemin.

L'évaluation des prix d'établissement et d'entretien de chacun des deux systèmes rivaux, partageait les opinions, aussi bien que l'appréciation de leur mérite respectif, comme l'indique le tableau suivant, dans lequel nous avons mis en regard les estimations de M. Stephenson et de M. Walker.

Système proposé.	Prix de premier établissement d'après M. M.		Entretien annuel d'après M. M.	
	Walker et Rastrick.	Stephenson et Locke.	Walker et Rastrick.	Stephenson et Locke.
Machines fixes....	100,862 L. St.	121,496 L. St.	33,317 L. St.	42,032 L. St.
Machines locomotives.	90,404	58,000.	43,464.	25,107.

L'opinion de M. R. Stephenson l'emporta, malgré les efforts de M. Walker. La Compagnie publia donc, le 25 avril 1829, le programme d'un concours de machines locomotives. Nous croyons devoir faire connaître les conditions principales de ce programme et le résultat de ce concours, à cause de l'impulsion nouvelle qu'il imprima aux perfectionnements de la machine à vapeur locomotive.

Extrait du Programme:

1°. La machine doit brûler sa fumée, d'après les stipulations de l'acte du Parlement, de la 7^e année du règne de Georges IV;

2°. Si elle pèse six tonneaux, elle doit pouvoir traîner, chaque jour, sur un chemin de fer bien construit et de niveau, un convoi de charriots du poids de 20 tonneaux, compris son fourgon et l'approvisionnement, à une vitesse de dix milles à l'heure, et avec une pression de vapeur n'excédant pas cinquante livres par pouce carré.

3°. La chaudière aura deux soupapes, l'une desquelles sera hors de la portée du machiniste, mais ni l'une ni l'autre ne pourront être fermées quand la machine fonctionnera.

A°. La machine et la chaudière seront portées sur des ressorts et sur six roues. La hauteur, jusqu'au sommet de la cheminée, ne devra pas excéder quinze pieds.

Le poids de la machine, y compris l'eau dans la chaudière, ne pourra pas dépasser six tonneaux. On donnerait la préférence à une machine plus légère, si elle trainait proportionnellement la même charge. Si le poids ne dépassait pas quatre tonneaux, on pourrait réduire à quatre le nombre des roues. La Compagnie sera libre de soumettre la chaudière, les cylindres, &c., à l'aide d'une presse hydraulique, à une pression de 150 livres par ponce carré, sans être responsable du dommage que la machine en pourrait éprouver.

6°. Il y aura un manomètre à mercure fixé à la machine, avec une tige indiquant la pression au dessus de 45 livres par ponce carré et construit de manière à laisser échapper la vapeur à une pression de 60 livres par ponce carré.

7°. La machine devra être rendue au commencement du chemin de fer, à Liverpool, le 1^{er} Octobre 1829, au plus tard.

8°. Le prix de la machine ne devra pas excéder 550^{l. st.}. Les machines refusées seront reprises par leurs propriétaires.

La Compagnie devait fournir le fourgon et les approvisionnements d'eau et de combustible.

Les juges du concours étaient M^r. Wood, de Newcastle-upon-Tyne, Rastick, de Stourbridge, et Kennedy, de Manchester.

Les machines présentées au concours étaient au nombre de cinq, savoir :

La fusée, (the rocket) pesant 4,05, à M. Robert Stephenson (fig. 27) ;

La nouveauté, pesant 3,01, appartenant à M^r. Braithwaite et Ericson ;

La Sans-pareille, pesant 4,155, appartenant à M. Hackworth ;

Le Cyclope, pesant 3, à M. Brandreth ;

La persévérante, pesant 2,17, à M. Brunstall.

Toutes les machines avaient été construites pour consommer du coke.

Le Cyclope n'entra pas en lice.

La combustion était entretenue dans la nouveauté, remarquable par son élégante construction, au moyen de soufflets mis en jeu par la machine elle-même. Dans une première expérience, ces soufflets crevèrent, et la machine fut obligée de s'arrêter. Dans une autre épreuve, le tuyau de la pompe d'alimentation se brisa et mit encore fin à sa course. Enfin, le jour où le prix devait être gagné, un tuyau qui traversait la chaudière, fut écrasé par la pression, et cette machine fut obligée de se retirer du concours.

La Sans-pareille, après une modification apportée à sa chaudière, sur l'avis de la Commission, concourut le jour fixé pour le jugement définitif. La pompe d'alimentation se déranger aussi. L'abaissement de l'eau dans la chaudière fit fondre le bouchon de plomb, la vapeur se perdit et l'épreuve ne put être continuée.

M. Brunstall retira sa machine.

La Fusée resta donc seule et fut jugée digne du prix proposé. Pendant les expériences, elle trainait une charge de 12,14 avec une vitesse de 14 milles à l'heure. Débarrassée du poids qu'elle remorquait, elle atteignit une vitesse de 35 milles à l'heure.

Le succès de la machine de M. Stephenson était dû presque exclusivement à la bonne

disposition de sa chaudière. Elle se composait d'un foyer complètement entouré d'eau et d'une chaudière cylindrique traversée par 25 tubes d'un petit diamètre qui donnaient passage à la flamme et aux produits de la combustion, pour les conduire dans la cheminée, où venaient aussi déboucher les tuyaux d'échappement de vapeur. La chaudière de la locomotive de M. Stephenson, comme celles que l'on établit encore aujourd'hui, n'est donc autre chose qu'une chaudière tubulaire, dont le tirage est singulièrement activé par l'échappement dans la cheminée de la vapeur qui sort des cylindres. Cette belle application de la force que possède encore la vapeur après avoir agi sur les pistons, est due toute entière à M. R. Stephenson; mais il est juste d'ajouter que la chaudière tubulaire avait été inventée en France par M. Séguin. L'honneur de cette invention appartient à un Français et non pas à l'Ingénieur Anglais Stephenson, ni à M. Wood, comme le disent presque tous les ouvrages anglais et comme l'ont aussi répété, d'après eux, quelques auteurs Français.*

On avait déjà fait usage de chaudières construites d'une manière analogue, dans lesquelles l'eau est contenue dans un grand nombre de tubes que la flamme entoure. Dans la chaudière tubulaire de Séguin, la disposition est inverse: l'eau entoure les tubes dans lesquels la flamme circule. La construction pratique de cette dernière chaudière est plus facile.

Les principaux perfectionnements apportés aux locomotives, depuis Stephenson, ont surtout consisté dans l'accroissement des dimensions et du poids. La Fusée pesait quatre tonnes. Les machines d'aujourd'hui pèsent jusqu'à 27 tonnes. Le nombre des tubes de la chaudière est d'au moins de 125 et s'élève quelquefois jusqu'à 150 et 200. La vitesse s'est aussi considérablement accrue: les locomotives seules parcourent de 25 à 26 lieues à l'heure, et remorquent des convois avec une vitesse de 18 lieues à l'heure. Le charbon est un des principaux éléments de dépense. La fusée de Stephenson brûlait 91 livres de coke par tonne et par mille ($0^{\text{kg}}.40$ par tonne et par kilomètre); maintenant on ne brûle plus que $0^{\text{kg}}.07$ par tonne et par kilomètre. L'accroissement des dimensions des locomotives, en en augmentant le poids, a nécessité l'augmentation du poids des rails: ils ne pesaient d'abord que 17^{kg} par mètre courant et pèsent maintenant jusqu'à 42 Kilog. Le poids des coussinets s'est accru de 4^{kg} à 14^{kg} ; les dimensions des traverses ont aussi augmenté. Le prix de traction a diminué par l'accroissement des dimensions des machines. En général, la puissance des machines à vapeur, croît proportionnellement à leurs dimensions. On conçoit, en effet, que la quantité de vapeur produite croisse en même temps que le volume de la chaudière (produit de trois dimensions), tandis que la perte de chaleur n'augmente qu'avec les surfaces (produit de 2 dimensions). De plus, le nombre des machines trainant un même poids étant moindre, le nombre des machinistes et des chauffeurs est moindre aussi.

On diminue donc le prix de traction en agrandissant les machines.

Enfin le prix de construction du chemin et des machines est plus considérable, mais on fait de grandes économies sur les frais d'entretien du matériel roulant et de la voie.

(*) Le brevet d'invention pour la construction perfectionnée d'une chaudière à tubes creux a été délivré à M. Séguin le 22 février 1828.

La fig 19 est la copie du dessin de cette chaudière publié dans le tome 37 des brevets d'invention, pl. 35. La disposition du fourneau de M. Séguin a même été imitée dans les locomotives, autant que le permettait les conditions de mobilité de cet appareil, c'est-à-dire que la grille est située beaucoup plus bas que l'entrée des tubes et que la partie du foyer.

Machines à vapeurs combinées. — Dans ces derniers temps, l'idée d'employer la chaleur latente de la vapeur d'eau, perdue dans le condenseur, à échauffer un nouveau liquide plus volatil que l'eau, bouillant à un degré moins élevé et absorbant moins de calorique latent, pour arriver aux mêmes effets de pression, a conduit aux machines à vapeurs combinées.

Eau et éther.

Eau et chloroforme.

La navigation à vapeur s'est emparée d'abord de ce moyen nouveau d'économie.

Le navire *Du Tremblay* où ce système est appliqué, a donné de bons résultats. —

L'enveloppe du condenseur de la machine à vapeur d'eau, est la chaudière servant à évaporer l'éther.

L'éther est emprisonné de toutes parts et ne peut se perdre. Après avoir été évaporé par la chaleur prise à la vapeur d'eau condensée, il agit sur un piston et est conduit ensuite dans une enveloppe refroidie extérieurement par le contact de l'eau froide.

La machine a, au moins, deux cylindres et deux tiroirs de distribution.

Machines à air chaud. — L'emploi de la chaleur comme force motrice par l'intermédiaire de l'air atmosphérique, a fait depuis longtemps l'objet des méditations des mécaniciens. On avait, depuis longtemps, remarqué qu'en prenant un volume d'air, en le comprimant de façon, par exemple, à le réduire de moitié, on dépense une certaine quantité de force motrice, mais on pourra la récupérer en échauffant l'air comprimé de façon à doubler son volume sans diminuer sa pression. Prenant ce volume doublé et en le faisant travailler dans un cylindre sur un piston mobile, à pleine pression d'abord et puis en le détendant jusqu'à ce que la pression soit ramenée à la pression de l'atmosphère, on produira une force motrice double environ de celle qui a été consommée pour réduire de moitié le volume primitif de l'air employé. Voilà donc un moyen de produire une force motrice égale à ce que nécessite la réduction de moitié d'un volume donné d'air, en consommant la quantité de chaleur nécessaire pour doubler le volume de l'air comprimé de moitié. Or, cet air, après qu'il a cessé de travailler dans le cylindre moteur, est versé dans l'air atmosphérique à une température supérieure de 266 degrés environ à celle qu'il possédait dans l'origine. On avait remarqué qu'on pouvait économiser une partie de cette chaleur, en l'employant à échauffer l'air comprimé servant à répéter la même opération; M. Buidin, notamment, avait proposé d'employer, pour cet objet, du sable ou des grains de plomb à travers lesquels on ferait passer l'air échauffé sortant des cylindres; l'air comprimé devrait ensuite passer en sens contraire dans les mêmes espaces, et reprendre ainsi la chaleur abandonnée par l'air qui avait servi à la première opération.

M. le capitaine Erikson a eu le mérite de réaliser cette pensée d'une manière industrielle.

Il a construit depuis peu aux États-Unis, un bateau ayant pour moteur une machine construite sur le principe que nous venons d'indiquer; la grenaille de plomb est ici remplacée par plusieurs épaisseurs de toile métallique à mailles serrées et auxquelles l'auteur donne le nom de régénérateur. Il résulte des rapports qui ont été faits sur cette machine, que l'économie de combustible est des trois quarts environ de ce qu'exigent des machines à vapeur de même force. Cette assertion n'offre rien de contraire aux lois physiques établies jusqu'ici.

Outre M. Burdin, M. Frauchot, dès 1840, M. M. Andraud et Galy-Casalan
se sont occupés de la même question, sur laquelle nous reviendrons à la fin du cours.

Chapitre II.

Propriétés des vapeurs, au point de vue des Machines actuelles.

§. 1^{er}.

Forces élastiques de la vapeur d'eau.

La vapeur d'eau étant exclusivement l'agent qui sert, dans la pratique, d'intermédiaire à la transmission de la chaleur entre deux corps à deux températures différentes, dans l'emploi de la chaleur comme force motrice, il est nécessaire d'entrer dans quelques détails sur ses propriétés.

La vapeur d'eau est obtenue par l'ébullition de l'eau. Lorsqu'on chauffe de l'eau dans un milieu à une certaine pression, il arrive un moment où des bulles, traversant le liquide, viennent crever à la surface, et l'on peut observer que la température de l'eau qui, jusqu'à la production de ce phénomène, allait en croissant, reste constante : elle est de 100° sous la pression d'une atmosphère ; si l'expérience se fait, non plus à une hauteur moyenne au dessus du niveau de la mer, mais sur une montagne élevée, les bulles se produisent à une température moindre, simplement parce que la pression a diminué ; le corps renfermé dans ces bulles, qui se dégage ainsi dans l'atmosphère, a toutes les apparences d'un gaz ; d'ailleurs, le poids de l'eau diminue pendant l'opération ; d'où il suit que c'est l'eau qui change d'état.

Mais maintenant, puisque ce corps qui se produit, a de grandes analogies avec un gaz, quelles sont les propriétés des gaz ? - Ce qui distingue un gaz, c'est la propriété qu'ont ses molécules, de se repousser mutuellement, au lieu d'être reliées entre-elles comme dans les liquides, ou dans les solides, par une force attractive. Maintenant cette force répulsive se traduit par une pression exercée par les gaz sur les parois des vases qui les renferment ou, plus généralement, sur une surface quelconque. Supposons, par exemple, mobile une des parois d'un vase renfermant un gaz ; cette paroi se mouvra en vertu de la pression qu'exerce le gaz sur sa face intérieure ; et si nous plaçons sur cette paroi un poids tel qu'elle ne puisse plus se soulever, ce poids indiquera la pression du gaz ; de plus, un poids plus considérable aura pour effet de réduire le volume du gaz, en rapprochant ses molécules. Cette propriété dont jouissent les gaz d'être infiniment élastiques, les distingue d'une manière très tranchée des solides et des liquides, et leur a fait donner le nom de fluides élastiques.

Le volume, la pression et la température d'un gaz, donnent une idée de ses propriétés mécaniques, et plusieurs relations existent entre ces quantités.

Mariotte, d'abord, démontra que le volume d'un poids déterminé de gaz à une certaine pression, est double de celui qu'occupe le même poids à une pression double, c'est-à-dire

que le volume d'un certain poids de gaz est en raison inverse de sa pression.

Celle est la loi de Mariotte que nous admettrons, bien que M. Regnault ait trouvé qu'elle n'était pas tout-à-fait exacte et que l'erreur que l'on commettait en l'appliquant était d'autant plus grande, que le gaz auquel on l'appliquait était plus rapproché du point où il passe à l'état liquide : car, aujourd'hui, nous devons le dire, beaucoup de gaz que l'on ne pouvait assimiler à des vapeurs, et qui étaient regardés comme incondensables, ont été amenés à l'état liquide, moyennant une pression suffisamment forte et une température suffisamment basse.

Puis Gay-Lussac a posé la loi suivante : C'est que, sous une pression constante, et pour une élévation de 1° de température, tous les gaz se dilatent de $\frac{1}{267}$ de leur volume à 0° . C'est-à-dire que l'on a

$$v = v_0 (1 + 0,00375 t)$$

M. Regnault a encore trouvé que ce coefficient n'était pas le même pour tous les gaz, et, qu'entre autres, pour l'air atmosphérique, il était de 0,00365. D'ailleurs, ces lois s'appliquent d'autant moins à la vapeur d'eau, que nous la considérons, en général, dans des points rapprochés de celui où elle passe à l'état liquide. Cependant, comme je l'ai déjà dit, il faut les admettre en attendant les résultats des expériences promises par M. Regnault.

Des deux lois ci-dessus, on conclut aisément :

$$\frac{pv}{p_0 v_0} = \frac{1 + 0,00365 t}{1 + 0,00375 t_0}$$

formule qui lie entre elles les pressions, la température, enfin le volume d'une même quantité pondérable de gaz.

Mais, maintenant, quand il s'agit d'une vapeur, il y a, correspondant à une température quelconque, une pression telle que la moindre augmentation dans cette pression, fait passer la vapeur à l'état liquide ; l'on dit alors que, pour cette température, la vapeur est à l'état de saturation ; et l'on a pu dresser des tables relatives à cette pression de saturation, même d'une manière assez simple, en s'appuyant sur cette remarque : que la vapeur qui se forme en contact avec le liquide, est toujours à l'état de saturation. D'après cela, la construction de ces tables se réduit à mesurer la pression de la vapeur dégagée dans le vide par un liquide porté à différentes températures.

Watt est le premier qui ait fait des recherches à ce sujet ; puis Dalton, M. de Béthancourt, M. M. Dulong et Berard, qui ont opéré dans des limites fort étendues ; enfin, M. Regnault qui a fait des expériences encore plus précises et dont les tables sont relatives à toutes les températures de -32° à 230° .

Table des forces élastiques de la vapeur aqueuse de -32 à +230 degrés.

Tempé- ratures.	Forces élastiques.	Différences pour 1°.	Tempé- ratures.	Forces élastiques.	Différences pour 1°.	Tempé- ratures.	Forces élastiques.	Différences pour 1°.
- 32°	^{m.m} 0, 320	^{m.m} 0, 032	0°	^{m.m} 4, 600	^{m.m} 0, 340	31°	^{m.m} 33, 406	^{m.m} 1, 953
31	0, 352	0, 034	+ 1	4, 940	0, 362	32	35, 350	2, 052
30	0, 386	0, 038	2	5, 302	0, 385	33	37, 411.	2, 154
29	0, 424	0, 040	3	5, 687	0, 410	34	39, 565	2, 262
28	0, 464	0, 044	4	6, 097	0, 437	35	41, 827	2, 374
27	0, 508	0, 047	5	6, 534	0, 464	36	44, 201	2, 490.
26	0, 555	0, 050	6	6, 998	0, 494	37	46, 691	2, 611
25	0, 605	0, 055	7	7, 492	0, 525	38	49, 302	2, 737
24	0, 660	0, 059	8	8, 017	0, 557	39	52, 039	2, 867
23	0, 719	0, 064	9	8, 574	0, 591	40	54, 906	3, 004
22	0, 783	0, 070	10	9, 165	0, 627	41	57, 910	3, 145
21	0, 853	0, 074	11	9, 792	0, 665	42	61, 055	3, 291
20	0, 927	0, 081	12	10, 457	0, 705	43	64, 346	3, 444
19	1, 008	0, 087	13	11, 162	0, 746	44	67, 790	3, 601
18	1, 095	0, 094	14	11, 908	0, 791	45	71, 391	3, 767
17	1, 189	0, 101	15	12, 699	0, 837	46	75, 158	3, 935
16	1, 290	0, 110	16	13, 536	0, 885	47	79, 093	4, 111
15	1, 400	0, 118	17	14, 421.	0, 936	48	83, 204	4, 295
14	1, 518	0, 128	18	15, 357	0, 989	49	87, 499	4, 483
13	1, 646	0, 137	19	16, 346	1, 045	50	91, 982	4, 679
12	1, 783	0, 150	20	17, 391	1, 104	51	96, 661	4, 882
11	1, 933	0, 160	21	18, 495	1, 164	52	101, 543	5, 093
10	2, 093	0, 174	22	19, 659	1, 229	53	106, 636	5, 309
9	2, 267	0, 188	23	20, 888	1, 296	54	111, 945	5, 533
8	2, 455	0, 203	24	22, 184	1, 366	55	117, 478	5, 766
7	2, 658	0, 218	25	23, 550	1, 438	56	123, 244	6, 007
6	2, 876	0, 237	26	24, 988	1, 517	57	129, 251	6, 254
5	3, 113	0, 245	27	25, 505	1, 596	58	135, 505	6, 510
4	3, 368	0, 276	28	28, 101	1, 681	59	142, 015	6, 776
3	3, 644	0, 297	29	29, 782	1, 766	60	148, 791	7, 048
2	3, 941	0, 322	30	31, 548	1, 858	61	155, 839	7, 331
1	4, 263	0, 337	31	33, 406		62	163, 170	
0	4, 600							

Tempé- ratures.	Forces élastiques.	Différences pour 1°.	Tempé- ratures.	Forces élastiques.	Différences pour 1°.	Tempé- ratures.	Forces élastiques.	Différences pour 1°.
62°	^{m.m} 163, 170	^{m.m} 7, 621	93°	^{m.m} 588, 406	^{m.m} 22, 334	124°	^{m.m} 1690, 76	^{m.m} 53, 12
63	170, 791	7, 923	94	610, 740	23, 038	125	1743, 88	54, 47
64	178, 714	8, 231	95	633, 778	23, 757	126	1798, 35	55, 85
65	186, 945	8, 551	96	657, 535	24, 494	127	1854, 20	57, 27
66	195, 496	8, 880	97	682, 029	25, 251	128	1911, 47	58, 68
67	204, 376	9, 220	98	707, 280	26, 025	129	1970, 15	60, 13
68	213, 596	9, 569	99	733, 305	26, 695	130	2030, 28	61, 66
69	223, 165	9, 928	100	760, 000	27, 590	131	2091, 94	63, 09
70	233, 093	10, 300	101	787, 590	28, 420	132	2155, 03	64, 66
71	243, 393	10, 680	102	816, 010	29, 270	133	2219, 69	66, 23
72	254, 073	11, 074	103	845, 280	30, 130	134	2285, 92	67, 81
73	265, 147	11, 477	104	875, 410	31, 000	135	2353, 73	69, 43
74	276, 624	11, 893	105	906, 410	31, 910	136	2423, 16	71, 07
75	288, 517	12, 321	106	938, 310	32, 830	137	2494, 23	72, 77
76	300, 838	12, 762	107	971, 140	33, 770	138	2567, 00	74, 44
77	313, 600	13, 211	108	1004, 910	34, 740	139	2641, 44	76, 19
78	326, 811	13, 677	109	1039, 650	35, 720	140	2717, 63	77, 94
79	340, 488	14, 155	110	1075, 370	36, 820	141	2795, 57	79, 73
80	354, 643	14, 644	111	1112, 090	37, 740	142	2875, 30	81, 56
81	369, 287	15, 148	112	1149, 830	38, 780	143	2956, 86	83, 40
82	384, 435	15, 666	113	1188, 610	39, 860	144	3040, 26	85, 29
83	400, 101	16, 197	114	1228, 470	40, 940	145	3125, 55	87, 19
84	416, 298	16, 743	115	1269, 410	42, 060	146	3212, 74	89, 13
85	433, 041	17, 303	116	1311, 470	43, 190	147	3301, 87	91, 11
86	450, 344	17, 877	117	1354, 660	44, 340	148	3392, 98	93, 11
87	468, 221	18, 466	118	1399, 020	45, 530	149	3486, 09	95, 14
88	486, 687	19, 072	119	1444, 550	46, 730	150	3581, 23	97, 20
89	505, 759	19, 691	120	1491, 280	47, 970	151	3678, 43	99, 31
90	525, 450	20, 328	121	1539, 250	49, 220	152	3777, 74	101, 44
91	545, 778	20, 979	122	1588, 470	50, 490	153	3879, 18	103, 59
92	566, 757	21, 649	123	1638, 960	51, 800	154	3982, 77	105, 79
93	588, 406		124	1690, 760		155	4088, 56	

Tempéra- ture.	Force élastique.	Différences pour 1°.	Tempéra- ture.	Force élastique.	Différences pour 1°.	Tempéra- ture.	Force élastique.	Différences pour 1°.
155°	4088,56	108,03	180°	7546,39	174,98	205°	12955,66	265,46
156	4196,59	110,29	181	7721,37	178,15	206	13221,12	269,63
157	4306,88	112,57	182	7899,52	181,32	207	13490,75	273,78
158	4419,45	114,91	183	8080,84	184,56	208	13764,53	277,99
159	4534,36	117,26	184	8265,40	187,83	209	14042,52	282,28
160	4651,62	119,66	185	8453,23	191,12	210	14324,80	286,52
161	4771,28	122,08	186	8644,35	194,47	211	14611,32	290,90
162	4893,36	124,55	187	8838,82	197,86	212	14902,22	295,26
163	5017,91	127,06	188	9036,68	201,27	213	15197,48	299,69
164	5144,97	129,57	189	9237,95	204,75	214	15497,17	304,16
165	5274,54	132,15	190	9442,70	208,23	215	15801,33	308,61
166	5406,59	134,74	191	9650,93	211,78	216	16109,94	313,21
167	5541,43	137,39	192	9862,71	215,33	217	16423,15	317,75
168	5678,82	140,08	193	10078,04	218,97	218	16740,90	322,39
169	5818,90	142,76	194	10297,01	222,62	219	17063,29	327,07
170	5961,66	145,53	195	10519,63	226,32	220	17390,36	331,77
171	6107,19	148,29	196	10745,95	230,05	221	17722,13	336,55
172	6255,48	151,12	197	10975,00	233,82	222	18058,64	341,30
173	6406,60	153,95	198	11209,82	237,64	223	18399,94	346,13
174	6560,55	156,85	199	11447,46	241,50	224	18746,07	350,97
175	6717,43	159,79	200	11688,96	245,41	225	19097,04	355,88
176	6877,22	162,75	201	11934,37	249,32	226	19452,92	360,84
177	7039,97	165,75	202	12183,69	253,31	227	19813,76	365,85
178	7205,72	168,80	203	12437,00	257,30	228	20179,61	370,87
179	7374,52	171,87	204	12694,30	261,36	229	20550,48	375,92
180	7546,39		205	12955,66		230	20926,40	

Ces tables ne sont pas d'ailleurs le résultat brut des expériences de M. Regnault. Il était bon qu'il y consignât toutes les températures de degrés en degrés; or, il lui était difficile d'obtenir une semblable régularité dans les expériences; il fit donc varier la température de quantité quelconque, et prenant les pressions correspondantes, il obtint une série de points représentant une loi générale de variations. En joignant les points déterminés par ses expériences, il n'avait pas une courbe régulière, des anomalies se présentaient; mais s'appuyant sur ce que la loi de la nature était très probablement représentée par une courbe régulière s'éloignant peu de ses observations, il arriva à la courbe représentée:

D'un autre côté, à l'aide de formules d'interpolation, M. Regnault, obtint une valeur générale de la pression, s'écartant peu de ses observations; (il faut remarquer d'ailleurs que ces formules ne sont approximativement exactes que dans les limites de ces mêmes observations).

Il prit la formule d'interpolation de Biot

$$\lg F = a - b\alpha^x - c\beta^x \dots\dots$$

dans laquelle $x = T + 20$, et F est la pression de saturation exprimée en centimètres de mercure pour la température T exprimée en degrés centigrades du thermomètre à air, et il obtint :

$$a = 6, 26403$$

$$\lg \alpha = 1, 994049$$

$$\lg \beta = 1, 998343$$

$$\lg b = 0, 13977$$

$$\lg c = 0, 69243$$

ou bien, dans le cas des températures exprimées en degrés du thermomètre à mercure.

$$a = 6, 57613$$

$$\lg \alpha = 1, 994945$$

$$\lg \beta = 1, 998705$$

$$\lg b = 0, 31760$$

$$\lg c = 0, 65698$$

Ces formules sont compliquées; toutefois, on peut les remplacer par d'autres formules plus simples, mais ne s'appliquant alors que dans des limites des plus restreintes. Ainsi:

$$P = 0, 0034542 + \left(\frac{46278 + t}{145360} \right)^{5,13} \text{ qui s'applique pour les pressions inférieures à 1 atmosphère,}$$

$$P = \left(\frac{75 + t}{174} \right)^6 \text{ qui s'applique entre 1 et 4 atmosphères,}$$

$P = (0, 28658 + 0, 0072003 t)^5$ donnée par M. Dulong, et qui s'applique de 4 à 50 atmosphères.

Dans ces diverses formules, la pression P est exprimée en kilogrammes par centimètre carré, et la température en degrés du thermomètre centigrade à mercure.

La courbe que nous avons tracée indique aussi que toutes les fois que pour une certaine température, on a une pression plus grande que celle donnée par cette courbe, la vapeur ne peut rester à cet état; une partie se condensera jusqu'à ce que la pression soit devenue égale à cette pression de saturation.

On voit encore que la formule dérivée des lois de Gay-Lussac et Mariotte ne peut correspondre qu'à des points au-dessous de cette courbe.

On peut encore démontrer quel est le volume d'un kilogramme de vapeur à saturation, à différents degrés de température.

Des expériences pour le cas où $t = 100^\circ$, et p la pression du gaz = $1 \frac{\text{Kil}}{,0335}$ ou l'atm. ont donné δ où le poids de $1 \frac{\text{m. cub.}}{\text{de vapeur}} = 0, 588 \frac{\text{Kil}}{\text{de vapeur}}$.

De plus, les lois combinées de Mariotte et de Gay-Lussac, donnent :

$$\frac{pv}{p_0 v_0} = \frac{1 + 0,00365 t}{1 + 0,00365 t_0} = \frac{p \delta_0}{p_0 \delta}$$

j'aurai
Si je donne à t_0, p_0, δ_0 les valeurs que fournit l'expérience mentionnée plus haut

$$\frac{1 + 0,00365 t}{1,365} = \frac{p \ 0,588}{\delta \ 1,0335} \quad \text{ou bien} \quad \delta = p \frac{0,7769}{1 + 0,00365 t}$$

Soit v le volume en mètres cubes de la vapeur pesant $K, K = \delta v$, d'où $\delta = \frac{K}{v}$;
Dela on déduit le volume qui est en raison inverse de la densité, et l'on trouve pour un poids K
d'eau ou de vapeur d'eau

$$v = 1,287 \frac{K}{p} (1 + 0,00365 t),$$

p est exprimée en kilogramme par centimètre carré.

On a p au moyen des tables de M. Regnault; on peut encore obtenir des formules empiriques, donnant le volume occupé par un poids donné de liquide à saturation. M. de Lamour donne les formules que voici : p (la pression) est exprimée en kilogramme par mètre carré.

$$\mu = \frac{20000000}{1200 + p} \quad \text{applicable de } \frac{1}{3} \text{ à } 5 \text{ atmosphères.}$$

$$\mu = \frac{21232000}{3020 + p} \quad \text{applicable de } 2 \text{ à } 5 \text{ atmosphères.}$$

μ est le coefficient par lequel il faut multiplier le volume de l'eau pour avoir celui de la vapeur à saturation produite par ce volume d'eau

On voit que la première de ces formules s'applique aux machines à haute pression et à condensation, la seconde aux machines locomotives, ou, en général, aux machines à haute pression sans condensation.

De ces formules on a déduit des tables très commodes dans la pratique.

§. 2.

Chaleurs spécifiques, de la vapeur d'eau.

L'élément le plus intéressant à connaître dans les vapeurs, après leurs forces élastiques, c'est la quantité de chaleur dépensée qui passe à l'état latent: Quelle est sa valeur?

Watt prit de l'eau à 0° , l'éleva à une certaine température, puis la fit passer en vapeur à cette température, et il crut que la somme des quantités de chaleur absorbée par l'eau dans chacune de ces opérations, était la même, quelle que fut cette température finale; c'est-à-dire qu'une vapeur à saturation, à une température quelconque, ramenée à l'état d'eau à 0° , céderait une quantité de chaleur

déterminée, constante, et il a trouvé, pour cette quantité, environ 636 unités de chaleur pour un kilogramme d'eau. Il résulte de cette loi que la quantité de calorique latent nécessaire pour transformer un certain poids d'eau en vapeur, diminue à mesure que la température augmente; et cela peut se concevoir en remarquant que le volume d'un même poids de vapeur est infiniment plus considérable à une basse température, et qu'alors le calorique latent compense la quantité de chaleur sensible au thermomètre.

Southern, plus tard, prétendit que c'était ce calorique latent qui était constant et égal à 536 unités de chaleur environ.

De telle sorte que l'on a, en nommant K la quantité de chaleur nécessaire pour transformer un kilogramme d'eau prise à zéro en vapeur à une température t ,

$$\text{d'après la loi de Watt, } K = 636$$

$$\text{d'après la loi de Southern, } K = 536 + t$$

Les chiffres de Watt et de Southern différaient peu, quant à la quantité de chaleur renfermée dans 1^{kil} de vapeur à 100°.

Watt opérait d'ailleurs de la manière suivante: il avait une chaudière à l'aide de laquelle il produisait de la vapeur à saturation successivement à différentes températures, et il mettait cette vapeur en communication avec une masse déterminée d'eau froide: il y avait condensation et par suite, d'un côté, augmentation dans le poids de cette eau provenant du poids de vapeur condensée, de l'autre élévation de température résultant de la quantité de chaleur cédée par cette même vapeur. Il en déduisait la quantité de calorique contenue dans un kilogramme de vapeur à saturation à ces diverses températures.

On voit aisément par les formules écrites plus haut, que les lois de Watt et de Southern peuvent être représentées, la première par une horizontale, la 2^e par une droite inclinée coupant la première pour l'abscisse de 100° et restant au dessous pour les abscisses plus petites, au dessus pour les abscisses supérieures à 100°.

La même question fut reprise par Clément - Desormes, qui retomba sur la loi de Watt, admise, par suite, jusqu'à ce dernier temps.

C'est alors que M. Regnault s'en occupa et arriva à ce résultat, que la loi véritable était comprise entre les lois de Watt et de Southern, mais pouvant se rapprocher davantage de la première. Elle est représentée par la formule

$$K = 606,5 + 0,305t$$

*Table de la chaleur spécifique de l'eau en de la
chaleur latente de la vapeur d'eau
à diverses températures*

Tempé- rature du thermomètre à air. T (1)	Nombre des unités de chaleur abandonnées par un kilog. d'eau, en descendant de T° à 0° Q (2)	Chaleur spécifique moyenne de l'eau entre 0° et T° (3)	Chaleur spécifique de l'eau de $T \text{ à } T + dt$ $\frac{dQ}{dT}$ (4)	Chaleur latente de la vapeur saturée à la température T (5)
0°	0,000	"	1,0000	606,5
10	10,002	1,0002	1,0005	599,5
20	20,010	1,0005	1,0012	592,6
30	30,026	1,0009	1,0020	585,7
40	40,051	1,0013	1,0030	578,7
50	50,087	1,0017	1,0042	571,6
60	60,137	1,0023	1,0056	564,7
70	70,210	1,0030	1,0072	557,6
80	80,282	1,0035	1,0089	550,6
90	90,381	1,0042	1,0109	543,5
100	100,500	1,0050	1,0130	536,5
110	110,641	1,0058	1,0153	529,4
120	120,806	1,0067	1,0177	522,3
130	130,997	1,0076	1,0204	515,1
140	141,215	1,0087	1,0232	508,0
150	151,462	1,0097	1,0262	500,7
160	161,741	1,0109	1,0294	493,6
170	172,052	1,0121	1,0328	486,2
180	182,398	1,0133	1,0364	479,0
190	192,779	1,0146	1,0401	471,6
200	203,200	1,0160	1,0440	464,3
210	213,660	1,0174	1,0481	456,8
220	224,162	1,0189	1,0524	449,4
230	234,708	1,0204	1,0568	441,9

Mais voyons quelles étaient les conséquences de la première loi admise, et quelles sont celles de la loi véritable.

De la loi de Watt, c'est-à-dire du principe de constance de la quantité de chaleur renfermée dans une même masse de gaz à saturation à diverses températures, résulte que si l'on comprime ou que l'on dilate une masse de vapeur à l'état de saturation, contenue dans une enveloppe imperméable à la chaleur, la nouvelle pression correspondra à la nouvelle température produite, c'est-à-dire sera la pression de saturation à cette température; dans le cas de la compression, il n'y aura donc pas eu condensation de vapeur.

De la loi véritable résulte, au contraire, que, si l'on prend de la vapeur à 150° et qu'on la dilate jusqu'à ce que sa pression soit devenue égale à la pression atmosphérique, sa température sera encore plus haute que 100° ; par suite, il n'y aura plus saturation; de même, si, prenant de la vapeur saturée à 100° , on la comprime, il y aura précipitation de vapeur.

§. 3.

Chaleur dégagée par la combustion de différents corps.

Considérons, maintenant, une question économique: que nous coûtent ces unités de chaleur? Pour la résoudre, il est nécessaire de savoir quelles quantités de chaleur développent les principales combustibles employés. Or, voici un tableau résultant d'expériences faites à ce sujet.

1 ^{Kil} de bois sec, desséché par une exposition prolongée, à une température de 100° produit...	3600	unités de chaleur
— bois ordinaire, contenant 0,20 d'eau.....	2800	"
— charbon de bois.....	7000	"
— tourbe desséchée à 60°	4800	"
— tourbe contenant 0,20 d'eau.....	3600	"
— charbon de tourbe.....	5800	"
— houille ordinaire.....	7500	"
— coke contenant 0,15 de cendres.....	6000	"
— carbone pur.....	7800	"

La valeur considérable correspondant au charbon de bois par rapport à celle du bois desséché et du bois ordinaire, provient de ce que, dans la combustion de ces derniers, il se forme d'autres produits gazeux que l'acide carbonique, produits qui s'emparent de la chaleur développée, ce qui n'a pas lieu dans la combustion du charbon de bois.

Appliquons l'un de ces résultats au cas qui nous occupe; prenons, par exemple, le coke et, à ce sujet, il est bon de remarquer qu'actuellement on n'admet plus dans la pratique que 5 pour 100 de cendres dans le coke; des procédés particuliers ayant permis de séparer une

grande partie des matières inertes, nous admettrons que la quantité de chaleur que fournira 1^{Kil} , se sera, comme de 10 pour 100; par suite, elle sera de 6600 unités de chaleur.

Or, si nous prenons une machine à vapeur à condensation, et si nous supposons que la chaudière soit alimentée par l'eau du condenseur, c'est-à-dire par de l'eau à 40° , il faudra, pour en faire passer un Kilogramme à l'état de vapeur à 100° , non plus 637 unités de chaleur, mais 597; or, 1^{Kil} de coke fournit 6600 unités de chaleur, donc ce Kilogramme pourra faire passer en vapeur à 100° $\frac{6600}{597} =$ environ 11 Kilogr. d'eau de la chaudière.

Ce résultat d'ailleurs est purement théorique, et c'est à peine si dans la pratique on en obtient la moitié.

Une autre question encore fort importante, est de déterminer la quantité d'eau nécessaire pour opérer la condensation d'un poids déterminé de vapeur: car, avant d'établir une machine à condensation, toujours plus économique qu'une autre à égalité de force produite, il faut d'abord se demander si l'on disposera d'une quantité d'eau suffisante pour la condensation.

Or, pour condenser 1^{Kil} de vapeur en eau à 40° , il faut absorber $637 - 40 = 597$ unités de chaleur; mais l'eau entre dans le condenseur à 10° (température moyenne) et en sort à 40° , d'où 1^{Kil} d'eau absorbe 30 unités de chaleur; c'est-à-dire que pour opérer la condensation de 1^{Kil} de vapeur, il faut $\frac{597}{30}$ Kilogr. d'eau, soit 20, Kilogrammes.

S. 4.

Vitesse d'écoulement de la Vapeur d'eau.

Reste enfin un dernier point à examiner dans cette étude analytique des propriétés de la vapeur d'eau, c'est la vitesse d'écoulement de cette vapeur. Pour faire circuler de la vapeur, il faut une certaine différence de pression: Voyons quelle vitesse résultera d'une différence déterminée; et pour cela appliquons le principe des forces vives. Supposons un piston marchant dans le sens indiqué par la flèche; le gaz s'écoule de l'espace ABCD dans l'espace indéfini à la pression p' par l'orifice mn, et cela en vertu de la différence de pression $(p - p')$. Or, si S est la surface de la section d'écoulement et e l'espace parcouru dans l'unité de temps, nous aurons pour la force vive dépensée

$$S (p - p') e = (p - p') v$$

en appelant v le volume de gaz écoulé.

D'un autre côté, la force du gaz qui s'écoule est $(\frac{1}{2} m v^2)$ c'est-à-dire $\frac{1}{2} \frac{v \delta}{g} u^2$ u étant la vitesse d'écoulement cherchée. Or

$$(p - p') v = \frac{1}{2} \frac{v \delta}{g} u^2$$

$$\text{D'où} \quad u = \sqrt{\frac{2g}{\delta} \frac{p - p'}{v}}$$

*Poids et Vitesses
de la vapeur s'échappant dans l'atmosphère,
à diverses pressions.*

<i>Pression absolue de la vapeur qui s'écoule</i>	<i>Poids du mètre cube.</i>	<i>Vitesse d'écoulement par seconde.</i>	<i>Pression absolue de la vapeur qui s'écoule.</i>	<i>Poids du mètre cube.</i>	<i>Vitesse d'écoulement par seconde.</i>	<i>Pression absolue de la vapeur qui s'écoule.</i>	<i>Poids du mètre cube.</i>	<i>Vitesse d'écoulement par seconde.</i>
<i>atm.</i>	<i>K</i>	<i>m.</i>	<i>atm.</i>	<i>K</i>	<i>m.</i>	<i>atm.</i>	<i>K</i>	<i>m.</i>
5, 00	2, 568	562	1, 60	0, 900	368	1, 09	0, 630	170
4, 75	2, 457	554	1, 50	0, 854	343	1, 08	0, 626	161
4, 50	2, 334	549	1, 45	0, 830	331	1, 07	0, 622	151
4, 25	2, 217	546	1, 40	0, 800	318	1, 06	0, 619	140
4, 00	2, 096	537	1, 35	0, 778	302	1, 05	0, 610	129
3, 75	1, 972	530	1, 30	0, 750	285	1, 04	0, 607	116
3, 50	1, 855	520	1, 25	0, 722	265	1, 03	0, 601	101
3, 25	1, 734	512	1, 22	0, 705	252	1, 02	0, 598	83
3, 00	1, 611	502	1, 20	0, 693	242	1, 01	0, 595	58
2, 75	1, 487	488	1, 18	0, 681	232	1, 00	0, 590	41
2, 50	1, 363	472	1, 16	0, 670	220	1, 00	0, 588	0
2, 25	1, 238	451	1, 14	0, 658	213	"	"	"
2, 00	1, 111	427	1, 12	0, 647	194	"	"	"
1, 75	0, 984	394	1, 10	0, 636	178	"	"	"

Ecoulement de la Vapeur dans un milieu à une pression plus faible.

Vapeur à 5 atmosphères absolues.			Vapeur à 4 atmosphères absolues.			Vapeur à 3 atmosphères absolues.		
Pression dans le récipient.	Pression effective en kilogram. par m. q.	Vitesse d'écoulement en mètres par 1°.	Pression dans le récipient.	Pression effective en kilogram. par m. q.	Vitesse d'écoulement en mètres par 1°.	Pression dans le récipient.	Pression effective en kilogram. par m. q.	Vitesse d'écoulement en mètres par 1°.
4,95	517	63	3,95	517	69	2,95	517	79
4,90	1034	89	3,90	1034	97	2,90	1034	112
4,85	1550	108	3,85	1550	120	2,85	1550	137
4,80	2067	125	3,80	2067	139	2,80	2067	158
4,75	2584	140	3,75	2584	155	2,75	2584	178
4,65	3618	166	3,65	3618	184	2,65	3618	210
4,55	4651	188	3,55	4651	209	2,55	4651	238
4,50	5168	198	3,50	5168	220	2,50	5168	251
4,25	7752	242	3,25	7752	269	2,25	7752	307
4,00	10336	281	3,00	10336	311	2,00	10336	355
3,75	12920	314	2,75	12920	347	1,75	12920	396
3,50	15504	344	2,50	15504	380	1,50	15504	423
3,25	18088	371	2,25	18088	411	1,25	18088	469
3,00	20672	396	2,00	20672	439	"	"	"
2,75	23256	421	1,75	23256	466	"	"	"
2,50	25340	444	1,50	25340	491	"	"	"
2,25	28424	465	1,25	28424	515	"	"	"

Mais, si j'appelle h la hauteur du gaz considérée nécessaire pour produire la pression $P-P'$, j'aurai

$$P-P' = \delta h, \quad \text{d'où} \quad h = \frac{P-P'}{\delta}$$

c'est-à-dire $u = \sqrt{2gh}$, ou la formule connue pour les liquides.

Or, en appliquant, on trouve que δ est très petit, c'est-à-dire que h est très grand, ou bien que pour une très légère différence de pression, on a une vitesse d'écoulement considérable: d'où plusieurs conséquences. Les orifices par lesquels s'écoule la vapeur n'auront pas besoin d'être très

grande; et les complications qui, dans les machines hydrauliques, résultent des masses, disparaissent ici; de plus, il suffira, d'avoir une très faible différence de pression, sous le piston, et dans le condenseur, pour imprimer à la vapeur une vitesse considérable, car une différence de pression d'une atmosphère donne à la vapeur qui s'écoule une vitesse de 300 mètres par seconde environ.

§. 5.

Notions sur quelques vapeurs et gaz autres que la vapeur d'eau.

Dans des applications récentes de la chaleur comme force motrice, on a proposé comme véhicules, des vapeurs autres que la vapeur d'eau et des gaz proprement dits.

La vapeur d'éther, la vapeur de chloroforme, l'air chaud ont été proposés.

Voici un tableau des principales chiffres intéressants à connaître, au sujet de ces corps.

Nom des Fluides.	Densité relative.	Point de vaporisation.	Chaleur latente absorbée.	Coefficient de dilatation.
Air pur.....	1, 0000	"	"	0, 0036706
Azote.....	0, 9720	"	"	0, 0036706
Oxygène.....	1, 1057	"	"	0, 0036700
Hydrogène.....	0, 0688	"	"	0, 0036613
Acide carbonique.....	1, 5290	- 58°*	"	0, 0037099
Vapeur d'Ether sulfurique.....	2, 5860	37°, 80	96°, 80	0, 00367
Vapeur de Chloroforme.....	2, 9400	61°, 00	"	0, 00367
Vapeur d'Alcool absolu.....	1, 6133	78°, 40	207°, 00	0, 00367
Vapeur d'eau.....	0, 6235	100°, 00	537°, 00	0, 00367

* Ce nombre se rapporte à l'acide carbonique solidifié.

Chapitre III.

§. 1^{er}

Calcul direct de l'effet des Machines à vapeur.

Maintenant que nous avons passé en revue les diverses propriétés de la vapeur, appliquons les au calcul de l'effet dynamique d'une machine à vapeur.

Imaginons une certaine quantité de vapeur poussant devant elle un piston, dont S est la surface en centimètres carrés; soit p la pression de la vapeur par centimètre carré; ps sera la pression totale, et l'effet produit sera cette quantité multipliée par l'espace parcouru par le piston; mais cet espace multiplié par la surface du piston, c'est l'augmentation du volume de la vapeur; donc l'effet produit est égal à $p dv$. Nous arrivons au même résultat, dans le cas où le piston revient sur lui-même.

Maintenant, dans une machine à double effet, tout se passe successivement de même sur les deux faces du piston, c'est-à-dire que des forces égales y agissent successivement pendant la marche progressive du piston pour une des faces, pendant la marche rétrograde pour l'autre. Occupons-nous donc simplement d'une des faces; il suffira de calculer $Sp dv$ pour la marche du piston dans un sens, puis pour cette marche dans l'autre, et de retrancher le second résultat du premier.

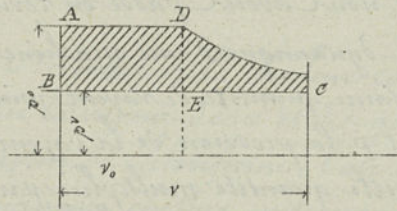
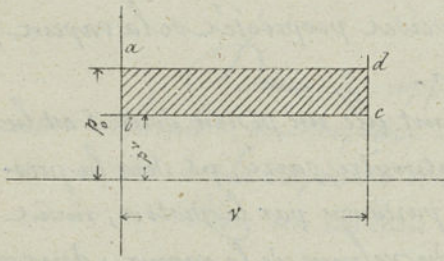
Or, pour intégrer, il faut exprimer la pression en fonction du volume; prenons d'abord une machine dans laquelle la communication entre le corps du cylindre et la chaudière reste établie pendant toute la première partie de la course du piston. Dans ce cas, la pression sera constante et égale à celle de la vapeur dans la chaudière, soit p_0 ; et si v est le volume de la vapeur introduite, $v p_0$ sera l'effet produit par la vapeur pendant cette première partie de la course du piston; pendant l'autre partie, la pression est aussi constante et égale à la pression dans le condenseur, soit p' ; d'où $v(p_0 - p')$ sera l'effet total produit par la vapeur contenue dans le cylindre.

Il est bon de remarquer de suite qu'on fait ici une hypothèse inexacte; c'est que la pression s'équilibre aussitôt que l'on a ouvert la communication entre le cylindre et le condenseur: la pression est d'abord plus grande que p' , d'où le résultat donné par la formule ci-dessus est trop fort.

Mais, maintenant, en laissant la communication ouverte entre la chaudière et le cylindre, pendant toute la marche progressive du piston, on n'obtient pas tout l'effet qu'on pourrait tirer du volume de vapeur dépensée ou de la quantité de combustible consommée pour produire cette vapeur; et cela résulte de ce qu'au moment où l'on change les communications, il y a contact entre un corps à 100° ou 150° et un corps à 10° , le condenseur, par suite perte de force vive.

Une amélioration consiste à intercepter la communication entre le cylindre et

la chaudière, lorsque le piston n'a encore fourni qu'une fraction de sa course; la vapeur se détend, c'est-à-dire que sa pression diminue, et par suite sa température baisse; de telle sorte que lorsqu'elle sera mise en communication avec le condenseur, il n'y aura pas contact entre des corps à des températures aussi différentes. Au reste, l'effet produit pendant une course totale comprenant l'aller et le retour du piston, peut être représenté par une surface: en portant les volumes occupés par la vapeur en abscisses et les pressions correspondantes en ordonnées, dans le premier cas déjà énoncé, l'effet produit peut être représenté par la surface $abcd$, et dans le cas de détente par la surface $ABCD$.



On voit que dans ce second cas, où le volume de vapeur introduit n'est que v_0 , au lieu de v , l'effet produit est proportionnellement plus considérable, car on a en sur toute la surface mixtiligne DCE .

D'ailleurs, la limite à cette détente n'est que dans la pression même de la vapeur dans le condenseur; théoriquement il y aurait avantage à atteindre cette limite et pratiquement on s'en rapproche beaucoup dans quelques machines de Cornouailles.

Pour la première portion de la marche progressive du piston, où il y a communication avec la chaudière, l'effet produit est $p_0 v_0$, d'après ce que nous avons vu plus haut. Quant à l'effet produit pendant la seconde période, il est égal à $\int_{v_0}^v p dv$; et pour faire cette intégration, il serait nécessaire de connaître la pression en fonction du volume. Or, nous avons vu qu'à ce sujet, les données physiques sont inexactes. Cherchons cependant la relation qui existe entre ces deux quantités p et v et supposons pour cela, ce qui a lieu dans quelques machines, que le cylindre est formé d'une double enveloppe et que l'espace annulaire qu'elle comprend est rempli de vapeur: alors la température de la vapeur qui se détend reste constante; par suite, les volumes sont en raison inverse des pressions, et l'on a

$$pv = p_0 v_0 \quad \text{d'où} \quad p = p_0 v_0 \cdot \frac{1}{v}$$

$$\text{d'où} \quad \int_{v_0}^v p dv = p_0 v_0 \log. hyp. \frac{v}{v_0} = p_0 v_0 \cdot 2,3 \log \frac{v}{v_0}$$

Quant au travail de la vapeur condensée lorsque le piston revient sur lui-même, il est égal à $p'v$.

Donc l'effet total produit par le volume v_0 de vapeur, est égal à

$$p_0 v_0 + p_0 v_0 \cdot 2,3 \log \frac{v}{v_0} - p'v$$

Rappelons-nous que cette formule suppose la vapeur à une température constante, hypothèse fort incertaine. De plus, la vapeur n'est pas sèche; des expériences ont prouvé qu'une quantité d'eau variant du $\frac{1}{5}$ au $\frac{1}{3}$ était entraînée par elle. D'où résulte :

- 1° la perte de la chaleur enlevée par cette eau entraînée sans production de force motrice;
- 2° une augmentation dans la densité de la vapeur et, par suite, une vitesse d'écoulement moindre pour une même différence de pression;
- 3° la vaporisation d'une partie de cette eau lors de la détente de la vapeur, circonstance qui rend encore plus inexacte l'application de la loi de Mariotte.

M. de Lambour a proposé une autre formule; elle est basée sur les considérations suivantes: Si nous supposons qu'un certain volume de vapeur soit introduit dans le cylindre et que celui-ci ne soit point entouré par la vapeur de la chaudière, la quantité de chaleur qu'il renfermera sera constante pendant la détente; par suite, d'après la loi de Watt, cette vapeur restera à saturation, c'est-à-dire que la température et la pression seront liées par la loi correspondante, à cet état. Or, nous avons vu comment, dans ce cas, on avait le volume d'une même masse de vapeur, à différentes pressions et à la température correspondante; on a sensiblement

$$p = \frac{a}{b+p}$$

p étant le coefficient par lequel il faut multiplier le volume d'un certain poids d'eau pour avoir le volume de sa vapeur, à la pression p .

D'où l'on tire

$$\frac{v}{v_0} = \frac{b+p_0}{b+p} \quad (1)$$

On voit que, d'après ces considérations, les volumes ne sont plus simplement en raison inverse des pressions, mais bien en raison inverse de ces mêmes pressions augmentées d'une constante. D'où, M. Lambour déduit la valeur de l'effet produit

$$p_0 v_0 + v_0 (b+p_0) \quad 2,3 \log \frac{v}{v_0} - b(v-v_0) - p'v$$

Cette formule suppose que la loi de Watt est exacte; en outre, que la vapeur est sèche. Or, aucune de ces hypothèses n'est exacte; lorsque le volume de la vapeur augmente, elle ne reste plus à saturation; par suite, il y a formation de vapeur aux dépens de l'eau, que la vapeur qui n'est jamais sèche entraîne avec elle. Pour une pression déterminée, la formule (1) nous donne donc un volume trop petit; d'où la valeur de l'effet produit donnée par M. Lambour est trop faible. La véritable loi est donc comprise entre les deux formules proposées. D'ailleurs, le moyen le plus simple dans la pratique consiste à appliquer une de ces deux formules et à corriger le résultat qu'elle donne par des expériences directes. On prend l'effet produit dans une machine que l'on connaît parfaitement; on voit la différence avec le résultat donné par la formule, et l'on corrige proportionnellement le premier résultat.

Pour les machines à vapeur à basse pression, M. Poncelet propose les

coefficients de correction, qui suivent et que l'on peut également appliquer aux machines à haute pression et à détente.

Coëfficients de correction.

Force des Machines en chevaux.	Machine en bon état d'entretien.	Machine en état ordinaire d'entretien.
De 4 à 8.....	0, 50	0, 42
De 10 à 20.....	0, 56	0, 47
De 30 à 40.....	0, 60	0, 54
De 60 à 100.....	0, 65	0, 60.

§. 2.

Dynamomètres.

Pour ce qui est enfin de la mesure expérimentale et après construction, de la puissance des machines à vapeur, on se sert aujour d'hui des instruments dynamométriques à ressort imaginés par M. M. Foncelot et Morin, et qui peuvent donner, en vertu d'une disposition ingénieuse, l'intégrale du travail développé dans un temps donné, et tous les états intermédiaires de la force.

On peut se servir aussi, et l'on se servait toujours anciennement, d'instruments à frottement et à bras de levier chargé de poids, tels que le frein de Prony.

On peut se servir, pour le même objet, d'un appareil spécial, imaginé par Watt, et dont on fait encore actuellement de fréquentes applications. Un corps de cylindre contient un piston en communication avec l'un des côtés du piston du cylindre travailleur. Le premier piston est attaché à une tige, à l'extrémité de laquelle est fixé un crayon et un ressort qui cède plus ou moins suivant la pression : la distance à un point fixe de la pointe du crayon mesure donc la pression ; si la flexion du ressort est proportionnelle à la pression, la pointe du crayon laisse une trace sur un papier qui se déroule, et décrit un espace proportionnel à celui que décrit le piston moteur, dans une direction perpendiculaire au mouvement du piston indicateur ; pendant une révolution entière de la machine, le crayon trace sur le papier une courbe fermée dont l'aire est la mesure de l'effet produit. Cet appareil est connu sous le nom de l'indicateur de Watt.

Chapitre IV.

Description d'une Machine à vapeur fixe à basse pression et à condensation.

§. 1^{er}

Dispositions générales.

Il existe un grand nombre de machines à vapeur fixes, mais ce serait nous détourner du but de ce cours que de donner une description détaillée, ne fut-ce même que des principales.

Les points de vue personnels des constructeurs, l'amour-propre qu'ils mettent à ne pas se copier les uns les autres, expliquent, le plus souvent, ces diversités.

Nous nous contenterons donc de décrire, avec quelques détails, la machine à vapeur fixe, à basse pression et à condensation, telle que l'a laissée Watt, sans à revenir ensuite sur les modifications utiles qu'on a pu y apporter depuis.

Dans cette étude, nous parlerons d'abord sommairement des différentes parties dont se compose la machine; nous indiquerons ensuite leurs proportions et nous terminerons par l'exposé des détails de construction qui leur sont relatifs, et par les faits pratiques relatifs à la production de la vapeur.

Cet ordre nous permettra de traiter plus rapidement la question qui nous occupe, parce que nous aurons toujours devant les yeux la machine toute entière et que nous y choisirons seulement les détails les plus intéressants.

Jetons les yeux sur la figure 30 qui représente assez exactement l'ensemble d'une machine de Watt construite dans les conditions ordinaires.

Nous voyons d'abord que la pièce principale est un balancier destiné à transmettre le mouvement de va-et-vient du piston du cylindre, à la manivelle de l'arbre tournant destiné à transmettre la force.

Le balancier oscille autour d'un axe qui repose sur deux entablements placés l'un en avant, l'autre en arrière du plan principal de la machine.

D'un côté, il reçoit le mouvement du piston par l'intermédiaire du parallélogramme de Watt; de l'autre, il le communique à l'arbre tournant par l'intermédiaire d'une bielle et d'une manivelle, dont l'une des extrémités est calée sur l'arbre tournant.

Un volant composé d'une jante assez épaisse, réunie au centre par des rais, est fixé de plus autour de cet arbre tournant. Du même côté de l'axe du balancier, est fixée la tige du piston de la pompe à eau froide. La tige du piston de la pompe à air, qui ne demande pas

une amplitude d'oscillation aussi grande que le piston moteur, est attachée au milieu d'un des côtés du parallélogramme, point qui, comme nous l'avons vu, décrit aussi sensiblement une ligne droite. Quant à la tige de la pompe d'alimentation, elle est fixée en un point du balancier encore plus rapproché de son centre d'oscillation.

Du balancier et du parallélogramme de Watt. — Le balancier des premières machines de ce genre, était en bois; il était composé d'un grand nombre de pièces de chêne assemblées par des boulons; mais ces pièces jouaient et, en raison de l'élasticité du bois, on ne pouvait jamais calculer exactement l'amplitude des oscillations du balancier; par suite, le piston pouvait venir choquer le fond du cylindre et le briser. On fut donc conduit à remplacer le bois par la fonte; ensuite, considérant que c'est un levier aux extrémités duquel agissent des forces considérables, puisqu'il reçoit et transmet l'action entière de la vapeur, on lui a donné la forme représentée par la fig. 31; c'est celle du solide d'égal résistance.

Quant à sa section, elle est représentée fig. 32; elle est la conséquence de ce principe, que la matière travaille d'autant plus pour résister à la rupture, qu'elle est plus éloignée de l'axe neutre (on sait que dans une section d'une pièce fléchie, l'axe neutre est celui suivant lequel les molécules n'éprouvent ni extension ni compression). De plus, aux différents points d'attache, s'exercent des forces plus ou moins considérables, d'où résulte la nécessité d'une certaine accumulation de matière en ces points; d'ailleurs, l'oscillation du balancier se fait autour d'un axe en fer forgé, pour assembler le goujon avec le balancier, on a soin de lui donner un diamètre un peu plus grand que celui de l'ouverture pratiquée dans le balancier; on est alors obligé, pour faire pénétrer ce goujon, de force l'entrée; on peut même encore, afin de mieux fixer ces deux parties, en augmentant leur pression mutuelle, enfoncer des clavettes dans des mortaises pratiquées dans le joint qu'elles forment.

Quant au parallélogramme qui sert à transformer le mouvement oscillatoire du balancier en mouvement de va-et-vient, il est formé ainsi qu'il suit: quatre tiges, deux de chaque côté du balancier, sont articulées aux extrémités de deux goujons traversant ce balancier, l'un à l'extrémité de la partie droite, l'autre au milieu de cette partie. Ces quatre tiges, projetées deux à deux, l'une sur l'autre, forment les côtés *a, a* du parallélogramme représenté dans les figures 33, 34. Une autre tige *b* articulée aux tiges *a*, forme le quatrième côté du parallélogramme. Mais, dans la fig. 34, cette tige *b* se projette sur une autre représentée par *d* dans la fig. 33; celle-ci, reliée par une de ses extrémités à un des sommets du parallélogramme, a son autre extrémité *f* fixe. Ce second point fixe est pris à la partie inférieure de l'entablement, fig. 30. La tige de la pompe à air passe à travers une boîte à étouper, et l'eau tirée du condenseur est jetée dans la bêche à eau chaude, où la pompe d'alimentation en prend la portion nécessaire à l'alimentation de la chaudière. Quant à cette tige, vu sa longueur, on ne tient pas compte du faible mouvement oscillatoire de son extrémité.

Du cylindre et des soupapes. — Voyons maintenant par quel système de soupapes les deux parties du cylindre communiquent successivement avec la chaudière et avec le condenseur. Cette disposition est représentée fig. 35 et 36. Je suppose le piston au haut de

sa course. Il faut alors mettre en communication la partie supérieure du corps de pompe et la chaudière, la partie inférieure de ce même corps de pompe et le condenseur, et rompre les communications inverses qui existaient, c'est-à-dire ouvrir S et s' et fermer S' et s; puis, au contraire, lorsque le piston est au bas de sa course, ouvrir S' et s et fermer S et s'.

Pour faire ouvrir et fermer en temps opportun ces soupapes, deux taquets t, t' sont fixés à la tige de la pompe à air; si c'est, par exemple, le tympan supérieur qui vient rencontrer le bras de levier horizontal, d'après la position du point fixe f, les points S et s' s'abaisseront, tandis que les points S' et s s'éleveront; Or, la figure 32 indique par quel système le mouvement de haut en bas des points S et s, ainsi que le mouvement de haut en bas des points S' et s', se communique aux soupapes et fait fermer les soupapes S et s', tandis que les deux autres s'ouvrent. La figure se comprend d'elle-même, les angles en c et b sont invariables, et a est la projection d'une tige dont l'axe est fixe et qui perce la paroi de la boîte à soupape.

Du tiroir. — Le tiroir, dont nous avons déjà parlé, peut produire d'une manière différente ces changements de communication.

Lorsque la vapeur agit dans la partie supérieure du cylindre, elle exerce sa pression sur le couvercle supérieur et tend, par suite, à soulever ce cylindre. Au contraire, lorsque la vapeur agit sous le piston, elle presse le cylindre sur sa base. Cette action alternative de traction et de pression exige que non seulement ce cylindre repose sur une base en maçonnerie extrêmement solide, mais encore qu'il soit fortement rattaché à la construction toute entière qui, alors, résiste par son poids.

Du bâti et des fondations. — Le cylindre est relié directement à la bêche; celle-ci est garnie d'oreilles en fonte dont les ouvertures correspondent à des trous pratiqués dans la maçonnerie et l'on adapte des boulons, ainsi que l'indique la fig. 38; on voit qu'un puits latéral est réservé, afin de faciliter l'opération de la pose des boulons et de permettre de les visiter. Ils doivent être de forte dimension et solidement vissés; car, en admettant que, soit leur élasticité, soit un manque de rigidité dans l'assemblage, permit un mouvement de 1 millimètre, ce mouvement produit par une force de 10 à 15,000 Kilogr, donnerait lieu à des trépidations très fortes.

Les boulons de fondation doivent être munis de larges rondelles en fonte, réparant la pression sur une étendue considérable de pierre de taille, de façon à ce que la pression par centimètre carré étant faible, l'élasticité de la pierre soit à peine mise en jeu; si alors l'écrou est serré d'avance de façon à ce que le boulon éprouve une tension égale à celle qui résultera de l'action de la vapeur, quand elle pressera le piston de haut en bas, la longueur du boulon restera constante; seulement la tension qu'il supporte, résultera tantôt de l'action de la vapeur, tantôt de l'élasticité de la pierre, selon que le piston descendra ou monterait.

De la bielle et de la manivelle. — La bielle adoptée à l'extrémité opposée du balancier, doit résister à une force considérable, car c'est la force de la vapeur toute entière qui lui est transmise; elle a une grande longueur, et cette considération doit entrer en ligne de compte dans la détermination de ses proportions, puisqu'elle est soumise, non pas seulement à

M.V. 8.



un effort de traction, mais bien à des efforts alternatifs de traction et de compression: le point le plus faible sera, par suite, au milieu; le diamètre des diverses sections ira donc en augmentant vers ce point; mais, d'un autre côté, la matière, résiste d'autant mieux qu'elle est plus éloignée de l'axe; on adoptera donc pour section, au lieu d'un cercle, celle représentée fig. 39.

La manivelle qui sert à la transformation de mouvement, est un mammeton qui, dans les bonnes machines, doit être en fer forgé. Ainsi que l'indique la figure 40, il est percé de deux ouvertures, l'une destinée à recevoir le goujon qui relie ce mammeton à la bielle, comme il est représenté fig. 41; la seconde, dans laquelle est fixé l'arbre tournant. Pour opérer cette liaison d'une manière invariable, on fait cette ouverture d'un diamètre un peu inférieur à celui de l'arbre; puis pour permettre l'introduction de ce dernier, on chauffe le mammeton; on a soin, d'ailleurs, de ménager une mortaise dans laquelle on introduit une clavette d'acier, afin d'empêcher, d'une manière plus certaine, que l'arbre ne puisse tourner par rapport au mammeton.

§. 2.

Proportions à donner aux différentes parties de la machine.

Examinons maintenant les proportions de ces différentes parties.

Pour le balancier, il y a avantage à le faire le plus grand possible; car, à égalité de course du piston, l'inclinaison que tendra à prendre la tige de ce piston, sera d'autant moindre; cela résulte de ce que cette inclinaison maxima se mesure par le sinus versé de la moitié de l'angle décrit par le balancier; or, ce sinus versé est d'autant plus petit que le balancier est plus grand. D'un autre côté, on ne peut exagérer les proportions de ce balancier; on lui donne donc généralement, pour longueur, 3 fois la course du piston moteur. Il y a aussi avantage à donner à la bielle une grande longueur, afin qu'elle ne soit pas trop inclinée par rapport à la verticale lorsque le piston est au milieu de sa course. En effet, la force transmise qui atteint pour des machines de 160 chevaux, par exemple, 10 ou 12 tonnes, se décompose en deux, au point d'attache de la bielle et du balancier, l'une suivant la bielle, l'autre qui pousse horizontalement le balancier et qui, pour peu que l'inclinaison de la bielle par rapport à la verticale soit notable, atteint 2 à 3000 Kilos. Or, cette force a de graves inconvénients: elle agit dans le haut de la machine; elle se communique aux paliers dans lesquels tournent les tourillons de l'axe du balancier et, par suite, à la partie supérieure de l'entablement. On peut d'ailleurs remarquer que cette force agit toujours dans le même sens; car, lorsque la bielle a passé de l'autre côté de la verticale, la force agit dans le sens opposé et, par suite, sa composante suivant l'axe du balancier, aura la même direction que précédemment. On voit donc que cette force agira toujours dans le même sens et que son intensité variera depuis 0 jusqu'à $\frac{1}{4}$ ou $\frac{1}{5}$ de la force totale qui s'exerce sur le piston.

Maintenant, l'entablement supporté par des colonnes, est peu propre à résister à cette force horizontale, et la figure rectangulaire qu'il forme avec ses appuis, facile à déformer; il est donc important de diminuer le plus possible cette composante. D'un autre côté, on ne peut

augmenter indéfiniment la longueur de la bielle, puisque, comme nous l'avons déjà remarqué, sa résistance varie en raison inverse du carré de sa longueur; on lui donne donc, en général, 5 à 6 fois la longueur du rayon de la manivelle.

D'ailleurs, on fortifie l'entablement en menant les diagonales du rectangle qu'il forme avec ses colonnes de support, ou encore en le prolongeant jusqu'aux murs formant les parois de la salle dans laquelle est placée la machine. Il faut de plus proscrire des entablements perpendiculaires au balancier, entablements qui, par suite de cette disposition, ne présenteraient pas autant de résistance, parce que la pression agit alors perpendiculairement à leur longueur.

Le volant est, comme nous l'avons dit, une roue en fonte dont la jante a une masse considérable. Son but est de régulariser le mouvement de la machine. La vapeur transmet à l'arbre une force variable; cette force même est nulle lorsque le piston est aux extrémités de sa course; et, en ces points, les différentes parties de la machine, la bielle, la manivelle ont une vitesse nulle; s'il n'y avait donc une masse conservant toujours une quantité d'action, une certaine force vive, la machine s'arrêterait à tous les points morts. Cette masse est le volant qui, en ces points, ayant une certaine vitesse, ne peut s'arrêter instantanément en vertu de sa force d'inertie. Il oblige donc, en perdant une certaine partie de sa puissance vive, la manivelle, à dépasser le point mort, et vers le milieu de la course du piston, lorsque la force motrice a toute son intensité, elle rend au volant ce qu'il avait perdu. D'où il suit que la vitesse du volant, c'est-à-dire celle de l'arbre tournant sur lequel il est calé, varie entre un maximum et un minimum.

Si, maintenant, pour une vitesse moyenne déterminée, on veut avoir le mouvement le plus régulier possible, condition indispensable dans une machine à tisser, par exemple, il faudra que le volant ait une puissance vive $\frac{1}{2} Mv^2$ considérable, ou bien que sa masse M soit très forte.

D'ailleurs, la détermination de cette masse du volant, pour une régularisation déterminée, est une question très complexe au point de vue pratique, par suite du grand nombre de pièces, d'engrenages, qui composent la machine et qui, tous, tendent à régulariser le mouvement. On ne peut que prendre note des exemples qu'on a sous les yeux, et dire qu'en général, il est nécessaire de donner au volant une masse considérable.

Ainsi, dans une filature où la régularité du mouvement est suffisante, on a, pour une machine de 40 chevaux, un volant de 9320 Kilog.; sa vitesse moyenne est de 6^m par seconde; ce qui donne pour sa force vive, 16776 Kilogrammètres. D'un autre côté, la machine fait 19 tours par minute, soit un tour en 3,1 secondes; sa force est de 40 chevaux; elle développe donc pendant un tour, une force de 9300 Kilogrammètres. La force vive du volant est donc égale à une fois et $\frac{8}{10}$ la force développée par le moteur pendant un tour de roue. Il faut d'ailleurs

remarquer que, dans ce cas d'une filature, les résistances sont sensiblement uniformes et que, par suite, si l'on avait affaire à des résistances très variables, il faudrait un volant encore plus considérable. Ainsi, dans une machine employée au laminage du fer.

Reste encore à déterminer les dimensions du cylindre et du piston moteur, pour une force déterminée de la machine. Nous savons que cette force est proportionnelle au volume de la vapeur, c'est-à-dire au volume du cylindre; par conséquent, ce volume n'est pas arbitraire;

mais quel rapport prendrons-nous entre la hauteur du cylindre et son diamètre ? - Il faut dire d'abord que lorsque certaines convenances l'exigent, on peut augmenter, soit la première, soit la seconde de ces dimensions au détriment de l'autre.

Watt prit un intermédiaire, et il a adopté, en général, pour la course du piston, une longueur double de celle du diamètre du cylindre. En Amérique, on a considérablement augmenté la course. Au contraire, dans les bâtiments à vapeur mus par une hélice, il a fallu diminuer considérablement cette course et augmenter la base du cylindre; l'espace manquait, le mouvement devant avoir lieu dans un sens perpendiculaire à la longueur du bateau.

Au reste, toute exagération, soit dans un sens, soit dans l'autre, a ses avantages et ses inconvénients. Si la course est grande, il faut un balancier plus grand, afin que la transformation du mouvement alternatif rectiligne en mouvement alternatif circulaire se fasse dans de bonnes conditions; mais, d'un autre côté, la force à transmettre pour produire le même effet, sera plus faible. L'inverse aurait lieu dans le cas où l'on diminuerait la course du piston.

Ce sont donc, des circonstances accessoires qui déterminent ce rapport, lorsqu'aucun autre motif spécial n'est à prendre en considération. Ainsi, on peut prendre le cylindre ayant sous le même volume la plus faible surface, car il en résultera une surface rayonnante moindre et, par suite, une moindre perte de chaleur. On obtiendra facilement les proportions de ce cylindre à l'aide de l'équat

$$\text{différentielle de la surface} = 0 \quad \text{ou} \quad d. (2\pi r^2 + 2\pi rh) = 0.$$

$$\pi r^2 h \text{ (ou le volume)} = \text{Const.}$$

$$\text{Et l'on trouve} \quad 2r = h$$

On a voulu expliquer la règle de Watt, en partant de la même considération, et, pour cela, on a dit que la seule partie fâcheuse du rayonnement était celle qui répondait à la portion du cylindre occupée par la vapeur, et l'on a supposé ce qui n'est pas exact, car la vapeur afférente doit rendre à l'étendue entière de l'enveloppe la chaleur qu'elle perd, même pendant l'instant où elle est en communication avec le condenseur; la condition du minimum de perte de chaleur par le rayonnement conduit donc à faire la course du piston égale à son diamètre.

Il faut maintenant que le passage par lequel la vapeur arrive dans le cylindre et s'échappe dans le condenseur, soit le plus grand possible; en effet, il faut que la conduite débite un volume égal à celui engendré par le mouvement du piston; or, plus l'orifice sera petit, plus la vitesse devra être grande, et cette vitesse correspond à une perte de pression; il convient donc pour cela de consulter l'expérience, tout en remarquant que la formule relative à l'écoulement des gaz, dit, comme nous l'avons fait remarquer en la discutant, que la vitesse d'écoulement est très grande, même pour une très faible différence de pression. Watt prend cette section égale au $\frac{1}{24}$ de la surface du piston. Watt donne au condenseur une capacité égale au huitième de celle du cylindre moteur.

Quant au cylindre de la pompe à air, il donne au volume engendré par le mouvement du piston de cette pompe le huitième de celui qu'engendre le mouvement du piston moteur; c'est-à-dire qu'il prend pour rayon du piston de la pompe à air, un rayon moitié de celui du piston moteur; car, d'après la position des points d'attache des tiges de ce piston, l'espace parcouru par

le premier est moitié de celui parcouru par le second.

D'après la théorie, nous avons vu que le poids de l'eau d'injection devait être 21 fois celui de la vapeur dépensée; Watt prend le nombre 24.

Remarquons, en terminant ces considérations, que pour avoir le nombre de chevaux de force dont on peut disposer, il ne suffit pas de prendre la surface du piston et la pression de la vapeur dans la chaudière; il y a différentes pertes de pression, dont il faut tenir compte.

Ainsi, la pression de la vapeur dans la chaudière étant... 1

La perte de pression pour produire le mouvement de la vapeur, sera.....	0, 007
Celle due au refroidissement du cylindre et des tubes de conduite.....	0, 016
Celle due au frottement du piston et à la perte de la vapeur qui se fait entre le piston et les parois du cylindre.....	0, 125
Celle due à la pression inverse résultant de la vapeur qui se précipite dans le condenseur.....	0, 007
Celle employée à faire mouvoir les pompes, à élever l'eau d'injection, à vaincre le frottement de arbres.....	0, 063
Celle employée à faire mouvoir la pompe à air.....	0, 050
Celle qui représente l'interruption de l'introduction de la vapeur avant la fin de la course du piston.....	0, 100
Total	<u><u>0, 368</u></u>

La pression transmise est donc égale aux 0, 632 de la pression dans la chaudière. Il est inutile de faire remarquer que ce tableau, et par suite, le résultat qu'on en tire, n'est qu'une indication, qu'une approximation, tant soit peu arbitraire.

Nous avons vu qu'en prenant deux circonférences égales pour celles que décrivent les extrémités de la tige de jonction, le point milieu de cette tige, décrirait une combe dont une des branches était sensiblement rectiligne et ayant sensiblement la forme indiquée fig. 42. On voit, d'après cela, que cette combe a trois de ces points sur la direction que l'on veut obtenir, les points a, b, c; c'est-à-dire que lorsque le point d'attache de la tige atteint, dans son mouvement, un de ces points a, b, c, cette tige a exactement la direction convenable.

Soient (fig. 42^{bis}) OA et OB, deux positions de l'axe du balancier, telles que les points A et B se trouvent sur la verticale décrite par la tige du piston; O'a et O'B, les positions correspondantes pour le côté du parallélogramme qui oscille autour du point O'. La droite de jonction prendra une suite de positions entre Aa et Bb.

Si je reviens que la troisième position convenable du milieu de la tige de jonction a lieu lorsque l'axe du balancier est suivant OC; de C comme centre avec Aa comme rayon, je décris un arc de cercle qui coupe la seconde circonférence en c; joignant Cc, j'ai la position correspondante de la droite de jonction; or, elle coupe en N la direction AB; donc si c'est en ce point

N que j'attache la tige du piston, cette tige aura la direction voulue dans la position OC de l'axe du balancier; ce point N est d'ailleurs facile à déterminer; il divise la droite de jonction dans le rapport des horizontales Cp, cp'.

La solution de la question revient, par suite, à la solution de celle-ci: dans quelle position les horizontales Cp, cp' sont-elles égales? — D'ailleurs, ceci et tout ce qui précède, est encore vrai dans le cas où les cercles OA et Oa seraient inégaux. Mais, envisagée dans toute cette généralité, cette dernière question n'a pas toujours de solution, et il est aisé de voir, d'un autre côté que, dans le cas de cercles égaux, cette solution cherchée répond à la position de la ligne de jonction Cc, telle qu'une de ses extrémités étant un peu au dessous de I, l'autre soit un peu au dessus de i.

C'est en ce point milieu que Watt attachait la tige du piston de la pompe à air, et la remarque qu'il fit et qui lui permit d'avoir, d'autres points d'attache, satisfaisant aux mêmes conditions, est celle qui sert de base au pantographe.

On voit, en effet sur la fig 42 ter, que les différents points de la droite Ob, reliés comme il est indiqué aux côtés du parallélogramme par les tiges d'h, d'k', d"k", d"K", décriront dans le mouvement du système, des courbes semblables à celle décrite par le point d; c'est-à-dire que dans trois positions de ces points, les tiges qu'on pourrait y attacher, se placeraient dans une même direction.

Il est, de plus, évident que deux pièces sont superposées suivant ab; c'est ce que montre la fig. 43 dans laquelle le balancier est supposé dans une de ces positions extrêmes. Watt attachait la tige du piston moteur au b, point qui, appartenant à la droite Ob, joint, comme nous venons de le voir, des propriétés du point d; par suite, les autres pièces da, ab, ac du parallélogramme, qui n'ont pour but que d'empêcher la figure de se déformer, n'ont besoin d'avoir que de très faibles dimensions.

Il y a des cas où l'on ne peut employer la même disposition. Ainsi, dans les bateaux à vapeur, la plus grande commodité exige que le balancier soit placé dans la partie inférieure; d'ailleurs, il est petit; par suite (fig. 44) OA, qui en est la moitié, sera plus petit que Oa'.

Quant à la détermination du point d'attache, telle que la troisième position de la tige corresponde à la position horizontale du balancier, je suivrai la marche indiquée plus haut; et, dans ce cas particulier, le point N divise sensiblement Cc dans le rapport des sinus versés des angles aOc, AOC. Je formerai de même le parallélogramme c'dbe, et tous les points de la droite Ob jouiront des propriétés du point N; c'est en b, comme l'indique la fig 45, qu'est attachée la tige du piston moteur. Il y a deux balanciers; le cylindre est entre les deux, et sa tige est fixée à une pièce projetée en b.

Une autre variété est celle où les deux centres sont placés d'un même côté de la verticale AB. Dans ce cas le point cherché N, n'est pas sur la ligne Cc, mais bien sur son prolongement, ainsi que l'indique la fig. 46. Le système, représenté fig. 47, donne aussi un point qui se meut sensiblement en ligne droite. En effet, le point O étant fixe, le point O', milieu de AB décrira un cercle lorsque le point B parcourra l'horizontale OB, et par suite,

le point A se mouvra suivant la verticale AO; par conséquent, ce point A suivra sensiblement cette verticale, si le point B, au lieu de parcourir l'horizontale OB, se meut suivant un cercle d'un rayon OB suffisamment long.

Proportions de diverses parties. — D'après ce que nous avons vu jusqu'ici, il reste dans la machine de Watt bien des proportions indéterminées, et la théorie fait voir que la plupart du temps, l'effet maximum de la machine est tout-à-fait indépendant des proportions de ses diverses parties. En effet, le principe des forces vives dit seulement que l'effet produit est, proportionnel à la quantité de vapeur dépensée dans un certain temps; ce qui revient à ceci, que la puissance de la machine est proportionnelle à sa surface de chauffe. Maintenant, elle pourra être légère et marcher très vite, ou lourde et marcher lentement.

Watt, d'après ce peu de données et d'après les principes d'application, a construit une première machine; il y a vu quelques inconvénients, principalement pratiques; par suite, dans une seconde, il a apporté quelques modifications, et ainsi de suite. En effet, comme nous le disions plus haut, une machine peut produire le même effet, avoir la même puissance en marchant vite ou en marchant lentement. Dans ce dernier cas, il lui faudra un grand cylindre, un grand piston; la pression sur la tige sera d'autant plus forte; d'où naîtront des inconvénients, des difficultés pratiques. Si d'un autre côté, elle marche vite, les frottements seront plus considérables, et il faudra tenir compte des forces d'inertie, et à l'égard de ces forces, entrons dans quelques détails.

Jusqu'ici, nous ne nous sommes occupés que des forces extérieures de la machine; nous l'avons considérée dans un état d'équilibre pour calculer sa puissance; nous n'avons eu égard, si je puis employer cette expression, qu'aux forces statiques. Mais, maintenant, en nous occupant de ses divers organes, nous devons considérer les forces intérieures, et principalement les forces d'inertie. C'est, au reste, la marche qu'ont toujours suivie les constructeurs; partant des principes de la statique, des dimensions admises dans les constructions immobiles, ils ont peu-à-peu augmenté ces dimensions primitives. Lorsque les différentes pièces de la machine sont en mouvement, la vitesse du piston, de la tige du balancier, etc, changent de signe à chaque période du mouvement oscillatoire; par suite, à chaque instant, il y a une force d'inertie à vaincre; car, en vertu du principe d'inertie, le balancier et les différentes pièces de la machine suivraient leur mouvement sans l'intervention d'une force faisant équilibre à cette force d'inertie. Cette force est égale pour chaque molécule au produit de sa masse par le coefficient différentiel de la vitesse par rapport au temps; elle a surtout de l'importance dans le balancier; d'un autre côté, elle croît avec la vitesse des diverses pièces, c'est-à-dire avec la vitesse de la machine, et peut, dans le cas d'une grande vitesse, prédominer, l'emporter sur la force statique, en égard à laquelle on a calculé les dimensions des diverses pièces de la machine; dans le cas d'une faible vitesse, au contraire, elle est presque nulle, elle disparaît devant l'autre.

On voit donc que si l'on ne veut avoir à redouter les forces dynamiques dérivant de la loi de l'inertie, on ne doit pas, en égard à la masse considérable du balancier, donner à la machine une trop grande vitesse. D'un autre côté, si la vitesse est trop lente, le volant a moins d'action et le mouvement est irrégulier.

D'après Watt, le piston peut marcher avec une vitesse de 1^m par seconde;

$m \frac{dv}{dt}$ est alors négligeable par rapport aux forces statiques. Ou bien encore, pour marcher vite, on doit supprimer le balancier; c'est ce qui a lieu dans les machines locomotives et nous devons dire que c'est la tendance actuelle des constructeurs.

Proportions des parties restantes. — Quant aux autres proportions, elles sont déterminées par des considérations d'ordre inférieur; mais on ne saurait trop recommander d'attacher une grande importance aux habitudes des constructeurs, provenant des traditions qui résultent d'une longue pratique. Il n'est donc pas sans intérêt, de résumer ici les proportions auxquelles s'arrêta Watt. Il prit:

La course du piston égale au double du diamètre de ce piston;
 Le balancier égal à trois fois cette course;
 La bielle égale au balancier, c'est-à-dire à 6 fois le bras de la manivelle,
 (Le bras de la manivelle étant nécessairement moitié de la course du piston.)
 Enfin le petit côté du parallélogramme égal à la moitié de la course du piston.
 Ces proportions ont été adoptées dans leur ensemble par les constructeurs, et ils s'en éloignent peu. Ainsi, le rapport de la bielle à la manivelle varie entre 5 et 6; nous avons déjà vu quels étaient les avantages et les inconvénients résultant soit d'une trop grande, soit d'une trop faible longueur de la bielle.

§. 3.

Détails de construction.

Détails de construction du balancier. — Nous avons vu que la longueur du balancier était de 3 fois la course du piston; nous avons vu encore que la plupart des balanciers étaient faits aujourd'hui en fonte. La machine de Chaillot a pourtant encore un balancier en bois, ce qui s'explique par l'époque reculée à laquelle remonte sa construction.

Pour déterminer d'une manière convenable les autres dimensions du balancier, il faudrait considérer non seulement les forces statiques, mais encore les forces dynamiques qui le sollicitent; au lieu de cela, et pour éviter la complication qui résulterait de la considération de ces dernières, on les néglige; mais, alors on prend pour la pression que la fonte peut supporter par centimètre carré, un nombre plus faible que celui de la théorie. Ainsi, l'on a été conduit à admettre 200 à 300^{kil}, tandis que la fonte ne rompt qu'à 2000.

Nous allons voir qu'on ne s'est pas arrêté à cette garantie. Le balancier est un levier chargé à ses deux extrémités, ou bien encore, chaque moitié peut être envisagée comme une pièce encastree; je lui appliquerai donc la formule

$$Pl = \frac{1}{6} T b a^2$$

dans laquelle P sera la pression de la vapeur, t la demi longueur du balancier, a sa hauteur à

l'encastrement, b son épaisseur, T la pression que peut supporter la fonte par centimètre carré, (nous avons dit que c'était de 200 à 300^{kil} dans ce cas de la pratique). Nous avons donc une relation entre les deux inconnues a et b ; mais maintenant il serait avantageux de prendre b très faible par rapport à a , afin d'éloigner la matière de l'axe neutre; d'un autre côté, b ne peut être trop faible; en coulant la fonte le refroidissement serait trop rapide; les différentes parties se souderaient mal pendant la coulée; on prend par suite $a = 16b$. On a donc a et b pour la section du milieu; maintenant, on donne à la section une forme plus avantageuse, celle d'un double T. Quant à la forme générale du balancier, c'est celle du solide d'égal résistance, c'est-à-dire une parabole dont le sommet est au point d'attache; car l'effort diminue à mesure qu'on s'éloigne du milieu.

Nous aurons donc un point mathématique pour le point d'attache; or, il faut là que le balancier puisse maintenir un goujon en fer forgé; il faut donc une assez forte hauteur, un diamètre de fonte assez considérable. On peut, d'ailleurs, raccorder ce cercle avec la courbe du balancier, soit par un cercle tangent aux deux et tournant sa concavité vers l'axe du balancier; c'est ce qu'indique la portion supérieure de la fig. 48, et c'est ce qui se fait le plus généralement au moyen d'une petite courbe convexe, ainsi que le représente la partie inférieure. On augmentera d'ailleurs l'épaisseur de la fonte partout où il faudra mettre un goujon un peu fort.

Quant aux dimensions du goujon du milieu, il faut remarquer, pour les déterminer, qu'à chaque extrémité du balancier, agit une force de 10 000 Kilog environ, agissant tantôt dans un sens tantôt dans l'autre; c'est donc une force de 20 000 Kilog qui est appliquée sur ce goujon; d'après cela, on obtiendra facilement le diamètre qu'on doit lui donner; de plus, en raison de l'alternative qu'il y a dans la direction de cette force, il faut éviter le moindre jeu, d'où pourrait résulter un effort considérable produit par une force vive dont ce jeu permettrait le développement. On doit donc d'abord faire entrer de force ce goujon dans le balancier, et, à cet effet, on donne à son diamètre quelque chose de plus qu'à celui de l'ouverture. De plus, cette ouverture, pour que le grain soit meilleur, est faite à l'aide d'une machine à percer, et, à la fonte, le balancier vient plein. C'est à l'aide d'une vis ou d'une presse hydraulique qu'on fait entrer le goujon; pour augmenter encore la solidarité de ces deux parties, solidarité qui résulte déjà de leur pression réciproque, on pratique une mortaise dans le goujon, une autre dans le balancier, et l'on y enfonce une cale en acier. La partie du goujon engagée dans le balancier est toujours d'un diamètre un peu plus fort que le reste; et cela par ce principe qu'il faut toujours indiquer à l'extérieur, mettre en évidence les parties les plus faibles d'une pièce quelconque, afin qu'il soit facile de les visiter. Rarement une cassure est instantanée; elle résulte généralement d'une fissure qui s'est agrandie peu à peu.

Les deux extrémités du goujon reposent sur un palier. Il est important que le frottement soit très faible; et d'abord on emploie un coussinet de matière différente, en bronze; enfin, par l'interposition d'un enduit lubrifiant, on arrive à réduire ce frottement aux $\frac{7}{100}$ de la pression totale. Ce coussinet est engagé dans une pièce de fonte dont les saillies empêchent tout mouvement latéral. Il est maintenu dans un autre sens par une pièce supérieure, le chapeau, relié à la base par deux boulons taraudés. D'un autre côté, pour que ce coussinet soit parfaitement dressé, on le frotte sur un diamètre plus petit que le diamètre voulu, puis on le fore exactement à l'aide d'une machine à percer. Cette opération se fait en plaçant entre la partie inférieure et la partie supérieure

de ce coussinet, de petites plaques de cuivre. Elles permettent de maintenir constamment le contact entre le goujon ou axe et le coussinet; on les lime peu à peu et l'on resserre les boulons, à mesure que l'usure tend à produire un jeu sensible. Les figures 49 et 50 représentent ce palier.

Mode de liaison du parallélogramme et de la tige du piston avec le parallélogr^{me}. — Occupons nous maintenant du mode de liaison du parallélogramme et de la tige du piston. Il est indiqué dans les fig. 51, 52. Le bras *ab* du parallélogramme est composé de deux systèmes, deux bandes de fer parallèles raccordées par des demi-cercles. La force qui sollicite ce bras, agit tantôt dans un sens, tantôt dans un autre; il doit y avoir adhérence complète entre ces bandes recombées et les deux goujons extrêmes, autour desquels elles s'enroulent; c'est-à-dire qu'il faut prévenir l'usure ou du moins y remédier à chaque instant. A cet effet, l'espace compris entre les deux prismes octogonaux, qui servent de coussinets aux goujons, est rempli par deux pièces parallélogrammiques en fonte; ces deux parallélogrammes sont séparés par un système de deux mentonnets, entre lesquels sont une clavette et une contre-clavette. En enfonçant de plus en plus la clavette qui forme coin, on écarte les deux parallélogrammes, c'est-à-dire qu'on rétablit entre les goujons, ou plutôt entre les coussinets et les bandes de fer, le contact que l'usure tend à détruire.

Le goujon extrême traverse la tête de la tige du piston, et comme il ne doit pas jouer, il y est introduit froid après avoir chauffé la tête. Cette tête porte une douille dans laquelle s'introduit à frottement dur la tige du piston qui, d'ailleurs, est retenue à l'aide d'une clavette. Les parties extrêmes du goujon s'assemblent avec le côté *bc* du parallélogramme composé de deux tiges symétriques et de peu d'importance, qui viennent se rattacher à un 3^e goujon.

Ce dernier porte encore le bras *ce*, dont l'extrémité est fixée en *e* à une pièce qui tient directement à l'entablement. Ce goujon a d'ailleurs une forme toute spéciale, représentée fig. 53. Il fallait que la tige de la pompe à air ne vint jamais, dans le mouvement oscillatoire du balancier, heurter ce goujon; c'est ce qui serait arrivé en lui laissant sa forme ordinaire; on l'a fait circulaire, en donnant à cette partie centrale un diamètre tel que la tige de la pompe à air pût se mouvoir dans l'intérieur sans obstacle.

Quant au 3^e côté du parallélogramme, il est composé de même de deux bandes de fer, reliées à une extrémité par une portion demi-circulaire, mais venant se confondre dans une des moitiés; après avoir embrassé le coussinet du goujon auquel est attachée la tige de la pompe à air. Afin d'apporter un remède au jeu que pourrait produire l'usure, on a, comme dans le bras *ab*, un parallélogramme de fonte avec un mentonnet contre lequel presse une clavette.

Détails relatifs à la tige du piston. — La tige du piston est dans le cas d'une colonne supportant une pression agissant tantôt dans un sens, tantôt dans un autre. La longueur est donc un élément fort important pour la détermination du diamètre. En général, on le calcule de telle sorte que la section ne supporte pas plus de 250 Kilog. par centimètre carré; et la rupture du fer n'a lieu que sous une charge de 3 à 4000 Kilog. Pour une machine de 30 à 40 chevaux, la tige du piston a de 6 à 7 centimètres de diamètre.

Détails relatifs à la bielle. — Quant à la bielle, il n'est plus nécessaire qu'elle soit cylindrique, et alors on lui donne la forme qu'indique la théorie; c'est-à-dire qu'elle est tracée

renflée en son milieu; sa longueur est d'ailleurs la même que celle du balancier. Dans le cas où elle est en fonte, on fait supporter environ 30^{kil} par centimètre carré à la section maxima; on peut aller au delà si la bielle est en fer forgé; la forme la plus favorable à la résistance, serait la forme annulaire, par suite de laquelle les molécules seraient le plus éloignées du centre, mais les difficultés pratiques que l'on éprouverait dans la fonte de cette colonne creuse, ont fait donner à la bielle une section en forme de croix, dont les bras diminuent en s'approchant des extrémités, et viennent se terminer brusquement à un tore, ainsi que l'indique la fig. 54.

La fig. 55 représente le système particulier employé au point d'attache de la bielle et de la manivelle, afin d'avoir un frottement convenable; assez doux pour ne pas développer une résistance trop considérable, et pourtant suffisant, afin d'éviter les chocs et les forces vives qui résulteraient du moindre jeu entre le goujon et l'ouverture qui le reçoit. Ce goujon repose, comme on le voit, dans une pièce formée de deux demi-conssinets; ces deux conssinets sont rattachés à la bielle par une bride qui les enveloppe; d'ailleurs, cette bride, elle-même, est liée à la bielle au moyen d'une mortaise pratiquée dans cette bride et dans la fonte, mortaise qui permet l'introduction d'une clavette et d'une contre-clavette; de plus, cette mortaise est ouverte de telle sorte que la clavette ne repose que sur la bride, et qu'il existe un jeu entre elle et la fonte, tandis que la contre-clavette s'appuie directement sur la fonte de la bielle.

On comprend alors qu'en enfonçant plus ou moins cette contre-clavette, on rapproche plus ou moins les deux portions du conssinet; on profite de cette facilité pour faire disparaître le jeu, à mesure que l'usure résultant du frottement tend à le produire; une plaque de cuivre est interposée entre les deux conssinets, afin qu'un coup de marteau trop fort n'augmente pas, outre mesure, la pression entre les surfaces frottantes. On peut, d'ailleurs, limer cette pièce lorsque le jeu, par suite de l'usure, est devenu trop considérable. En plaçant, au contraire, au dessous, le jeu entre la clavette et la fonte, c'est l'autre demi-conssinet qui marche, et l'on peut conserver ainsi à la bielle une longueur à peu près constante.

L'autre extrémité du goujon est assemblée à frottement dur avec un manneton que représente la figure 56. Cet assemblage peut se faire en portant le manneton au rouge; on rend, d'ailleurs, ces deux parties tout-à-fait solidaire, à l'aide d'une double mortaise et d'une clavette.

Détails relatifs à l'arbre tournant. — Voyons, maintenant, quelles sont les dimensions qu'il convient de donner à l'arbre, pour résister à la force de torsion à laquelle il est soumis. En appelant p cette force, l la longueur du bras de levier à l'extrémité duquel il agit, et D le diamètre de l'arbre, nous avons la formule:

$$pl = m D^3.$$

Mais, cette formule a été déterminée pour le cas d'un corps au repos; il faut donc ici déterminer le coefficient en raison des circonstances et avoir recours à la pratique. pl dépend ici de la vitesse de la machine; à égalité de puissance de cette machine, la force qui tend à torde est d'autant plus faible que la machine marche plus vite. En effet, si j'appelle A le travail transmis par la machine dans une minute, exprimé en kilogrammes par des mètres, j'aurai

$$A = p. 2 \pi l n.$$

car $2\pi l$ est l'espace parcouru pendant un tour, par le point d'application de la force P , et n est le nombre de tours par minute, d'où

$$D^3 = \frac{A}{n} K.$$

D'ailleurs, l'expérience a indiqué qu'il convenait de prendre:

- 1° Tour un arbre en fonte et dans le cas où les résistances sont à peu près constantes. $K = 1,25$
- 2° " " dans le cas où les résistances sont très variables. $K = 5,00$
- 3° Tour un arbre en fer et dans le cas où les résistances sont à peu près constantes. $K = 0,40$
- 4° " " dans le cas où les résistances sont très variables. $K = 1,00$

Détails relatifs au cylindre. — Quant aux dimensions à donner au cylindre, elles ne sont pas déterminées par la pression qu'il a à supporter sa paroi; car cette pression n'est environ que de $\frac{1}{5}$ d'atmosphère, mais bien par les nécessités pratiques d'une bonne coulée, qui exigent que la fonte ait une certaine épaisseur au dessous de laquelle un refroidissement trop brusque empêcherait les différents flots de fonte et de se souder et même d'arriver au contact. Cette limite minima est d'environ $0^m,02$. Si, d'ailleurs, on veut obtenir cette épaisseur dans le cylindre définitif, il faut l'augmenter un peu; car, après la fonte du cylindre, il est nécessaire de l'aléser. Cette opération se fait à l'aide de l'alésoir, espèce de tourneau tournant autour de l'axe du cylindre, et ayant de plus un léger mouvement de translation, de telle sorte que les instruments tranchants dont il est armé, décrivent des hélices dont l'ensemble forme la surface cylindrique intérieure du cylindre.

Les pièces de fonte sont formées par la fusion d'un mélange de fonte neuve et de vieille fonte. La première est une fonte douce, molle, qualité qu'elle doit à la quantité notable de carbone qu'elle contient, la seconde donne de la dureté; elle est composée de débris de pièces de fonte refondues qui, par cela même, ont perdu de plus en plus de leur carbone. Or, les pièces soumises à des forces actives, la bielle, par exemple, doit être en fonte douce, c'est-à-dire qu'on doit diminuer la proportion de vieille fonte par rapport à l'autre; au contraire, pour le cylindre, on force la proportion de vieille fonte, pour diminuer l'usure résultant du frottement.

Dans les machines à haute pression, qui se sont introduites en France, en même temps que celles à basse pression, et dont l'usage par cela même a pu plus d'extension qu'en Angleterre, les conditions qui déterminent l'épaisseur de la paroi du cylindre sont tout autres. La pression de la vapeur peut entrer en ligne de compte. Le cylindre tend à être brisé suivant deux arêtes diamétrales et nous avons la formule

$$2rP = 2eT.$$

car la résultante des forces qui tendent à détruire le cylindre, est égale à la pression P à laquelle il est soumis, multipliée par le diamètre extérieur $2r$; tandis que la résistance est égale à la tenacité T , multipliée par la section déterminée par le plan diamétral $2e$. Si donc la pression de la vapeur est de n atmosphères, j'aurai, le centimètre étant pris pour unité de longueur:

$$(n-1)r = Te.$$

d'où l'on tire e ; dans le cas où $n = 6$ et $r = 0^m.30$, on a

$$e = \frac{150}{T}$$

Or, la fonte se brise sous une tension de 1500 Kilog. par centimètre carré ; et en prenant le dixième comme pression admissible dans la pratique, nous obtenons

$$e = 0^m.01$$

On voit que, dans ce cas, c'est encore la considération pratique de la coulée du cylindre qui doit déterminer l'épaisseur de la paroi ; c'est-à-dire qu'on doit la prendre d'au moins $0^m.02$; mais, comme je l'ai déjà dit plus haut, il faut plutôt forcer cette dimension, car le piston, surtout dans les machines à cylindres horizontaux, use la paroi intérieure ; d'où résulte la nécessité d'un nouvel alésage, c'est-à-dire de diminutions successives dans l'épaisseur de cette paroi.

Lorsque les dimensions du cylindre sont très considérables, que son diamètre est, par exemple, de 2^m , que la machine est de 500 ou 600 chevaux, alors la considération pratique est écartée, c'est la formule ci-dessus qui prédomine ; il est d'ailleurs toujours bon de baser sur des renseignements pratiques ; ainsi, nous avons supposé que la résistance était égale sur toute l'étendue de l'épaisseur du cylindre, ce qui n'est pas ; elle est plus grande à l'intérieur qu'à l'extérieur ; il est vrai que cette différence est faible, au-dessous de dix atmosphères ; mais, d'un autre côté, la différence de température intérieure et extérieure, tend à répartir bien plus inégalement encore l'intensité de ces résistances, et le résultat de cette différence doit être de mettre les parties intérieures de l'enveloppe cylindrique dans un état de pression, tandis que les parties extérieures résistent seules à la tension intérieure de la vapeur.

Détails de mécanisme — Boîte à étouper — Occupons-nous maintenant des détails de mécanisme et d'assemblage. Le premier appareil de détail de ce genre, dont nous devons nous occuper, est la boîte à étouper (Stuffing box). Son but est d'empêcher toute filtration de gaz entre une tige mobile et l'ouverture par laquelle elle passe ; ainsi on l'emploie pour empêcher que la vapeur ne s'échappe entre la tige du piston moteur et le couvercle du cylindre. On perce dans le couvercle du cylindre une ouverture d'un diamètre plus grand que celui de la tige, et l'on remplace, par une partie rapportée, l'anneau supprimé en plus ; cette bague s'usera rapidement, par suite du frottement considérable, qui occasionneront les inclinaisons successives de la tige, mais il sera facile de la remplacer ; on entouche ensuite, autour de cette tige du piston, de la filasse bouillie dans la graisse fondue, et l'on en remplit le petit cylindre qu'on a ménagé sur le couvercle supérieur du grand cylindre ; puis, au-dessus, est une deuxième bague ; c'est cette bague supérieure qui exerce sa pression sur l'étoupe. Celle-ci transmet cette pression presque comme un liquide, c'est-à-dire dans tous les sens ; de telle sorte qu'il y a un contact très satisfaisant entre l'étoupe et la tige du piston, et par suite, un obstacle très convenable à la perte de la vapeur.

La bague supérieure est munie de deux oreilles percées d'ouvertures dans lesquelles passent des boulons rattachés au cylindre inférieur, de telle sorte qu'en les serrant plus ou moins, on fait varier la pression de cette bague sur l'étoupe. Le centre est évidé en forme de godet, et dedans l'on verse constamment de l'huile.

Cet appareil de la boîte à étouper, représenté fig. 57, s'emploie fréquemment dans les machines; nous serons donc conduits à en parler souvent, mais nous ne reviendrons plus sur sa description.

Le piston moteur est dans des conditions analogues, c'est-à-dire qu'il faut qu'il y ait contact intime entre le piston et la paroi intérieure du cylindre; cette condition à remplir fut une des grandes difficultés que rencontra Watt dans la construction de sa machine.

Newcomen avait fait ce joint à l'aide d'une couche d'eau qu'il entretenait sur la tête du piston. Watt alésa d'abord le cylindre, mais les pistons s'usaient vite; alors, il appliqua au piston le système de la boîte à étouper et, cela, de la manière indiquée par la fig. 58.

La tige du piston se termine à la partie inférieure par une portion conique; sur cette extrémité repose une bague en fonte, qui forme le fond du piston. Cette bague est fixée à la tige à l'aide d'une clavette d'acier représentée fig. 59, et que l'on introduit dans une ouverture pratiquée dans la tige et dans la bague de fonte. De plus, cette bague a une forme telle qu'elle laisse un espace annulaire au dessus d'elle et contre la paroi intérieure du cylindre; et c'est cet espace qu'on remplit de filasse tressée et préparée, comme il est indiqué ci-dessus.

Une seconde bague formant le couvercle supérieur du piston, est pressée plus ou moins à l'aide de boulons et d'écrous, contre cette filasse qui, par suite, en transmettant cette pression contre la paroi intérieure du cylindre, rend étanche ce joint du piston et du cylindre.

Mais cette disposition ne peut convenir que lorsque le piston a une vitesse très modérée; aussi, dans ces derniers temps, les a-t-on remplacés exclusivement par des pistons métalliques dans les machines locomotives.

Une objection que l'on a faite à ces pistons à étouper, un inconvénient sérieux qu'ils présentent, c'est la nécessité où l'on est d'enlever le couvercle du cylindre, lorsqu'on veut serrer les écrous, c'est-à-dire comprimer la filasse. L'on a proposé divers moyens pour remédier à cette difficulté, et, entre autres, celui représenté fig. 60. D'après ce système, chaque boulon est armé d'une petite roue dentée, et toutes ces roues sont rendues solidaires par l'intermédiaire d'une grande roue dentée concentrique à la tige du piston, et avec laquelle elles engrènent. Une des petites roues sert de roue motrice; à cet effet, une douille est pratiquée au centre et en regard de cette ouverture, une autre semblable est faite dans le couvercle supérieur du cylindre; celle-ci est, en général, fermée à l'aide d'une vis en fer. Lorsqu'on veut comprimer la filasse, c'est-à-dire serrer les boulons, on enlève la vis et l'on engage dans la douille de la roue dentée, une tige rectangulaire, à l'aide de laquelle on fait tourner cette roue et, par suite, toutes les autres; un encliquage empêche la grande roue, c'est-à-dire chacune des petites de revenir sur elles mêmes par suite de l'élasticité de la filasse.

Détails de distribution - Clapets - Voyons, maintenant, les appareils destinés à ouvrir et à fermer les différentes communications qui existent dans cette machine.

Le plus ancien est le clapet ordinaire, c'est celui qu'on emploie entre la pompe à air et le condenseur; il faut que l'eau entrée dans le corps de pompe ne puisse pas rentrer dans le condenseur. Ce clapet, essentiellement composé d'une rondelle de cuir doublée de plaques métalliques, est représenté dans la fig. 61.

Le cuir s'emploie aussi avec avantage pour le piston des machines à élever l'eau. On se sert alors de rondelles de cuir embouti; la pression de l'eau augmente encore la pression du cuir contre la paroi; ce piston est représenté fig. 62. M. Letestu a fait également un emploi ingénieux du cuir, dans la pompe qui porte son nom.

Mais on ne peut plus employer le cuir dès que la température est un peu élevée et dépasse 40° ; ainsi, pour la pompe à air, où la température est de 40° à 50° , on emploie une soupape à charnière métallique; sans cela, la gélatine du cuir se dissout et la matière est détruite. Une autre soupape est aussi placée à travers le piston de la pompe à air; enfin une troisième s'ouvre lorsque la pression intérieure dépasse la pression atmosphérique et laisse échapper l'air et l'eau.

Parmi les fermetures du même genre, il y a encore le piston à garnitures métalliques dont nous nous occuperons au sujet des machines locomotives.

Dans une pompe à double effet, les quatre clapets se meuvent naturellement sans qu'il soit besoin d'appareils particuliers; mais il n'en est plus de même lorsque le piston crée de la force motrice. Dans ce cas, nous avons vu qu'à l'origine des machines à vapeur, ce mouvement des soupapes était obtenu à l'aide de taquets fixés sur une poutrelle et qui venaient agir sur des bras de levier communiquant avec ces soupapes. Mais il y avait, dans ces dispositions, un choc de pièces métalliques, choc qu'il faut éviter dans une machine; par suite des trépidations qui en résultent, les pièces se maculent, la matière tend à se détruire.

Tiroir de Watt — Watt, cherchant à éviter cette disposition, s'empara d'une idée que Lavoisier avait appliquée à la machine pneumatique; c'est l'appareil du tiroir représenté fig. 63 et qui, par un simple mouvement de va-et-vient, renverse alternativement les communications des deux parties du cylindre avec la chaudière et avec le condenseur. Dans la machine pneumatique, il y a, il est vrai, dépense mais non création de force motrice; par suite, les soupapes marchent naturellement; mais ce mouvement n'était pas assez parfait, surtout vers la fin de l'opération, et Lavoisier avait préféré l'obtenir mécaniquement.

Cet appareil du tiroir, à côté de l'avantage d'une grande simplicité, a des inconvénients que nous allons signaler, et qui ont déterminé Watt à employer dans ses machines fixes une disposition un peu plus compliquée.

Le défaut principal de l'appareil représenté fig. 63, est le frottement excessivement considérable qu'il fait naître par la différence de pression qui a lieu sur ses deux faces. Dans une locomotive, cette différence est, en moyenne, de 6 atmosphères, et la surface du couvercle du tiroir est de 900 centimètres carrés, d'où résulte une pression atteignant peut-être 5400 Kilog^{mes}, qui se transmet sur les bords de ce tiroir, c'est-à-dire sur une surface assez limitée; le frottement qui en résulte produit une élévation considérable de température; il y a usure et souvent grippement. De plus, le frottement étant d'environ 540 Kilogrammes, c'est une force égale qu'il faut dépenser pour le vaincre à chaque instant, c'est-à-dire que pour chaque course du tiroir, on perd 54 Kilogrammes par demi-tour de roue, (la longueur de cette demi-course étant d'environ 0^m, 91) et autant pour l'autre tiroir; soit en tout 108 KM par demi-tour de roue.

Si, pour diminuer ce frottement, on veut diminuer la pression, c'est-à-dire réduire les dimensions du tiroir, on augmente la longueur des conduites qui vont communiquer avec

les parties inférieure et supérieure du cylindre, d'où résulte, à chaque coup de piston, la perte d'une plus grande quantité de vapeur, car, à chaque coup de piston, il y a condensation de la vapeur que renferment ces conduites; or, cette perte de force n'est pas à négliger, la section de ces conduites étant, pour obtenir un écoulement facile de vapeur, ainsi que nous l'avons plus haut, d'environ $\frac{1}{25}$ de la surface du piston moteur. Néanmoins, la grande simplicité de cet appareil l'a fait conserver jusqu'à ce jour dans les machines locomotives.

Quant à la disposition adoptée par Watt dans ses machines fixes, elle est représentée fig. 64. Comme on le voit, la section de ce tiroir par le plan AA' donne un demi-cercle racheté par une partie droite. Ce tiroir se meut dans un petit cylindre, de telle sorte que ses deux faces, l'une cylindrique, l'autre plane, sont en communication avec la chaudière, ce qui réduit, dans une forte proportion, le frottement considérable se produisant dans l'autre cas; on voit, de plus, qu'ici l'intérieur du tiroir n'est plus constamment en communication avec le condenseur, mais bien avec la chaudière. Il fallait, maintenant, qu'à chaque mouvement du tiroir, l'ouverture, qui se trouvait découverte, vint de suite en communication avec le condenseur; pour cela, Watt fit communiquer, directement avec le condenseur, la partie inférieure du demi-cylindre dans lequel se meut le tiroir, et, indirectement par le centre du tiroir, la partie supérieure; puis, pour séparer ces deux parties de la partie moyenne dans laquelle circule la vapeur, Watt pratiqua deux joints parfaits à l'aide de boîtes à étouper demi-circulaires; l'étoupe est placée en a, a, et, pour chacun des joints, une espèce de presse demi-annulaire, représentée en plan et en coupe, fig. 65, comprime la filasse contre les parois du demi-cylindre; la tige verticale, qui transmet au tiroir le mouvement de va-et-vient, relie ces deux presses et, à l'aide, d'un écrou placé à la partie supérieure, règle le degré de pression, le degré d'adhérence que l'on veut obtenir entre le tiroir et son enveloppe; quant au joint plan qui existe entre le tiroir et le cylindre, on le rend aussi parfait que possible, en dressant avec soin les deux parties métalliques frottantes.

Comme nous l'avons dit plus haut, la plus grande complication de ce tiroir, son poids plus fort, d'où résulte une réaction tenant à l'inertie beaucoup plus considérable, ont empêché qu'on ne l'appliquât aux machines locomotives.

Le mouvement de va-et-vient du tiroir, s'obtient au moyen d'un excentrique callé sur l'arbre sur lequel est fixé le volant. Cet excentrique est enveloppé par deux brides bouloinnées auxquelles est fixée la bielle qui, par l'intermédiaire d'un bras de levier, communique au tiroir le mouvement de va-et-vient. D'ailleurs, cette communication se fait à une grande distance, à une distance égale à la longueur du balancier; de plus, la force transmise est successivement une compression et une tension, d'où est résulté la nécessité de donner à la tige de communication une grande largeur pour une plus faible épaisseur; on l'a, en outre, renforcée par un système de triangulation que représente la figure 66. Le bras de levier est engagé dans le crochet que forme l'extrémité de cette bielle; de telle sorte qu'en soulevant cette dernière, on dégage le bras du levier, c'est-à-dire qu'on arrête aussitôt le tiroir et, par suite, la machine. La bielle continue d'ailleurs son mouvement de va-et-vient jusqu'à ce que toute la force vive de la machine soit perdue, mais elle ne le transmet plus; un petit loquet, représenté fig. 67, permet même de fermer le crochet.

Soupapes en coquilles — On peut encore établir le système de fermeture de ces

communications à l'aide de soupapes dites soupapes en coquilles. Or le contact a lieu suivant une surface conique, comme dans la fig. 68, ou bien suivant une surface plane, comme dans la fig. 69. Dans l'un et l'autre cas, la soupape est dirigée par une tige verticale, maintenue entre les brides de fer.

La dernière de ces deux soupapes a longtemps servi comme soupape de sûreté; pour cela il suffisait de placer sur sa tête un poids plus ou moins considérable; lorsque les bords de la soupape excèdent trop l'ouverture, elle fonctionne mal; malgré une différence notable de pression, elle ne se soulève que très peu. M. Clément en donna l'explication: la vapeur, en se dégageant, rayonne et se dilate avec une telle énergie, que sa tension descend au dessous de la pression atmosphérique; de telle sorte, qu'en vertu de cet excédant de pression extérieure, la soupape tend constamment à se refermer. On peut, au reste, se rendre compte par l'expérience de la brusque dilatation de cette vapeur qui s'échappe. Si, en effet, ouvrant une soupape de la machine de Watt, à basse pression, on mettrait la main dans le jet de vapeur qui se produit, on serait gravement brûlé; s'il s'agit, au contraire, d'une machine à haute pression, on peut faire impunément la même expérience; bien que la température de la vapeur contenue dans la chaudière soit plus élevée, il y a une dilatation brusque qui abaisse instantanément cette température. C'est donc avec une certaine précaution que l'on doit employer ces sortes de soupapes.

Les soupapes coniques ne présentent pas cet inconvénient; de plus, elles forment coins, d'où résulte une plus grande pression entre les surfaces en contact. Pour rendre le contact plus parfait, l'on dresse, puis l'on rode les deux surfaces coniques. L'opération du rodage consiste à enduire les surfaces d'une matière graisseuse et à les tourner longtemps l'une sur l'autre. Cette opération n'est pas sans difficulté et demande le plus grand soin.

La fig. 70 indique comment l'on peut disposer ces soupapes; c'est une coupe faite par un plan perpendiculaire au plan du balancier.

Ainsi que le fait voir, sur une plus grande échelle, la fig. 71, tous les assemblages se font à l'aide de brides; les parties formant les soupapes sont alors entièrement distinctes des parties qui composent l'enveloppe, et l'on peut aisément réparer ou remplacer les pièces qui se détériorent ou s'usent.

S. 4. Production de la Vapeur.

De la combustion et du foyer. — Parlons d'abord de la production de la chaleur. Le moyen le plus économique de produire de la chaleur, est la combustion ordinaire. Le combustible est dans la plupart des pays industriels, le charbon de terre; on en trouve des gisements importants en France; quoique, sous ce rapport, ce pays soit beaucoup moins bien partagé que l'Angleterre; par suite, le prix en est plus élevé dans notre pays, bien que depuis une vingtaine d'années il ait considérablement baissé. Il y a 15 ans, le charbon de terre revenait à Paris à 50^f la tonne; aujourd'hui ce prix est tombé au dessous de 30^f hors barrières, tandis que sur les

mines mêmes, il varie de 5 à 10^f; on peut, par suite, espérer qu'avec l'abaissement des prix de transport, on arrivera au prix de 20 à 25^f la tonne, qui est la valeur actuelle du charbon de terre à Londres. Le charbon de terre pur se compose de carbone, d'hydrogène, de matières dormantes, par leur combustion, des produits volatils et, de plus, de 1 ou 2 pour 100 de cendres. Mais, la plupart du temps, il se trouve mêlé de débris de rocher voisins, de schistes noirs, matières extrêmement nuisibles par les résidus qu'elles donnent dans la combustion et qui obstruent les grilles; aussi, depuis quelque temps, épure-t-on le charbon, d'abord par un triage à la main, puis par un lavage dans lequel le charbon plus léger reste à la surface; ce charbon ainsi épuré, quoique renfermant toujours de 2 à 3 pour 100 de cendres et de pierres, est très satisfaisant pour la combustion. — Quant à la température nécessaire pour déterminer cette combustion, elle est assez élevée; le carbone, pour se combiner avec l'oxygène, exige une température de 400°; l'hydrogène demande un peu plus de 500°; il sera donc nécessaire, vu les variations inévitables de la température, ou l'abaissement qui aura lieu lors d'un chargement, de porter cette température du foyer à 600°. Il y a à craindre que, par suite de cette haute température, les parties métalliques des parois de la chaudière ne s'oxydent rapidement; pour éviter cela, on les met sur leurs faces intérieures en contact avec l'eau qui, pour une pression de la vapeur de 10 atmosphères, a une température d'au plus 160°. Quant aux autres parties de la paroi du fourneau, elles sont en briques réfractaires pour éviter le plus possible la déperdition de la chaleur; d'ailleurs, la pierre à chaux serait très rapidement décomposée. L'on donne même au fourneau deux enveloppes séparées entre elles par un lit de sable, afin de rendre l'enveloppe extérieure tout-à-fait indépendante des dilatations et des contractions résultant des variations de température qui affectent plus directement l'enveloppe intérieure.

Quant à la quantité d'air à introduire pour une bonne combustion, il faut qu'elle soit suffisante pour que tout soit entièrement brûlé; d'un autre côté, il faut qu'il n'y ait pas excès, car l'air qui s'échappe, après avoir traversé le foyer, emporte une certaine quantité de chaleur. Voyons donc, avant tout, ce que la chimie nous donne comme proportion, entre la quantité de charbon de terre et celle d'air, convenable pour une combustion complète. La quantité d'oxygène nécessaire pour brûler un kilogramme de charbon de terre, n'est pas déterminée, par suite de l'indétermination qu'il y a dans la composition, de ce charbon en carbone et en hydrogène; elle varie entre 1^k,87 et 3^k,00. Or, le volume d'air qui correspond à 1^k d'oxygène, est de 3^m,75, qu'on peut porter à 5^m,62 en ajoutant la moitié en sus, car on ne peut espérer que tout l'air soit brûlé et qu'il n'en échappe pas à la combustion. Le volume d'air nécessaire pour brûler 1^{Kit} de charbon de terre, est donc de trois fois cette quantité, c'est-à-dire de 16^m,86. Maintenant, pour évaporer 1^k d'eau, il faut $\frac{1}{7}$ Kilog. de charbon; c'est donc 2^m,86 d'air pour 1^k d'eau évaporée; d'un autre côté, un cheval de force correspond à 30^k d'eau évaporée par heure; d'où l'on conclut que pour chaque cheval de force, il faut 60 mètres cubes d'air atmosphérique par heure.

Il faut que cet air traverse la masse en combustion; pour obtenir ce résultat, on introduit l'air dans le fourneau par une grille de fer sur laquelle est placé le combustible; l'air froid qui s'écoule continuellement et avec rapidité par cette grille, empêche qu'une température trop élevée ne la déténise.

On voit que, d'après cette disposition, il n'est pas possible de brûler du charbon

qui serait trop fin, car alors l'air aurait de la difficulté à passer à travers; d'un autre côté, si l'on voulait le brûler à flamme renversée, il resterait au fond des parties stériles, tandis qu'avec le mode adopté, les parties fusibles (le mâche-fer) s'écoulent, et les parties infusibles sont retirées à l'aide de ringards et tombent dans le cendrier.

L'expérience a appris qu'il fallait environ pour chaque cheval de force, une surface de grille de $0^{\text{m}},09$; mais, comme les vides sont égaux aux pleins dans cette grille, la moitié seule sera pour l'admission de l'air; d'après cela, on a calculé la vitesse de l'air lorsqu'il s'introduit dans le foyer, et l'on a trouvée de $0^{\text{m}},30$ à $0^{\text{m}},40$ par seconde.

Quant à l'étendue de la surface de chauffe nécessaire pour produire la quantité de vapeur qui correspond à la force d'un cheval, on peut, pour l'établir, partir de cette première approximation, que cette étendue est proportionnelle à la force de la machine. Or, un cheval répond, comme nous avons vu, à 30 Kilog. d'eau évaporée par heure, et il faut 26 mètres carrés de surface de chauffe pour évaporer un mètre cube d'eau, soit 1000 Kilog. dans une heure, correspondant à 33 chevaux; d'où il faut, par cheval, $0^{\text{m}},78$. Mais, ce chiffre ne peut être une mesure absolue, car, proportionnellement, les causes de perte de chaleur sont plus grande dans une petite machine que dans une grande; les pertes dues au rayonnement, croissent proportionnellement aux surfaces, tandis que la puissance de la machine croît comme les cubes des dimensions. Ainsi, ce nombre $0,78$, bon pour une machine de 50 chevaux, est insuffisant au dessous et plus que suffisant au dessus.

Par exemple, on construit pour les chemins de fer, de petites machines à vapeur destinées à élever l'eau nécessaire à l'alimentation des locomotives, et dont la force est de 2 à 3 chevaux seulement. Aussi, leurs surfaces de chauffe sont-elles comparativement très grandes, environ de 2 à 3 mètres carrés par force de cheval.

Enveloppe de la chaudière — Examinons maintenant la chaudière elle-même; son enveloppe n'a besoin de résister qu'à une pression très faible, le poids de l'eau sur la paroi inférieure; car la vapeur a une pression égale à la pression atmosphérique; il faut pourtant remarquer que dans les machines à basse pression actuelles, cette pression excède d'environ 20 à 30 pour 100 la pression atmosphérique. Ceci, d'ailleurs, exige simplement une épaisseur un peu plus considérable de l'enveloppe; dans tous les cas, cette épaisseur, par crainte d'oxydation, est toujours plus grande que les résultats qui découlent des conditions mécaniques.

La tôle est la matière que l'on emploie pour former cette enveloppe; elle se trouve dans le commerce en feuilles planes de dimensions déterminées. On réunit ces feuilles à l'aide de rivets; pour cela, on recouvre le bord d'une feuille par une seconde, et l'on perce dans ces deux lames une suite de trous cylindriques dans lesquels on enfonce à chaud ces rivets, qui peuvent avoir environ deux centimètres de diamètre. Leur tête les arrête d'un côté; de l'autre, pendant qu'ils sont encore chauds, et au moment où ils viennent d'être enfoncés, on forme une tête artificielle à l'aide de coups de marteaux répétés. Le refroidissement de ces rivets produit un rétrécissement qui presse encore plus fortement ces deux feuilles l'une contre l'autre. On obtient, de cette manière, des joints parfaitement étanches. — D'ailleurs, les chaudières de Watt présentent une surface développable: par conséquent, rien de plus simple

que de replier alors ces feuilles suivant la coupe représentée fig. 72; les deux extrémités sont d'ailleurs fermées par des surfaces planes.

Forme de la Chaudière. — L'eau s'élève dans cette chaudière jusqu'à une certaine hauteur; au dessus est le réservoir de vapeur; ce réservoir doit être suffisamment grand, car, s'il n'était, par exemple, qu'une fraction de la capacité du cylindre, il se viderait très vite, d'où résulterait une ébullition instantanée, un soulèvement de la masse liquide toute entière et, par suite, une introduction très nuisible dans le cylindre, d'eau mêlée à la vapeur. On dit, alors, que la machine prime.

Cette forme de la section a paru à Watt la plus convenable pour l'introduction de la chaleur dans la chaudière. Comme on le voit dans les fig. 72 et 73, les gaz, produits de la combustion, passent successivement dans un conduit inférieur et dans deux conduits latéraux; c'est pendant ce triple parcours de la longueur de la chaudière, qu'ils cèdent leur chaleur à la masse d'eau intérieure.

Deux ouvertures sont pratiquées dans la maçonnerie du fourneau; l'une supérieure, par laquelle on introduit le combustible; l'autre par laquelle seule doit pénétrer l'air, afin qu'il traverse la masse en combustion. On ouvre, d'ailleurs, plus ou moins cette bouche, afin de régler le tirage. Au sortir de la cheminée, les gaz ont encore une température de 400° ; dans le foyer, elle est de 1600 ; c'est donc un quart de la chaleur perdue de cette manière; un autre quart encore se dissipe, soit par rayonnement de la chaudière, soit à travers les parois du fourneau; reste donc une moitié seulement qui pénètre dans la chaudière et sert à la transformation de l'eau en vapeur; ces pertes expliquent la nécessité, où l'on est de consommer environ deux fois plus de charbon que ne l'indique la théorie.

Appareils de sûreté. — Différents appareils sont fixés à la chaudière, afin de prévenir les accidents qui pourraient résulter d'une trop grande pression de la vapeur dans cette chaudière et d'un niveau d'eau, soit trop bas, soit trop élevé.

Soupape de sûreté. — Si, d'abord, une soupape limite la pression en ayant la facilité de se soulever lorsque la tension de la vapeur dépasse une certaine valeur, elle limite par cela même, la température qui, par suite, ne peut atteindre le point où le fer serait altéré; c'est l'office de la soupape de sûreté représentée fig. 74; des rondelles de fonte superposées forment le poids convenable; une tige verticale à la portée du mécanicien, lui permet de manœuvrer cette soupape à la main, opération qu'il est permis de répéter fréquemment, de peur que quelque circonstance, l'oxydation des pièces, par exemple, n'établisse de l'adhérence entre la soupape et le gîte sur lequel elle repose.

Robinet à niveau. — Des accidents très graves peuvent aussi résulter d'un abaissement du niveau de l'eau dans la chaudière. En effet, si ce niveau est un peu trop bas et qu'une partie de la paroi de la chaudière, contigue aux carneaux latéraux, soit hors de l'eau, cette partie peut être portée au rouge; or, en admettant que ceci ait lieu pendant que la machine est arrêtée, lorsque le travail reprendra, il y aura subitement diminution de pression, d'où soulèvement de la masse liquide qui, arrivant en contact avec la partie rouge de la chaudière, occasionnera une

production abondante et instantanée de vapeur; on comprend que, delà, puissent résulter de terribles explosions. Les accidents de cette nature sont aussi fréquents dans les machines à basse que dans les machines à haute pression.

Un premier moyen de s'assurer à chaque instant que le niveau de l'eau dans la chaudière est satisfaisant, consiste dans un système de deux ajustages, fermés chacun par un robinet. Tous deux prennent naissance dans la chaudière, l'un un peu au dessus du niveau que doit toujours avoir l'eau de la chaudière, l'autre un peu au dessous; de telle sorte que l'un doit toujours donner de la vapeur, l'autre toujours de l'eau.

Tubes de niveau— Un deuxième appareil qui donne exactement le niveau de l'eau, est un tube en verre latéral communiquant avec deux ajustages métalliques placés en communication l'un avec l'eau, l'autre avec la vapeur.

Flotteur— Un troisième appareil est aussi représenté sur la fig. 75; c'est un système de double flotteur fonctionnant ainsi qu'il suit: la pompe alimentaire qui prend une portion de l'eau que la pompe à air tire du condenseur, amène cette portion par le tube a; cette eau est versée dans un petit récipient intérieur, au fond duquel est une soupape; si cette soupape est fermée, l'eau s'écoule par le trop plein d; si, au contraire, elle est ouverte, l'eau tombe dans le tube principal et vient alimenter la chaudière; or, d'après le système de pompes qui relie la soupape au flotteur F, cette soupape s'ouvre dès que le niveau de l'eau dans la chaudière baisse au dessous d'une certaine limite. Un second flotteur f règle le tirage; on comprend d'abord, qu'en vertu de l'excès de pression de la vapeur sur la pression atmosphérique, l'eau monte dans le tube, et d'une quantité plus ou moins notable, suivant que cet excès de pression est plus ou moins grand; si maintenant le flotteur f est relié par un système de pompes à un diaphragme placé dans un des carneaux, le mouvement du flotteur, en fermant plus ou moins ce carneau, activera plus ou moins le tirage, suivant que la pression est trop faible ou trop forte.

Conduite du feu— La manière de conduire le feu n'est pas indifférente; elle a, au contraire, une grande importance. La plus simple, la plus généralement suivie, mais non pas la meilleure, est la méthode des chargements périodiques. Dès que le combustible est affaissé, au dessous d'une certaine épaisseur, au dessous d'un certain niveau, on ouvre, on jette quelques pelletées de charbon; on nivelle à la pelle, et l'on reforme immédiatement, afin que le tirage ne se fasse pas par cette ouverture.

Cette méthode présente de grands inconvénients: d'abord, chaque fois que l'on renouvelle l'opération du chargement, il y a une masse d'air considérable qui passe sans avoir été brûlée; nous allons voir ensuite, en examinant de plus près le phénomène de la combustion, qu'il y a un grand avantage à ce qu'il s'opère régulièrement et que cette condition, par la méthode des chargements successifs, est loin d'être remplie.

Après un chargement, la hauteur du charbon se réduit assez rapidement par le dégagement des matières volatiles; il reste sur la grille le coke, la matière fixe, et l'air traversant cette masse, il y a combinaison de l'oxygène; par suite, élévation considérable de la température. De cette haute température dans les carneaux et dans la cheminée, résulte une pression d'autant

plus faible, c'est-à-dire une accélération dans le tirage qui n'est produit que par la différence qui existe entre la pression atmosphérique et la pression intérieure de la cheminée. La quantité d'air qui s'introduit en ce moment, peut donc être un peu trop considérable. Mais, maintenant, pour opérer un rechargement, on ouvre la porte du fourneau; la différence des pressions reste la même, et la section d'introduction de l'air est considérablement augmentée; une première conséquence va donc être le passage à travers les carneaux d'une masse d'air considérable qui emportera une notable quantité de chaleur; c'est une première cause d'abaissement de la température. On jette le charbon sur la grille; le premier phénomène est le dégagement des parties volatiles qui absorbent, dans cette transformation, une grande quantité de chaleur; d'où résulte une nouvelle cause d'abaissement de la température. Cet abaissement produit un ralentissement dans le tirage. On ferme la porte; nouveau motif pour qu'il n'entre pas assez d'air, et une partie des matières volatiles s'échappent sans avoir été brûlées; ce sont ces épaisses fumées noires que l'on voit se dégager lors des rechargements. Enfin, nous revenons peu à peu au point d'où nous sommes partis.

La combustion, par suite de ces variations, s'opère donc mal. L'air s'introduit presque constamment ou en trop forte ou en trop faible proportion. Il y a d'abord perte de chaleur et ensuite un dégagement de fumées épaisses qui est certes à considérer lorsqu'il s'agit d'une usine placée dans un centre industriel et entourée d'habitation.

On a fait de nombreuses tentatives pour faire disparaître ces variations et pour diriger la combustion de telle sorte, qu'elle s'opérât toujours dans des conditions normales.

On eut d'abord l'idée de faire varier l'ouverture du cendrier, afin de donner passage à une plus ou moins grande quantité d'air; mais le remède était incomplet; on avait ainsi une masse d'oxygène convenable, mais il fallait encore une température suffisamment élevée.

On chercha alors une disposition de grille telle que chacune de ses parties fut toujours dans des conditions identiques.

La fig. 76 représente une de ces dispositions. Le charbon ferme complètement l'ouverture du fourneau; un ouvrier, à l'aide d'un ringard qui traverse la masse, fait descendre ce charbon peu à peu et d'une manière uniforme sur la grille inclinée. La combustion se fait alors dans des conditions toujours les mêmes; et l'on peut calculer la section d'introduction, de manière à ce que la quantité d'air qui pénètre à chaque instant soit dans de justes proportions avec la quantité de combustible à brûler. Ce procédé est toutefois rarement employé, bien qu'il conduise souvent à faire disparaître entièrement ces épaisses fumées qui représentent une perte du tiers ou du quart du combustible, et qu'il n'exige qu'un ouvrier intelligent et soigneux pour faire avancer régulièrement la masse de charbon.

La disposition représentée fig. 77, arrive au même résultat à l'aide d'un mécanisme. Il se compose d'une grille circulaire tournant autour d'un axe vertical; cet axe est armé, dans sa partie inférieure, d'une roue dentée, par l'intermédiaire de laquelle l'arbre moteur lui transmet un mouvement convenable; les barreaux de la grille sont d'ailleurs dirigés suivant les rayons de sa circonférence. Le charbon s'écoule d'une manière constante par une trémie placée au bord de la grille qui l'entraîne avec elle dans le mouvement lent dont elle est animée. On comprend ainsi que les différentes phases de la combustion se produisent sur les divers secteurs de la cir-

conférence.

On a encore donné à la grille la forme d'une chaîne sans fin; c'est celle que représente la fig. 78. Le charbon s'écoule de même uniformément par une trémie et il est entraîné par le mouvement de la grille dont la longueur et la vitesse sont calculées de telle sorte que tout le charbon soit brûlé lorsqu'il arrive à l'extrémité. Dans cette dernière partie, c'est de l'air seul qui passe ou à peu près. Mais il rencontre à une haute température les matières fuligineuses que dégage le charbon qui arrive sur la grille et les brûle. Un autre avantage de cette grille, c'est que, par suite de son mouvement de rotation, elle se nettoie elle-même.

La remarque que nous faisons plus haut au sujet de l'air, qui, passant à l'extrémité de la grille, dans ce dernier cas, vient brûler les matières fuligineuses qui se dégagent du charbon dans les premiers instants de sa combustion, explique l'avantage qu'on a eu à employer, comme on l'a fait quelquefois, un carneau latéral par lequel s'introduit une certaine quantité d'air froid; un appendice à la chaudière force le courant gazeux à se recourber au dessus de l'orifice. Cette disposition, représentée fig. 79, suffit quelquefois pour brûler toute la fumée au contact de l'air qui s'introduit. Un registre que peut faire mouvoir le chauffeur, règle cette introduction.

En outre, les moyens mécaniques sont encore ce qu'il y a de préférable. Voyons quelles sont les dimensions que doivent avoir les cheminées, en raison de la puissance des machines. Le tirage est proportionnel à la différence de pression intérieure et extérieure; or, cette différence est elle-même proportionnelle à la hauteur de la cheminée. Quant à la section, elle est égale à un coefficient constant, multiplié par la puissance de la machine, et divisée par la racine carrée de la hauteur. D'ailleurs, ce coefficient est 4; c'est-à-dire que l'on a, en nommant S la section de la cheminée,

$$S \text{ (en décimètres carrés)} = \frac{4 P \text{ (exprimé en chevaux)}}{\sqrt{H} \text{ (exprimé en mètres)}}$$

La hauteur de 15^m est largement suffisante pour un bon tirage; aussi, en général, cette hauteur de la cheminée varie de 10 à 15^m. Cependant, elle va jusqu'à 30 dans les pays industriels où un centre de population voisin a à craindre les fumées et émanations de tout genre qui s'échappent par la cheminée.

Dans le cas où la hauteur serait de 20 mètres et la puissance de 40 chevaux, on a facilement la section:

$$S = \frac{4 \cdot 40}{\sqrt{20}} = 36 \text{ décimètres carrés.}$$

Les cheminées sont ordinairement en briques. Il faut apporter dans cette construction le plus grand soin; et, d'abord, la première condition à remplir pour qu'elles ne s'inclinent pas, est de leur donner un grand empattement. Sans cette précaution, l'on aurait à la base une pression excédant les limites de la résistance. D'ailleurs, dans toutes les parties où la température excède 500°, il faut mettre des briques réfractaires; aussi, les emploie-t-on pour former le pare-

ment intérieur jusqu'à une certaine hauteur.

Le fait extérieur est de 0^m,02 à 0^m,03 par mètre ; quant à l'intérieur, il s'élève par redants, ainsi que le représente la fig. 80. Jusqu'à une certaine hauteur, à partir du sommet, la cheminée est élevée sur une épaisseur d'une demi-brique ; puis, au dessous, d'une brique entière ; encore plus bas, d'une brique et demie et ainsi de suite. Le commencement est en pierre, afin de former masse contre l'action du vent.

Le tirage, à l'aide de la cheminée, se fait, avons-nous vu, en vertu d'une différence de pression extérieure et intérieure qui résulte d'une température élevée, entretenue dans la cheminée ; or, cette température nécessite l'emploi, la dépense, du quart de la chaleur développée par la combustion ; on trouve, d'un côté, qu'il ne faudrait pas une aussi grande quantité de chaleur, considérée comme force motrice, pour produire le tirage à l'aide d'une machine, telle que le ventilateur, par exemple ; la cheminée est donc un mauvais moyen de produire le tirage. Aussi, a-t-on essayé de la remplacer ; ainsi, aux bains de la Samaritaine, à Paris, au lieu de laisser l'air encore chaud s'échapper, on le fait passer à travers des tubes où il se dépose de toute sa chaleur, et le tirage est obtenu à l'aide d'un ventilateur mû par un homme, dont l'économie de combustible suffit en au delà pour payer la journée.

Chapitre V.

Machines à vapeur fixes à haute pression.

Avantages des machines à haute pression. — On a un grand avantage, une économie considérable à employer la vapeur à une pression plus élevée que la pression atmosphérique. Cela tient, comme nous l'avons observé au commencement de ce cours, à ce que la dépense est, à fort peu près, la même pour faire passer de l'eau à l'état de vapeur, quelle que soit d'ailleurs la température. Cette remarque n'avait pas échappé à Watt ; mais, avant tout, il a créé la machine à basse pression. L'art de la chaudronnerie était trop peu avancé à cette époque. Mais, peu à peu les difficultés pratiques se sont levées ; les machines-outils ont été créées et perfectionnées, les ouvriers sont devenus plus habiles et aujourd'hui une chaudière peut supporter, sans inconvénient sérieux, une pression de 8 à 10 atmosphères. Les motifs qui avaient fait rejeter d'abord les machines à haute pression, ont donc perdu et perdent chaque jour de leur importance.

Dans l'étude de ces machines, nous mettrons d'abord de côté la machine à haute pression, sans condensation, dont le meilleur modèle est, sans contredit, la machine locomotive que nous décrirons spécialement plus loin. Employée comme machine fixe, elle est préférable à la machine avec condensation, lorsqu'on n'a pas à sa disposition une grande masse d'eau froide pour opérer la condensation ; elle est, d'ailleurs, moins compliquée et moins coûteuse comme frais d'installation.

Watt mentionne dans ses premiers brevets, la machine à haute pression avec condensation. Il laisse les mêmes dispositions que dans la machine à basse pression, si ce n'est en ce qui regarde les soupapes d'introduction et d'écoulement de la vapeur; il en coordonne les mouvements de façon à utiliser la détente de la vapeur, dont il avait compris toute l'importance. Pour en calculer toute la puissance, nous avons vu qu'on pourrait partir de la loi de Mariotte; elle suppose, il est vrai, la température constante, et cette hypothèse n'est jamais remplie complètement, même par l'emploi de deux enveloppes entre lesquelles circule la vapeur, ou dont l'intervalle est rempli par des cendres ou du charbon pilé.

On a donc, dans ses machines, un autre appareil distributeur fermant plus tôt la soupape qui amène la vapeur. Ainsi, si l'on veut dépenser le même poids de vapeur que dans une machine à basse pression et que la machine travaille à 4 atmosphères, on n'introduit la vapeur que pendant le quart de la course.

L'inconvénient de machines à vapeur, en général, lorsqu'il s'agit de faire marcher des filatures, c'est-à-dire les variations dans la pression transmise à l'arbre, est encore augmenté dans les machines à détente par les variations dues à la différence de la pression de la vapeur sur le piston. On atténue, en partie, cet inconvénient par l'emploi du volant.

Machine de Woolf — Un autre moyen de remédier à l'irrégularité qui résulte de la détente, consiste dans l'emploi fait par Woolf, de deux cylindres de capacité différente. Nous l'avons déjà vu plus haut (Page 2, fig. 21), si l'on peut travailler avec une expansion qui soit dans le rapport de 1 à 4, un des cylindres a 4 fois le volume de l'autre; dans le plus petit, la vapeur travaille à haute pression, et la détente agit constamment dans le grand; d'où résulte, on le comprend, une plus grande régularité d'action.

L'effet produit dans cette machine, s'obtient par le calcul comme il suit: En appelant p la haute pression, p' la basse pression variable, p'' la pression dans le condenseur et dv et dv' les éléments de volume engendrés par un mouvement infiniment petit des pistons, il est facile de voir que l'on aura pour valeur de l'effet produit:

$$\int (p - p') dv + \int (p' - p'') dv' = \int p dv + \int p' (dv' - dv) - \int p'' dv',$$

dans laquelle le premier terme est la quantité développée par la formation de la vapeur, et le second, celle qui correspond à la détente, c'est la même formule que l'on trouve pour la machine à détente à un seul cylindre.

La fig. 81 représente les dispositions d'ensemble d'une Machine de Woolf: On voit que le point d'attache de la tige du second piston est pris sur le parallélogramme, et que celui de la tige de la pompe à air est aussi directement relié à ce parallélogramme primitif. Le tiroir déjà décrit, sert à fermer et à ouvrir en temps opportun les communications du petit cylindre avec la chaudière et l'appareil représenté fig. 82. Quant à ce dernier, il a pour but de faire communiquer avec le second cylindre la vapeur qui a déjà travaillé dans le premier, puis de la faire écouler dans le condenseur. A cet effet, il est composé de deux parties complètement séparées et qui ne peuvent être mises en communication que par l'intermédiaire de deux petits espaces fermés, communiquant l'un avec le dessous du piston du grand cylindre, l'autre avec le dessus. Les doubles soupapes

S, S', s et s' servent, d'ailleurs, à établir ces communications. On ouvre d'abord S et s', les deux autres étant fermées; alors, la vapeur qui a travaillé dans le premier cylindre, vient agir sur la partie supérieure du piston du grand cylindre, tandis que la partie inférieure communique avec le condenseur; ce piston descend; il remonte en ouvrant les soupapes S et s' et fermant Set s'. Le mouvement de ces soupapes s'obtient aisément à l'aide de deux tiges armées de taquets, communiquant l'une avec S et s', et l'autre avec S' et s'; ces tiges reçoivent un mouvement de va-et-vient d'un levier représenté fig. 83; il oscille autour du point O, en vertu d'un premier mouvement oscillatoire communiqué au bras du levier OA par un excentrique calé sur l'arbre moteur, de telle sorte que le levier soit horizontal lorsque les pistons sont aux extrémités de leur course. Lors que les communications avec le condenseur s'ouvrent un peu avant celles qui donnent accès à la vapeur, on laisse un peu de jeu entre les taquets et les bras de levier des soupapes d'admission.

Chaudières à bouillottes. — La disposition la plus ordinaire des chaudières à haute pression, est représentée fig. 84 et 85. Elles sont cylindriques (surfaces d'équilibre indéformables), et comportent, en outre, deux bouillottes reliées de distance en distance, au tronc principal par des tubulures. Les bouillottes se prolongent jusqu'à l'extrémité de la maçonnerie qui enveloppe le tout, et sont terminées par des ouvertures fermées quand la machine travaille, et que l'on peut ouvrir, afin de nettoyer les bouillottes dans lesquels, en vertu de leur position, s'accumule la plus grande masse de dépôts.

Machine de Cornouailles. — Parmi les machines à haute pression, les machines à épuisement de Cornouailles sont, ainsi que nous avons déjà eu l'occasion de le dire, les plus perfectionnées. Le minerai est pauvre; il faut donc pour rendre l'exploitation possible, arriver aux dépenses les moins fortes. Celle du combustible a dû d'abord fixer l'attention, et l'on a fait, pour la diminuer, des efforts considérables motivés par le prix élevé du combustible. On est arrivé à une dépense de 0,98 par cheval et par heure, lorsque, en général, elle est de 2 à 3^k pour les meilleures machines.

Une disposition très ingénieuse des soupapes de distribution, mérite de fixer l'attention. Il est extrêmement avantageux que l'équilibre des pressions s'établisse facilement, rapidement, lorsque l'on met le cylindre en communication, soit avec le condenseur, soit avec la chaudière; on y parvient en augmentant la section des orifices. Mais, de larges orifices entraînent la fermeture sur de grandes surfaces, d'où résulte, pour soulever ces soupapes, une dépense de force considérable, puisque l'effort à vaincre est égal à la différence des pressions intérieure et extérieure multipliée par la surface de l'orifice (approximativement). Pour diminuer cette résistance, on a imaginé la disposition de soupapes représentée fig. 86 et qu'on appelle: Soupapes de Cornouailles. Au dessus de l'ouverture, est placée une espèce de lanterne fixe, c'est-à-dire une pièce pleine en fonte supportée par quatre montants verticaux; cette première pièce est enveloppée d'une seconde qui forme, à proprement parler, la soupape et s'appuie sur la première le long des surfaces annulaires AA'; pour soulever ce chapeau, c'est-à-dire pour établir une double communication annulaire, on n'a plus à vaincre qu'un effort égal à la différence des pressions, multipliée seulement par la projection des surfaces annulaires comprises entre la partie fixe et la partie mobile. Ainsi que

l'indique la fig. 91, on remarque, dans les machines de Cornouailles, trois soupapes différentes; la soupape d'introduction, la soupape d'équilibre et la soupape d'éduction. La fermeture de ces différentes soupapes se fait en temps opportun à l'aide d'une pontrelle armée de taquets. La position de celui qui ferme la soupape d'introduction étant variable, permet de régler à volonté la détente. Le même système ne peut être employé pour l'ouverture, car elle doit se faire pour chacune des soupapes, la machine toute entière étant à l'état de repos. Par exemple, lorsque le piston arrive au haut de sa course, ce n'est que lorsqu'il s'y est arrêté un instant, que les soupapes d'éduction d'abord, d'introduction ensuite, s'ouvrent; de même, la soupape d'équilibre ne s'ouvre que lorsque le piston, arrivé au bas de sa course, y est resté un moment à l'état de repos. On a recours alors à un appareil appelé cataracte et représenté fig. 92. Un cylindre fermé à sa base par une soupape qui s'ouvre du dedans au dehors, contient un piston plein. Pendant la course ascendante du piston, le cylindre se remplit d'eau par l'ouverture de la soupape qui se soulève, le piston ne peut descendre que par suite de l'évacuation de l'eau qui remplit le cylindre par un tube fermé, par un robinet dont on règle l'orifice à volonté.

La machine en mouvement soulève le piston et remplit d'eau le cylindre. Le piston s'abaisse par l'action d'un contrepoids, avec le degré de vitesse que comporte la position donnée au robinet. Un levier en connexion avec la tige du piston, participe à son mouvement, en fait partir un appareil à échappement qui rend libre un arbre sollicité à tourner par un poids placé à l'extrémité d'un levier implanté sur l'arbre. Cet arbre, en tournant, soulève la tige de la soupape à laquelle il correspond, et la communication s'établit; elle reste ouverte jusqu'à ce que la machine étant entrée en mouvement, un taquet placé convenablement sur une pontrelle attachée au balancier, vienne rencontrer un bras de levier calé à l'arbre, et rétablisse celui-ci, ainsi que l'appareil à détente, dans sa position primitive. La soupape, abandonnée à elle-même, se ferme alors par l'action d'un poids convenablement placé.

Le mouvement imprimé au piston de la cataracte de bas en haut, ayant pour but de remplir le cylindre, est communiqué par la machine en mouvement.

Il résulte de cette description, qu'en réglant convenablement l'ouverture du robinet de la cataracte, l'on pourra s'arranger de telle sorte que les coups se succèdent à des intervalles plus ou moins rapprochés. De ces diverses dispositions et de l'emploi d'une détente prolongée, sont résultées, comme nous l'avons déjà dit, des machines infiniment supérieures aux machines ordinaires; des machines ne consommant que 0,93 de houille par heure et par force de cheval; tandis que le chiffre minimum est de 2^{Kil}, et atteint plus généralement 4 à 5^{Kil}.

Machines sans balancier — On est resté longtemps avant de songer à supprimer le balancier dans les machines à vapeur; on a craint les innovations, et l'on a eu raison dans de certaines limites; les essais coûtent cher, en fait de machines, et peu sont sanctionnés par la pratique.

Mais il y a eu nécessité de supprimer le balancier dans les machines locomotives; et, depuis ce moment, la tendance est la généralisation de cette idée. Cette pièce est soumise à des pressions énormes qui détruisent les fondations et les bâtis; elle exige de grands soins d'installa-

tion, elle est pesante et il y a toujours avantage à arriver à un mécanisme plus léger. On ne peut rien d'édire, cependant, contre le balancier, de ce qu'à chaque coup de piston, sa force vive est détruite et recrée, puisque les variations de vitesse ont lieu par degrés insensibles, il n'y a pas, en général, de choc et la force vive consommée, quand la vitesse du balancier s'accroît, est rendue quand elle diminue. Cette pièce présente même un avantage dans les machines à condensation, puisqu'elle fournit aisément un point d'attache pour la tige de la pompe à air et pour toutes les pièces accessoires du mécanisme.

Quoiqu'il en soit, par suite des motifs dont nous parlions plus haut, on a adopté pour beaucoup de machines, les dispositions représentées fig. 87. Les cylindres sont horizontaux et le mouvement du piston de la pompe à air est obtenu à l'aide d'un excentrique calé sur l'arbre moteur.

Machines à cylindre horizontal — Un autre préjugé qui a subsisté longtemps, consistait dans la nécessité où l'on se croyait de faire travailler les cylindres dans une position verticale. On craignait que le poids du piston ne les déformât. Or, cette influence est peu sensible et dans tous les cas, le piston, en raison de son élasticité, se modèle sur la nouvelle forme adoptée par le cylindre.

On peut voir un exemple remarquable de cette nouvelle disposition sur les bateaux à vapeur du Rhône construits au Creusot.

La seule chose qui tende à désorganiser le système, est la décomposition de la force motrice au point d'attache de la bielle et de la tige du piston.

Une des dernières dispositions de ce genre, se remarque dans la machine fixe de S^t Germain, destinée à faire le vide dans le tube atmosphérique. Les cylindres sont horizontaux, et la bielle communique directement son mouvement à l'arbre moteur à l'aide d'une manivelle. Au lieu des deux cylindres employés par Woolf, pour obtenir une plus grande régularité dans le mouvement, on a employé ici, comme dans les machines locomotives, 2 manivelles marchant à 90° l'une de l'autre.

Au lieu de la pompe à air, on a une machine tout-à-fait indépendante pour faire le vide dans le condenseur. Cette disposition est avantageuse par suite du mouvement intermittent de la machine; on ne raréfie l'air du condenseur qu'au moment de la faire fonctionner. Pour la distribution de la vapeur, on a employé les soupapes de Cornouailles; on évite ainsi les inconvénients des petites ouvertures, si sensibles dans les locomotives, où elles occasionnent une perte de force de deux atmosphères. Il fallait, de plus, pouvoir manœuvrer ces soupapes à volonté; il fallait que celle d'introduction, qui doit être peu de temps ouverte, fût à la disposition du mécanicien, qu'il pût faire varier la détente suivant la puissance du train ascendant, faire un vide plus ou moins parfait. On se sert, pour faire varier la détente dans les locomotives, de la coulisse appliquée la première fois par M. Stephenson. Elle a l'inconvénient de n'être applicable que dans des limites assez restreintes; ainsi, l'on ne peut guères réduire la période d'introduction de la vapeur que jusqu'à la moitié de la course du piston. Il serait avantageux de pouvoir aller jusqu'au dixième; mais il faut alors avoir recours à un appareil beaucoup plus délicat, plus compliqué.

Machines à détente variable — On voit sur les fig. 88 et 89 qu'une came fixée sur un arbre lié à l'arbre moteur, vient s'appuyer dans son mouvement contre l'extrémité d'un bras de levier et, par suite, fait soulever la soupape, qui reste ouverte jusqu'à ce que le levier ait échappé à la came. Suivant les dimensions de la came, on comprend que la soupape restera plus ou moins de temps ouverte. Rien de plus simple que de passer alors de là à la détente variable. Au lieu d'une came, imaginons une espèce de manchon représenté fig. 90 et formé, pour ainsi dire, d'une suite de cames dont les largeurs varient d'une manière insensible. Si ce manchon peut se mouvoir, parallèlement à l'axe, à volonté, le bras de levier, dont nous avons parlé plus haut, restant fixe, pourra recevoir l'action d'une came plus ou moins large. Ce manchon saillant sera terminé, d'un côté, par une arête rectiligne correspondant à l'introduction, à l'extrémité de la course du piston. et, de l'autre, par une arête en hélice, et la détente variable sera obtenue à volonté par les positions que l'on donnera au manchon sur son axe.

Chapitre VI.

Des Machines à vapeur appliquées à la navigation.

§. 1^{er}

Calcul de la résistance éprouvée par un bâtiment.

Pour calculer la résistance qu'éprouve un bâtiment qui se meut dans de l'eau tranquille, il faut appliquer le principe de la conservation du centre de gravité, en considérant l'ensemble du système formé par le bâtiment et le liquide. La théorie nous donne :

$$E m \frac{dv}{dt} = T$$

T représente la tension de la corde, en supposant que l'on toue le bâtiment.

$$E m (v - v') = T t$$

Si on suppose que le mouvement est devenu uniforme, T représentant l'effort de traction exercé, par exemple, par la corde de halage, il est constant et l'on a

$$E m (v - v') = T t.$$

Le premier nombre représente l'accroissement de la quantité de mouvement du

liquide pendant le temps t , suivant un axe parallèle au mouvement du navire. Cette même quantité, évaluée pendant l'unité de temps, c'est-à-dire pendant une seconde, représente donc l'effort nécessaire pour remorquer le bâtiment; ainsi, la résistance qu'oppose un corps flottant dans une direction donnée, est égale à la quantité dont s'accroît la quantité de mouvement imprimée au fluide, pendant l'unité de temps.

La quantité de liquide que met en mouvement un bâtiment, est proportionnelle à la surface de sa section au maître-couple. Si je l'appelle S , et u l'espace décrit pendant une seconde, j'aurai $\frac{S u \cdot 1000}{g}$ multiplié par un coefficient constant C qui représentera la masse du liquide mise en mouvement dans l'unité de temps. D'où, l'accroissement de la quantité de mouvement du fluide dans l'unité de temps sera :

$$C \frac{S u^2 \cdot 1000}{g} \text{ Kil.}$$

Celle devrait être la valeur de la force nécessaire pour remorquer le bâtiment; elle est de la forme Au^2 . Cette constante A varie, dans des limites très étendues, avec la forme du navire, du corps, en général. L'art du constructeur, de navires doit tendre à réduire, autant que possible, cette constante. On peut remarquer pourtant que l'influence de cette forme et son importance ne deviennent sensibles que lorsque la vitesse est peu considérable.

Le seul principe absolu de cette formule, c'est que la résistance qu'éprouve un corps immergé, est proportionnelle à la section de ce corps multipliée par le carré de la vitesse, pour des solides semblables.

Dans la formule ci-dessus, nous avons considéré le cas d'un navire sollicité par une force extérieure; c'est le cas du halage; c'est aussi le cas d'un navire à voiles.

Mais, si le bâtiment a en lui-même la force qui le fait avancer, comme dans un bateau à rames, un bateau à vapeur, en général, la force extérieure T , ou la résistance, est égale à 0. Alors, $Em(v-u) = 0$, ce qui exprime que la quantité absolue du mouvement ne varie pas; or, le navire, dans son mouvement progressif, déplace sans cesse de nouvelles masses de fluide, en leur communiquant une certaine quantité de mouvement qui mesure la résistance de la coque; donc, pour que la quantité de mouvement reste constante malgré la progression, il faut que le navire soit muni d'un appareil qui imprime à l'eau, un mouvement en sens inverse de celui où marche le bateau. En supposant le navire en marche, il suffira que ces deux quantités de mouvement soient égales et de sens contraire, pour que ce navire continue à s'avancer en raison de la vitesse acquise. Les rames ne font qu'imprimer à l'eau ce mouvement inverse; c'est aussi le but des roues à palettes; appliquons la théorie à ce dernier cas.

J'appelle u la vitesse du bateau, v la vitesse des palettes; ces dernières vont venir rencontrer l'eau successivement, avec une vitesse égale à $(v-u)$. De plus, on peut supposer, quoique le phénomène soit, en réalité, beaucoup plus compliqué, qu'elles vont mettre en mouvement un prisme d'eau indéfini dont la section sera égale précisément à leur surface S . D'où, l'accroissement de quantité de mouvement occasionné par les palettes, sera :

$$\frac{S u \cdot 1000}{g} (v-u) \text{ Kil.}$$

ou mieux, en raison même de l'inexactitude de l'hypothèse que nous avons faite sur la tranche d'eau mise en mouvement

$$SAu (v-u)$$

A étant un certain coefficient qu'indiquera l'expérience.

Maintenant, l'accroissement de quantité de mouvement due à la marche progressive est égal à

$$S'A' u^2$$

S' étant la section immergée du maître-comple, d'où :

$$(a) \quad \begin{array}{l} SAu (v-u) = S'A' u^2 \\ \text{ou} \quad SA (v-u) uv = S'A' u^2 v. \end{array}$$

Mais la force vive dépensée sera égale à la résistance qu'éprouvent les palettes ou à l'accroissement de quantité de mouvement qu'elles communiquent à l'eau, multiplié par leur vitesse ; on a :

$$SA (v-u) uv = S'A' u^2 v.$$

On voit que de la nécessité où l'on est de placer sa machine sur le navire résulte une perte de force considérable égale à

$$S'A' u^2 (v-u) \quad \text{ou à} : SA (v-u)^2 u.$$

En effet, en imprimant la vitesse u , à l'aide du halage à la corde, on dépense une quantité de force vive représentée par :

$$S'A' u^2 u = S'A' u^3$$

Dans le cas actuel, elle est égale à :

$$S'A' u^2 v = S'A' \left(1 + \frac{S'A'}{SA}\right) u^3$$

car de (a) l'on déduit :

$$v = u \left(1 + \frac{S'A'}{SA}\right)$$

De cette valeur de la force dépensée, l'on peut conclure de suite que la vitesse coûtera fort cher à obtenir ; en effet, cette force est proportionnelle au cube de u , c'est-à-dire croît extrêmement rapidement avec cette quantité. On voit, de plus, l'avantage que l'on aura à rendre S' aussi petit que possible, c'est-à-dire à avoir une faible section au maître-comple. En effet, dans les rivières, il est avantageux d'allonger indéfiniment, pour ainsi dire, les bâtiments ; mais sur mer, c'est une ressource dangereuse à laquelle on ne doit pas avoir recours ; le navire trop fatigué, tend à se briser transversalement, et c'est à un accident de ce genre qu'on attribue la perte du bâtiment transatlantique, le *Président*, qui a disparu dans un voyage d'Amérique en Angleterre.

SA doit être le plus grand possible, par rapport à $S'A'$; aussi, emploie-t-on de grandes

palettes chaque fois que l'on n'en est pas empêché par d'autres considérations.

A et A' ont été déterminés sur des bateaux à vapeur déjà construits. A , comme nous l'avons vu plus haut, dépend de la forme plus ou moins parfaite de la carène. Il varie pour les bateaux sur les rivières de 9 à 20.

Quant à A' , il est égal à :

68 à peu près, pour les bateaux dont la vitesse excède 4^m.50 par seconde ;
et de 100 environ, pour les bateaux qui marchent lentement.

Nous avons vu que la puissance de la machine devait être égale à :

$$\left(1 + \frac{S'A'}{SA}\right) S'A' u^3 = M S' u^3.$$

Pour les bateaux sur les rivières, M varie de 10 à 27.

Sur mer, ce coefficient est plus avantageux : il est

Pour les bateaux de petite dimension, de 7. 16.

Pour les bateaux de grande dimension (400 à 500 chevaux) de 3. 86.

Cette différence tient en grande partie aux difficultés qui résultent des dimensions limitées du tirant d'eau dans les rivières ; à l'obligation dans laquelle se trouve le constructeur de prendre au maître-couple une section sensiblement carrée, afin de trouver une place que ne peut lui fournir ni la largeur ni la profondeur.

D'un autre côté, en mer, dans une grande masse d'eau, en général, la résistance à la carène est beaucoup moindre. Ainsi, aux États-Unis, sur les rivières offrant un énorme volume d'eau, on dépasse une vitesse de 6^m par seconde ; tandis qu'en France, on atteint, au plus, en eau morte, 4^m.50 à 5^m.00 ; et cela tient, en partie à la dimension des fleuves de l'Amérique.

Voici les principaux éléments d'un bateau marchant sur la Garonne, qui peut être considéré comme donnant un bon résultat moyen. (Clémence France)

Longueur à la flottaison	36 ^m
Largeur au maître-couple	3 ^m
Tirant d'eau en charge	0 ^m .50
Largeur au fond	2 ^m .80
Surface au maître-couple	1 ^m .50
Surface des deux palettes	1 ^m .15
Vitesse en eau morte, par seconde,	4 ^m .81
Diamètre extérieur des roues	2 ^m .90
Hauteur d'une palette	0 ^m .35
Largeur d'une palette	1 ^m .65
Nombre de tours par minute	42. 75
Force motrice en chevaux	24.
Valeur de A'	9.
Valeur de A	63.

Quant aux bateaux à hélice dont il nous reste à parler maintenant, nous avons

déjà indiqué, au commencement de ce cours par quelle suite de transformations on a passé pour arriver au système hélicoïdal, actuellement employé, et qui consiste en un arbre, armé de 2 à 4 ailes, placé à l'arrière du bâtiment, et qui pénètre par une boîte à étouper dans l'étambot.

Nous pouvons citer de même les éléments d'un bateau à vapeur à hélice.

Diamètre de la surface hélicoïdale...	1 ^m , 75
Las de cette même surface.....	2 ^m , 44
Vitesse du navire par seconde.....	4 ^m , 50
Nombre de tours par minute.....	138, 66
Surface au maître-couple.....	12, 50

Le prix du kilomètre parcouru par des bateaux à vapeur bon marché, faisant le cabotage entre les côtes de France et d'Angleterre, est de 8 à 10^{fr}.

§. 2.

Description des Machines des Bâtimens à palettes.

Lorsque l'on adapte une machine à vapeur à l'axe d'une paire de roues à palettes dans un bâtiment flottant, certaines précautions spéciales doivent être prises d'abord pour que le mouvement de la machine ne compromette par la solidité des parties du vaisseau.

La machine repose sur une plaque en fonte, attachée à la carène du bâtiment (fig. 93 et 94). De chaque côté des cylindres, sont deux plaques en fonte qui les comprennent, et qui se prolongent jusqu'au massif de fondation sur lequel reposent les coussinets de l'arbre de couche. On évite ainsi les déformations de la machine, qui seraient le résultat des déformations subies par le bâtiment, si les pièces portant la machine étaient en charpente: De telles déformations auraient pour effet de donner lieu à des frottemens très nuisibles, et de fausser la direction des pièces principales du mécanisme. Alors, les arbres de rotation écartés de leur position normale, portent sur les arêtes des coussinets; il en résulte souvent un échauffement très considérable des parties frottantes. Ces dislocations de la charpente flexible du navire, occasionnaient aussi souvent la rupture des bâtis en fonte en usage, il y quelques années, et qui sont généralement remplacés aujourd'hui par des bâtis en fer forgé. Les machines sont d'ailleurs à deux cylindres agissant sur des manivelles à angles droits, pour éviter l'emploi d'un volant incompatible avec la nécessité de renversements de sens instantanés dans la marche de l'arbre des roues et les arêtes qui se produisent souvent dans la machine pendant les gros temps.

La roue à palettes est formée de deux tonneaux calés sur l'extrémité de l'arbre de couche; de ces tonneaux partent des bras de fer, réunis ensemble par des cordes et des entretoises; à la circonférence extérieure s'attachent les palettes, madriers rectangulaires en bois. Pour diminuer l'effet des chocs que les palettes très larges produisent en plongeant dans l'eau, on a distribué les palettes dans les roues les plus modernes, comme l'indique la figure 96.

Elles sont plus étroites, et chaque palette est remplacée par plusieurs autres situées à des distances variables de l'axe.

Cet appareil est, comme on le voit, très simple et très facile à construire et à réparer. Mais il a un inconvénient, ainsi que l'analyse suivante le démontrera.

L'effet de la roue à palettes n'est utile à la propulsion du bâtiment que par la quantité de mouvement parallèle à la route suivie qu'elle imprime aux molécules de l'eau; les composantes verticales et perpendiculaires à la route du bâtiment sont donc entièrement perdues: elles ont coûté un certain travail mécanique qui ne profite point à la marche; il convient donc de les éviter autant qu'il est possible. Or, dans la roue ordinaire, les palettes sont dans la direction des rayons, et, par conséquent, sont obliques au plan de l'eau au moment où elles plongent, et à celui où elles émergent: delà une vitesse verticale imprimée aux molécules liquides. On éviterait cette perte de travail en faisant en sorte que les palettes fussent toujours perpendiculaires au plan de l'eau, et on y est parvenu au moyen d'un mécanisme particulier (fig. 98)

La palette est attachée par son milieu aux deux cercles en fer qui comprennent la roue; elle peut tourner autour de l'horizontale, de manière que, quelle que soit la position de la roue, on puisse l'amener à être verticale. L'inclinaison de la palette est déterminée par un système de leviers articulés: l'un est attaché à la palette; l'autre, articulé au premier, est attaché au collier mobile d'un excentrique fixe attaché à la charpente du bâtiment; le collier de l'excentrique est muni d'une pièce saillante sur laquelle vient presser une pièce attachée à la roue. De cette manière, le collier de l'excentrique tourne avec la roue, et, en suivant sur l'épave le mouvement de rotation de la roue pendant un tour entier, on reconnaît que les palettes plongeantes restent sensiblement verticales. L'expérience a prouvé que ce mécanisme remplissait son objet; il y a moins de perte de puissance vive, c'est-à-dire que la puissance vive, ou le travail dépensé par la machine à vapeur, approche plus d'être égal au travail qui serait nécessaire pour donner au bâtiment un mouvement identique au moyen d'une traction extérieure. Mais, cet appareil est compliqué et a, par conséquent, des inconvénients; il est moins solide, moins durable et plus difficile à exécuter et à réparer. Son principal avantage se manifeste quand le bâtiment est soumis au roulis; alors une des roues plonge jusqu'au centre, quand l'autre est en dehors; la roue ordinaire rencontre alors une énorme résistance, provenant de ce que la palette horizontale doit, pour plonger, déplacer une grande quantité d'eau; cette pression est assez grande pour arrêter le mouvement de la machine jusqu'à ce que la vague ait passé sous le navire. L'appareil perfectionné, où les palettes sont toujours presque verticales, est tout-à-fait exempt de cet inconvénient.

L'arbre de rotation est la pièce la plus importante; le diamètre est de 25 à 30 centimètres; il est en fer forgé et divisé en trois morceaux; on les réunit au moyen d'anneaux, ainsi que le montre la figure.

Les plus grands navires à palettes actuellement existants, sont construits dans ce système, et on y met à profit tous les perfectionnements de détail. Malgré cela, la machine à vapeur que nous venons de décrire a beaucoup d'inconvénients.

1°. Le poids. Cette machine pèse 1000 à 1200 Kilogrammes par cheval; pour un navire de 800 chevaux, il faut donc une machine du poids de 1000 tonnes.

2°. La quantité de charbon brûlée qui est énorme; il faut compter 3 à 4 Kilog. par heure et par cheval; de sorte qu'il faut embarquer à bord d'un transatlantique 800 à 1000 tonnes de charbon, pour une traversée de 12 jours en moyenne.

De là résulte que la machine et les provisions de charbon occupent un espace très grand, et rendent énorme le poids mort; le fœt en est augmenté d'autant, et on ne peut transporter que les voyageurs et les objets ayant une grande valeur, qui paient un grand prix sans que leur poids soit grand.

3°. L'emploi d'un balancier a l'inconvénient que nous avons déjà signalé à propos des machines fixes. C'est ce qui a conduit à l'emploi des machines à actions directes.

Machine de Fairbairn (fig. 98). Le diamètre du cylindre est égal environ à la course du piston; la tige pousse une bielle très courte qui s'articule au coude de l'arbre de rotation; la bielle étant très courte, prend, par rapport à la tige, une inclinaison assez grande pour qu'on puisse craindre, qu'il en résulte une déformation qu'on prévient au moyen d'un appareil analogue au parallélogramme de Watt. Le prolongement d'un des rayons de ce système articulé, manœuvre la tige de la pompe à air.

Machine de Maudslay (fig. 99). Cette machine emploie une bielle plus longue; deux cylindres, marchant ensemble, portent une double plaque en tôle de 0^m.015 d'épaisseur, qui comprennent les tiges; à sa partie inférieure, la double plaque porte une masse en fonte à la hauteur des pistons; sur cette masse, repose une bielle qui passe entre les deux plaques de tôle et articulée à son autre extrémité au maneton de l'arbre de couche. Le mouvement de la masse de fonte est assuré entre deux glissières fixées sur les deux cylindres.

Machines à cylindre oscillant.

Les machines à cylindre oscillant paraissent avoir été construites pour la première fois en France, dans les ateliers de M. Cavé, à Paris. Il est certain que ce n'est que fort longtemps après l'emploi, qu'en avait fait ce constructeur, qu'elles se répandirent en Angleterre.

Le principe général sur lequel elles reposent, consistent à supprimer les bielles et les balanciers intermédiaires entre l'axe du piston et le maneton de la manivelle, et à assembler directement l'extrémité de la tige du piston sur le maneton, puis à rendre le cylindre lui-même mobile autour d'un axe parallèle, à l'axe de rotation.

La distance entre l'axe de rotation et l'extrémité de la tige du piston est ainsi diminuée de toute la longueur de la bielle, en général considérable, surtout dans le cas où le balancier est déjà supprimé.

La plus grande difficulté de cette disposition nouvelle des cylindres, était l'introduction de la vapeur et l'installation du tiroir.

La chaudière étant fixe, la meilleure chose à faire était d'introduire la vapeur par les points fixes du cylindre qui sont les points situés sur l'axe de rotation. C'est le parti que l'on prit en effet: Exemples (fig. 100 et 101). La vapeur arrive par l'un des tourillons creux sur lesquels repose le cylindre; elle fait le quart du tour du cylindre, extérieurement, arrive dans le tiroir qui la distribue et qui est appliqué sur le cylindre lui-même, à 90° des génératrices d'introduction et de sortie,

et ressort, de l'autre côté, par le 2.^e touillon d'appui.

Restait la difficulté de la manœuvre du tiroir. On la résout en adoptant la disposition indiquée par les mêmes figures : le tiroir est muni d'une tige qui paraît à l'extérieur, et cette tige est manœuvrée par un levier concave, concentrique au cylindre, dont le milieu est fixé sur un axe rayonnant du cylindre, et l'extrémité libre, saisie par la tige d'un excentrique convenablement disposé.

Pour permettre au mouvement circulaire du bout du levier d'avoir lieu malgré son articulation avec l'extrémité de la tige de la bielle, qui a un mouvement vertical, on donne à l'ouverture dans laquelle est prise l'extrémité en question, une forme allongée et arquée. Les deux mouvements se superposent alors avec la plus grande facilité, et le jeu de l'appareil se fait aussi aisément que si la machine était entièrement fixe.

L'agencement général des deux cylindres moteurs d'un bâtiment et de l'axe des roues est montré par les figures 105 et 106. Les pompes à air sont manœuvrées par des coudes ou des excentriques assemblés sur l'axe général, et le tout est compris entre les deux parois du bâtiment.

Les machines oscillantes sont préférées par beaucoup de constructeurs, surtout en Angleterre, pour les bateaux rapides. Les bateaux omnibus de la Tamise et les bateaux transatlantiques les plus récents sont munis par des machines de ce système.

Terminons par un mot sur la pression à laquelle la vapeur est employée dans les machines de marine. Dans la plupart des machines de marine Anglaises actuelles, la pression varie entre 1 et 2 atmosphères. $1\frac{1}{3}$ est un cas très fréquent. C'est-à-dire qu'on emploie la machine à basse pression. Mais, malgré cela, on fait usage de la détente. La détente permet à la pression de descendre au dessous d'une atmosphère, dans le cylindre, et trouve dans le condenseur une pression de $0^{\text{atm.}}$ 10 seulement.

Parmi les appareils de détente le plus fréquemment employés, se trouve celui-ci : Une vanne ou tiroir qui forme l'arrivée de la vapeur, lorsque le piston est à une partie déterminée de sa course, au milieu, par exemple, est manœuvrée par une tige dont le mouvement est obtenu par l'action combinée d'un levier à contrepoids, et d'une plaque ovale assemblée sur l'axe de rotation (fig. 102). En variant la forme de la courbe employée, on conçoit que l'on puisse produire la détente à un mouvement quelconque de la course du piston, et la disposer de la manière la plus favorable aux résultats que l'on veut obtenir.

On produit cette variabilité de la détente au moyen de plusieurs cames faites sur un dessin différent et placées parallèlement entre elles, de façon à glisser à volonté parallèlement à l'arbre, tout en tournant avec lui; on fait ainsi agir sur le levier celle de ces cames que l'on juge à propos de mettre en action, et on fait varier ainsi la détente. Ces appareils de détente sont placés entre les cylindres et les appareils ordinaires de distribution.

Cette facilité de modification combinée avec celle d'allumer un plus ou moins grand nombre de foyers, permet de marcher à volonté, avec une vitesse plus ou moins grande.

Dispositions diverses.

Les usines du Creusot fournissent aux bâtiments de navigation fluviale, un grand nombre de machines à un seul cylindre horizontal. Ces machines ont une grande simplicité et une grande légèreté. Leur prix est d'autant moindre.

Quelques bâtiments à service omnibus ont une roue à palettes centrale, comprise entre deux coques parallèles et mue par deux cylindres assemblés aux extrémités de ses axes.

Quelques exemples de roues à palettes uniques travaillant à l'arrière, ont été employés dans des cas où l'on avait intérêt à diminuer la largeur du bâtiment, pour le passage, par exemple, des écluses, et à dégager le milieu du bâtiment de l'encombrement de la machine.

Des bâtiments à quille mobile ont été construits pour la navigation mixte, en mer et en lit de rivière (fig. 103). Leur section au maître-couple est à peu près carrée. Leur longueur et leur largeur est limitée par les dimensions des écluses, et le tirant d'eau minimum, (2^m sur la Seine). Leur mâture est disposée de façon à ce que l'on puisse abaisser les mats au passage des ponts. La quille est un système de deux fortes feuilles de tôle de 4^m de long chacune et qui peuvent s'élever et s'abaisser, dans deux fentes verticales de 4^m de long, placées en deux points différents du bâtiment; elles gagnent en profondeur ce qu'elles perdent en longueur. À mesure qu'on arrive dans une eau plus profonde, on les baisse davantage. Une exacte connaissance des points dangereux et des bas fonds le long des côtes, est indispensable pour naviguer avec un système de ce genre. Le remède partiel de cet inconvénient est la mobilité même de la quille. Grâce à la coupe inclinée de l'avant de chaque lame, elle se soulève à la rencontre des obstacles et rentre d'elle-même dans l'intérieur du bâtiment. Un bâtiment de ce genre a hélice, nommé le Lamorignière, fait le service entre Tria et Bordeaux.

Chiffres et Coefficients relatifs aux bâtiments à palettes.

Les navires Transatlantiques à palettes ont généralement une vitesse de palettes plus grande que la vitesse du bâtiment, dans le rapport de 1,2 à 1.

$$v = 1,2 u.$$

Le tonnage étant diminué pendant la durée du voyage par la combustion du charbon, l'émersion du navire à l'arrivée peut aller jusqu'à 1 mètre, et alors il faut que leurs dimensions soient calculées en conséquence. On leur donne des dimensions telles, qu'au milieu de la marche, elles marchent convenablement.

Les tempêtes et les vents agissent sur les palettes trop larges et sur les tambours trop grands. Souvent les tambours ont été enlevés ou endommagés par des coups de mer.

La surface des palettes est d'environ 0^m.22 à 0^m.27 par force de cheval pour les

bâtiments naviguant sur mer, et de $0^m.35$ à $0^m.45$ par force de cheval pour les bâtiments de rivière. Le rapport de la largeur à la hauteur est de 4 à 5 pour 1 sur mer, et de 7 à 1 sur les rivières, où l'action des vagues n'est pas à redouter.

Pour ce qui est des coefficients que nous avons appelés A et A' , peu d'expérience les ont déterminés : la résistance A du maître-couple varie entre 9 et 20 dans les rivières.

A' relatif aux palettes est à peu près égal à 68 dans les mêmes circonstances.

Le coefficient du cube de la vitesse M peut être mesuré directement et se trouve varier de 10 à 27 dans les rivières et de 7,16 à 3,86 sur mer.

Il diminue lorsque la puissance relative de la machine et les dimensions relatives du bâtiment augmentent.

L'emploi de la vapeur sur mer, est ainsi plus avantageux que dans les rivières.

Ce fait s'explique naturellement par la plus grande largeur et la plus grande profondeur de la masse liquide à traverser, et par la facilité que l'on a pour donner à la carène au maître-couple les gabarits les plus avantageux.

§. 3. Bâtiments à hélice.

Construction de l'hélice. — L'idée primitive et les perfectionnements successifs des moteurs hélicoïdaux appliqués à la navigation, ont été indiqués dans ce qui précède.

Les avantages généraux de ce genre de moteurs, ont été également discutés.

La première condition à remplir dans la construction d'une hélice, est que son pas soit plus grand que l'espace parallèle à l'axe que l'on veut parcourir dans le temps d'une rotation. En d'autres termes, il faut que la vitesse de progression de l'hélice supposée mobile dans un milieu immobile, soit au moins égale à la vitesse désirée pour le bâtiment dans l'eau.

La vitesse imprimée à l'eau dans le sens opposé au mouvement du navire, est la conséquence de la différence entre les deux vitesses, quand le bâtiment ne doit son mouvement qu'à l'hélice seule.

Mais, lorsque l'on adapte aux bateaux à hélice une voilure assez puissante, on peut constater quelquefois que la vitesse de l'eau en sens inverse du bâtiment, due à la rotation de l'hélice, est nulle ou même négative. Dans ce cas particulier, l'eau, entraînée à la suite du navire mu par les voiles, n'est pas assez puissamment repoussée par les palettes de l'hélice qui progresse, pour reprendre la vitesse inverse.

L'hélice est adaptée à un arbre de couche horizontal et longitudinal qui traverse tout le fond de la carène.

Elle est placée par rapport à l'arrière du bâtiment comme le montre la figure 303^{bin}. Pour obtenir d'une hélice le travail le plus avantageux, il faut que les lignes d'eau soient très fines à l'arrière, comme le montre le plan de la figure.

Des expériences ont été faites à ce sujet en Angleterre sur un petit bâtiment

spécial (1846, Le Nain). On modifia la forme des lignes d'eau en gonflant le bordage au moyen de trois couches de madriers épais. Le même bâtiment, qui filait 9 nœuds à l'origine, c'est-à-dire 9 fois 1853^m par heure, ne fila plus que $3\frac{1}{4}$ dans les mêmes conditions, avec trois bordages superposés à la coque nue, et avec deux bordages superposés seulement, la vitesse redevint $5\frac{3}{4}$.

Pour ce qui est de la forme exacte de la surface hélicoïdale, l'expérience a fait reconnaître successivement : 1°. Qu'une portion d'hélice, assez faible était suffisante pour donner l'impulsion à un bâtiment du plus fort tonnage, et que la proportion, du diamètre de l'hélice à la largeur du bâtiment au maître couple, pouvait varier depuis $\frac{1}{3}$ jusqu'à $\frac{1}{5}$.

2°. Que la meilleure disposition à donner au propulseur, était de le composer d'un petit nombre d'ailes séparées et massives.

Il résulte d'expériences de M. Cavé que, si d'une roue à 4 branches, on retranche 2 branches, l'effet utile produit à vitesse égale, dépasse de beaucoup la moitié de l'effet utile produit par les quatre branches, bien qu'il n'y ait plus que la moitié de la surface qui agisse. Cela tient à ce que : 1°. Quand il y a quatre branches, il n'y a pas assez de distance entre 2 branches consécutives pour que chacune d'elles ne rencontre pas une notable portion de l'eau qu'a déjà mise en mouvement la branche précédente, eau incapable d'offrir une résistance utile. 2°. Les frottements sont moindres avec deux branches qu'avec quatre.

On en est ainsi venu à l'adoption de deux ailes seulement en laiton fondu, occupant environ $\frac{1}{6}$ du pas total de l'hélice, et en projection $\frac{1}{6}$ du cercle enveloppé.

3°. Que la surface des palettes ne devait pas être une surface hélicoïdale ordinaire engendrée par une droite normale à l'axe, mais une surface hélicoïdale engendrée par une courbe normale sur l'arête de l'hélice à son origine, (fig. 104) et recombée vers l'arrière du bâtiment, à son extrémité, de manière à mieux embrasser l'eau que l'hélice refoule, et à s'opposer, jusqu'à un certain point, aux fuites perpendiculaires à l'axe.

De plus, la directrice de la courbe en question sur l'axe massif de l'hélicoïde, n'est pas non plus une hélice à progression uniforme, mais une hélice dont le pas augmente d'une manière continue à mesure que l'on avance vers l'arrière et dont le développement sur un plan tangent, est une courbe parabolique, comme l'indique la figure.

Description de la Machine d'un bâtiment à hélice.

La plus grande difficulté à vaincre était de faire tourner un arbre de couche avec frottements dans une boîte d'étouper, avec une vitesse de 200 tours environ par minute.

La première idée que l'on eut fut de communiquer le mouvement de la machine à l'hélice par deux arbres de couche parallèles, l'un ayant un mouvement assez modéré, et l'autre un mouvement plus rapide. Dans ce système, le mouvement était communiqué par un engrenage métallique des deux parts. Leur bruit et leur fragilité étaient un inconvénient. Aux engrenages métalliques, on substitua des chaînes (Bennel), puis des engrenages mixtes où l'une des roues avait

des dents en bois.

Mais toutes ces solutions ne satisfont pas beaucoup mieux aux conditions voulues.

Aujourd'hui que les machines locomotives de terre ont démontré la possibilité pratique de donner à un axe une rotation suffisamment rapide par action directe, les constructeurs préfèrent généralement ce système plus simple. Les pertes de travail par les frottements y sont aussi considérablement diminuées.

Les figures 105 et 106 représentent la disposition générale d'une machine à hélice, établie dans le système de l'action directe avec cylindre oscillant. On voit que l'action propulsive totale de l'hélice sur le navire s'applique au point fixe A, où s'appuie l'extrémité de l'arbre tournant. De là, un moyen très simple de mesurer directement la force nécessaire pour mouvoir le bâtiment. Un levier courbé disposé comme l'indique la figure 107 suffit à cet effet. En combinant cet appareil avec l'indicateur de Watt qui donne le travail brut développé dans les cylindres, et en prenant le rapport des deux quantités de travail, on obtient le rendement du système.

Dans les bâtiments à palettes, le rendement est égal au rapport de la vitesse du navire à la vitesse des palettes, en faisant abstraction des frottements intérieurs de la machine.

On voit encore qu'en vertu du voisinage du propulseur et du gouvernail, l'effet du gouvernail sera beaucoup plus grand que dans un bateau ordinaire. Ce fait permet d'augmenter dans une notable proportion, la longueur des bâtiments par rapport à leur largeur, et de leur donner ainsi des conditions plus favorables encore à la rapidité, même avec des dimensions absolues plus grandes.

Les vaisseaux de 120 avaient anciennement 70 mètres. Aujourd'hui, un bâtiment à hélice anglais le *Great Britain*, a 99^m.

Un autre bâtiment anglais, le *Wellington*, coupé en deux et allongé de 15^m pour y loger un appareil à hélice de 700 chevaux, obéit encore parfaitement au gouvernail avec une longueur totale de 85 mètres.

On projette actuellement des bâtiments de 150 mètres et de 10,000 tonnes, pour relier l'Australie à la métropole Anglaise. L'augmentation des dimensions absolues diminue évidemment les frais généraux et la résistance à la mer par rapport au tonnage.

La résistance des bâtiments de 150^m à des vagues de 30^m de longueur, sera également beaucoup plus grande. On espère qu'ils franchiront des distances de 1000 lieues avec des vitesses de 5 lieues à l'heure, sans augmenter beaucoup la force relative des machines. Nous avons vu, en effet, que dans l'expression $M S^3 v^3$ qui mesure la force motrice à demander à la machine, pour obtenir une vitesse donnée, le coefficient M diminue très rapidement avec les dimensions absolues du navire, dans les établissements actuels.

Description du bâtiment à hélice le *Napoléon*.

Les plus belles expériences qui aient été faites jusqu'à présent avec le propulseur

hélicoïde, sont les tourneurs d'essai du bâtiment français le Napoléon.

Dans les vaisseaux de 120 ordinaires, on donne à la surface de voilure un rapport de 31 à la surface de section au maître-couple. Dans le Napoléon, le rapport est de $28^{\text{m}9\frac{1}{2}}$ seulement pour $1^{\text{m}9}$ au maître couple.

La machine comprend 2 cylindres de $2^{\text{m}19}$ chacun. Le mouvement est communiqué au moyen d'engrenages mixtes en métal et en bois dur.

Les soutes à charbon sont susceptibles de se remplir d'eau en échange du charbon qu'elles dépensent, pour maintenir fixe le poids du bâtiment.

On travaille à $43^{\text{m}m}$ de vacance au dessus de la pression atmosphérique. La force effective est de 2000 chevaux; la force nominale est de 900 chevaux.

Les machines donnent $25\frac{1}{2}$ coups par minute. Le bâtiment parcourt $7^{\text{m}30}$ par 1^{h} . Cela revient à 27 kilomètres par heure = 13 nœuds 86. Les meilleurs bâtiments transatlantiques n'ont encore qu'une vitesse de 12.

Le coefficient M du Napoléon est de 5,57. Or, on a vu que les meilleurs bâtiments à palettes, ont 3,86. C'est la seule infériorité des bâtiments à hélice par rapport aux bâtiments à palettes.

Le dimanche 28 Février 1855, a été lancé à Brest, le navire mixte la Bretagne, armé de 130 canons du plus fort calibre. Voici ses principales dimensions comparées à celles du Napoléon.

Longueur de la carène à la flottaison ou dehors des bordages, ci.....

Largueur.....

Déplacement : total au maximum de charge 6466 tonnes

La force de la machine à vapeur est de 1200 chevaux; l'hélice à quatre branches, a $6^{\text{m}30}$ de diamètre; son chargement en combustible est de 14 jours pour une vitesse de dix nœuds, et de six jours pour une vitesse maxima qui est de 14 nœuds. Il a 3000 m.c de surface de voilure.

Dans le Napoléon, la génération de l'hélice, au lieu de se faire par une simple ligne droite perpendiculaire à l'axe, se fait par une ligne faiblement concave vers l'arrière. L'idée qui a conduit à prendre ce parti, a été d'empêcher, jusqu'à un certain point, les molécules d'eau impressionnées par le moteur, de s'éloigner de l'axe, en vertu de la force centrifuge développée par la rotation.

En outre, le pas de l'hélice augmente progressivement de l'avant à l'arrière, dans le but de fouetter, en quelque sorte, le liquide avec une vitesse croissante, et de faire passer progressivement l'eau du repos à la vitesse maxima.

Le cercle limite de l'hélice est de $26^{\text{m}9}$. La section au maître-couple est de $99^{\text{m}9}$. Le pas des spirales à l'origine est de $7^{\text{m}30}$; au milieu de $8,50$; à l'extrémité de $9,40$.

Il résulte de ce fait, que si l'eau était un écron solide, pour un tour de l'axe, le navire marcherait de près de $9^{\text{m}40}$. Or, la marche réelle, pour un tour de roue, est de $8^{\text{m}32}$.

La différence entre $8^{\text{m}32}$ à $9^{\text{m}40}$, donne à peu près la mesure de la vitesse imprimée

La Bretagne.	Le Napoléon.
81^{m}	71^{m}
18. 08	16.

à l'eau en sens inverse de la marche du navire, lorsque le navire se meut en vertu de l'hélice seule.

Le Napoléon a huit fourneaux. Lorsque toutes les chaudières sont allumées, la vitesse varie de $12\frac{1}{2}$ à 13 nœuds. Lorsque l'on n'en allume que la moitié, 11. Lorsque l'on n'en allume qu'un quart, 9.

Les vitesses sont proportionnelles à peu-près à la racine cubique du nombre des fourneaux allumés.

La puissance de la machine est proportionnelle à u^3 .

Pendant un temps t , la quantité de charbon à consommer sera, par exemple :

$$K u^3 t = K u^2 ut.$$

Or, ut est constant pour un même voyage. C'est l'espace parcouru. Donc, la quantité de charbon consommée pour faire un même voyage, est proportionnelle au carré de la vitesse seulement. Ceci fait voir que, toutes choses égales d'ailleurs, on consumerait un peu moins de charbon pour un même voyage en allant plus lentement.

Le Napoléon, employé comme remorqueur, imprime encore une vitesse de 5 nœuds à trois navires réunis.

Il a franchi les Dardanelles en remorquant le navire amiral, avec une vitesse de 5 nœuds à l'heure et contre un vent violent.

Données numériques relatives aux Bâtimens à Hélice.

	Enchanter.	Arrogant.
Tonnage.....	953.	1872
Superficie imm. maître-couple.....	33. ^{m.c}	60. ^m 50
Longueur.....	57. ^m	60. ^m
Largeur.....	9. ^m 90	13. ^m 50
Machine F.N.....	360.	360
Machine F.R.....	672.	623
Diam. écou.....	3. ^m 60	4. ^m 65
Par.....	4. ^m 08	4. ^m 65
Nombre des ailes.....	2.	2.
Longueur des ailes $\frac{1}{6}$ p.....	0,79	0,77
R. tours par 1'.....	80.	80.
Vitesse du navire.....	$10\frac{1}{4}$ ^{n.}	8. ⁿ
Vitesse par 1".....	5. ^m 03	4. ^m 11
Glissement de l'eau.....	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{8}$
Coefficient M.....	11,9	11,1

Détails économiques — Pour un service de voyageurs à grande vitesse, et avec une régularité de chauffage à peu près constante, les bâtiments à palettes paraissent encore préférables à cause de la moindre valeur du coefficient de résistance qui représente une moindre quantité de charbon à dépenser et à emporter.

Valeur du coefficient M.	Palettes.	Hélices.
Petits navires.....	7, 16.	28, 00.
Grands navires.....	3, 86.	11, 00.
Trois grands navires.....	3, 00.	5, 57.

Disons, toutefois, que l'importance du coefficient M, au point de vue de la dépense, est atténuée, en grande partie, par les dépenses d'équipage et de réparation.

Dépenses diverses pour un vaisseau de 1000 tonnes, ayant une machine de 350 chevaux FN, et parcourant 18 Kilomètres par heure.

Prix d'établissement.....		1 million
Entretien 5 p/o.....	50,000 f	"
Dépréciation.....	50,000.	"
Assurance.....	50,000.	"
Intérêt.....	50,000.	"
Equipage de 32 personnes: solde et nourriture.....	60,000.	"
Total des dépenses fixes.....	260,000.	"

Les dépenses proportionnelles seront, par kilomètre parcouru, 75 ^k de charbon à 20 ^f la tonne.....	1 ^f 50
Huile, graisse et menues réparations.....	" 16
Droits de place et de port.....	" 60
Menues dépenses.....	" 22
Total par kilomètre.....	2. 48.

Dépense totale dans un an, pour 200 jours de navigation et 86,400 Kilomètres.....

Il faut alors ajouter au prix du kilomètre parcouru, les 3^f 01^c de frais généraux.

Total: 5, 49.

L'intérêt du commerce est donc que les navires restent le moins possible dans les ports, afin de diminuer la part relative des frais généraux. C'est le point de départ de l'idée des Docks.

Pour avoir le prix du fret, il faut, après avoir déduit du prix du tonnage, le chargement de charbon, diviser $5^{\text{f}}.49$ par le nombre de tonnes qui restent.

Soient, par exemple, 500 kilomètres à parcourir par un navire de 1000 tonnes, la machine a une force de 350 chevaux. Et 4 kilogrammes par heure, la consommation sera, par heure, de 1400 kilogrammes. Par jour, 33 tonnes. En 14 jours, cela fait 462 tonnes; restent 500 tonnes utiles environ, ce qui donne, pour prix du fret, $0^{\text{f}}.01^{\text{c}}$ par tonne et par kilomètre.

Autre exemple:

Bateau de 400 tonnes, à hélice, de 50 chevaux; Prix 250,000^f. Les frais fixes seront alors les suivants:

Extraction à 7 %	17,500. ^f "
Dépréciation 5 %	12,500. "
Assurance 5 %	12,500. "
Intérêts 5 %	12,500. "
Equipage, Solde et nourriture	27,000. "
Total des frais fixes	82,000. "

Les dépenses proportionnelles - Par kilomètre parcouru:

18 Kil. de charbon à 20 ^f la tonne	0, 36.
Huile et graisse	0, 04.
Droits de phare et de port	0, 25
Dépenses diverses	0, 15

Si le bateau navigue 200 jours par an, il parcourra, à raison de 12 Kil. par heure, 57,600^k; on aura par kilomètre parcouru:

Frais généraux	1 ^f . 42
Frais proportionnels	0. 80
Total	2, 22

En marchant à la voile, par les temps favorables, le tonnage en charbon pourra n'être que de 50 tonnes. Restent 350. En divisant $2^{\text{f}}.22$ par 350, on obtient le prix du fret $0^{\text{f}}.005$, soit $\frac{1}{2}$ centime.

Ceci prouve que dans un grand nombre de circonstances, les transports par mer et par bâtiments à hélice (houille, par exemple) l'emporteront de beaucoup, en économie, sur les transports par terre. Ces derniers n'avaient, il y a quelques années, que $\frac{1}{8}$ à $\frac{1}{10}$ des transports de houille de Newcastle, à Londres.

Le prix des transports par canaux est d'environ $0^{\text{f}}.02$. Les bâtiments à voiles ont des frais fixes moindres, mais ils sont souvent retardés, les frais généraux deviennent plus grands.

En outre, les chances de la spéculation sont constamment modifiées par ces lenteurs, et il en résulte que la transformation des navires à voiles en bâtiments mixtes, à hélice, se fait constamment.

Le port de Marseille (blés d'Odessa) fournit des exemples nombreux de ce genre d'amélioration.

§. 4. Navigation fluviale.

Sur les rivières, les avantages des hélices sont beaucoup moindres que sur mer. Le fait d'un coefficient réellement moindre donne, au contraire, un avantage très marqué aux bâtiments à palettes.

Voici les dimensions principales d'un bâtiment à palettes, pour navigation fluviale, qui a donné de bons résultats dans ces derniers temps, sur la Garonne:

Longueur à la flottaison.....	36 ^m
Largeur au maître-couple.....	3 ^m
Tirant d'eau en charge.....	0 ^m 50
Largeur au fond.....	2 ^m 80
Surface au maître-couple.....	1 ^m 50
Surface des deux palettes.....	1 ^m 15
Vitesse en eau morte par 1".....	4 ^m 81
Diamètre extérieur des roues.....	2 ^m 90
Hauteur d'une palette.....	1 ^m 65
Nombre de tours par 1'.....	42 ^m 75
Force motrice en chevaux.....	24.
Valeur de A'.....	9.
Valeur de A.....	63.

On voit de suite que la longueur relative du bâtiment est beaucoup plus grande que sur mer.

Le rapport est de 12 au lieu de 6 qu'on donne moyennement aux bâtiments maritimes. Cela tient à ce que les mêmes dangers et les mêmes difficultés de manœuvre ne sont pas à craindre en rivière que sur mer et qu'il y a toujours avantage, en eau calme, d'augmenter la longueur par rapport à la largeur, pour diminuer la résistance relative du bâtiment.

Le deuxième caractère essentiel des bâtiments de rivière, est la forme presque rectangulaire du bâtiment au maître-couple, et l'absence de quille proprement dite. Cela tient à la nécessité d'obtenir le maximum de tonnage, avec le minimum de tirant d'eau. La quille, sur mer, est nécessaire pour donner au bâtiment la résistance au déplacement latéral, nécessaire pour que l'action du vent sur les voiles, ait son plein effet dans le sens de l'axe du bâtiment. En eau de

rivière, où l'on n'emploie qu'une voile, qu'avec vent arrière, et où, en général, on ne l'emploie pas du tout, une quille très développée n'a plus de raison d'être.

Bâtimens de la Saône et du Rhône.

	Saône.	Saône.	Saône.	Rhône.
Longueur.....	60 ^m , 00	67 ^m , 00	80 ^m , 00	80. 00
Largeur.....	5, 00	4, 10	4. 00	4. 10
Rapport.....	12, 00	16, 00	20, 00	19. 05
Tirant d'eau max.....	" 70	" 70	" 80	" 75
Section immergée au m.c.....	3, 50	2, 90	3, 20	3, 70
Force de la machine réelle.....	70.	120.	200.	240.
Nombre de chevaux par m.g. m.c.....	20.	41	62.	78.
Nombre de palettes.....				
Surface des 2 palettes.....	1, 60	2, 90	3. 60	3. 60
Diamètre des roues.....	4, 14	4, 85	4. 95	5, 00
Nombre de tours en 1'.....	32.	34	37.	34.
Vitesse par 1'.....	265. "	300	333	400.
Rapport des vitesses du bateau et des palettes.....	0, 73	0, 68	0. 69	0. 685
Valeur du coefficient M.....	12.	18.	21.	19.

L'étude de ces chiffres met en évidence le très grand rapport de la surface des palettes à celle de la section immergée au maître-couple.

Elle démontre que la résistance représentée par M, augmente, toutes choses égales d'ailleurs, avec la vitesse. Cela tient à l'augmentation, comme du frottement dans les liquides avec la vitesse.

On emploie, sur le Rhône et sur la Seine, des bateaux porteurs qui ne remorquent pas et renferment eux mêmes leur charge. On a poussé les bateaux porteurs du Rhône jusqu'à 140^m de longueur pour 7 mètres de largeur. Proportion 1/20. Machine de 400 chevaux. Tirant d'eau de 1^m.30. Charge très uniforme.

Quelques anomalies aux règles que nous avons précédemment mentionnées, peuvent se présenter dans des cas particuliers. Une de ces anomalies est le fait de l'accroissement de vitesse obtenu par un navire coupé en deux et allongé pour obtenir une augmentation de tonnage, sans changer sa machine. On l'explique en remarquant que l'accroissement de longueur augmente la stabilité du navire en mouvement, diminue, par suite, les effets des coups de mer et des embarquements d'eau.

De l'emploi de la Vapeur pour la navigation dans les canaux.

Le principal obstacle à l'emploi de la vapeur pour la navigation dans les canaux, consiste dans l'agitation des eaux produite par le passage des bâtiments. Cette agitation soulève les vaseux du fond, et corrode les rives du canal avec une grande perte de puissance vive.

Des tentatives peu heureuses ont été faites en Angleterre et en France, à l'effet de perfectionner ce genre de navigation.

Les procédés du touage sur un point fixe, au moyen d'une chaîne qui traverse les bâtiments et s'enroule sur un axe central, sont employés dans la traversée de la Seine, à Paris.

Enfin, les roues à croc, employées pour la remonte du Rhône, dans quelques bâtiments, sont encore un système particulier que nous nous contenterons de mentionner.

§. 5.

Chaudières des Machines à navigation.

Les chaudières des bâtiments à vapeur doivent toujours être à feu intérieur.

Chaudières à carreaux — Une disposition généralement adoptée, est celle que représente la fig. 108. Le feu est allumé dans les parties inférieures, et la flamme circule dans la section de la chaudière, comme l'indiquent les flèches. L'eau est contenue dans les espaces assez minces, compris entre deux plaques de tôle, qui sont remplis par des tranchées horizontales.

La même cheminée correspond toujours à plusieurs chaudières. Pour n'avoir pas à craindre une section de cheminée trop grande pour une chaudière seule, on divise la section dont il s'agit, en autant de conduites qu'il y a de chaudières.

A cause du grand nombre de parties horizontales vivement chauffées dans l'appareil, il est très important de maintenir la hauteur du niveau de l'eau à un point constant.

Les surfaces horizontales ont d'ailleurs la puissance calorifique la plus grande, parce qu'elles sont moins longtemps en contact avec chaque bulle de vapeur qui s'en détache, et plus longtemps avec l'eau dont le pouvoir absorbant est plus grand.

Chaudières tubulaires — Aujourd'hui l'on combine de plus en plus les dispositions à carreaux, les systèmes tubulaires. Le principal soin à prendre, dans ce cas, est de rendre les parties tubulaires facilement accessibles à cause des réparations. La figure 109 rend compte de ces dispositions dans le bâtiment à hélice le *Simon*.

La disposition des tubes en damier est préférée à la disposition en quinconce, lorsqu'il s'agit de machines à marine, pour permettre à la vapeur de se frayer plus facilement un passage

vertical entre deux séries verticales de tubes, sans à perdre un peu sur la quantité des tubes.

Les chaudières tubulaires paraissent destinées à se substituer entièrement, dans peu de temps, aux chaudières à carneaux dans les bâtiments à grande vitesse.

Les principaux inconvénients des chaudières à vapeur telles que nous les avons décrites, sont la réduction des espaces nécessaires pour visiter le dessous et le côté des chaudières, et l'oxydation assez rapide des parois minces en tôle, par l'eau qui s'écoule à travers les fissures. Cette action résulte des actions concourantes du renouvellement de l'eau, de la présence de l'air et de la chaleur.

Dans les chaudières tubulaires, les réparations sont plus faciles, en général, que dans les chaudières à carneaux. Les tubes se remplacent et se nettoient aisément.

On a l'habitude de donner aux grilles, dans les chaudières à vapeur, une inclinaison de $\frac{1}{6}$.

On facilite, par ce moyen, la double manœuvre du chauffeur qui consiste à pousser par en dessous le combustible vers le fond du foyer, et de désobstruer, par en dessous, les intervalles de la grille avec un ringard.

Les chaudières à carneaux, à égale quantité de vapeur produite, sont de $\frac{1}{3}$ plus lourdes et durent moins longtemps.

Chaudières en cuivre. — L'oxydation des chaudières en fer par l'oxygène de l'eau, a introduit, dans un assez grand nombre de cas, l'emploi de la tôle de cuivre.

Le prix des chaudières en cuivre est environ 4 fois plus grand que celui des chaudières en fer, et elles durent quatre fois plus longtemps.

Il y a donc compensation.

Les avantages spéciaux des chaudières en cuivre, sont le plus long intervalle entre les réparations, et la plus grande conductibilité du cuivre pour la chaleur. Le rapport de sa conductibilité à celle de fer, est de 2,4 à 1 environ.

Incrustations. — Sur mer, les incrustations salines sont beaucoup plus à craindre naturellement que sur terre. Les croûtes pierreuses formées peuvent se détacher par plaques plus grandes et produire des surchauffes violentes et subites à l'endroit des parois mises à nu.

Dans les rivières, les eaux contiennent de 0,25 à 0,60 pour 1000. Sur mer, on trouve $\frac{1}{32}$ du poids de sel, c'est-à-dire que sur 1000, on a 3,80. Le sel marin seul y entre pour 2,50.

Les quantités de sel varient d'ailleurs suivant les mers.

Mer rouge.....	4,3
Méditerranée.....	3,8
Manche.....	3,5
Atlantique.....	2,8
Mer noire.....	2,1
Baltique.....	0,66

Pour remédier, en partie, à ce grand inconvénient, on pousse l'évaporation assez loin, pour que la salure de l'eau dans la Chaudière soit voisine du point de saturation du sel marin, sans y atteindre. On évacue une partie de cette eau, et l'on introduit de l'eau de mer en quantité telle que la portion de sel introduit, soit de nouveau égale à celle contenue dans la portion rejetée. La quantité de sel contenue dans la chaudière reste alors constante tout en produisant de la vapeur.

Ce système exige, comme on le voit, une pompe spéciale d'évacuation et fait perdre une quantité de chaleur spécifique particulière.

Ainsi de $\frac{1}{32}$ on va à $\frac{5}{32}$, et l'on restitue à ce moment, en échange d'un volume d'eau contenant, en poids, une quantité quelconque, un volume 5 fois plus grand. Pour arriver à ce résultat, il suffit de donner aux pompes d'alimentation et d'évacuation, des sections d'un rapport convenable. Ce rapport est à peu près de 5 à 1. (Il ne l'est pas exactement, cela tient aux variations produites par les jeux, les mouvements irréguliers et les usures.)

Un appareil spécial appelé sali-mètre est destiné à reconnaître le degré de concentration de l'eau de la chaudière.

On peut imaginer beaucoup de dispositions fondées sur le principe des corps flottants pour arriver à cette connaissance. On peut également se fonder sur le principe thermométrique de la plus grande température d'évaporation des dissolutions salines.

Pour modifier le rendement de la pompe d'alimentation, il suffit de modifier d'une manière correspondante la course de son piston, en adaptant la tige de manœuvre à un bras de levier plus ou moins long.

La chaleur de l'eau évacuée est d'ailleurs employée à réchauffer un serpentin par lequel arrive l'eau froide.

Chaudières à distillation de hale — On a proposé divers moyens pour réemployer l'eau distillée du condenseur sans la mêler avec de l'eau de refroidissement. Un des moyens proposés consiste à refroidir le condenseur à l'aide de surfaces derrière lesquelles circule de l'eau froide, et à restituer les pertes par fissures en eau douce emportée. La complication de ce genre d'appareils, et la difficulté d'obtenir une surface refroidissante assez considérable et assez active pour enlever toute la chaleur, ont fait renoncer, assez généralement à leur usage.

Choix des houilles — Le dégagement des gaz qui se séparent des houilles à toute température, peut donner lieu à des accidents et à des inconvénients particuliers.

Les explosions de feu grisou peuvent avoir lieu dans les soutes des bateaux à vapeur, et donner lieu, au moins, à des incendies ou à des déperditions considérables pour la combustion. De là, la nécessité de choisir des charbons qui dégagent peu de gaz.

Dans la marine militaire, une autre qualité à rechercher dans les charbons, est qu'ils dégagent peu de fumée noire, et ne rendent pas ainsi toutes les manœuvres visibles de loin. Les houilles analogues aux anthracites, répondent mieux à ce but que les houilles ordinaires.

Les fumées très épaisses noircissent d'ailleurs les voilures des navires de guerre, que l'on combine, en général, avec les moteurs mécaniques, pour arriver au maximum de vitesse.

§. 6.

Machines à vapeur mixtes.

Les machines à vapeur mixtes sont fondées sur l'idée d'utiliser la chaleur perdue par la vapeur d'eau dans le condenseur des machines à haute pression, pour échauffer des liquides s'évaporant à des températures moins élevées que l'eau, et absorbant, par suite, moins d'unités de chaleur.

En thèse générale, une machine de ce genre devra donc présenter successivement (fig. 110)

- 1° Une chaudière à vapeur d'eau ordinaire (tubulaire);
- 2° Un premier cylindre mu par la vapeur d'eau;
- 3° Un condenseur traversé par une série de tubes dans lesquels circule la vapeur d'éther, et où la température est maintenue entre 50° et 60° . La tension de la vapeur d'éther à cette température, est d'environ 2 atmosphères.
- 4° Un deuxième cylindre où circule la vapeur d'éther;
- 5° Un deuxième condenseur à tubes où la vapeur d'éther se condense, dans les tubes, et où circule, entre les tubes, une masse d'eau froide à 10° .

La vapeur d'éther descend alors au fond du 2^e condenseur et s'y rassemble sous forme de liquide. Une pompe l'en retire et le fait revenir au fond du premier condenseur. À partir de ce moment le jeu de l'éther recommence.

On voit que c'est une circulation continue, et l'éther n'est jamais en communication avec l'air atmosphérique.

Quoiqu'il en soit, l'éther présente le grave inconvénient d'être excessivement inflammable et explosible à l'état gazeux.

On limite l'atmosphère explosible par des cloisons hermétiques, et on ventile énergiquement.

La perte d'éther, par évaporation a été d'environ $\frac{1}{2}$ litre par heure. Prix: 1 franc.

Le navire le Du Tremblay fit le trajet de Marseille à Alger en 53 heures $6\frac{1}{2}$ navires, avec une force de 70 chevaux seulement.

La vapeur d'eau travaillait à 1 atmosphère $\frac{3}{4}$;

L'éther à 1 atmosphère $\frac{7}{8}$;

La détente pour les deux machines, à $\frac{1}{2}$;

La pression dans le 1^{er} condenseur de 0,55;

La pression dans le 2^e condenseur de 0,10 seulement;

La consommation de charbon de 1^k.10 à 1^k.16;

par heure et par force de cheval.

Dans ces derniers temps, on a proposé le chloroforme qui n'est pas explosible; mais, en revanche, il asphixie, et sa présence n'est pas annoncée par une odeur assez forte.

§. 7.

Des Machines à air chaud.

La théorie des machines à air chaud a déjà été exposée sommairement dans l'introduction historique de ce cours (page 36).

On sait que le principe sur lequel elles reposent, consiste à prendre un volume d'air atmosphérique déterminé; à le comprimer de façon à réduire ce volume de moitié, et à récupérer la force motrice perdue pour cela, en échauffant l'air comprimé, de façon à doubler son volume, sans diminuer sa pression. Prenant ensuite ce volume doublé, et le faisant travailler dans un cylindre, sur un piston mobile à pleine pression d'abord; et puis, en le détendant jusqu'à la pression de l'atmosphère, on produira une force double environ de celle qui a été consommée pour réduire de moitié le volume de l'air comprimé. Puis, au lieu de reverser directement l'air primitivement échauffé dans l'atmosphère à sa température de 266° , on économisera une partie de cette chaleur, en la déposant de nouveau dans l'appareil qui avait servi à le chauffer (paquet de toiles métalliques régénérateur) et en l'employant ensuite à échauffer une nouvelle portion d'air comprimé, servant à répéter la même opération.

La machine destinée à réaliser ces effets est représentée théoriquement (fig. 111) et en proportions détaillées avec la position relative réelle des pièces (fig. 113, 114, 115 et 116).

Le cylindre alimentaire A et le cylindre travailleur B sont situés l'un au dessus de l'autre, de manière à avoir le même axe géométrique.

Dans le cylindre alimentaire se meut un large piston creux P, dont les joints avec l'enveloppe du cylindre, sont rendus hermétiques par les dispositions ordinaires, mais à une assez grande distance du foyer, vers le haut du piston.

Au piston inférieur se relie le piston supérieur P' par le moyen de tiges verticales résistantes.

Le cylindre supérieur est donc fermé en bas, par son piston, et en haut il porte deux soupapes figurées en K et L.

Le régénérateur V débouche au bas du cylindre alimentaire par l'orifice.

Un réservoir d'air comprimé est en R.

Un foyer destiné à compléter l'échauffement de l'air dans le grand cylindre en D.

Les soupapes S et S' sont mues, indépendamment l'une de l'autre, par un appareil assemblé sur l'axe de rotation général.

Cela posé, pour mettre en jeu et faire marcher la machine, on commencera par chauffer l'appareil jusqu'à ce que le cylindre ait acquis une température suffisante; puis on

refoule de l'air dans le réservoir R au moyen d'une pompe à bras auxiliaire. Lorsqu'on est arrivé à la pression voulue, tout est prêt pour mettre la machine en marche. On agit alors légèrement sur le volant et le mouvement s'établit aussitôt.

Il faut avoir soin, lorsqu'on charge le réservoir, de tourner le volant de telle sorte que la soupape d'admission S reste fermée; autrement, le réservoir communiquant avec le cylindre, la même pression s'établit dans tout l'appareil et dans la boîte à toiles. En même temps, la soupape S se trouvant fortement pressée sur son siège, l'air ne peut sortir, et l'on éprouve une résistance si grande à faire mouvoir le volant, qu'il est impossible de déterminer le mouvement de la machine.

Une seconde précaution qu'on doit prendre, c'est de chauffer le cylindre suffisamment. Si la température n'est pas assez élevée, l'air n'étant admis dans le cylindre que pendant une partie de la course, il arrive qu'à la fin de la course ascendante, sa pression est inférieure à celle de l'atmosphère, dans le cylindre, et dans la boîte. La soupape S s'ouvre alors avant la fin de la course, l'équilibre de la pression s'établit à l'intérieur et à l'extérieur de l'appareil, l'écoulement de l'air expiré dans l'atmosphère, ne peut plus avoir lieu que très lentement, et la machine se ralentit beaucoup. Une heure et demie de feu préliminaire bien conduit, suffit pour la faire marcher, mais il faut deux ou trois heures de feu pour que la machine arrive à donner toute sa force.

Jeu de la Machine — Cela étant, voici ce qui se passera dans le jeu régulier de l'appareil.

Lorsque le piston P est au bas de sa course, la soupape S reste fermée, tandis que la soupape S s'ouvre par l'action des camers. L'air refoulé par la pompe dans le réservoir R se précipite par l'ouverture de la soupape S dans la capacité qui renferme les toiles métalliques.

Il traverse la pile des toiles, y prend de la chaleur très rapidement, 240° , puis arrive par l'ouverture et dans le cylindre. Là, il achève de s'échauffer à 266° par l'effet du rayonnement des parois du cylindre, se dilate, sans changer notablement de pression et soulève le piston P. La dilatation et l'échauffement complet de l'air ne sont d'ailleurs pas instantanés, et ces phénomènes continuent à se produire pendant tout le temps de la course ascendante du piston. La soupape S d'admission se ferme ensuite avant que le piston ait terminé sa course, et l'air échauffé n'agit plus que par sa dilatation ou sa détente, suivant les dimensions du cylindre et les dispositions de l'appareil.

Dans la machine envoyée au Havre, et dont les fig. 113, 114, 115, 116 représentent les plans, coupes et élévations, l'admission est coupée aux $\frac{4}{5}$ environ de la course. Nous ferons remarquer, d'ailleurs, que le réservoir d'air a pour objet de maintenir, aussi constante que possible, la pression de l'air froid arrivant dans le générateur pendant toute la durée de l'admission.

Pendant que le piston P monte, celui P de la pompe s'élève aussi et refoule dans le réservoir la quantité d'air aspirée, dans la course descendante qui précède.

Lorsque le piston P est arrivé au haut de sa course, la soupape S d'échappement s'ouvre, l'air chaud renfermé dans le cylindre moteur s'échappe à travers l'orifice et dans les toiles métalliques, y abandonne la plus grande partie de sa chaleur et sort dans l'atmosphère par l'orifice d'échappement S. Le piston P' de la pompe redescend en même temps que le piston P.

A l'instant où il commence à descendre, la soupape K s'ouvre, et une nouvelle quantité d'air est aspirée pour être refoulée ensuite par la pompe dans le réservoir, à travers la soupape L, pendant la course ascensionnelle suivante :

Dans les figures de détail, les soupapes S et S' sont disposées autrement que dans la figure théorique; au lieu d'être concentriques, elles sont l'une à côté de l'autre, et se projettent l'une sur l'autre dans la première coupe.

La manière de prendre le mouvement sur les tiges qui relient le piston P au piston P', consiste, d'ailleurs, dans un mouvement de va-et-vient au moyen d'un levier courbé, centré en ω (fig. 115), et ce mouvement de va-et-vient fait marcher une bielle qui s'adapte au manneton de l'arbre du volant.

Dans la machine réellement exécutée (navire calorique), on ne travaille pas à une pression aussi élevée.

Voici les dimensions :

Cylindre alimentaire, diamètre.....	4 ^m , 27
Course commune.....	1, 83
Cylindre travailleur.....	3, 48
Hauteur totale.....	9, 14
Nombre de toiles.....	200
Diamètre des fils.....	0 ^m , 0016
Épaisseur du régénérateur.....	0, 30
Surface motrice A.....	143000 cent. q.
Vol. piston moteur.....	26 ^{m.c.} 15
Vol. piston résist.....	17 ^{m.c.} 40
Pression totale par centim. q.....	1 ^{k.} 56
Différence avec press. atm.....	0, 56
Température la plus élevée.....	249°

Évaluons approximativement, par le calcul, la quantité de travail développée dans le cylindre B, soient p_0 la pression initiale, v_0 le volume initial, p et v la pression et le volume final.

On sait que l'effet produit pendant cette première période, sera :

$$v_0 p_0 \log \frac{P}{p_0} + p v - p_0 v_0$$

Or, les deux derniers termes se déterminent en vertu de la loi de Mariotte; donc le résultat définitif n'est que de :

$$v_0 p_0 \log \frac{P}{p_0}$$

Maintenant, dans le cas qui nous occupe :

$$p_0 = 10,000^k \text{ (pression atmosphérique)}$$

$$v_0 = 17^{\text{m.c.}} 40$$

$$p = 15,600^k$$



Et l'on trouve pour expression du travail :

$$E = 77,600 \text{ kgm.}$$

Le volume de $17^{\text{m.c.}}40$ introduit dans D, se trouve ainsi réduit à $11^{\text{m.c.}}15$ (en raison inverse des pressions). Ce volume se trouvera à 10° . En le faisant passer par le régénérateur et le fond du cylindre A, on élèvera sa température à 249° , toujours sous la pression de $1^{\text{k.}}56$; son volume deviendra, en vertu d'une formule connue :

$$V = v \frac{1 + \alpha t}{1 + \alpha t'}$$

Et en substituant les chiffres convenables, on aura :

$$V = 20,79^{\text{m.c.}}$$

Dans ce calcul, nous négligeons les effets des changements de température dus aux variations des pressions elles-mêmes. Quoiqu'il en soit, l'on voit, qu'en définitive, on obtient un volume de $20^{\text{m.c.}}79$ en présence d'un volume de $11,15$.

Le volume de $20^{\text{m.c.}}79$, en se formant, produira un travail de $v_0 p_0'$. En formant la communication à la moitié environ de la course, on marchera avec détente, et il s'ajoutera une nouvelle quantité de travail.

En effet, le volume total du cylindre moteur est de $26^{\text{m.c.}}15$. Conséquemment, en supposant la température constante à partir de ce point, pour pouvoir appliquer la loi de Mariotte, il sera facile de calculer la pression finale, et en appliquant encore la formule logarithmique, mentionnée plus haut, on trouve :

$$15600^{\text{k.}} \cdot 20,79^{\text{m.c.}} \left(1 + \log. \frac{156}{124}\right)$$

Donc, à retrancher :

$$26^{\text{m.c.}}15 \cdot 10,000^{\text{k.}}$$

Ce qui donne, en effectuant les calculs :

$$E' = 138\,229 \text{ kgm.}$$

Ainsi, l'effet total de la machine sera :

$$E' - E = 60\,629 \text{ kgm.}$$

Quatre appareils de ce genre produiront environ :

$$T = 240,000 \text{ kgm.}$$

Or, l'arbre de rotation fait $6^{\text{t.}}$, 5 tours par 1'. Donc, en effectuant encore ce calcul, on trouve, pour effet théorique, 350 chevaux.

En admettant pour perte par les frottements, etc, 0,50, on trouve :

175 chevaux.

Or, la vitesse obtenue a été, en effet, analogue à celle d'une vitesse ordinaire de 175 chevaux. C'est peu de force, mais, en revanche, la consommation de charbon n'a été que de 177^k par heure; c'est-à-dire 1^k par heure et par force de cheval; quatre fois moins que les meilleures machines de navigation connues.

Si l'on considère maintenant que 1500 à 2000 tonnes de charbon sont nécessaires pour un voyage transatlantique, avec les navires ordinaires, l'économie des $\frac{3}{4}$ donnera un résultat énorme comme espace, pouvant être utilisé pour la charge en marchandises.

Cherchons encore le volume et le poids de l'air consommé. Les 17^{me} 40 d'air pèsent 21^k.

Comme il y a 6 coups $\frac{1}{2}$ de piston et 4 machines, le résultat est 26 fois le volume du cylindre, et, en une heure le poids d'air introduit dans les cylindres, sera:

$$17,40 \times 26 \times 60 = 32760^k.$$

Ainsi, en somme, 32760^k d'air sont introduits par heure. Cette masse d'air est à élever à 252°. La température initiale étant 10°, le nombre de calories à fournir à l'air, sera:

$$32760 \times 249 \times 0,237^{\text{cal}} = 1933266^{\text{cal}}.$$

Or, la combustion de 1^k de charbon, développe 4700 unités de chaleur. Les 177^{kil} reconnus par l'expérience, donneront:

$$177 \times 4700 = 831900^{\text{cal}}.$$

La différence entre les deux quantités de chaleur représente l'efficacité du régénérateur, et fait voir son importance capitale.

La vitesse de l'air dans les mailles du régénérateur, sera donnée par l'équation:

$$v. 1,62. 60 = 26.2. 6,5.$$

Ce qui donne:

$$v = 3^m, 50.$$

Cherchons l'abaissement de température du régénérateur à chaque passage.

Le poids du cuivre en mailles, contenu dans le régénérateur est de 1500 kil. La chaleur spécifique du cuivre étant 0,095, le nombre x des degrés perdus par le régénérateur sera donné par l'équation

$$1. 0,237. 232^{\circ} = 72^{\text{kil}} \cdot 0,095 x.$$

Ce qui fait:

$$x = 8^{\circ}, 05.$$

Les principaux inconvénients de machines à air chaud, sont leurs grandes dimensions, la difficulté de leur action directe, la difficulté de maintenir les joints étanches à la haute

température qu'elles exigent, les vapeurs et les décompositions des huiles et des graisses qui en résultent, les oxydations et les dilatations produites par la même cause.

C'est à l'avenir de les résoudre; car, quelles que soient les forces nouvelles et les moteurs nouveaux dont on puisse encore faire l'application à l'industrie, il y aura toujours désormais des machines à air chaud, comme il y aura toujours des machines à vapeur. A chaque nature spéciale de travail et aux circonstances locales de chaque espèce, correspondent des machines et des moteurs d'une nature spéciale.

Chapitre VII.

Description générale du jeu d'une Locomotive. Calcul de la relation qui existe entre l'effort exercé sur le piston et le travail produit.

Nous avons vu dans le Chapitre I, que le poids maximum, accordé par la Compagnie du chemin de fer de Liverpool, aux machines locomotives qui devaient disputer le prix qu'elle proposait, était de six tonnes; aucune des machines présentées n'atteignit ce poids. La fusée ne pesait que quatre tonnes environ. Depuis cette époque, le poids des machines locomotives a toujours été en augmentant graduellement. On en construit aujourd'hui qui pesent jusqu'à 27 tonnes. On reconnut, en effet, que la dépense de combustible, pour l'unité de poids transportée à l'unité de distance, diminuait avec la force de l'appareil, et l'augmentation du nombre des tubes à fumée, et par conséquent avec l'accroissement du volume de la chaudière. Ainsi, R. Stephenson, qui n'avait mis que vingt-cinq tubes dans la fusée, construisit bientôt des machines où il en plaça 60, puis 100; et aujourd'hui quelques machines en ont jusqu'à 200.

Après avoir indiqué d'une manière générale, comme nous venons de le faire, la marche des modifications successives apportées aux machines locomotives, depuis l'apparition de la fusée jusqu'à nos jours, nous allons expliquer le jeu de l'une de ces machines. Dans la suite du cours, on reviendra sur chacune des pièces dont nous allons signaler l'existence et on étudiera avec soin sa construction et les formes différentes que les ingénieurs ont eu devoir lui donner à différentes époques.

§. 1^{er}.

Etude générale d'une locomotive.

Cette étude pourra être considérée comme relative à toutes les machines à vapeur: car toutes sont mises en mouvement par des méthodes analogues et soumises aux mêmes principes, toutes sont composées des mêmes éléments, et les difficultés qu'offrent l'assemblage de leurs diverses parties et leur construction en général, se représentent dans les locomotives. Enfin, l'étude de ces

machines fait voir les meilleures solutions qui ont été trouvées jusqu'ici, pour résoudre les problèmes auxquels l'emploi de la vapeur donne lieu.

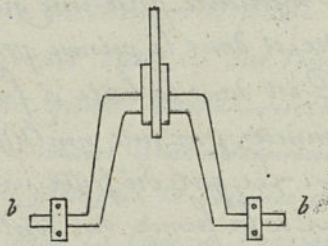
La machine que représente la planche 26, est une machine à cylindres intérieurs et à essence condée. On a essayé de mettre les cylindres sur les côtés de la chaudière; mais cette disposition, dont nous reparlerons plus tard, n'offrait pas davantage capital, et on tend aujourd'hui à revenir aux machines à cylindres intérieurs. L'enveloppe extérieure de la machine est formée d'un tronc cylindrique horizontal, se raccordant antérieurement avec une partie prismatique à base carrée, terminée en dessus par une portion de cylindre et une cheminée, et postérieurement avec une autre portion prismatique, généralement surmontée d'un dôme. Le cylindre est terminé en avant par une plaque en tôle, qui le sépare de la partie prismatique antérieure, qu'on nomme boîte à fumée. Le devant de cette boîte à fumée est formé d'une plaque mobile autour d'une charnière verticale. Quand cette plaque est fermée, la boîte à fumée n'a d'autre issue que la cheminée. Le prisme postérieur n'est pas séparé du cylindre: il est fermé latéralement par deux plaques en tôle, et postérieurement par une cloison percée d'une petite porte; la partie inférieure du prisme est ouverte. Il porte à l'intérieur un autre prisme plus petit, dont il est distant d'environ 0^m,10, et qui porte le nom de boîte à feu.

Les parties inférieures de ses parois et celles qui avoisinent la porte, se rapprochent de l'enveloppe extérieure, à laquelle elles sont unies. Enfin, la partie inférieure porte une grille, qui ferme inférieurement la boîte à feu. L'espace compris dans le cylindre et dans le prisme postérieur, se trouve donc fermé de toutes parts, et l'on peut y mettre de l'eau. C'est dans la boîte à feu qu'on place le combustible. La fumée et la flamme se rendent dans la cheminée, par une multitude de tubes horizontaux, qui réunissent la boîte à feu à la boîte à fumée. Les gaz du foyer vaporisent l'eau en traversant la chaudière. On n'a pas mis de tubes abducteurs de la fumée sur toute la hauteur du cylindre, afin de laisser à la vapeur un espace, entre le sommet de la chaudière et l'eau, et une distance suffisante entre le liquide et l'origine du tube qui prend la vapeur: cet espace, qui sert de réservoir à la vapeur, contribue à en séparer l'eau, qu'elle entraîne souvent à l'état de mélange mécanique; il est important qu'elle soit aussi sèche que possible. De plus, il faut que les tubes soient toujours immergés, afin qu'ils ne puissent pas devenir rongés, ainsi que la partie supérieure de la boîte à feu. Le conduit qui prend la vapeur, s'élève autant que possible dans le dôme, afin d'avoir une vapeur plus sèche, traverse le réservoir à vapeur de la chaudière, se bifurque en arrivant dans la boîte à fumée qu'il contourne, et se termine, près des cylindres, dans deux espaces particuliers, qui ont reçu le nom de boîtes à vapeur. Dans la partie qui traverse la chaudière, ce conduit contient un appareil nommé régulateur, qui sert à interrompre ou à ouvrir la communication entre la chaudière et les cylindres. Le tuyau à vapeur a été recourbé dans la boîte à fumée, pour laisser libres les orifices des tubes de la chaudière, afin qu'on puisse les nettoyer avec une tige de fer, après avoir ouvert la porte antérieure de la boîte à fumée.

Les boîtes à vapeur sont des espaces rectangulaires, en contact immédiat avec les cylindres. Ces derniers contiennent chacun un piston muni d'une tige. Chaque face du piston est alternativement en communication avec la chaudière et l'air extérieur; de sorte que l'une des faces est pressée par la vapeur, à la tension de la chaudière, et que l'autre communique avec l'atmosphère. La tension de la vapeur de la chaudière est de 4, 5 et même quelquefois 7 atmosphères; la vapeur en contact avec

l'air en prend la tension; on conçoit donc que le piston, soumis, d'un côté, à une pression, de plusieurs atmosphères, et de l'autre, à la pression d'une seule, soit poussé par la vapeur venant de la chaudière jusqu'à l'extrémité du cylindre; quand il est arrivé à ce point, la face qui était en communication avec l'air extérieur, est mise en communication avec la chaudière, et l'autre avec l'atmosphère. Aussitôt, le piston, pressé en sens inverse, rétrograde jusqu'au bout du cylindre; les communications sont alors interverties de nouveau, et le piston revient. On obtient ainsi un mouvement de va-et-vient, dont on se sert pour faire mouvoir la machine.

L'appareil de distribution de vapeur qui sert à intervertir les communications, se nomme tiroir; il est contenu dans la boîte à vapeur. La tige du piston, qui éprouve un mouvement de va et vient, est maintenue entre deux guides, qui forment un appareil nommé glissière. Elle porte une bielle terminée par deux articulations: l'une d'elles porte un appareil particulier, qui la relie à la manivelle d'un essieu courbé ou vilbrequin. Cette bielle sert à transformer un mouvement de va et vient du piston, en un mouvement de rotation de l'essieu. L'effet qui se produit est analogue à celui de l'instrument du remouleur ou gagne-petit. Le bouton de la meule de cet instrument est animé d'un mouvement circulaire continu, tandis que la corde qui réunit la planchette à la meule, joue le rôle de la bielle. L'extrémité de la manivelle du vilbrequin porte un collier auquel s'attache la bielle. Au moyen de cet appareil, le piston communique un mouvement de rotation à l'essieu bb et à la roue qui lui est fixée. Le vilbrequin est un appareil fort simple, qui est fort employé dans les machines. Tantôt c'est l'essieu qui communique un mouvement alternatif par la bielle, comme cela a lieu dans les pompes mues



par des roues hydrauliques; tantôt c'est un piston qui donne par la bielle à l'essieu un mouvement circulaire continu, comme dans les locomotives.

Le mouvement de l'essieu courbé offre plusieurs particularités importantes. Quand le bras de la manivelle, la bielle et la tige du piston sont en ligne droite, on voit qu'une force appliquée au piston ne saurait mettre l'essieu en mouvement. Les points où se trouve dans ce cas l'extrémité de la manivelle, se nomment points morts. On voit donc que, dans une locomotive, un seul cylindre agirait d'une manière irrégulière et produirait une marche saccadée. C'est pour cette raison qu'on emploie deux cylindres, qui sont disposés de sorte que l'un produise son plus grand effet, quand la manivelle de l'autre est à un point mort. Les manivelles sont pour cela placées à angle droit. On obtient ainsi une force à peu près constante. Il arrive quelquefois qu'un des pistons se casse. La machine est disposée de telle sorte qu'on puisse l'enlever facilement. On peut alors marcher avec un seul piston dont la marche irrégulière rend les premiers mouvements difficiles, mais qui suffit, lorsque la vitesse acquise vient aider à continuer le mouvement quand la manivelle est aux points morts.

Les deux extrémités de l'essieu courbé sont placées dans des parties fixes très solides. Comme il s'y produit un frottement considérable, on s'arrange de sorte que les surfaces qui glissent l'une contre l'autre, soient toujours humectées d'un peu d'huile ou de graisse fondue. Ces parties

fixes portent le nom de paliers ou de boîtes à graisse. Elles sont attachées à une partie solide se reliant à une barre de fer qui règne sur toute la longueur de la machine, et qu'on nomme longeron. Ce longeron a 0^m,20 de hauteur sur 0^m,025 d'épaisseur. Les roues principales, dites roues motrices, sont calées sur l'arbre qui reçoit l'action de la vapeur. Il y a sur le devant de la locomotive, une seconde paire de roues, également maintenues par des boîtes à graisse. Le centre de gravité de la machine correspond à peu près à l'axe moteur : une troisième paire de roues supporte la partie postérieure de la locomotive. Des pièces de forge, espèce d'arcs-boutants, joignent la chaudière au longeron. Pour éviter un mouvement saccadé, produit par les aspérités du chemin, et qui fatigueraient la machine, on fait supporter le longeron par deux tiges verticales, fixées aux extrémités d'un ressort. Celui-ci est porté par une tige verticale, qui se bifurque sur la boîte à graisse. Chaque boîte à graisse porte ainsi un ressort. Tantôt le longeron est compris entre la roue et la chaudière : on dit alors que la machine est à chassis intérieur ; tantôt la roue se trouve entre le longeron et la chaudière, et la machine est à chassis extérieur ; dans ce dernier cas, les pièces de forge qui supportent la chaudière, sont d'une forme différente.

La vapeur qui a travaillé dans les cylindres, doit être mise en communication avec l'air extérieur. On se sert pour cela d'un conduit qui communique avec les tiroirs, et qui se recourbe dans la boîte à fumée, soit en avant, soit sur les côtés. L'orifice de ce tuyau d'échappement est à l'origine de la cheminée ; la vapeur qu'il y lance, à chaque quart de tour de la roue motrice, communique une grande vitesse aux gaz de la cheminée, et produit derrière eux un vide, qui appelle l'air dans le foyer.

Les tiroirs qui servent à faire communiquer chaque face du piston alternativement avec la chaudière et l'air extérieur, sont mis en mouvement par un excentrique. Cet appareil est une espèce de vilbrequin, que l'on fixe à l'essieu des roues motrices. C'est donc la machine elle-même qui fait mouvoir son appareil de distribution de vapeur. Et chaque cylindre correspond deux excentriques, dont l'un sert à faire avancer la locomotive, et l'autre à la faire reculer.

Il nous reste à dire quelques mots des pompes alimentaires. L'eau de la chaudière se transformant en vapeur, serait bientôt épuisée, si l'on ne la renouvelait pas. Il importe d'ailleurs de maintenir cette eau à un niveau presque constant, afin que les tubes soient toujours immergés. Une pompe est mise en mouvement, soit par un excentrique fixé à l'arbre moteur, soit par la tige même du piston, soit par un autre organe de la machine. Le piston de la pompe se meut tant que la machine marche, mais au moyen d'un robinet, le mécanicien peut fermer le tuyau qui communique au réservoir, et alors le piston travaille à blanc. Un appareil particulier permet au mécanicien de voir quand il est utile d'introduire de l'eau dans la chaudière. Le réservoir d'eau est assez considérable.

Une locomotive peut faire 40 Kilomètres sans prendre d'eau, comme on a calculé qu'une machine vaporisait 70^{kg} d'eau par Kilomètre, elle doit porter environ 3000^{kg} d'eau pour pouvoir faire les 40 Kilomètres ; en ajoutant 1000^{kg} pour les cas imprévus, les réservoirs doivent contenir 4000^{kg} d'eau. Quelquefois ils en contiennent 5000, 6000 et même 7000^{kg}. Une machine brûle en charbon le 7^e environ du poids de l'eau qu'elle dépense. Elle doit donc remorquer environ 1000^{kg} de combustible. Un charriot, qu'on nomme tender, est destiné à porter le charbon

et le réservoir d'eau; ce dernier communique par un tuyau au tube de la pompe alimentaire de la locomotive.

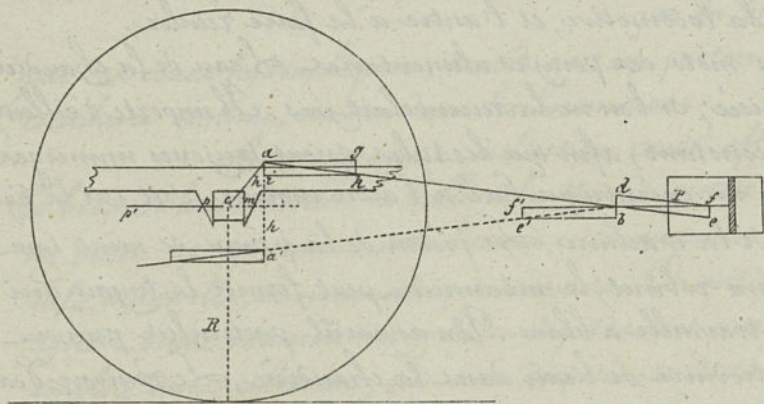
Dans la machine que nous venons de décrire sommairement, les cylindres sont placés entre les roues et agissent sur un essieu doublement courbé. Cette disposition présente quelques avantages, mais elle nécessite l'emploi d'un essieu courbé. Cette pièce est d'une exécution difficile et coûteuse, et est sujette à se rompre. Dans d'autres machines, les cylindres sont extérieurs au chassis, et les pistons communiquent le mouvement aux roues, au moyen de boutons fixés à une certaine distance de l'axe. Cette disposition est presque exclusivement employée dans l'Amérique du Nord; la figure 117 donne une idée de la disposition ordinairement préférée. Le cylindre à vapeur est en V, et le mouvement est communiqué, par le bouton B, à la roue motrice. Un cylindre semblable est placé de l'autre côté de la boîte à fumée. Le piston qu'il renferme agit sur un bouton situé dans un plan passant par l'axe de l'essieu et faisant un angle droit avec celui qui contient le premier bouton. La roue motrice est à l'arrière; le devant de la machine est porté sur une espèce de charriot à quatre roues, avec lequel il s'assemble avec une cheville ouvrière; cette construction facilite le passage dans les combes à petit rayon.

Nous allons maintenant étudier la manière dont la pression de la vapeur sur le piston produit la marche de la locomotive. Quelques principes de statique et de dynamique suffisent pour l'expliquer.

Une force provenant de la machine elle-même, ne peut la faire avancer, qu'en s'appuyant sur un point fixe. Ce point est évidemment celui où la roue est en contact avec le rail. Considérons un instant très court, pendant lequel on pourra regarder la roue motrice, et par suite la machine, comme éprouvant un mouvement circulaire autour du point o . Ce point sera alors la projection de ce que l'on nomme dans les Théories des mouvements d'un corps solide, l'axe instantané de rotation. Pendant ce temps très court, on peut regarder la roue et le vilebrequin comme formant un seul et même corps solide, tournant autour du point o .

La force P , qui est appliquée au piston, se transmet en b . Ici, elle se décompose en deux autres, l'une bd , perpendiculaire à la tige du piston,

qui sera détruite par la résistance de la glissière, et l'autre dirigée suivant la bielle. Celle-ci peut être considérée comme agissant sur le point a et comme la résultante de deux autres parallèles aux forces bd et be ; les deux triangles rectangles bfe et aik étant égaux, la force $ag = bf$ sera égale à la pression de la vapeur sur le piston. Si nous considérons la bielle comme très longue



comparativement à la manivelle, l'angle aKi sera toujours très petit, et la force ai négligeable, nous n'en tenons pas compte ici pour éviter des calculs compliqués. L'ensemble de la manivelle et de la roue, qui forme un seul corps, est donc soumis à une force P , égale à celle qui agit sur le piston, et transmet au chassis par la boîte à graisse, une pression P' qui est donnée par le théorème des moments $P'R = P(R+h)$; d'où $P' = P(1 + \frac{h}{R})$, expression dans laquelle h est la hauteur du point a au dessus du centre de la roue, et R le rayon de cette roue. Cette force P' pousse en avant le chassis, et par suite tout l'ensemble de la locomotive; mais la vapeur qui est contenue dans le cylindre, presse aussi le couvercle de ce cylindre, et en sens inverse du piston; elle tend ainsi à produire un mouvement de recul. La force qui fait progresser la machine est donc $P' - P$ ou $P \frac{h}{R}$.

Cette force est l'effort de traction qui fait avancer le convoi. On tire de ce calcul une autre conséquence: le point o étant fixe, pendant la rotation instantanée, on trouve aisément l'effort qu'il doit pouvoir supporter. On a deux forces qui agissent sur la locomotive; l'une P agissant en a , en produit une autre P' poussant, par l'intermédiaire de la boîte à graisse, le chassis en avant, de sens contraire à P . Le point o doit donc être capable de supporter un effort égal à $P' - P = P \frac{h}{R}$, qui est égal à la résistance du convoi à la traction. Cet effort du point o ne peut évidemment provenir que du frottement de la roue sur le rail. Si donc ce frottement est plus faible que $P \frac{h}{R}$, le point o cèdera, et la roue tournera sur elle-même. Si $P \frac{h}{R}$ est au contraire plus faible que le frottement, le convoi s'avancera sur la voie. Quand la machine éprouve un mouvement régulier uniforme, l'effort produit par le frottement est égal à la force qui entraîne le convoi, et a pour mesure $\frac{Ph}{R}$.

La quantité h est évidemment proportionnelle au sinus de l'angle aKf' de la bielle et du piston. Quand cet angle est nul, la force de traction est nulle, et la manivelle est à un de ses points morts.

Si nous supposons que le point a soit descendu plus bas que le centre de la roue, en a' , par exemple, et que le piston agisse par conséquent en sens inverse, nous aurons une décomposition de forces un peu différente, mais qui donnera les mêmes résultats. La force P du piston, dirigée maintenant suivant bf' , donnera naissance à une force be' , agissant dans la direction de la bielle, et qui pourra encore se décomposer en deux autres, dont l'une sera égale à P ; nous négligeons l'autre pour plus de simplicité. Cette force P produira en p sur le chassis une force $P' = P \frac{R-h}{R}$. La vapeur, agissant dans le cylindre, poussera, en sens inverse du piston, le couvercle du cylindre, la machine et le chassis, avec une force P . Le chassis sera donc sollicité par une force $P - P' = P - P(1 - \frac{h}{R}) = \frac{Ph}{R}$. La force de traction aura donc la même valeur que dans le premier cas. L'action de l'essieu sur le chassis aura lieu de l'autre côté de la boîte à graisse et en sens inverse du mouvement, tandis

que la pression P de la vapeur sur le couvercle pousse le châssis en avant, le frottement en o , en vertu du théorème de Statique relatif aux forces parallèles, sera égal encore à $P - P' = P \frac{h}{R}$ et représentera le frottement de la roue sur le rail.

Nous avons supposé la bielle très grande par rapport au rayon de la manivelle, afin de simplifier le raisonnement; on arriverait à un résultat parfaitement analogue, en ayant égard à l'inclinaison de la bielle et, par conséquent, à l'existence de la composante verticale de la force qui agit parallèlement à la bielle.

L'on remarque une grande usure sur les parois de la boîte à graisse, quand elle n'emboîte pas exactement le châssis. Cette usure est produite par la pression qui s'exerce alternativement sur chaque face de la boîte, suivant que l'extrémité de la manivelle est au dessus ou au dessous du centre de la roue motrice. Il importe donc beaucoup de ne pas laisser le moindre jeu entre le châssis et la boîte.

La force $\frac{Ph}{R}$ varie à chaque instant, avec h . Il est quelquefois important de connaître la force moyenne qu'on peut attendre d'une machine. La valeur de cette force est donnée par le théorème des forces vives. Ce théorème peut être exprimé par la formule.

$$\frac{1}{2} (\sum m v^2 - \sum m v_0^2) = E_m - E_r$$

dans laquelle m est la masse d'un point du système, v et v_0 ses vitesses au commencement et à la fin de l'instant considéré, et enfin E_m et E_r le travail moteur et le travail résistant. Si nous considérons la machine arrivée à un mouvement régulier uniforme, et pendant que la roue motrice décrit une circonférence entière, les vitesses v et v_0 , au commencement et à la fin de ce temps, seront égales, et le travail moteur produit égalera le travail résistant. Le travail moteur est évidemment celui des pistons, et le travail résistant celui de la résistance qu'exerce le convoi sur le châssis de la machine, ou de la force de traction. En désignant par D le diamètre du cylindre, la surface du piston sera $\frac{\pi D^2}{4}$, et si l'on nomme F et F' les efforts de la vapeur, par mètre carré, sur les faces du piston, la force P d'un piston sera $\frac{\pi D^2}{4} (F - F')$. Pendant que la roue motrice fait un tour, chaque piston parcourt deux fois la longueur c du cylindre; le travail de chaque piston, pendant ce temps, est de $2c \frac{\pi D^2}{4} (F - F')$, et celui des deux, de $4c \frac{\pi D^2}{4} (F - F')$ = $\pi c D^2 (F - F')$; c'est l'expression du travail moteur des pistons. Si l'on désigne par T la force de traction, le châssis parcourant pendant un tour de roue un espace $2\pi R$, le travail résistant sera $2\pi R.T$. Pendant un tour de la roue motrice, ce travail est égal au travail moteur des pistons, et l'on a $2\pi R.T = \pi c D^2 (F - F')$, ou bien

$$T = \frac{c D^2 (F - F')}{2R}$$

Cette expression fait voir que la force de traction est proportionnelle au carré du diamètre des cylindres. Elle peut être mise sous une autre forme, en observant que le volume du cylindre est

$\frac{\pi D^2 c}{4}$, et que les pistons engendrent quatre fois ce volume, pendant un tour de la roue motrice. $\pi D^2 c$ est donc le volume de vapeur usé pendant un tour de cette roue, désignons-le par V , et nous aurons :

$$2\pi RT = V (F - F')$$

soit t le temps d'un tour de roue, v la vitesse du convoi et V la quantité de vapeur dépensée par unité de temps, et nous aurons

$$T \cdot \frac{2\pi R}{t} = \frac{V}{t} (F - F'), \text{ ou } T v = V (F - F').$$

Donc la vitesse ou bien la force de traction sera d'autant plus considérable, que le volume de vapeur produit par seconde sera plus grand, ou la tension de cette vapeur plus forte. On conçoit donc que l'importance des dimensions des différentes parties de la machine ne soit que secondaire, tandis qu'il importe, au contraire, au plus haut degré, de produire la plus grande quantité de vapeur ou la plus forte tension possible. Ce résultat obtenu, on pourra disposer d'une grande force ou d'une grande vitesse.

Chapitre VIII.

Des roues et des essieux.

§. 1^{er}.

Roues en fonte et en fer.

Les roues sont des éléments principaux du matériel des chemins de fer. Pour en apprécier exactement tous les détails, les modifications et l'état actuel, nous suivrons la méthode historique qui a été adoptée jusqu'ici.

Les premières roues qui ont été employées étaient en bois, comme celles des voitures ordinaires. On s'aperçut bientôt qu'elles n'étaient pas capables de résister à la vitesse des chemins de fer, et l'on dut chercher une matière plus dure que le bois et facile à façonner. La première idée qui se présenta, fut de faire des roues en fonte. Il y a quinze ou vingt ans, toutes les roues employées sur les chemins de fer étaient en fonte, comme celle qui est représentée par les fig. 118 et 119. On ne tarda pas à reconnaître les inconvénients de la fonte. Cette matière est moins dure que le fer qui forme les rails, et les roues s'usèrent rapidement, sous la pression considérable qu'elles avaient à supporter. La jante se creusait en peu de temps, surtout vers le milieu, et lorsque les oscillations de la roue, parallèlement à la direction des essieux, écartent le rebord du côté intérieur du rail, la roue ne porte plus que par la saillie a qui reste en dehors, sur le côté extérieur du rail et s'éraille rapidement. On peut observer cet effet sur tous les chemins de fer. Les roues en

fonte servent encore aujourd'hui quelquefois pour les terrassements au wagon. Si l'on emploie du fer miéplat, placé de champ, pour servir de rails, ceux-ci pénètrent bientôt les roues, et, au bout d'un mois, elles sont quelquefois hors de service. Un autre désavantage des roues en fonte est que, dans une même paire de roues, l'une peut être formée d'une fonte plus dure que l'autre. L'usure étant alors inégale, les roues roulent sur des circonférences inégales, aussi, et un frottement de glissement doit nécessairement se produire.

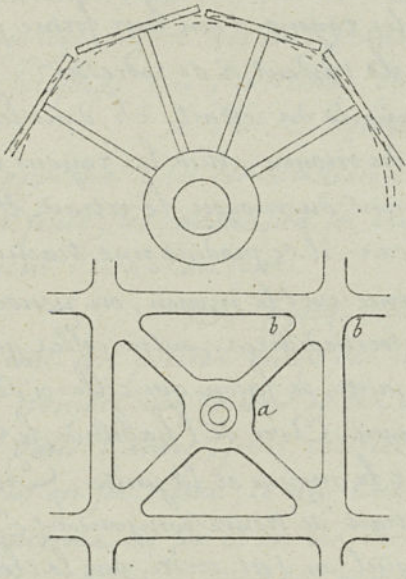
Le premier perfectionnement apporté aux roues en fonte, a été de les fonder en coquille. Dans cette espèce de moulage, la fonte, au lieu d'être coulée dans un moule entièrement en terre ou en sable, est versée dans un moule dont la circonférence est formée d'un cercle en fonte ou en fer tourné, suivant le profil adopté pour la jante. La fonte se refroidit très rapidement, grâce à la conductibilité des pièces métalliques avec lesquelles elle se trouve en contact. Elle reçoit ainsi une espèce de trempe qui lui fait acquiescer une grande dureté. La fonte grise employée se trouve ainsi transformée, sur une petite épaisseur, en fonte blanche. En chauffant de nouveau la pièce, elle reprendrait son premier état et perdrait de sa dureté. Cet effet est le même que celui produit par le recuit sur les pièces d'acier trempé.

La partie métallique du moule porte le nom de coquille; on donne au sable la propriété de s'agglutiner légèrement, en le mêlant à une petite quantité d'argile. La circonférence de la roue se solidifiant la première, se refroidit aussi plus vite que le moyen et les rayons. En moment où ces parties passent à l'état solide, leurs molécules sont en équilibre entre elles; mais en se refroidissant, elles tendent à éprouver un retrait, et sont ainsi sollicitées par une force, à laquelle la circonférence, depuis longtemps durcie, les empêche d'obéir. Cette tension du centre est énorme, et rend les roues fragiles comme du verre, quand la rupture ne se produit pas immédiatement.

Les roues sont également fragiles, quand on ne se sert pas d'un moule en coquille. Quand on les coule, les rayons et la jante se solidifient les premiers, à cause de leur faible épaisseur; il en résulte que le moyen, en se contractant au moment de sa solidification et pendant son refroidissement, exerce sur les parties déjà solidées, un effort très considérable auquel elles ne peuvent obéir. Les molécules se trouvent ainsi dans un état forcé, qui enlève à la roue une grande partie de sa solidité.

Si la fonte n'est pas très homogène et très douce, ce qui arrive fort souvent, la roue se brise avant même d'être complètement froide. Les questions auxquelles le retrait donne lieu, sont très importantes; il faut que le modèle de la pièce à fonder soit tel, que le refroidissement se fasse également partout. Les diverses qualités de fonte éprouvent des retraits différents; quelques-unes le supportent mal et se brisent ou se déforment. Les fondeurs acquiescent souvent une grande habitude des fontes, et reconnaissent leurs propriétés d'après leur provenance. Quand une pièce en fonte à un certain volume, la partie extérieure se solidifie avant l'intérieure et ne peut suivre celle-ci dans son retrait; il arrive quelquefois alors qu'elle se fend. Ce phénomène est analogue à celui qui a donné naissance aux grands phénomènes géologiques. Dans les roues fondues en coquille, l'épaisseur considérable de la circonférence l'empêche seule de se plisser sous l'action du retrait des rayons et du moyen. Cette action s'est produite dans une espèce de roues en fer forgé, dont le moyen seul était fondu, et les rais formés d'une série de T juxtaposés et ajustés exactement.

La circonférence a pris la forme indiquée par la figure. Quelque chose d'analogue a lieu dans les plaques tournantes, dont le centre doit présenter un noyau solide, pour supporter la plaque; les nervures qui la forment, sont séparées par des parties évidées. Des fractures se produisent souvent en a, quoique la fonte soit d'une bonne nature. On exige des fontes de qualité supérieure pour éviter ces inconvénients, auquel encore on n'échappe pas toujours. Afin d'en diminuer les chances, on met des évidements b partout où il y a un nœud. On accroît ainsi les surfaces, et le refroidissement devient plus égal.



On évite en grande partie l'inconvénient du retrait pour les roues en fonte, en ménageant dans le moyeu un certain nombre de fentes parallèles aux rayons, comme l'indiquent les figures 118 et 119. Les différentes parties de la roue peuvent alors obéir à la contraction qui a lieu pendant le refroidissement, et présentent une résistance beaucoup plus considérable. On met sur le moyeu deux frettes en fer, dont on voit la coupe cd, fig. 119, et l'on chasse fortement dans chaque fente des cales en fer, qui donnent au système une solidité parfaite. Ces bagues ou frettes en fer sont placées à chaud, de sorte que, pendant le refroidissement,

elles diminuent de diamètre et exercent une énorme pression sur les différentes parties du moyeu qu'elles doivent réunir. On fixe enfin les roues sur leurs essieux, au moyen de clavettes en fer, introduites entre l'essieu et l'intérieur du moyeu.

Malgré ces précautions, les roues en fonte sont toujours faciles à briser. Elles ne peuvent résister à des chocs un peu violents. Ainsi, il y a quelques années, toutes les roues du chemin de St. Etienne à Lyon étaient en fonte; la casse était de près de 300 par mois. Ces accidents ne se présentent pour ainsi dire plus, depuis l'emploi des roues en fer.

Les molécules de tous les corps, quand elles ont été écartées de leur position primitive, par une cause quelconque, tendent à y revenir avec une force à peu près proportionnelle à la quantité dont elles se sont écartées de leur distance primitive; cependant, quand l'écartement dépasse certaines limites, la force attractive cesse tout à coup, et le corps se brise. Or, la fonte diffère du fer, en ce que l'écartement pour lequel la force attractive cesse d'avoir son effet, est beaucoup plus grand pour le deuxième de ces corps que pour le premier. Ce défaut de la fonte est accru encore par les inégalités de retrait, et bien que leur fragilité soit diminuée dans une forte proportion, par la précaution indiquée de fendre les moyeux, il ne laisse pas que d'être une objection sérieuse à leur emploi.

Quand une de ces roues vient à se briser dans un trajet, elle fait verser le wagon qu'elle porte, et les autres voitures, lancées avec une grande vitesse, écrasent la première versée, et montent ensuite les unes sur les autres. Les débris de wagon et la houille transportée forment alors un amas qui encombre la voie. Lorsqu'un pareil accident a lieu dans un souterrain,

il en forme complètement l'issue. Il en résulte, outre les indemnités à payer au propriétaire du charbon, des frais de déblai et l'interruption momentanée du service.

Pour éviter la fragilité produite par la tension des rais, on les fait en fer forgé, et on leur donne la forme d'une *s* (fig. 120). On dispose les rayons de manière à engager leurs extrémités dans la fonte, puis on coule la circonférence en coquille, et enfin le moyeu. La circonférence se refroidit la première, et quand le moyeu éprouve l'action du retrait, il agit sur les rayons, à qui leur forme permet de fléchir; les rayons de combure, de leurs axes augmentent, et ils tendent à se redresser.

Avec de la pratique, on parvient à éviter les inconvénients du retrait. Si, dans les roues précédentes, on coule la circonférence la première, le retrait du moyeu attire les rayons vers le centre; si l'on ne fondait la circonférence qu'après le refroidissement du moyeu, le retrait de celle-ci tendrait à pousser les rais vers le centre. Dans le premier cas, il se produit une traction par le moyeu; dans le second, une compression dirigée de la circonférence vers le moyeu; on pense parer à ce double inconvénient, en se plaçant dans des conditions intermédiaires, entre celles que nous venons d'indiquer. Si l'on coule d'abord le moyeu, puis la jante, de façon que celle-ci se refroidisse plus vite, elle est froide presque en même temps que le moyeu. Avec de l'habitude, les fondeurs parviennent à apprécier le moment où il convient de couler le moyeu et la jante. On obtient ainsi des roues très bien faites, dans lesquelles l'action du retrait se trouve compensée. Il est dès lors inutile de se servir de rayons courbes; c'est le parti auquel on s'est arrêté sur le chemin de fer de St. Etienne à Lyon; les rais sont en fer méplat de $\frac{0,08}{5,01}$ d'équarrissage (fig. 121). On façonne d'abord un moyeu et une jante en bois, dans lesquels on adapte les rais. On place ce modèle dans du sable, qu'on tasse tout autour jusqu'au plan du milieu des rais. On obtient ainsi une première moitié du moule. La seconde se fait de la même manière. On sépare alors le bois des rayons, qu'on dispose dans l'un des demi-moules. On superpose convenablement les deux moitiés du moule, et l'on a un vide qui a très exactement la forme de la pièce à couler. On fond le moyeu, puis la jante, quand le centre de la roue est un peu refroidi.

Les pièces formées de fer et de fonte sont assez souvent employées dans les constructions. Elles ont un grand inconvénient, qui résulte de la difficulté de joindre d'une manière intime le fer et la fonte. On a pris divers moyens pour atteindre ce but. On décape avec soin les parties du fer qui doivent se trouver en contact avec la fonte. Cette précaution est des plus importantes. On recommande aussi de saupoudrer le fer de borax; ce sel, qui a la propriété de fondre très aisément les oxydes, fond l'oxide de fer, décape ainsi ce métal, et, par sa moindre densité, s'élève à la partie supérieure du moule, en entraînant les oxydes. On fait aussi congeler le fer, afin d'éviter l'action d'un corps froid sur la fonte en fusion. Le moyen préféré pour cela est de verser dans le moule beaucoup plus de fonte qu'il n'en peut contenir: on dispose deux systèmes d'ouvertures, et l'on prend dans la cuillère ou poche, deux ou trois fois la quantité de fonte qui composera la pièce fondue. On remplit le moule, et on continue à y verser de la fonte. Il s'établit ainsi un courant de métal en fusion, qui élève bientôt le fer à la température de la fonte. On obtient par cette méthode une union très intime des deux parties métalliques. Malgré cette précaution, qui est très importante, on ne peut jamais être bien certain d'obtenir une adhérence parfaite; et il arrive qu'en brisant les pièces ainsi coulées, on trouve souvent des cavités ou soufflures qui

paraissent résulter d'un dégagement de gaz pendant la coulée.

Le mode de construction précédent est assez économique; mais les roues ainsi obtenues finissent tôt ou tard par se déranger. Le fer est sujet à se séparer de la fonte. Ce procédé est cependant employé encore sur une grande échelle. On tend maintenant à construire les roues entièrement en fer forgé, par l'exclusion successive de la fonte.

M. Stephenson comprit, dès le commencement de ses travaux, la nécessité d'apporter à la construction des roues, un soin tout particulier. Il fit faire le moyeu et la jante en fonte, les rayons en fer creux, et il enveloppa d'un bandage en fer la jante de fonte, préalablement dressée au tour.

La figure 122 représente la vue de face et la coupe par un plan passant par l'axe d'une des petites roues des machines de Stephenson. Les roues motrices n'en diffèrent que par le nombre des rayons et les dimensions. Les rayons sont inclinés alternativement dans un sens et dans l'autre, pour résister plus complètement aux efforts latéraux exercés sur la jante. Ils sont en fer creux, ce qui leur donne une grande légèreté. On ferme leurs extrémités avec des bouchons en fer et on les dispose dans le moule où doit être coulée la première jante en fonte. On a soin de recouvrir d'un enduit de borax et de poussière de charbon la partie des rayons qui doit être noyée dans la fonte. Cette précaution permet au fer d'être bien décapé, au moment où la fonte vient l'envelopper, et de pouvoir par conséquent faire corps avec elle. L'évidement *o*, ménagé dans la jante, n'a d'autre but que de diminuer son poids.

Un tube présente, à égalité de matière, une résistance plus grande qu'un cylindre plein: ainsi, une colonne en fer creux présentera, à égalité de poids, une résistance plus considérable qu'une colonne en fer plein, et une bien plus grande rigidité. Les tubes de la roue de Stephenson sont en tôle de 4 millimètres d'épaisseur, et sont sondés à peu près comme des canons de fusil. L'inclinaison des rais donne à la roue une grande force pour résister aux efforts horizontaux produits par les mouvements latéraux des wagons. L'emploi d'un bandage en fer forgé rapporté, présente un perfectionnement important, qui a été bientôt presque généralement adopté; quand une jante toute en fonte est brisée, ou présente quelque défaut grave, la roue est hors de service. Il n'en est pas de même d'une jante en fer forgé, qui peut se remplacer aisément. Les roues de Stephenson présente donc des progrès notables. La jante en fer forgé est maintenant en usage sur tous les chemins de fer. On ne peut guère citer que les districts houillers, tels que ceux de St Etienne et du nord de l'Angleterre, où l'on se sert encore de jantes toutes en fonte. Les roues de Stephenson ont été d'abord établies sur le chemin de Liverpool à Manchester; la partie des rais en contact avec la fonte a péri la première; les tubes étaient devenus fragiles ou cessaient d'adhérer à la fonte, et jouaient dans le moyeu.

Les roues de Bury (fig. 123 et 124) étaient de la même époque que celles de Stephenson. Dans ces roues, les rayons sont en fer plein, liés mécaniquement à la jante et au moyeu, et alternativement inclinés comme précédemment. Ils sont terminés par des T, qu'on fixe à la jante au moyen de rivets. Les rivets sont de petits boulons, sans vis ni écrou; on les fait rougir à blanc, dans une forge, on les met en place et on frappe sur leur extrémité, en maintenant leur tête. On obtient ainsi un clou à deux têtes, qui par son retrait serre fortement les pièces qu'il réunit. Cette opération s'appelle rivure. On attache les rais au moyeu par des clavettes: on y

alèze des trous obliques, au moyen d'une machine à forer; les rayons qu'on y introduit, portent une petite ouverture, où l'on place la clavette; enfin, le moyen porte, vis-à-vis le bout de chaque rais, une ouverture par où l'on introduit la clavette, et une par où l'on écarte les deux parties de son extrémité fendue. Ces roues sont meilleures que celles de Stephenson; mais la main-d'œuvre compliquée qu'elles exigent, les rend très chères. Elles ont paru en Angleterre, pays où une invention en fait aussitôt surgir une rivale; et l'on peut dire que les roues de Stephenson ont donné naissance à celles de Bury. Ces dernières sont plus coûteuses, mais meilleures; elles offrent un progrès sur celles de Stephenson; c'est que la partie en fonte de la jante de celles-ci, qui est sujette à se briser, y est remplacée par une jante en fer forgé. On en a employé sur le chemin de fer de Paris à St Germain, où elles servent encore. Ce chemin, l'un des plus anciennement construits, a vu successivement tous les systèmes adoptés, et présente un grand intérêt historique.

On a joint quelquefois les rais à la bande de fer, qui forme ordinairement une première jante intérieure, en faisant une soudure par encollage. Quand on veut souder deux morceaux de cire, il faut les chauffer et les presser l'un contre l'autre; la chaleur étend la sphère d'attraction moléculaire, et la pression force les molécules d'un morceau à se rapprocher assez de celles de l'autre pour en être attirées. Le fer se soude à lui-même d'une façon semblable, mais il exige pour cela une température élevée et une pression très forte. Ces deux conditions, également nécessaires, sont faciles à remplir quand on doit joindre deux morceaux de fer plat. On les chauffe à blanc, on les place l'un sur l'autre, on obtient la pression requise, par l'inertie de la masse dont se compose la tête des marteaux. Quand on veut souder deux morceaux de fer par encollage, c'est-à-dire perpendiculairement l'un sur l'autre, l'opération est plus difficile: la barre verticale, qui reçoit le coup de marteau, plie, au lieu de transmettre la pression. Ces raisons font généralement préférer les soudures par encollage. Pour faire des roues, on a essayé de souder à une même bande de fer autant de barres qu'il devait y avoir de rayons, puis on chauffait la bande, on la contournait de manière à former une roue et on réunissait les rais par un moyen fendu.

Ce moyen, par son retrait, attirait fortement les rayons à lui, et souvent la circonférence se voilait. La roue était alors hors de service. Quand cet accident n'arrivait pas, il y avait toujours une tension considérable, qui rendait la roue très fragile.

M. Jackson a construit des roues sans aucune soudure (fig. 125). Chaque élément de la roue est une pièce de fer en forme de T; la tête de chaque T a en plan la forme d'un rectangle. On relie toutes les pièces par une circonférence en fer et par un moyen en fonte. Pour obtenir une roue bien faite, il faut, en disposant les rais pour la coulée, laisser un intervalle d'un demi-millimètre ou d'un millimètre entre deux T consécutifs; sans cela le retrait du moyen diminue la longueur du cercle extérieur, presse les T les uns contre les autres, relève leurs extrémités et déforme ainsi leur circonférence.

Les roues des machines de Sharp et Robert (fig. 126) sont construites en fer, comme les précédentes, avec un moyen en fonte. La première jante en fer est exécutée de la manière suivante: on commence par préparer autant de morceaux de fer plat, terminés en biseau (fig. 127), que la roue doit avoir de rayons. On les chauffe alors successivement

au rouge blanc, et on les applique sur une matrice en fonte, d'une courbure convenable; on soude au même instant, par encollage, sur le milieu de chacune de ces pièces, le rayon correspondant convenablement chauffé; on forme ainsi autant de T que la roue doit avoir de rayons. On dispose ensuite toutes ces pièces sur un cercle en fer, d'un diamètre égal à celui que doit avoir le bandage intérieurement. On les fixe dans cette position, au moyen de boulons; on place au centre le modèle en bois du moyeu, et on livre la roue à la fonderie. Quand le moyeu est coulé, il reste à réunir entre elles toutes les pièces qui doivent former la jante. Pour cela, on chauffe deux à deux les extrémités de ces pièces, et on introduit entre elles des prismes en fer, comme l'indique la fig. 127. Ces soudures se font à plat, sur l'enclume, et ne présentent aucune difficulté. Après avoir terminé toutes les soudures, on tourne cette jante en fer, et enfin on place dessus, comme de coutume, la jante à rebord. La fig. 128 donne la coupe par l'axe de cette roue. On doit remarquer les entailles, que les constructeurs ont eu devoir faire aux rayons, pour les fixer plus solidement dans la fonte.

Pour éviter les inconvénients de la soudure par encollage, il convient de suivre une autre méthode pour la fabrication des T, qui forment les éléments des roues. Pour cela, l'on prend une barre de fer miéplat (fig. 129), de fort équarrissage, dont on étire une extrémité en la section que doit avoir le rai; on obtient ainsi la forme A; on fend ensuite à chaud la partie laissée intacte avec une branche, espèce de marteau à couteau, qu'on place sur la partie à fendre, et sur lequel on frappe; puis on ouvre les deux parties de manière à avoir la forme C; on place la barre sur une enclume D munie d'un trou, et on forge la pièce dans la forme E. On taille ensuite en biseau les deux extrémités du T; l'on dispose ensuite les rais entre deux chassiss circulaires a (fig. 130) en laissant un petit intervalle entre les extrémités des T; on les maintient ainsi provisoirement, puis on coule le moyeu: pour réunir les T, on chauffe à blanc deux pointes voisines, et l'on introduit entre elles, à coups de marteau, deux coins b en fer rouge, portés par un manche auquel ils sont légèrement soudés par encollage. La pression nécessaire s'exerce aisément à coups de marteau. La dernière de ces soudures donne lieu à une objection: quand elle est terminée, elle se refroidit et tend à produire un retrait auquel la circonférence ne peut plus obéir. Mais les rais, qui doivent être en fer de bonne qualité, peuvent fléchir légèrement, et la circonférence s'étire un peu. Un seul point du cercle produisant le retrait, la tension est faible, mais elle suffit pour casser les soudures, quand on n'a pas fait usage d'un fer assez doux. Il faut donc prescrire le fer aigre avec le plus grand soin.

Le dernier mode de construction que nous venons de décrire, était généralement adopté, lorsque M. Stephenson proposa de lui substituer une disposition empruntée à la construction en usage pour les voitures de voyageurs. La roue est formée d'une série d'éléments triangulaires semblables (fig. 131). Pour faire l'un de ces éléments, l'on prend une barre de fer, dont la section a la forme indiquée par la fig. 132. On la coupe de la longueur voulue, puis on la plie suivant la figure triangulaire mixtiligne abc. On rapproche plusieurs de ces triangles, de manière à obtenir un cercle entier, et on les unit en les serrant entre deux demi-circonférences en fer (fig. 133); on peut alors aisément manier la roue. On la porte à la fonderie, où l'on coule le moyeu, en ayant soin de laisser entre les triangles le jeu qu'exige le retrait, puis on termine en plaçant le bandage. Quand le fer n'est pas d'assez bonne qualité, des fentes se produisent suivant la bissec-

trice des angles b et c. Lorsqu'un rayon occupe sa position verticale inférieure, il supporte toute la pression du moyeu; quand il se trouve placé différemment, il ne supporte qu'un faible effort, nécessaire pour empêcher la roue de se déformer: cette différence de tension fatigue les rayons. En outre, le fer recombé à chaud, a été resoulé sur lui-même dans les courbures, et perd en ces endroits une partie de ses qualités; on conçoit donc que ce soit là que les fissures se produisent. Les rais finissent par jouer dans le moyeu en se séparant de la fonte; enfin, les côtés courbes des triangles mixtilignes s'applatissent quelquefois, et les roues cessent d'être rondes. On peut remédier à ce dernier inconvénient de la manière suivante: on prend une barre de fer de $\frac{0,03}{0,08}$ d'équarrissage, on en forge une circonférence d'un diamètre un peu plus petit que celui de la roue déformée; on porte cette bande de fer ou faux bandage à une température élevée: elle se dilate, et sa circonférence devient capable d'embrasser le contour extérieur des triangles; on la place sur la roue et on laisse refroidir; elle éprouve un retrait, serre fortement les triangles, prend la forme de leur périmètre extérieur, et cesse ainsi d'être parfaitement circulaire; on lui rend cette forme au tour, et l'on place dessus le bandage à rebord.

Le mode de construction précédent est plus économique que l'emploi des T; chauffer les barres de fer et les plier sur des patrons, est une opération rapide et facile. Aussi, cette méthode de faire des roues était-elle très en usage il y a trois ou quatre ans; on s'en est servi pour presque tous les chemins de fer. Les désavantages qui ont été signalés plus haut, se sont présentés presque partout. Certains fabricants ont substitué une forme un peu différente à celle indiquée précédemment, pour les barres de fer. Ainsi, au Creusot, l'on a adopté la forme c (fig. 132), dans laquelle la nervure médiane est remplacée par deux nervures latérales, d'une saillie un peu moindre, ces barres se font au laminoir avec autant de facilité que les autres, et leur matière est moins resoulée dans les points de courbure. Soit que cette disposition soit préférable, soit que la matière fut meilleure, les roues du Creusot sont encore en bon état. L'expérience a du reste démontré que ces fentes s'arrêtent toujours après avoir partagé la nervure médiane, et que les roues présentent encore alors une solidité suffisante. Leur principal défaut est de se déformer, et l'on y remédie par un faux bandage, comme on l'a déjà dit.

La méthode employée généralement pour la fabrication des roues de voiture, consiste à les composer de triangles en fer méplat, à fonder le moyeu et à entourer le tout d'un faux bandage et d'un bandage à rebord. L'avantage que présente la disposition des rais qu'indique la fig. 134, est de leur donner plus de rigidité. Si l'un des triangles tend à fléchir latéralement, il est retenu par le côté du triangle voisin. Si deux barres sont verticales, elles offrent moins de résistance à la flexion que lorsque, étant symétriquement inclinées par rapport à la verticale, elles se soutiennent mutuellement. Les deux barres formant un même rayon, offrent encore plus de résistance, quand leurs parties inclinées sont plus courtes que le rayon de la roue. Aussi, divers brevets ont-ils été pris pour des formes qui dérivent de celles de la figure. On a rendu la circonférence plus rigide en adoptant, pour l'extrémité des rais, la disposition indiquée par la fig. 135. Leur inclination soutient la jante, comme des contrefiches soutiennent une poutre un peu longue.

C'est à ce système de construction, depuis longtemps en usage, que M. Stephenson a fait l'emprunt des roues de machine que nous venons de décrire. Les inconvénients que nous

avons signalés, tendent à en réduire l'emploi de plus en plus, et à ramener au système précédemment décrit, où les roues sont composées de T forgés, dont les tiges se réunissent au centre, et dont les branches forment la jante. Une longue expérience, qui, sur le chemin de fer de St. Germain, date de 10 ans, a constaté la solidité de ce genre de construction.

On a fait dernièrement des roues dont on a complètement exclu la fonte. Les moyeux forgés de cette matière, ne sont jamais bien adhérents aux rais, et présentent un autre défaut; quand on a coulé un moyeu, on y fore un trou pour y fixer l'essieu. On fait ce trou d'un diamètre un peu plus petit que celui de l'essieu, et l'on y introduit celui-ci de force avec une presse hydraulique. Le moyeu tend alors à se rompre. Quelquefois l'essieu n'étant pas exactement calibre, est un peu trop gros; sa pression est alors trop considérable pour que le moyeu puisse y résister, et il se brise; on remédie à cet accident, en tournant sur le moyeu brisé deux filets, sur lesquels on dispose des frettes en fer, analogues à celles des roues en fonte (fig. 118 et 119). Ces inconvénients ont conduit à forger des moyeux en fer, matière moins cassante que la fonte. On a fait des roues semblables à celles dont les éléments sont des T soudés les uns aux autres (fig. 136); mais on a terminé l'extrémité centrale de ces T, par une espèce de bouton ayant à peu près la forme d'un tronc de pyramide quadrangulaire. Tous ces boutons juxtaposés forment une espèce d'anneau, à face supérieure et inférieure coniques, qui est la partie principale du moyeu. Il est très important que leurs surfaces soient parfaitement dégagées d'oxyde, afin de faciliter les soudures. On dresse les faces des boutons au rabot, et l'on dispose les T en cercle, sans les souder les uns aux autres; on les maintient dans cette position par deux chassis circulaires, qu'on serre avec des boulons l'un contre l'autre. On entoure la roue ainsi commencée, de deux demi-circonférences en fer, jointes par des boulons; chacune d'elles porte un petit tourillon placé au bout d'un même diamètre; ces deux tourillons sont saisis par des crochets soutenus par les deux bouts d'une chaîne; cette chaîne elle-même est portée par une grue. On soulève la roue, et on la place sur une forge circulaire qui est suspendue à l'extrémité du bras d'une grue; cette forge (fig. 137) est munie d'un trou capable de contenir le moyeu: on l'y place, on l'entoure de charbon, et on le porte à la température du blanc soudant. En même temps, on fait chauffer au même degré, dans une forge voisine, une espèce de galette en fer a; on la soude légèrement et par encollage à une tige t, afin de pouvoir la porter. Quand la roue a été chauffée quelque temps, sa face inférieure est à une température plus haute que sa face supérieure. On l'enlève de la forge, au moyen de la grue, et on la fait tourner autour des deux tourillons situés aux extrémités d'un même diamètre, et supportés par des chaînes. On la met sur une enclume, on place la galette de fer sur le moyeu, et une dizaine d'ouvriers frappent dessus à coups redoublés. Cette opération se fait très vite: on chauffe de nouveau la roue, et l'on place une galette pareille à la première sur la seconde face du moyeu. La soudure des deux dernières pièces est très solide, mais on n'en est pas aussi sûr de l'union du bout des T, dont les faces en contact ne reçoivent pas de pression directe. Cependant la température, à laquelle on soude, amollit assez le fer pour l'amener à participer un peu aux propriétés des liquides. Dans ceux-ci les pressions se transmettent également dans tous les sens, et l'on peut admettre qu'à la température du blanc soudant, la pression se transmet en grande partie aux faces de contact des T. Une autre circonstance tend à favoriser la réunion des rais: on forme la roue

à froid, et on la maintient entre deux bandes de fer en forme de demi-circonférence (fig. 133). Quand on chauffe le centre de la roue, il se dilate et presse les T contre les bandages semi-circulaires; ceux-ci résistent et produisent une pression considérable sur les faces de contact des T. La soudure se fait le plus souvent; mais c'est sur la galette en fer qu'il faut surtout compter pour relier parfaitement toutes les parties du moyeu. Quand les soudures sont terminées, l'on alèse au tour de l'ouverture qui doit recevoir l'essieu, on réunit les extrémités extérieures des T par des coins en fer, puis on place le faux bandage et le bandage à rebord.

On obtient ainsi des roues représentées par les figures (138 et 139). La première de ces figures s'applique aux roues d'avant et d'arrière des machines Crampton, et la seconde aux roues motrices, qui ne diffèrent des premières que par leurs dimensions et la forme particulière de leur moyeu.

Ces roues ont le défaut d'être chères; ainsi, tandis que les roues en fer méplat ne coûtent que 0.90 le kilogramme, on paie le kilo. de celles-ci de 2.50 à 3.00; mais il faut attribuer une partie de cet inconvénient au peu d'habitude qu'on a de ce genre de construction. Il faut d'ailleurs que les premières roues exécutées dans ce système, aient les premiers soins qu'elles nécessitent, tels que ceux de l'établissement de forger et d'enclumer, spécialement propres à ce genre de roues.

L'idée des moyeux en fer n'est pas tout-à-fait nouvelle: dès l'année 1841, l'on s'est servi, sur le chemin de St. Germain, de roues complètement en fer; mais, à cette époque, on pouvait considérer leur construction comme un tour de force. Les moyeux en fer, par leur solidité, sont précieux pour les voitures destinées à marcher très rapidement. On s'en sert sur tous les chemins où la vitesse des convois atteint 20 lieues à l'heure. Elles joignent à l'avantage de la solidité, celui d'être légères, qu'elles doivent à la petitesse de leur moyeu. Aussi ne sont-elles pas beaucoup plus coûteuses que les autres, le prix élevé du kilogramme de leur matière étant compensé par leur peu de poids.

On a proposé d'autres manières de confectionner des roues sans fonte. Ainsi, l'on peut prendre autant de barres de fer qu'il doit y avoir de rayons, et les contourner comme l'indique la figure 140. Il est aisé de voir que leur réunion formera extérieurement une circonférence, et au centre le corps d'un moyeu. On réunit les diverses portions de ce moyeu par deux disques en fer qu'on traite par les mêmes procédés que les galettes en fer des roues précédentes. On termine le cercle formé par les rayons, en soudant l'extrémité de chaque barre à l'angle voisin; la partie externe de cet angle est dressée suivant un plan, et le bout de la barre est en biseau. On chauffe à blanc les parties à souder, l'on place l'angle de la barre sur l'arête d'une enclume d, et l'on termine la soudure au marteau.

À l'exception des roues fondues en coquille, toutes doivent être revêtues d'un bandage à rebord. Ce bandage est la source d'une des principales dépenses d'entretien; on est forcé de le changer souvent, à cause de l'usure rapide de son rebord, qui s'oppose au déraillement des voitures. Une même roue peut user un nombre considérable de bandages. Leur fabrication est par suite importante, et mérite le plus grand soin. Le fer qu'il faut y employer doit être très dur, pour s'user moins, mais il ne doit pas être cassant; si le bandage se brisait au moment

où le train marche avec une grande vitesse, il en pourrait résulter de graves accidents. On a vu des bandages se briser et leurs morceaux être projetés avec une grande violence; mais il est heureusement arrivé que les machines qui ont éprouvé cet accident étaient à six roues, et que les cinq autres ont évité les malheurs qui auraient eu lieu.

Pour faire les bandages, on prend du fer acieré, à grains très fins. Le fer présente, en général, deux modes de structure: il peut être à grains; sa cassure présente alors de petites facettes qui ont l'air de petits grains, et qui proviennent d'un commencement de cristallisation; cette cristallisation offre des plans de clivage qui rendent le fer cassant. Le fer peut aussi être fibreux, et quand on le casse, il paraît présenter une série de fibres brisées. Le fer à grains de bonne qualité se fait en France dans un grand nombre de forges, où l'on se sert de bois pour fondre le minerai.

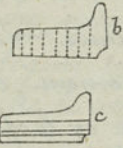
Il a toujours une apparence argentine, et son grain est d'une grande finesse. Quand il est à gros grains, il est moins bon, et il ne faut pas l'employer à faire des bandages. Le fer à grains est dur, mais en général cassant; il n'est que très rarement exempt de ce défaut, et ce n'est qu'alors qu'il est propre à faire des bandages; dans ce cas, il doit pouvoir se plier à froid sans gerçure. Un tel fer se soude aisément, et possède une tenacité considérable. Le fer nerveux est une fort bonne qualité de fer; il est moins dur que le fer à grains, mais il résiste autant aux efforts dirigés suivant sa longueur; ainsi, il supporte, sans se rompre, de 3000 à 4000^{Kg.} par centimètre carré. La tenacité du fer à grains est à peu près la même; mais, quand sa limite d'élasticité est dépassée, il se rompt, presque sans s'étendre; le fer à nerfs, au contraire, s'allonge considérablement avant de se briser: une barre de fer de 2^m, par exemple, peut augmenter sa longueur d'un décimètre. Le peu de dureté du fer nerveux fait qu'on lui préfère le fer à grains pour la construction des bandages. Le contact de ceux-ci avec le rail a lieu sur une surface qui peut avoir 1 millimètre de largeur sur 4 centimètres de long. Une roue supporte, en général, 1000^{Kg.}: la roue motrice d'une locomotive supporte une pression d'environ 5000^{Kg.}, ce qui fait 12000^{Kg.} par centimètre carré. La limite d'élasticité du fer est de beaucoup dépassée; le bandage s'use surtout par écrasement, et tend à se déformer. On conçoit donc toute l'importance de la dureté de la matière, dont on le forme, et des motifs qui déterminent à choisir un fer à grains, acieré, mais peu cassant.

On prend, pour les bandages, un fer qui a été obtenu en se servant exclusivement de bois, soit pour la transformation du minerai en fonte, soit pour l'affinage. On est ainsi certain d'éviter l'action d'une petite quantité de soufre que contient toujours la houille et qui rend le fer cassant. Cependant, en Angleterre, on se sert presque partout, pour fabriquer les bandages, d'un fer obtenu à la houille, dans les forges de Low-Moor et de Bowling, près Leeds. Ce fer doit sa supériorité à la nature du minerai et aux soins particuliers qu'on met à le fabriquer. La principale précaution qu'on emploie, consiste à casser le fer affiné en morceaux d'un demi-Kilog^{me} environ. Des ouvriers habitués à ce genre de travail font un triage de ces morceaux et jugent, à l'apparence du grain, de la qualité de chacun d'eux. On obtient ainsi un fer supérieur à celui que produisent les autres forges d'Angleterre. En France, où l'on se sert encore de bois, plusieurs usines donnent un fer propre à fournir d'excellents bandages.

Pour fabriquer un bandage, on prend plusieurs barres, de $\frac{0,15}{0,3}$, sortant de l'affinerie,

et de la longueur voulue; en les superposant, on en forme des paquets, que l'on soumet au corroyage, c'est-à-dire qu'on porte plusieurs fois au blanc soudant, pour les soumettre ensuite à l'action d'un fort marteau. Autrefois, on employait des marteaux à came, mais on ne pouvait leur faire atteindre une grande hauteur de chute; maintenant, on les remplace par des marteaux pilons; ils consistent en une masse de fonte, se mouvant verticalement entre deux coulisseaux, et liée à la tige d'un piston mis en mouvement par la vapeur; à l'aide d'un jeu de tiroir, qu'on peut faire mouvoir à la main, ou avec un mécanisme fort simple, on fait arriver ou échapper la vapeur qui soulève le piston et le laisse retomber par l'action de la pesanteur. Dans les grandes forges, on élève jusqu'à 4 et 5 mètres, des moutons pesant 6 à 7000 kilogrammes. Outre sa grande simplicité, cet appareil présente encore l'avantage de permettre au forgeron de faire varier l'intensité du coup qu'il veut frapper; il lui suffit pour cela d'élever le piston à une hauteur variable, en maintenant ouvert, pendant un temps plus ou moins long, le conduit abducteur, ou de laisser sous le piston une couche de vapeur, qui, se comprimant, diminue l'énergie du choc. Pour donner une idée de la précision que cet instrument comporte, il suffit de dire qu'un forgeron exerce peut, sous le pilon, casser une noisette sans l'écraser.

Le martelage soude les diverses barres, rapproche les molécules qui les composent, et paraît en augmenter la densité et la dureté. On allonge ainsi les paquets au marteau jusqu'à ce que leur section soit à peu près égale à celle que l'on veut donner au bandage. On termine, soit en passant la barre réchauffée au laminoir qui lui donne immédiatement son profil définitif, soit en la forgeant à l'aide d'une étampe. L'étampe est une pièce de fer, dont l'une des faces a un profil correspondant exactement à celui que l'on veut donner au bandage. Cette étampe est portée par une tige de fer, et se place entre le marteau et la bande, qui en prend bientôt la forme. On s'arrange de manière à ce que les soudures des diverses parties du bandage soient parallèles au plan de la roue *b*. Cette disposition a de grands avantages sur la disposition *c* qui avait été primitivement adoptée. Celle-ci consistait à placer les soudures perpendiculairement au plan de la roue. Mais, comme on verra, au tour, sa forme à un bandage qui commence à s'insérer, il arrivait quelquefois que l'on enlevait le fer sur l'épaisseur de

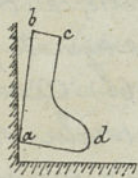


toute la première barre, et que le rebord ne tenait plus à la roue que par la soudure. On devait donc craindre que la soudure ne manquât, que le rebord ne se séparât de la roue, et qu'un déraillement n'en fut la conséquence. Ce grave inconvénient n'est pas autant à redouter, si l'on dispose les soudures parallèlement au plan de la roue; alors, quand l'une d'elles vient à manquer, la barre, devenue indépendante, forme un cercle qui adhère à la roue de la même manière que le bandage tout entier. On peut d'ailleurs s'apercevoir aisément du mauvais état de la roue, les deux parties du bandage commençant à se séparer d'environ un millimètre ou un demi-millimètre. On voit donc combien la disposition *b* est avantageuse, et les raisons qui doivent la faire constamment prescrire dans les fabriques. Les usines livrent les bandages ainsi préparés et de longueur convenable. On les soumet alors à plusieurs opérations que nous allons successivement décrire.

On commence par refouler les extrémités des bandages; cette opération doit se faire toutes

les fois qu'on veut souder deux pièces bout à bout. Pendant la soudure, il faut frapper sur la pièce à souder, ce qui en diminue nécessairement l'équarrissage, il faut donc l'augmenter d'abord, pour obtenir en définitive les dimensions voulues. On chauffe au blanc sur une forge (fig. 142, 143, 144) le bout à refouler; on porte le bandage sur une enclume, et on frappe sur son extrémité, avec un marteau d'environ 100^{lb} (fig. 145, 146). Ce marteau est suspendu à un chassis fixé à deux entrails consécutifs, de la charpente du bâtiment. On l'écarte de sa position primitive, et la pesanteur lui faisant éprouver un mouvement pendulaire, il vient frapper sur l'extrémité rougie du bandage. Celle-ci prend alors la forme *d*, différente de sa forme primitive.

Quand les bandages ont été refoulés à leurs deux bouts, on les met dans un four en long (fig. 149, 150, 151, 152), où leur température est élevée jusqu'au rouge blanc. Ce four doit être capable de contenir des bandes de six mètres de long; il porte trois foyers, situés d'un même côté de la sole; une voûte recouvre leur ensemble. La flamme passe sur les bandages, traverse la grille sur laquelle ils reposent, et vient ensuite sortir par une cheminée, située vers le milieu du four. On porte les bandes sur la machine à cintrer, pour leur donner la forme d'un cercle et pour rapprocher leurs deux bouts. Cette machine (fig. 153, 154, 155, 156) se compose essentiellement d'un disque circulaire, de 0^m.07 d'épaisseur, dont le centre porte un trou principal: plusieurs autres trous plus petits sont disposés en cercle autour du centre. Sur ce premier disque est un anneau, dont le diamètre variable est, pour l'opération du cintrage, un peu plus grand que celui que doit avoir le bandage terminé; un levier horizontal est fixé à un manchon en fonte, mobile autour d'un pivot central, et porte un axe vertical, autour duquel tourne un galet. Le profil de ce galet emboîte exactement celui du bandage. On fixe un bout du bandage contre l'anneau, avec un coin placé dans le disque inférieur, puis on fait tourner le levier autour du pivot central. On force ainsi le bandage à se plier; à mesure que la roulette s'avance, on le maintient sur l'anneau à l'aide de coins, mais il tend à se séparer de celui-ci, de sorte que sa face *ab* n'est pas parfaitement perpendiculaire au disque, et présente une forme conique.



Pour lui rendre la forme cylindrique et donner à la roue le profil qu'elle doit avoir, on serait obligé d'enlever au tour une grande quantité de fer: il importe donc beaucoup d'éviter cet inconvénient. On y parvient à très-peu-près en frappant sur la partie *cd*; la face *ab* devient alors normale au disque,

et la paroi intérieure du bandage prend la forme cylindrique voulue.

Quand le bandage a pris une forme circulaire, on soude sur une enclume (fig. 157) ses deux extrémités au moyen de coins en fer. On chauffe fortement sur une forge (fig. 144, 158, 159) les bouts à réunir, puis on introduit entre eux un coin en fer au moyen d'une tige soudée par encollage. On frappe alors sur le coin pour le souder. On soude de même un second coin, et l'on frappe jusqu'à ce que toutes les traces de refoulement aient disparu. Il est très important que les coins soient tout-à-fait de même nature que les bandages. La température du blanc soudant à laquelle il faut arriver, sans la dépasser, n'est pas la même pour les diverses qualités de fer. Si donc la matière des coins n'était pas identique à celle des bandages, la température du blanc soudant, propre aux premiers, ne conviendrait pas aux seconds,

et la soudure serait mal faite. On commande les coins en même temps que les bandages, et on les fait ensemble et de la même matière. Quand ils sont, pour ainsi dire, de même pâte, les ouvriers parviennent bientôt à arriver exactement à la température voulue. On obtient ainsi des soudures bien faites.

Le poids des bandages s'élevant quelquefois à 200^{kg} et 300^{kg}, il faut se servir de moyens particuliers pour les soulever. On se sert de griffes qui le saisissent aux extrémités d'un diamètre perpendiculaire à celui de la soudure. La tige de ces griffes porte un touillon qui est saisi par une grue. Quand les soudures ont été faites, l'anneau que forme le bandage n'est pas parfaitement circulaire. Comme il doit s'adapter sur le faux-bandage par le plus grand nombre de points possible, il importe que sa surface et la roue soient exactement cylindriques; pour obtenir une circonférence très régulière, on alèse le bandage; mais, si on lui faisait subir de cette opération, il y aurait un déchet considérable. On a donc dû chercher à rendre la surface interne de la bande aussi régulière que possible avant de la porter au tour, et l'on y est parvenu, au moyen du même appareil qui sert à la cintrer (fig. 155, 156, 153, 154). On enlève le levier, son manchon et son galet, leur pivot central est la partie supérieure d'une vis, fixée par son extrémité au disque inférieur. Cette vis, en tournant, fait mouvoir un écrou, qui a la forme d'un tronc de pyramide polygonale régulière. L'anneau sur lequel on cintré le bandage, est formé de quatre à six segments, joints par des rayons aux portions correspondantes d'une partie centrale. Ces rayons, qui convergent vers le centre, ont plus de hauteur que l'anneau, et s'engagent dans des rainures ménagées dans le disque inférieur. La partie centrale, formée de plusieurs morceaux, est percée au milieu d'une ouverture propre à recevoir l'écrou. On conçoit donc, qu'en abaissant l'écrou, au moyen de la vis, les divers rayons glissent dans leurs rainures, et le diamètre de l'anneau augmente. On chauffe les bandages au rouge cerise dans des fours particuliers, à calotte mobile (fig. 162, 163). Ces fours sont composés d'un foyer central rond; sur leur sole, également ronde, on place quelques briques sur lesquelles on pose les bandages. Une série de trous, destinés à absorber la fumée, sont percés dans la sole, au delà du bandage. Le tout est recouvert d'une calotte mobile. Cette calotte est une voûte sphérique, bâtie sur un anneau conique en fer. Cet anneau est attaché à des tiges de fer qui se réunissent au dessus du four et qui peuvent être saisies par une grue (fig. 164, 165). Au bout de dix à douze minutes, le bandage a atteint la température rouge cerise. On le porte alors sur la machine (fig. 153, 154, 155, 156) à mandriner, dont on tourne la vis; on augmente le périmètre extérieur de l'anneau qui presse les parois du bandage et les dresse suivant une surface cylindrique à base circulaire. On facilite cette opération en frappant le bandage avec un marteau. On peut admettre qu'après cette opération la section intérieure du bandage ne s'écarte pas d'un cercle parfait de plus d'un millimètre.

M. Audicon, entrepreneur de la traction du chemin de fer de Rouen, a simplifié ces opérations au moyen d'un appareil (fig. 166) qui diminue le tournage. Il se compose d'une plaque de fonte, traversée par un axe vertical, autour duquel tourne un cylindre: une roulette, également mobile autour d'un autre axe vertical mis en mouvement à l'aide de roues dentées, est portée sur un châssis mobile qui permet d'approcher la roulette du cylindre pour comprimer entre eux le bandage, qui doit avoir 0^m,002 ou 0^m,003 de plus d'épaisseur que quand on emploie le procédé précédent. Après avoir cintré et soudé ses extrémités, on le place entre le cylindre et la roulette qu'on serre

contre lui, puis, en la faisant tourner, on le force à se lamminer entre ces deux surfaces tournantes, et sa face extérieure est alors assez bien dressée pour réduire, à peu de chose, le fer à enlever au tour. Or, le tournage, outre les frais de main d'œuvre, présente encore cet inconvénient d'enlever la couche superficielle, laquelle, ayant subi l'action directe du marteau, est en général plus dure et de meilleure qualité que la surface intérieure. C'est donc là un véritable perfectionnement.

Dans les constructions soignées, on ne se contente pas de la forme que donnent les méthodes précédentes; l'on alèse le bandage, et l'on tourne la jante de la roue sur laquelle il doit s'appliquer; celle-ci est dressée sur un diamètre supérieur de 2 à 4 millimètres à celui sur lequel le bandage est alésé.

La dernière opération est l'emballage. Il consiste à placer le bandage sur la roue. On le réchauffe au four, il augmente un peu de diamètre et devient capable de revêtir la roue. On le place sur un disque en fonte, et l'on y introduit la roue. En se refroidissant, il y adhère fortement par le retrait; on hâte son action, en immergeant la roue et le bandage; le disque qui les supporte, est suspendu à une grue, au dessus d'une cuve à eau, disposée dans le sol (fig. 167). Il est, en outre, soutenu par des ergots, reposant sur un rebord; des fentes verticales, qui sont ménagées dans celui-ci, permettent, en tournant la plaque, de la descendre dans la cuve avec ce qu'elle supporte. La tension qui résulte du retrait s'appelle tirage; quand il est trop considérable, le bandage peut se briser, soit avant l'entier refroidissement, ce qui a peu d'inconvénients, soit pendant la marche d'un convoi. On porte la roue à la machine à percer, on pratique dans la jante, des trous cylindriques, terminés par une partie conique prise dans le bandage (fig. 135); on place dans chaque trou un rivet chauffé au rouge cerise; on maintient sa tête avec un marteau, et l'on frappe sur son extrémité de manière à en forger une seconde tête. On place ainsi un rivet entre deux rails consécutifs.

Quand le bandage commence à s'insérer, il se lammine entre le rail sous la forte pression qu'il supporte; n'étant pas partout également dur, il s'écrase en quelques points plus que dans d'autres; il se produit des endroits plats, qui donnent lieu à des chocs. Le meilleur fer s'étire et le bandage s'allonge: le tirage l'empêche d'abord de quitter la roue, mais il cesse à la fin d'y adhérer; il n'y tient plus que par les rivets qui le maintiennent assez pour empêcher momentanément tout accident. Mais, dès que les huiles, qui suintent alors entre le bandage et la roue, ont fait apercevoir qu'ils ont cessé d'adhérer l'un à l'autre, on retire la roue de la circulation. Après avoir coupé les rivets, on enlève le bandage, on place une bande de tôle d'épaisseur convenable sur le faux bandage, et on remet le bandage à rebord par le procédé qui a été indiqué plus haut. Quelquefois, on emploie une autre méthode: on force la matière à rentrer sur elle-même, en aplatissant l'anneau en un ou plusieurs points de sa circonférence; il en résulte une diminution de longueur égale à la différence entre l'arc et sa corde; on le repose ensuite, en le portant sur les appareils que nous avons décrits plus haut. Mais le laminage sur les rails a non seulement allongé le bandage, mais a modifié son profil; on le lui rend au tour. Cette opération se nomme rafraichissage. Elle se renouvelle trois ou quatre fois pour un même bandage. On le remplace par un neuf quand son épaisseur s'est réduite à trois centimètres pour les machines, et à deux centimètres $\frac{1}{2}$ pour les wagons. On a calculé, dans divers cas, la distance qu'un bandage peut parcourir sans être renouvelé: elle est de 50 mille kilomètres pour les bandages des roues de wagon et des roues de supports des locomotives, et de 45 mille pour ceux des

roues motrices. L'entretien et le renouvellement des bandes coûtent, par kilomètre, 0,0297 pour les roues d'une locomotive, et 0,0198 pour celles du tender. On peut donc compter, dans le prix du kilomètre parcouru par une locomotive et son tender, environ 0,55 pour l'entretien de ses bandages seulement.

Pour opérer une union plus intime entre le bandage et la jante, on tourne la surface de celle-ci et l'on alèse le bandage suivant une circonférence d'un diamètre un peu moindre que celui de la roue. Comme nous vu que le bandage, porté à une température rouge-cerise, acquiert un diamètre plus grand que la jante à laquelle il adhère par le retrait, et porte sur elle par tous les points de sa surface intérieure. Il en résulte une adhérence plus grande que celle qu'on obtiendrait sans l'aide du tour. On ne fait pourtant pas toujours l'opération de l'alésage : elle ne se pratique que dans les constructions soignées. Il est tout-à-fait nécessaire pour les roues de locomotives, mais on s'en dispense généralement pour celles des wagons, qui doivent supporter une charge beaucoup moindre. Il est nécessaire dans les roues de locomotives fabriquées avec des fers à T, pliés en triangles qui remplissent le disque, et dont le centre est en fonte : on s'était d'abord contenté de revêtir ces roues d'un simple bandage ; mais on a bientôt reconnu que leur périmètre était souvent ovale, et que le bandage dont on les entourait, prenait aussi cette forme. Il fallait alors enlever au tour une grande quantité de fer, ce qui affaiblissait beaucoup le bandage. Pour remédier à ce grave inconvénient, on met un faux-bandage, dont l'intérieur prend la forme ovale de la roue, mais dont l'extérieur reçoit au tour une forme parfaitement circulaire. On alèse faiblement le bandage, qu'on met ensuite en place. On obtient ainsi des roues d'une solidité satisfaisante.

Il faut aléser le moyen en même temps qu'on tourne la jante. On se sert pour cela d'un outil puissant qui se compose d'un plateau dont le diamètre est plus grand que celui de la roue à tourner. Ce plateau a de grandes dimensions quand il doit suffire à des roues motrices, qui ont quelquefois jusqu'à 2^m.10 de diamètre. Au centre du plateau se trouve un axe, fondu en même temps que lui ; cet axe est porté horizontalement par deux collets, le plateau qui est à son extrémité est vertical ; l'axe et le plateau forment un tour. Un tour est mis en mouvement par un système d'engrenages dont on fait varier la force suivant la distance de l'outil à l'axe de rotation du plateau. La pression de l'outil sur la pièce à tourner, est la force que le moteur doit vaincre ; le moment de cette force est d'autant plus considérable qu'elle agit sur un bras de levier plus long, ou que sa distance à l'axe du tour est plus grande. L'arbre qui reçoit l'action du moteur, agit par une courroie sans fin, sur l'engrenage du tour ; celui-ci est composé de plusieurs pièces, et la courroie en fait mouvoir un nombre d'autant plus considérable que le bras de levier de l'outil est plus grand. L'outil est un rectangle d'acier, dont le bout est forgé en tranchant aigu : il est formé d'acier fondu très dur, qu'on aiguise avant de le tremper ; il peut avoir environ 0^m.30 de long sur 3 à 4 centimètres d'équarrissage. Il repose sur un support en forme de piédestal, et il est tenu par une partie mobile, à laquelle il est invariablement fixé par une vis. On le place de manière à le faire entrer de 1 millimètre à 4 millimètres dans la pièce à tourner. Celle-ci est fixée au tour et tourne avec lui ; l'outil enlève alors de petits copeaux de métal qui ont la même largeur que lui. Comme il doit s'enfoncer plus ou moins, suivant la résistance des diverses parties de la pièce à tourner, la pièce qui le tient est placée dans une glissière, où l'on peut l'avancer plus ou moins. Pour que le tournage se fasse convenablement, il ne faut pas que la pièce passe trop vite devant l'outil, que des chocs trop violents pourraient briser, ou que la

température élevée qui se développe pourrait être empêché, malgré la précaution que l'on a de le refroidir par un léger courant d'eau qui tombe goutte à goutte. La vitesse qui paraît préférable, est de 7 à 8 centimètres par seconde : ainsi, la circonférence des roues que l'on tourne ne doit pas avoir une vitesse de plus de 8 centimètres. Le plateau est percé d'un grand nombre de trous ; on y fixe la roue, au moyen de 7 à 8 boulons à crochets, en ayant soin de faire coïncider, autant que possible, le centre de la roue et celui du disque. On met le tour en mouvement ; l'outil se meut lentement, en décrivant une droite inclinée ou parallèle à l'axe du tour, par suite d'un mouvement mécanique que lui communique le tour. On dresse ainsi en deux ou trois passes, la jante de la roue, quand on en est à tourner le rebord, donc le profil n'est pas assujéti à une loi aussi régulière, l'outil est dirigé à la main.

Un second outil, agissant d'une manière analogue au premier, alèse quelquefois en même temps le moyeu. Quand les deux outils ne travaillent pas ensemble, il faut avoir grand soin de ne pas déranger la roue sur le tour, avant d'aléser le moyeu. On conçoit qu'avec cette précaution, l'on est parfaitement certain que les surfaces de la jante et du moyeu sont mathématiquement concentriques ; leur centre est celui du disque. On alèse semblablement le bandage. Quand il a été mis sur la roue, on place l'essieu que l'on fixe invariablement. On entourne le bout de manière à lui donner un diamètre un tiers ou un quart de millimètre plus grand que celui de l'intérieur du moyeu. On en dresse l'extrémité, suivant une surface conique, donc le diamètre extrême est un peu plus petit que celui du moyeu. Quand on présente l'essieu, il entre de quelques millimètres dans le vide du moyeu. On finit alors de le faire entrer au moyen d'une presse hydraulique (fig. 169, 170, 171).

Cette presse est portée sur un châssis mobile, équilibré, qui s'élève ou s'abaisse à la hauteur des essieux à caler. On la fixe au disque qui supporte la roue, et l'on agit sur le piston. La pression se transmet à l'essieu, qui prend la position voulue. Le diamètre du centre du moyeu augmente de $\frac{1}{8}$ de millimètre, celui de l'essieu diminue d'autant, et il se produit entre les deux surfaces en contact une pression considérable. On peut alors regarder l'essieu comme invariablement lié à la roue. Cependant, par excès de précaution, on ménage dans l'essieu et dans le moyeu deux rainures correspondantes entre lesquelles on introduit, à coups de marteau, une clavette en acier pour les empêcher de tourner l'un dans l'autre si la pression ne les unissait pas suffisamment. Autrefois, on faisait les essieux plus minces, on les mettait dans le moyeu, puis on plaçait 3 ou 4 clavettes de dimension propre à faire coïncider exactement les axes de l'essieu et de la roue ; mais on n'y parvenait pas aussi bien que par la méthode précédente, et la solidité de l'assemblage était beaucoup moindre.

On tourne la fusée, sur laquelle doit reposer la boîte à graisse, en même temps que l'essieu, et quand celui-ci est placé, l'on est certain que toutes ses surfaces sont parfaitement concentriques avec celles de la roue. Quand ces deux pièces sont assemblées, on les porte sur un tour (fig. 172, 173, 174), composé de deux plateaux semblables à celui qui a été déjà décrit. On fait coïncider les centres des essieux avec ceux des tours ; pour cela, quand on tourne l'essieu, on ménage un petit trou conique d'environ un millimètre à son centre ; des cônes sont disposés aux milieux des plateaux, et l'on place leurs pointes dans les

petits trous des essieux. On fixe par des boulons chaque roue au plateau correspondant; un arbre engiène avec le périmètre des plateaux et les fait mouvoir ensemble avec les roues et l'essieu qu'ils portent. On tourne alors aisément la surface extérieure du bandage.

On donne à cette surface, qui doit être en contact avec le rail, la forme d'un tronc de cône convergeant vers l'extérieur de la roue (fig. 175, 176, 177). Ses génératrices de ce cône sont inclinées sur les normales au plan de la roue de $\frac{1}{20}$ à $\frac{1}{17}$. Elles se raccordent avec une partie à courbure convexe, qui forme le rebord de la roue. On laisse, entre ce rebord et le rail, un espace suffisant pour que leur frottement ne soit qu'accidentel. Pour que le contact du rail et de la jante ait lieu sur le plus de points possible, on incline l'axe du rail de $\frac{1}{20}$ à $\frac{1}{17}$ sur la verticale, de manière à ce qu'il soit perpendiculaire à la surface conique du bandage. L'avantage de cette conicité des jantes est de permettre aux convois de parcourir les courbes sans frottement et sans l'intervention du rebord. La force centrifuge pousse les roues vers l'extérieur de la courbe, le rayon d'une roue augmente, celui de l'autre diminue d'autant, et leur ensemble décrit une portion de circonférence.

Examinons quelle serait la courbe minimum que pourrait ainsi parcourir une paire de roues dont la jante aurait le profil de la figure 176.

Appelons r le rayon de la circonférence de contact quand les roues sont sur une voie en ligne droite. Désignons par α l'inclinaison de la jante, et par e la quantité dont le système des roues avance vers la courbe extérieure.

Le rayon de la circonférence de contact de la roue extérieure sera $r + \alpha e$, et celui de la circonférence de contact de la roue intérieure $r - \alpha e$.

La distance des bords intérieurs des rails est de $1^m,44$; leur largeur étant de $0,06$, la distance de leurs axes est de $1^m,44 + 0^m,03 + 0^m,03 = 1^m,50$. Par conséquent, si R est le rayon de courbure de l'axe de la voie, $R + 0^m,75$ et $R - 0^m,75$ seront les rayons de courbure des axes du rail extérieur et du rail intérieur.

Cela posé, il faut que les circonférences de contact des roues soient proportionnelles aux courbes à parcourir pour qu'il n'y ait pas de glissement d'une roue sur le rail. Les circonférences étant, comme leurs rayons, cette condition sera exprimée par l'équation.

$$\frac{r + \alpha e}{r - \alpha e} = \frac{R + 0^m,75}{R - 0^m,75}$$

D'où on tire

$$R = \frac{0^m,75 r}{\alpha e}$$

La plus petite valeur de R répondra à la plus grande valeur de e . On voit, d'après la figure, que cette valeur est $e = 0^m,010$. Supposons $\alpha = \frac{1}{20} = 0,05$, et $r = 0^m,50$, nous aurons

$$R = \frac{0^m,75 \times 0^m,50}{0,05 \times 0,01} = 750^m$$



On voit que l'inclinaison de $\frac{1}{30}$ permet aux roues de parcourir sans frottement et sans l'intervention des rebords, une courbe de 750 mètres de rayon. En général, on prend 1000^m pour le rayon des courbes dans les chemins de fer; mais, quand le tracé l'exige, on fait des courbes de 750 mètres de rayon, et quelques unes même plus fortes, par exemple dans les gares et les croisements de voies.

On joint le rebord à la partie conique de la jante par une courbe inclinée; cette précaution est fort importante: elle empêche que le rebord ne produise contre le rail un mouvement de cisailles, et ne risque de monter sur le rail s'il rencontre quelque obstacle. Il pourrait y avoir alors détachement: aussi, quand le frottement a rendu verticale la face intérieure du rebord, on le reporte immédiatement au tour pour lui rendre le profil voulu. Dans ces derniers temps, on a donné à la partie la plus extérieure de la jante une inclinaison (fig. 178, 180) de $\frac{3}{20}$ plus forte que celle de la jante proprement dite. Lorsque celle-ci s'use, pour lui rendre sa forme, il faut enlever une quantité considérable de matière: l'inclinaison de $\frac{3}{20}$ a pour but d'en enlever d'avance une partie. L'inclinaison de $\frac{1}{20}$ paraît du reste n'être pas assez forte, et l'on tend aujourd'hui à la porter à $\frac{1}{17}$. On obtiendrait ainsi la possibilité de parcourir sans frottement et sans l'intervention du rebord des courbes d'un moindre rayon.

On prévient par là un autre inconvénient: la jante des roues, après un parcours de 15000 à 30000 kilomètres se creuse de plusieurs millimètres dans son milieu, et lorsque, accidentellement la roue roule sur la saillie qui s'est produite sur la partie antérieure restée intacte, la pression exercée par la roue en ce point éraïlle les rails sur le bord extérieur; c'est surtout dans les croisements de voie que cet effet destructeur se fait sentir.

Examinons maintenant, en analysant le problème au point de vue de la mécanique, s'il n'existe pas des forces tendant à placer le système de l'essieu et de ses deux roues dans les conditions nécessaires pour parcourir sans frottement de glissement des courbes d'un rayon assez limité.

Supposons que le roulement s'opère d'abord sur une partie rectiligne par des cercles de même rayon; l'axe instantané de rotation est la ligne qui passe à chaque instant par les deux points de contact, et il n'y a pas de frottement de glissement: une courbe, inclinée par exemple de droit à gauche, vient à se rencontrer, les roues étant portées à suivre leur mouvement rectiligne, le boudin de celle de droite se rapprochera du bord du rail extérieur, tandis que celui de la roue de gauche s'éloignera du rail intérieur, et le roulement s'opérera sur des cercles de rayons différents, le plus grand étant sur le rail extérieur. Où est situé maintenant l'axe instantané de rotation? Nous savons seulement à priori qu'il doit être parallèle à l'axe de l'essieu. Cherchons à déterminer sa position; supposons que les deux cercles concentriques (fig. 181) représentent les deux cercles de roulement; que x situé entre les deux points de contact A et B, soit la projection de l'axe cherché; que m et n représentent les distances x A, x B; le roulement s'opérant autour du point x , A et B décrivent des arcs de cercles ayant pour rayons les lignes m et n , et pour vaincre le frottement de glissement qui en sera la conséquence, il faudra une augmentation de l'effort de traction. Je la représente par T; si p est le poids supporté par chacune des roues, ω la vitesse angulaire, R le rayon du cercle intérieur, f le coefficient de

frottement, on posera l'équation de l'égalité du travail moteur et du travail résistant.

$$T \cos(R+m) = p w f (m+n); \text{ d'où } T = \frac{p f (m+n)}{R+m}, \text{ ou enfin } T = \frac{p f a}{R+m},$$

en désignant par a la différence des rayons des deux cercles. On peut considérer comme un axiome que l'axe de rotation qui s'établit est celui qui exige l'effort de traction le plus faible pour produire le mouvement; car, si nous partons du repos, et si nous supposons que la force de traction aille constamment en augmentant, dès qu'elle aura atteint cette valeur minimum, le mouvement commencera et continuera dans les mêmes conditions. Il faut donc déterminer m et n pour que T soit un minimum. Cette condition est remplie quand m a la plus grande valeur possible a . L'axe instantané passe donc constamment par le point de contact du cercle le plus grand, et la zone extérieure tourne sur le rail sans glisser, tandis que la zone intérieure glisse d'une quantité qui est au mouvement de translation comme a est à $R+a$. Nous voyons en même temps que l'effort de traction dû à ce frottement appliqué à l'axe de l'essieu est égal à $\frac{p f a}{R+a}$, et le point R à un autre de direction contraire égale à $p f$; et, si nous supposons, ce qui est le cas ordinaire, que le mouvement soit uniforme, il faut que les forces se fassent équilibre et, par conséquent, que le point A soit sollicité par une force représentée par la différence de ces deux-ci, et agissant dans le sens du mouvement: elle a pour expression $\frac{p f R}{R+a}$ qui diffère très peu de $p f$, a ne dépassant pas en général $0^m,001$. Donc, en résumé, lorsque deux roues viennent à rencontrer une combe, celle qui est extérieure et dont le boudin se rapproche du rail, est sollicitée dans le sens du mouvement par une force égale à très-peu près à $p f$; celle qui est à l'intérieur, dont le boudin s'éloigne du rail par une force de sens contraire égale à $-p f$, et il se produit ainsi un couple ayant pour bras de levier la largeur de la voie, et qui tend, sans l'intervention du boudin, à placer l'essieu normalement à la combe et à le faire converger vers son centre; et si son rayon de courbure est constant pour tous ses points, les choses étant ainsi disposées d'une manière normale, les forces cessent d'agir et le roulement se fait sans frottement.

On conçoit que sur une partie rectiligne du chemin, si une cause quelconque, telle qu'une inégalité dans la pose des rails, vient à déplacer les wagons de leur position normale, les diamètres des circonférences de contact des roues cessent d'être égaux, le couple dont il a été parlé tout-à-l'heure se produit sur les roues et tend à les ramener à leur position ordinaire par une série d'oscillations autour d'elle. Le couple a le même effet dans les combes, et la position normale seule est différente.

Pour les locomotives, p est au moins égal à 4000^k , f n'est pas inférieur à $0,1$, et la force est représentée par 400^k . Pour que l'essieu puisse obéir, comme nous l'avons supposé, à l'action du couple, il faut qu'il soit laissé un peu de jeu dans les collets. Dans l'origine, on cherchait autant que possible à s'opposer à ces déplacements; mais quand on se fut une fois aperçu qu'il en résultait un accroissement de traction sans plus de garantie contre les dangers de déraillement, on laissa quelque latitude aux essieux de wagons et à ceux de derrière des locomotives: quant à

l'essieu de devant, comme c'est lui qui doit guider tout le train, et que son déraillement entraînerait les plus graves conséquences, on tient avant tout à s'assurer de sa parfaite fixité.

Le jeu qu'on donne aux essieux dans leurs collets est très petit et la distance mise entre le rail et le rebord est très faible; aussi, les roues éprouvent-elles un frottement lorsque les courbes ont un rayon plus petit que le rayon limite qui a été calculé plus haut. Quand la quantité e dans le système de roues avance vers la courbe extérieure, où la distance du rebord au rail est d'un centimètre, le rayon est de 750 mètres; quand on la porte à 0,015, ce qui est très facile dans la pratique, il est de 450 mètres. Si la courbe à parcourir est d'un rayon plus petit, l'une des roues éprouve un frottement de glissement. Cet inconvénient n'est pas grave dans les gares où les convois vont lentement, et où la machine a, par cela même, une force plus grande; dans le parcours même du chemin, il exige un ralentissement de vitesse; sans cette précaution, le rebord frottant contre le rail et produisant un mouvement de cisailles, risquerait de sortir de la voie. Le rayon des courbes doit donc forcément être considérable pour ne pas exiger un ralentissement trop grand, et l'on peut dire que, loin des stations, sur un chemin qu'on doit parcourir à toute vitesse, les courbes doivent avoir au moins 750^m de rayon. Il en résulte que les changements de direction dans un chemin de fer sont une source abondante de difficultés et de dépenses. Il serait souvent très utile de se servir de courbes à petit rayon, et l'on a fait un grand nombre d'inventions pour permettre aux wagons d'en parcourir. Parmi tous les moyens qui ont été proposés, les deux plus remarquables sont ceux de M. Laignel et de M. Vinoux.

Le système de M. Laignel consistait à faire rouler celle des deux roues d'un même essieu qui est la plus éloignée du centre de la courbe, non plus sur sa jante, mais sur son rebord. On fit plusieurs expériences pour essayer ce moyen; on lançait un wagon sur une pente au bas de laquelle il parcourait avec une grande vitesse une courbe d'environ 50 mètres de rayon; le rebord de la roue extérieure portait sur la gorge d'un rail posé à plat. Les déraillements ont été très rares dans ces expériences.

On proposait d'appliquer ce système à tous les chemins de fer; mais, il avait eu plusieurs inconvénients; le rapport des deux circonférences de roulement étant constant, le rayon des courbes aurait dû aussi être constant, comme cela résulte des théories précédemment exposées. M. Laignel avait alors proposé de former les grandes courbes d'une série de parties droites réunies par des courbes du rayon voulu. Ce système d'ailleurs, tout en satisfaisant à peu près à la condition de la différence des deux circonférences de roulement, ne satisfaisait pas à celle de la convergence des rayons. Le rebord aurait bientôt coupé la gorge du rail. La saillie du rail sur sa gorge n'aurait pas suffi pour assurer contre tout déraillement, et l'on aurait été forcé de mettre un contre-rail extérieur. La force centrifuge étant en raison inverse du rayon de courbure et proportionnelle au carré de la vitesse, était très grande dans les courbes de 50 mètres; c'était un frottement inadmissible sur le contre-rail. Enfin, "d'après le résultat d'expériences faites devant une Commission d'Ingénieurs des Ponts et Chaussées et soumises au calcul par M. e Mamiel", dit M. Poncelet dans son rapport à l'Académie des Sciences, "la résistance du wagon de M. Laignel qui n'est que $\frac{1}{200}$ environ de la charge totale pour la partie rectiligne de la voie, s'élevait à $\frac{1}{22}$ pour la partie courbe, ou à peu près au décuple". Aussi ne regarde-t-on pas le

système de M. Laignel comme bon dans les grandes lignes ; mais il peut être employé avec avantage dans les gares où les points de chargement et de déchargement sont multipliés.

Dans le système de wagon articulé de M. Arnoux, qui est beaucoup plus parfait, les axes convergent rigoureusement vers le centre de la courbe. L'essieu étant à peu près fixe et les roues mobiles comme dans les voitures ordinaires, rien n'exige l'égalité des espaces angulaires décrits par chacune d'elles ; il en résulte que dans les courbes, l'une tourne un peu plus vite que l'autre. Les essieux sont mobiles autour de leurs milieux, comme dans l'avant train des voitures ordinaires. L'essieu antérieur de la locomotive est précédé de galets inclinés qui touchent les rails et qui servent à donner un premier mouvement de rotation à un axe horizontal. Celui-ci communique, par un système de chaînes sans fin, très bien entendu, un mouvement analogue aux essieux, qui convergent alors vers le centre de la courbe. Au moyen de ce système de voitures, on peut parcourir des courbes d'un très petit rayon : on peut en voir un exemple au chemin de fer de Seaux, où les convois remontent des côtes en suivant des lacets, et notamment, dans les gares extrêmes, dans des courbes de 18 mètres de rayon.

Les roues éprouvent souvent des efforts latéraux qui tendent à leur faire prendre une position oblique sur leurs axes de rotation. Dans les wagons ordinaires, la roue étant calée sur l'essieu, reporte ses efforts sur le rail, mais ils augmentent l'usure que produit le frottement dans les wagons articulés où la roue tourne sur la fusée de l'essieu. La roue doit jouer bientôt sur la fusée en cessant d'être normale à l'axe. Cette détérioration des essieux est la première qui se produit dans les voitures ordinaires. Aussi, l'on peut juger si des roues sont neuves à la facilité avec laquelle elles cèdent à un effort normal à leur plan.

Le système de M. Arnoux permettrait de gravir les côtes, d'éviter les points difficiles, et de placer plus avantageusement les ouvrages d'art. Mais, pour le matériel roulant, il exige des appareils plus compliqués, et probablement plus chers d'entretien et de premier établissement. Dans les grandes lignes, les difficultés qui exigeraient des courbes à petit rayon ont été rares relativement à la longueur dans les chemins exécutés jusqu'à présent. L'emploi de wagons articulés n'aurait donc pas compensé l'augmentation des frais d'achat et d'entretien du matériel par une plus grande facilité d'exécution de la voie. Il vaut donc mieux ne pas les employer sur les chemins construits en pays de plaine. Mais, si l'on faisait un chemin de fer dans un pays montagneux, le système Arnoux pourrait être utilement employé. C'est une question d'appréciation, dont la solution varie avec les circonstances.

Cette concitité des jantes et ce jeu laissé aux essieux constituent une solution très simple et à-peu-près complète du problème du parcours des courbes sans frottement, et les moyens plus ou moins ingénieux et compliqués imaginés pour le résoudre d'une manière complète, ont perdu une grande partie de leur intérêt.

§. 2.

Des Essieux.

L'essieu est une barre de fer destinée à porter le poids de la voiture et assemblée

dans les moyeux des roues, avec le centre desquelles son axe doit coïncider exactement; la voiture repose sur l'essieu à l'aide de deux collets ou sortes de fourchettes munies d'un cordons.

Considérons une moitié de l'essieu: elle est encastrée dans le moyeu, pressée de bas en haut par le rail, et de haut en bas par le poids de la voiture qui est réparti sur toute la fusée ou partie comprise dans les collets; si l'on suppose que cette force soit concentrée en son milieu, l'essieu réduit à son axe est dans le cas de la ligne A, B, C, D, E , (fig. 182) sollicitée en A et e par deux forces de sens contraire $P, -P$, et encastrée dans la partie BD ; dans les diverses sections comprises dans la partie AB , le moment des forces élastiques, et par suite la tendance à la rupture, augmente depuis A jusqu'en B ; il tendrait à augmenter jusqu'à C s'il n'y avait pas encastrément, et à partir il serait constant pour tous les points et égal à $P \cdot \overline{AM} - P \cdot \overline{CM} = P \cdot \overline{AC}$. On voit donc, d'après cette analyse, que la partie comprise entre les deux roues est la plus exposée à la rupture, mais la théorie n'indique pas que la rupture doive s'y produire plutôt en un point qu'en un autre. Aussi, dans l'origine, les constructeurs avaient-ils donné la même épaisseur à toute cette portion de l'essieu; mais on ne tarda pas à s'apercevoir qu'en cas de rupture, celle-ci se produisait toujours contre la face intérieure de la roue. Si la théorie ne donne pas l'explication de ce fait, c'est qu'elle ne peut tenir compte de l'influence que l'encastrément exerce sur l'élasticité de l'essieu près de ce point; par cela même que les oscillations sont moins fortes, l'effort pour produire la rupture est plus considérable; aussi maintenant on donne en ces points un renflement, en ayant soin de le raccorder par un congé avec la partie qui est encastrée.

En observant l'aspect des essieux cassés, on remarque que le milieu de la cassure seul est saillant, ce qui indique d'une manière certaine que la rupture ne se produit pas instantanément, mais qu'il se forme d'abord une fente qui se propage circulairement. Il est donc d'une grande importance de visiter fréquemment l'état de cette partie de l'essieu; l'on prescrit quelquefois au mécanicien de l'entretenir parfaitement poli sur une largeur de 5 à 10 centimètres, pour le forcer à y porter une attention spéciale et pour mettre à nu la trace de la fente qui pourrait rester cachée sous une couche de crasse et de poussière. Il a de plus une prime chaque fois qu'il signale une trace de rupture.

On détermine le diamètre de la fusée d'après la formule de la résistance des matériaux

$$Pa = \frac{\pi T d^3}{32}$$

dans laquelle P est l'effort supporté, à la longueur de son bras de levier, T la tension à laquelle on veut soumettre le fer par centimètre carré, d le diamètre inconnu, π le rapport de la circonférence au diamètre. Pour les wagons de marchandises, $a = 18$, $T = 270$, $P = 2000$, le poids de la caisse du wagon étant 2000^k , et celui des marchandises qu'il contient 6000 environ: il en résulte $d = 11^m$. Dans cette application, l'unité de mesure est le centimètre et 270 est la tension maximum supportée par l'essieu par centimètre carré exprimée en Kilogrammes; on donne aux essieux de voiture la même dimension, bien que le poids à supporter soit beaucoup moindre,

pour ne pas compliquer le matériel et pour avoir des garanties plus grandes encore contre la rupture, bien que la limite de rupture soit environ de 4000^k ; le chiffre de 270 ne doit pas être considéré comme trop faible dans les circonstances dont il s'agit.

La principale résistance qu'un convoi éprouve sur un chemin de fer, est le frottement des fusées sur les coussinets: l'équation de l'égalité des travaux moteur et résistant, considérée pendant un tour de roue, donne $T = Pf \frac{r}{R}$, expression dans laquelle T est l'effort de traction nécessaire pour vaincre la résistance due au frottement des fusées, P la charge supportée, r et R les rayons des fusées et des roues. Pour rendre T le plus petit possible, il faut augmenter R, ou diminuer r et f. Pour rendre le coefficient de frottement f aussi faible qu'on peut, on lubrifie les surfaces frottantes à l'aide d'une substance grasse. On ne peut pas augmenter le rayon R de la roue au delà d'une certaine limite; il ne faut pas en effet trop élever le centre de gravité des wagons, ce qui diminuerait leur stabilité sur les rails, ni accroître l'effort de traction en augmentant le poids des roues. On donne en général $0^m,45$ à leur rayon, que l'on ne porte jamais au delà de $0^m,50$. Il semblerait que r doit être aussi petit que possible; aussi avait-on d'abord pris $r = 0,25$ sur le chemin de fer de St. Germain; mais d'autres considérations qui vont être exposées font voir que cette quantité est de beaucoup trop faible.

La quantité f avait été donnée par des expériences; mais, dans les cabinets de physique, les expériences ne durent que quelques minutes, tandis que, dans la pratique, le frottement dure quelquefois 12^h consécutives; il dure même parfois davantage, par exemple, dans les convois de marchandises qui se rendent de Bruxelles à Paris. Il se produit alors quelquefois un phénomène connu sous le nom de chauffage. La continuité du frottement élève beaucoup la température des fusées; on peut admettre que la chaleur résulte de la force motrice comme la force elle-même est produite par la chaleur. Les surfaces frottantes s'échauffent, s'amollissent et le frottement augmente; par suite, la température s'accroît aussi et rend le frottement encore plus considérable. La chaleur s'élève quelquefois assez pour brûler la matière qui lubrifie l'essieu; et l'on voit alors une flamme s'élever des boîtes à graisse. On dit alors que l'essieu a chauffé. Ce phénomène est assez fréquent, et l'on peut dire qu'il se produit au moins une fois par jour sur chaque chemin de fer. Il carbonise les graisses ou l'huile qui ne servent plus de corps lubrifiants; l'alliage qui forme le coussinet de la boîte à graisse se combine avec le fer; l'essieu finit par s'amollir et par céder en se brisant à la pression qu'il supporte.

Pour diminuer le frottement, on a formé la partie de la boîte à graisse qui repose sur l'essieu, de différents alliages. Celui que l'expérience paraît indiquer comme le meilleur, varie de 80 de cuivre et de 20 d'étain à 85 de cuivre et 15 d'étain. Le plus dur est celui qui contient le plus d'étain; quand la proportion de ce métal diminue, l'alliage s'amollit, et son frottement sur le fer augmente. Quand on met plus d'étain, l'alliage est plus dur et produit moins de frottement, mais devient plus fragile. On varie en conséquence la proportion d'étain suivant que la rupture est plus ou moins à craindre. On a remarqué qu'on diminuait les chances de chauffage en diminuant le poids supporté par centimètre carré de la projection horizontale de la fusée, c'est-à-dire en augmentant le diamètre de cette partie de l'essieu. Ainsi, ce diamètre est maintenant, sur le chemin de fer de St. Germain, de $0^m,07$, et de $0^m,08$ sur celui du Nord; ces

dimensions paraissent convenir parfaitement. Sur ce dernier chemin, la longueur de la fusée adoptée pour les trains rapides, est de $0^m,20$, et par suite sa projection est de $0,20 \times 0,08 = 0,0160$. Le poids supporté par un bout de l'essieu est au maximum de 2000^k , ce qui fait de 12 à 13^k par centimètre carré. On peut donc dire que dans les wagons destinés à marcher avec la vitesse de 16 à 20 mètres par seconde, il convient de calculer le diamètre de la fusée de manière à ce que sa projection ne supporte pas plus de 13 à 14^k par centimètre carré. Les dimensions de cette projection devront être augmentées proportionnellement aux vitesses et au poids à supporter par l'essieu. On peut considérer cette règle comme le résultat d'une très longue expérience.

Le phénomène du chauffage qui a lieu, en général, pour tous les axes qui se meuvent entre des collets, était connu des mécaniciens avant que l'établissement des chemins de fer l'ait rendu très fréquent; on savait que le moyen de l'éviter est d'augmenter les dimensions des surfaces frottantes et d'employer des procédés de graissage très parfaits. Lorsqu'un axe a chauffé, il faut l'arrêter, le refroidir avec de l'eau froide, nettoyer les surfaces frottantes, et les enduire de graisse.

Les accidents produits par la rupture des essieux peuvent être fort graves; c'est à cette cause qu'est dû celui du 8 Mai 1842 sur le chemin de Paris à Versailles; aussi, met-on le plus grand soin à faire des essieux d'une solidité parfaite. On a vu comment on a été conduit à en augmenter les dimensions près des fusées, et à leur donner entre les roues, contrairement aux indications de la simple statique, la forme de deux troncs de cône tournant leur plus petit bout l'un vers l'autre, et réunis par une partie cylindrique d'environ $0^m,30$ de longueur. On leur a donné d'abord une forme un peu différente de celle qu'on leur donne maintenant. On tournait la partie qui devait être placée dans le moyeu de la roue, et on laissait un angle vif au point de jonction de cette partie et du reste de l'essieu. Cet angle servait d'épaulement à la roue, et l'enveloppait ainsi de se décaler et de se rapprocher du milieu de la voie. Mais on s'est bientôt aperçu que les ruptures avaient toujours lieu à cet angle vif; on remarqua que lorsqu'une pièce cylindrique est dressée suivant deux diamètres différents, il faut en raccorder les portions par une surface adoucie; que sans cette précaution les ébranlements se communiquent inégalement, et qu'une rupture à l'angle vif est fréquente. C'est à cet angle qu'ont eu lieu presque toutes les ruptures des anciens essieux. En conséquence, on a modifié cette première forme: on tourne la surface de l'essieu sur une longueur qui est d'environ $1/2$ centimètre plus grande, que l'épaisseur du moyeu de la roue, et on la raccorde avec la partie brute de l'essieu par un congé ou combe adouci. La naissance de cette combe limite à 4 ou 5 millimètres la quantité dont la roue peut se rapprocher du milieu du wagon. Ce déplacement, quoiqu'il soit un inconvénient minime, est observé avec soin et, dès qu'on s'en aperçoit, on enlève l'essieu pour fixer de nouveau les roues dans la position qu'elles doivent occuper. On forge l'essieu sur un diamètre un peu plus grand que celui qu'il doit avoir définitivement. Mais, comme la surface de l'essieu a reçu directement l'action du martelage, et, par suite, est plus dure que le reste de cette pièce, il importe d'enlever au tour la plus petite quantité de fer possible. Aussi exige-t-on que le diamètre de l'essieu forgé ne diffère que de 2 à 3 millimètres de celui qu'on veut lui donner. Cette précaution augmente la solidité de l'essieu. Le soin que l'on prend pour découvrir les fissures qui précèdent toujours la rupture d'un essieu près de la roue, a été indiqué

plus haut. C'est un des moyens les plus efficaces d'éviter les accidents.

Les wagons et les voitures reposent en général sur des fusées extérieures; mais, dans les locomotives, il est plus commode et plus économique de faire supporter leur poids intérieurement aux roues. Dans ce cas, comme dans le cas de la fusée extérieure, la ligne AB (fig. 183) est dans le cas d'une pièce encastrée soumise à des forces (P, F) ; le moment des forces élastiques et, par suite, la tendance à la rupture, est $P.B\delta$; en un point D , il est... $P\overline{AD} - P.\overline{BD} = P.\overline{AB}$, quantité constante. Le calcul, comme dans le cas d'une fusée extérieure, n'indique donc rien sur la forme à donner à l'essieu. Mais comme il importe que la rupture n'ait pas lieu sous le coussinet, on donne à l'essieu en ce point un diamètre plus grand de quelques millimètres que celui de la partie voisine intérieure de l'essieu. Un congé sert à fixer la boîte à graisse; au delà, on donne à l'essieu une épaisseur un peu plus petite que sous le coussinet, et on nettoie avec soin cette partie; dès qu'une fissure est signalée, on enlève l'essieu et on le remet au rebut.

On a remarqué qu'après l'établissement d'un chemin de fer, il s'écoule un certain temps avant qu'il se produise de rupture d'essieu, qu'au bout de ce temps, les ruptures deviennent très fréquentes. On en a conclu que le fer, capable de résister aux efforts auxquels on le soumet, finit par perdre cette qualité. En examinant la cassure du fer qui, en sortant de la forge, était de très bonne nature, on remarqua qu'elle présentait l'aspect du fer à gros grains, et on fut amené à conclure que, par suite des trépidations, le grain et la qualité du fer se modifient. Ces faits, et beaucoup d'autres, démontrent la vérité de cette remarque qu'aucune théorie n'a pu encore expliquer.

Pour s'en convaincre, on peut faire l'expérience suivante, qui est bien simple. On prend une barre de fer neuve de bonne qualité, on la coupe en plusieurs portions; on en prend une, et on la courbe sous le marteau, à l'aide d'un étau, sans la rompre; on en prend une seconde, qu'on martèle à la température du rouge-cerise, et qu'on courbe ensuite à froid sans plus de danger que la première; puis on en prend une troisième dont on continue le martelage après que le refroidissement s'est opéré; elle ne peut plus alors se courber à froid; quelques coups de marteau suffisent pour la briser; en même temps, on remarque une altération sensible de son grain. Il est à ces altérations des essieux un remède facile: c'est de les porter à la température du rouge-cerise, et de les laisser refroidir lentement; ils cessent alors d'être cassants et reprennent l'aspect fibreux.

L'opération du recuit a le double avantage de rendre au fer ses qualités premières et de permettre de reconnaître plus facilement les fissures qui pourraient exister près des moyeux et qui apparaissent comme un voile dans l'épaisseur du fer devenu translucide. Après quelque temps de service, il est prudent de les mettre au rebut, au moins quand les dimensions sont faibles; leur durée dépend du diamètre. Sur le chemin de St. Germain, on leur avait donné $0^m.09$ près du moyeu, et après 80,000 Kilomètres, il devenait prudent de les changer. Sur le chemin du Nord, on leur a donné $0^m.11$, et jusqu'ici ils se conservent très bien; mais, du moment où on s'apercevra qu'ils se cassent quelquefois, on assignera une limite au parcours à leur faire exécuter avant de les changer. Les essieux de voitures sur les chemins ordinaires ne doivent pas faire plus de 60 à 75 mille Kilomètres. Leur altération est plus rapide sur les

routes pavées que sur les chaussées d'empierrement. Sur plusieurs chemins de fer, on numérote chaque essieu, on conserve un échantillon du fer dont il est formé, et on tient un registre des diverses opérations qu'il subit et de l'espace qu'il parcourt. Connaissant ainsi toute l'histoire de chacun d'eux, on espère arriver à reconnaître exactement l'époque où il convient de retirer de la circulation les diverses espèces d'essieux. Une longue expérience de ces questions peut seule indiquer quelle est la durée du parcours convenable, et quel est l'effort sous lequel il convient le mieux de faire travailler le fer : il est à présumer qu'on l'a un peu dépassé, et que les essieux de wagons ne devraient pas supporter plus de 180 kg par centimètre carré de pression maximum, et ceux de locomotives 150 kg .

Grâce à toutes les précautions que nous venons d'indiquer, et au soin qu'on prend pour fabriquer les essieux, leurs ruptures sont devenues très rares. Des accidents analogues à ceux que nous avons décrits, se présentent également dans les voitures ordinaires.

Pour fabriquer un essieu, on prend plusieurs barres de fer de bonne qualité, préparées dans des forges au bois. Le fer doit être analogue à celui dont on se sert pour les bandages. On prend des barres ayant toutes la même longueur, afin de n'avoir pas à faire des soudures bout à bout. L'action du marteau ne devant pas s'exercer suivant l'axe de l'essieu, de pareilles soudures seraient mal faites et donneraient lieu à des solutions de continuité dans le sens même où la rupture tend à se produire. On réunit ces barres en un paquet ayant un poids supérieur à celui que doit avoir l'essieu. On les soude généralement au marteau; cependant le laminoir suffit pour certaines espèces de fer.

En Angleterre, où le fer est toujours puddlé, quelques fabricants font des paquets cylindriques formés d'une pièce centrale ronde, entourée d'autres barres prismatiques, telles que la section du paquet soit un cercle parfait. Après avoir porté le tout au rouge, on le passe au laminoir, qui en soude les diverses portions, et réduit à 15 centimètres son diamètre qui était de $0^{\text{m}} 20$. Quand on a obtenu par un des moyens précédents une pièce ronde, on lui donne la forme voulue, en se servant du marteau et d'étampes analogues à celles qui ont été décrites pour les bandages. On ébauche la fusée comme l'indique le contour ponctué a, puis on termine au tour; on a soin quelquefois de laisser au bout de l'essieu un petit cylindre ou témoin b (fig. 184). Quand on reçoit les essieux, on rompt ce témoin en lui faisant supporter des poids marqués, et on conclut par une formule comme la résistance que le fer a présentée par centimètre carré. On conserve avec soin le témoin pour en comparer la texture à celle de l'essieu, quand celui-ci aura parcouru un espace considérable.

Dans l'Artillerie, on fait supporter aux essieux placés horizontalement le choc d'un mouton dont le poids est fixé par le cahier des charges de l'entreprise. Si le fer est de bonne qualité, l'essieu se fausse et ne rompt pas. La flèche qu'il doit prendre est fixée d'avance. Si l'essieu est reçu, on le dresse à chaud et on le met ensuite en circulation. Les compagnies de chemins de fer ne soumettent leurs essieux à aucune épreuve; elles regardent le soin apporté par les fabricants comme la meilleure garantie de leur qualité. Les épreuves de réception deviendront du reste de moins en moins utiles. La nature spéciale de cette fabrication, l'outillage qu'elle exige et la tendance générale à la division du travail, sont autant de causes qui

concentreront nécessairement l'exécution des essieux dans un petit nombre d'établissements qui s'en occuperont spécialement. Leur existence dépendant alors de la bonne réputation de leurs produits, ils rivaliseront de soins et d'attention pour obtenir une fabrication constamment bonne et des pièces de qualité bien connue.

Les locomotives à cylindres extérieurs ont tous leurs essieux droits et semblables à ceux des wagons. L'extrémité de la bielle agit dans ces machines sur un bouton lié invariablement au moyeu. Cette disposition évite, il est vrai, l'emploi des essieux courbés, mais elle a un inconvénient : l'action de la force motrice agit sur deux points distants entre eux d'environ $1^m,70$, et plus éloignés du milieu de la machine que lorsque les cylindres sont intérieurs. On conçoit que les pistons agissant alternativement à chaque extrémité des essieux, l'action de la vapeur s'exerce successivement sur chacun des chassis, de sorte que la machine est entraînée en partie, tantôt par l'action de l'une des roues et tantôt par l'autre. La machine se trouve ainsi soumise à un excès de traction appliqué successivement à droite et à gauche. Par suite de cette action, la locomotive tend à tourner, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre. L'inertie des parties mouvantes de la machine ajoute encore à ce mouvement oscillatoire. Nous reviendrons sur ce sujet à la fin de ce cours. Ce mouvement de lacet est d'autant moindre que les cylindres sont plus rapprochés du milieu de la machine. Aussi les met-on en général l'un à côté de l'autre. Alors l'essieu est nécessairement courbé et forme deux des appareils que nous avons décrits sous le nom de vilbrequins. Les deux vilbrequins doivent être dans deux plans rectangulaires ; l'essieu doit être capable de supporter une grande partie du poids de la locomotive et de l'effort de traction, et doit pouvoir résister à la torsion que la bielle tend à lui faire subir. Le poids que porte chaque coussinet des roues motrices est d'environ cinq tonnes. Les conditions que doivent remplir les essieux courbés exigent donc une grande force et une forme compliquée, ce qui rend leur fabrication difficile. On a proposé plusieurs procédés pour les faire : voici celui qui a le mieux réussi jusqu'à ce jour.

On prend de la fonte de très bonne qualité, on l'affine au bois et l'on en chasse le laitier sous la pression de marteaux puissants. On en forme des galettes rectangulaires ayant de $0,30$ à $0,40$ de côté et $0,03$ d'épaisseur. On superpose cinq de ces rectangles, on les chauffe au blanc soudant, et on les soude aisément au marteau. Dans cette opération, la petite quantité de laitier qui peut être restée dans le fer est chassée par le marteau, en même temps la masse s'allonge et l'on a une plaque de $0^m,10$ d'épaisseur sur $0^m,40$ de large et $0^m,50$ à $0^m,60$ de long. — Enfin, on joint trois de ces plaques, que l'on chauffe au rouge blanc dans un four à revêchie, et qu'on soude avec un marteau pesant de 3 à 4 mille kilogrammes. On obtient ainsi une masse rectangulaire a a (fig. 185) de $1^m,50$ de long, $0^m,50$ de large et de $0^m,30$ de haut. On façonne cette masse au marteau, de manière à lui faire prendre successivement les formes b et c. On chauffe au rouge les parties d, puis on y pratique une ouverture circulaire, au moyen d'un fort poinçon d'acier enfoncé à coups de marteau. Quand l'essieu est refroidi, on le porte sous un ciseau soumis à un mouvement vertical alternatif, qui enlève par copeaux les parties e, et forme les ouvertures e d e des vilbrequins. Il reste à mettre à angle droit les deux manivelles. Pour cela, on chauffe le milieu de l'essieu au rouge-cerise, et on le tord avec des leviers. Cette torsion, de 90° , répartie sur une assez

grande longueur de l'arbre, sous l'influence d'une température élevée, n'altère en rien sa solidité.

Dans ce mode de construction, aucune soudure ne vient favoriser les ruptures qui tendent à se faire dans les parties les plus faibles f , et dans des plans perpendiculaires à celui des plaques qui ont formé l'essieu. Il n'en est pas de même pour les essieux fabriqués il y a quelque temps; on se servait alors, au lieu de plaques, d'une série de barres mises les unes à côté des autres, et il en résultait des soudures perpendiculaires au plan des courbes; les ruptures ont presque toujours suivi l'une de ces soudures. On voit que cet inconvénient est évité par le procédé de fabrication qui vient d'être décrit. On obtient ainsi l'essieu brut de forge; il reste à le tourner.

Le prix des pièces de forge s'estime au poids du fer qu'elles contiennent. Ce prix est très variable. Le fer de première qualité non travaillé, valant 44^{f} les 100^{kg} , dans les essieux droits, le fer se paye de 70 à 75^{f} les 100^{kg} ; enfin, le prix s'élève jusqu'à 400^{f} les 100^{kg} pour les essieux courbés, tournés et ajustés. L'un de ces essieux pèse environ 450^{kg} , ce qui en met le prix à environ 1800^{f} . En raison de ce prix élevé, les fabricants garantissent à leurs essieux un parcours d'au moins $40,000$ Kilomètres.

Quand l'essieu est complètement forgé, il faut le tourner. On le fait supporter par les pointes centrales d'un tour double, et on tourne l'axe. Il faut ensuite tourner les collets ou fusées concentriques, sur lesquelles la bielle doit agir. Pour y parvenir, on fixe à l'essieu des pièces de fonte A (fig. 186) telles que le centre de gravité du système soit sur l'axe passant par le centre d'une des fusées. On trace sur la fonte des projections de l'axe de la fusée et on le fait coïncider avec celui du tour. On peut alors tourner un des collets. On agit de même pour le second. Cette opération exige des ouvriers très exercés. On obtient ainsi des essieux ayant la forme indiquée par la figure 187.

§. 3.

Boîtes à graisse.

Une boîte à graisse est composée d'un coussinet a (fig. 188, 189, 190, 191) formé de l'alliage métallique dont on a parlé plus haut; ce coussinet est maintenu dans une contre-boîte en fonte b , qui porte des cavités c , destinées à recevoir des boulons. Au dessus du coussinet se trouve un réservoir d , destiné à recevoir la graisse, et mis en communication avec la fusée par des ouvertures ou lumières f , placées suivant l'axe de l'essieu. Quatre rainures à angle droit, taillées dans la face inférieure du coussinet d'alliage, convergent vers le centre de chaque lumière et sont destinées à répandre la graisse sur la fusée. Enfin, une partie en fonte (fig. 192), supportée par deux boulons, vient emboîter inférieurement l'essieu. La matière grasse contenue à la partie supérieure de l'appareil, se fond quand le frottement s'échauffe la boîte; elle passe par les lumières et se répartit par les rainures sur toute la surface de la fusée. La quantité de graisse usée de cette manière, est proportionnelle au frottement qui se produit; elle est moyennement de $0,0018$ par kilomètre parcouru par un wagon.

La matière employée d'abord comme graisse était du suif; mais son prix élevé

a conduit à lui incorporer de l'eau. Pour y arriver, on fait chauffer 36^{kg} de graisse avec 4^{kg} de carbonate de soude et 60^{kg} d'eau qu'on ajoute peu à peu. On obtient ainsi une matière grasse qui contient sur 100^{kg} 60^{kg} d'eau, 4 de carbonate de soude et 36 de graisse; cette dernière matière est la seule qui coûte un prix élevé. La composition que nous venons d'indiquer, correspond aux températures basses de l'hiver, supérieures seulement à zéro. La proportion d'eau diminue quand la température de l'air ambiant s'élève, la consistance de la graisse s'accroît en même temps. En été, on emploie une graisse qui ne renferme que 40^{kg} d'eau sur 100^{kg} . En temps de gelée, l'eau pourrait, comme le prouve l'expérience, se séparer de la graisse; le frottement s'accroît alors dans une forte proportion; on autorise alors les graisseurs à introduire à plusieurs reprises une épinglette dans la graisse et à remplir les vides qu'elle y laisse d'une certaine quantité d'huile.

La matière grasse dont on se sert est du suif ou de l'huile de palme venant d'Asie. Cette dernière substance est moins chère que le suif; la matière grasse qu'elle sert à préparer, revient à $0^{\text{fr}}50$ le Kilogramme environ. Pour les machines, on emploie un mode de graissage plus parfait. On se sert d'huile d'olive; c'est-à-dire d'une huile de première qualité. La fusée est, comme dans les wagons, recouverte d'un coussinet d'alliage, mais le réservoir destiné à contenir la matière grasse, a une forme un peu différente (fig. 193); les lumières sont surmontées de tubes qui s'élèvent jusqu'au dessus du niveau de l'huile. De grosses mèches de coton traversent ces tubes, se recourbent autour de leur extrémité pour plonger dans l'huile, et transmettent par capillarité ce liquide à la fusée. On ferme le réservoir aussi hermétiquement que possible au moyen de couvercles en tôle, qui empêchent le sable ou la poussière soulevés par le convoi de pénétrer dans l'huile.

On a proposé plusieurs autres moyens de graisser les fusées, mais ils n'ont pas été consacrés par l'expérience. Quelques uns de ces systèmes consistent (fig. 194) à enduire d'huile la partie inférieure de la fusée, soit au moyen d'un gros bouchon flottant dans un réservoir d'huile et que l'essieu en tournant ferait tourner aussi, soit au moyen d'un rouleau en bois plongeant à moitié dans l'huile, porté sur un axe en fil de fer pressé contre la fusée par des ressorts, et que celle-ci ferait également tourner.

La partie inférieure de la boîte à graisse Normanville (fig. 195) est fondue en même temps que la partie supérieure, avec laquelle elle fait corps. La graisse pénètre sur la fusée par deux lumières a; celles-ci sont réunies par une rainure b, qui sert à répandre plus également la matière grasse sur toute l'étendue des surfaces frottantes. L'ouverture de la boîte porte un couvercle métallique qu'on ferme au moyen d'une vis s'engageant dans un écrou fixe. L'essieu porte un cercle en cuivre d, qui tourne avec lui. Ce cercle, mobile, suivant l'axe horizontal de l'essieu, est pressé contre la boîte à graisse, par une bande de caoutchouc e. La partie fondue de la matière grasse se réunit dans le fond de la boîte, et continue à lubrifier la fusée. La boîte étant fermée de toutes parts, l'action du sable et de la poussière n'est plus à craindre, et la fusée, entourée de graisse, éprouve un frottement beaucoup moindre que dans la boîte à graisse ordinaire.

Cette boîte est adoptée particulièrement pour les trains à grande vitesse, sur plusieurs des principales chemins de fer Anglais; on commence à l'expérimenter en France.

S. 4.

Suspension des voitures et machines.

Après avoir étudié les roues, les essieux et les boîtes à graisse, examinons par quel système ce dernier appareil supporte le poids du corps même de la locomotive.

La chaudière porte par des pièces de forge a (fig. 196) sur un châssis rectangulaire formé de pièces de fer b de 0^m,20 à 0^m,30 de hauteur, sur 0,02 à 0,03 d'épaisseur. Les axes des pièces latérales correspondent au milieu des boîtes à graisse. Une tige verticale c s'appuie, quand le châssis est intérieure, aux roues, sur un évidement pratiqué dans la boîte à graisse. Cette tige porte une ouverture destinée à laisser passer le châssis; elle embrasse le milieu d'un ressort horizontal, formé d'une série de plaques de fer superposées comme l'indique la figure. Lorsque les fusées sont extérieures, le ressort porte directement sur la boîte. Les deux extrémités du ressort sont percées d'un trou dans lequel passe un fort boulon. Un écrou d, vissé au bout supérieur de ce dernier, s'appuie sur le ressort, tandis que l'autre partie du boulon se bifurque pour embrasser le châssis. Les bouts inférieurs du boulon s'épanouissent et portent un trou dans lequel passe un second boulon j, qui relie le premier au longeron. On voit donc que la machine porte par les pièces de forge sur le châssis, celui-ci par les boulons sur le ressort, et enfin ce dernier sur la boîte à graisse et l'essieu. Tel est le système de suspension le plus généralement adopté.

Les ressorts adoucisent les mouvements de la machine. Quand les roues s'élèvent, l'effort qu'elles produisent pour soulever la machine, est contrebalancé par la force d'inertie de sa masse; le ressort plie et le longeron se soulève plus lentement que la roue. On conçoit donc que les oscillations et les chocs qu'il éprouve sont plus lents et plus doux que ceux de l'essieu; si la voie est ondulée, le centre de la roue suivra une ligne parallèle à celle-ci, tandis que la courbe déviée par le centre de gravité de la machine sera moins sinuuse que la voie. Les ressorts régularisent ainsi le mouvement de la locomotive.

Pour maintenir la boîte à graisse pendant le mouvement de rotation de l'essieu, on se sert de deux plaques de fer h (fig. 196) presque en forme de triangles, et qu'on nomme plaques de garde. Ces plaques sont doubles et solidement liées au longeron par des rivets. Quelquefois elles font corps avec cette pièce qui s'épanouit alors près des boîtes pour former les plaques de garde h. Ces plaques se meuvent verticalement par rapport aux boîtes, et un frottement assez considérable s'opère, quelquefois en leurs points de contact. Nous avons vu que par suite de l'action du piston sur la roue, la boîte presse alternativement les pièces de garde avec toute la force de traction, c'est-à-dire une force de 2 à 3 mille Kilogrammes. Cette pression finit toujours par user les pièces frottantes. Pour en diminuer l'usure, on en augmente beaucoup les surfaces. On met entre la boîte et les pièces de garde, deux morceaux de fonte K (fig. 197) qui pénètrent entre ces dernières auxquelles ils sont fixés par des rivets, et sur lesquelles ils ont saillie. Grâce à l'étendue des surfaces frottantes, ce n'est qu'après un temps assez considérable que le jeu peut produire un balottement. Dans les roues motrices, la pression s'exerce successivement sur chaque face de la boîte, le moindre jeu donne naissance à des chocs qui augmentent beaucoup l'usure et

qui pourraient faire casser les plaques ou les boîtes. Les pièces K (fig. 197) remédient presque complètement à cet inconvénient; mais on est parvenu à y obvier avec plus de perfection, par la méthode suivante: on incline la face mn ordinairement verticale, et on fait de la pièce K un coin mobile. Ce coin de rattrapage, de jeu, est soutenu (fig. 198) par un boulon à vis qui s'appuie sur une barre de fer reliant les deux plaques de garde. Quand l'usure a produit un peu de jeu, on relève les coins en tournant les écrous l, et la boîte se trouve de nouveau convenablement maintenue. On se sert maintenant de cet appareil dans toutes les machines soignées, mais seulement pour les roues motrices dont la pression s'exerce par les boîtes, suivant deux sens différents. Pour les autres roues, on préfère laisser à leurs boîtes le jeu nécessaire pour faciliter le passage des courbes. Du reste, les dispositions que nous venons de décrire et qui sont les plus ordinaires, varient beaucoup dans les machines et dans les voitures.

Non seulement, les ressorts diminuent les mouvements brusques dans le sens vertical, mais ils amoindrissent le maximum d'effort, que doivent supporter les essieux. Quand ceux-ci s'élèvent, ils doivent exercer sur la machine, pour lui faire éprouver un mouvement analogue, une force représentée par $m \frac{dv}{dt}$, m étant la masse de la machine, et v la vitesse avec laquelle elle est soulevée. Les ressorts diminuent la rapidité du mouvement vertical de la chaudière, diminuent le rapport $\frac{dv}{dt}$, et par suite la force $m \frac{dv}{dt}$ qui pourrait excéder indéfiniment le poids de la machine. On restreint ainsi les limites entre lesquelles varie $m \frac{dv}{dt}$, et l'on peut donner de moindres dimensions aux essieux qui doivent pouvoir résister à cette force et au poids de la machine. Aussi met-on maintenant des ressorts même aux voitures à marchandises, tandis qu'on n'en avait d'abord adapté qu'aux wagons, pour la plus grande commodité des voyageurs.

Un autre avantage des ressorts consiste à rendre l'usure des rails plus faible, à rendre leur contact avec les roues plus continu, et à diminuer par là les chances de déraillement.

Si les voitures ne sont pas munies de ressorts, si par l'effet des inégalités de la voie, la roue s'élève au dessus du rail, sa pesanteur seule tend à l'y ramener, et elle suit pour s'en rapprocher la loi de la chute des corps graves. S'il y a un ressort, la roue en retombant est sollicitée par son poids comme dans le cas précédent, et en outre par la réaction du ressort, et la constante g est dans ce cas remplacée par $g \left(1 + \frac{m'}{m}\right)$, m étant la masse de la roue et m' la masse du poids supportée par le ressort, à l'instant qu'on considère.

La position du centre de gravité d'une machine locomotive, relativement à ses roues, est une des choses les plus importantes qu'il y ait à considérer dans sa construction; car l'adhérence des roues motrices dépend du poids qu'elles supportent, et celui-ci est en fonction de la position du centre de gravité.

Dans les machines à quatre roues, le poids supporté par chaque paire est réciproquement proportionnel à la distance de leurs essieux au centre de gravité du système. Il n'y a dans ce cas aucune indétermination.

Il n'en est pas de même dans les machines à six roues. Si nous appelons

en effet π le poids total d'une locomotive, dont le centre de gravité est en G (fig. 199) et P, Q, R , les poids supportés par les essieux des roues désignées par ces lettres, nous n'avons entre ces quantités et les distances a, b, c , indiquées sur la figure, que les deux équations

$$P + Q + R = \pi$$

$$Pa + Qc + Rb = 0$$

$$\text{et } P = \frac{\pi b - Q(b-c)}{b-a}$$

$$R = \frac{\pi a - Q(a-c)}{b+a}$$

Dans le cas où le centre de gravité serait à gauche de la roue A , on aurait des équations semblables.

On voit par là que la charge de l'une des roues est indéterminée et que celle de la roue motrice en dépend. On profite de cette indétermination pour rendre la plus grande possible la charge A . Le moyen employé est fort simple. Les ressorts des roues extrêmes sont garnis de vis qui permettent de les tendre plus ou moins, et par conséquent de faire varier la partie des points de la machine qui porte sur eux. On fait supporter aux roues antérieures, dont le déraillement serait le plus funeste, un poids plus considérable qu'aux roues de derrière.

Ces relations algébriques se traduisent graphiquement d'une manière commode, par la construction suivante : soit ACB (fig. 200) la ligne sur laquelle porte la locomotive. Soient A, B, C , les points de contact des roues de support et de la roue motrice. Soient P, Q, R , les poids supportés par chacune d'elles. Menons une horizontale BD , représentant le poids total de la machine, à l'échelle de 0",01 pour 1000^{kg}, par exemple. Soit G une ligne parallèle à l'action de la pesanteur et passant par le centre de gravité de la machine ; soient abc les distances de A, B, C à cette ligne. Si nous desserrons complètement les écrous d (fig. 196) des roues motrices, la machine ne portera plus que sur les roues A et B et $Q=0$. Soient P', R' les poids qu'elles supportent ; si je joins AD et si je mène GE parallèle à AD , les lignes DE, EB représenteront les poids R' et P' ; la similitude des triangles ADF, GEF donne en effet

$$P'a = R'b$$

$$\text{et la ligne } DF = P' + Q'$$

Supposons que les écrous des roues B soient desserrés ; alors la machine porte sur A et C et $R=0$; à une distance quelconque l , menons une parallèle IK à DB ; menons deux perpendiculaires DL, EK , de manière à ce que $DB = IK$. Sur une ligne inclinée KL , prenons $KM=c$ et $LM=a$. Joignons IL et menons MH parallèle à IL . Les lignes IH, HK représenteront les poids Q'' et P'' supportés en A et c : en effet, les triangles semblables ILK , et HMK donnent

$$Q''c = P''a,$$

et IK égale le poids total de la machine, ou $P'' + Q''$

Supposons maintenant que la machine porte sur ses six roues. Joignons E, H et

EI, et menons une parallèle à DF. Les parties NO, OV, VX de cette parallèle satisferont aux mêmes équations que les poids supportés en A, B, C. On voit en effet que $P+Q+R = DB$ égale le poids total de la machine. En outre les triangles semblables donnent.

$$R = x \frac{R'}{l}$$

$$Q = Q'' \frac{l-x}{l}$$

$$P = R' + P' - Q - R = R' + P' - \frac{xR'}{l} - Q'' \frac{l-x}{l}$$

et l'on peut voir aisément que ces valeurs satisfont à l'équation $Rb + Qc = aP$; car si on les substitue dans cette équation, elles donnent $P'' + Q'' = P' + R'$, équation identique, puisque $DB = IK$.

Chapitre IX.

Chaudronnerie.

§. 1^{er}.

Des Chaudières et des Tubes.

Avant de nous occuper d'une manière particulière de la construction des chaudières des machines locomotives, nous présenterons quelques considérations générales sur l'art de la chaudronnerie et sur les propriétés des feuilles métalliques ordinairement employées dans ce genre de construction.

Les tôles livrées au commerce par les usines à fer sont généralement divisées en trois classes: les tôles faibles qui ont depuis $\frac{1}{2}$ jusqu'à 3 millimètres d'épaisseur. Les tôles moyennes dont l'épaisseur varie de 3 à 6 millimètres. Enfin, les tôles fortes qui ont de 6 à 12 et même 15 millimètres d'épaisseur.

Les dimensions ordinaires des feuilles de tôle n'excèdent pas 1^m,10 à 1^m,20 de largeur, sur 1^m,40 à 1^m,60 de longueur.

On appelle sens du laminage d'une feuille de tôle la direction perpendiculaire aux arêtes des cylindres du laminoir au moyen duquel elle a été façonnée. La tôle soumise à un effort dans cette direction, présente plus de résistance que dans toute autre. On doit tenir compte de cette considération dans l'assemblage des feuilles d'un ouvrage en chaudronnerie.

Les feuilles de tôle ne peuvent être réunies les unes aux autres par des soudures.

Le peu d'épaisseur de ces lames de fer les expose à se brûler par un feu trop ardent, ou à se refroidir trop vite une fois hors du feu, quand on veut opérer la soudure. On les réunit les unes aux autres par des rivets, comme nous allons l'indiquer. On prend une tige de fer ayant à-peu-près le diamètre que doivent avoir les rivets, et on la coupe en morceaux de même longueur. Après avoir chauffé au rouge ces morceaux, on les introduit successivement jusqu'à mi-hauteur dans un trou cylindrique pratiqué dans une enclume et de diamètre convenable. On place une étampe sur leur extrémité supérieure et on l'écrase à coups de marteau. Le fer, amolli par la chaleur, se moule dans l'étampe, et la tête du boulon se trouve ainsi formée. Les deux feuilles de tôle sont percées de trous correspondants et placées l'une sur l'autre, comme l'indique la figure 201. On introduit alors dans les deux trous, placés l'un sur l'autre, un boulon chauffé au rouge, et l'on en soutient la tête, soit au moyen d'un levier en bois appuyé sur une enclume, soit au moyen d'une masse de fer. Dans ce dernier cas, le coup de marteau, agissant sur une masse considérable, ne lui fait éprouver qu'un faible mouvement. On frappe sur l'extrémité du boulon, de manière à refouler le fer et à lui donner la forme d'un cône, ou d'une portion de sphère. Le corps même du boulon prend alors la forme des trous de la tôle, de telle sorte que, s'ils ne sont pas exactement superposés, ou s'ils sont coniques, il les remplit parfaitement. Le rivet est encore très chaud quand l'opération du battage est terminée. Pendant son refroidissement, il se contracte, tend à diminuer de longueur, et presse l'une sur l'autre les feuilles de tôle avec une très grande force.

Avant de commencer le battage du rivet, on doit s'assurer que les deux feuilles de tôle sont parfaitement en contact. On conçoit en effet que s'il n'en était pas ainsi, le fer encore mou, céderait à l'action du marteau et s'introduirait dans le joint des deux feuilles, comme l'indique la figure 202. Il s'opposerait ainsi complètement à tout rapprochement ultérieur des deux lames.

On produit ce rapprochement préalable des deux feuilles avec des boulons à vis, que l'on passe dans quelques-uns des trous pratiqués dans la tôle, qu'on a eu soin de dresser préalablement à l'endroit où doivent se faire les rivures. On place les rivets intermédiaires, et quand ils sont en assez grand nombre pour produire eux-mêmes le rapprochement, on enlève les boulons à vis et on met aussi des rivets dans les trous qu'ils occupaient.

Les rivets sont ordinairement écartés de 0^m,04 à 0^m,06 d'axe en axe. Leur diamètre varie de 0^m,015 à 0^m,020.

Quand on se propose de soumettre un liquide ou un gaz à une pression considérable, dans une enveloppe faite à l'aide de rivures, on fait généralement suivre cette opération d'un mâtage. Pour constater qu'une chaudière est close hermétiquement, on la remplit d'eau qu'on soumet à une haute pression au moyen d'une presse hydraulique. Il existe souvent, entre deux plaques de tôle rivées entre elles, un petit intervalle de $\frac{1}{10}$ à $\frac{1}{20}$ de millimètre, par où il se produit, lors de l'épreuve, un petit jet ou un suintement d'eau. En marque à la fois les endroits où ils sont en lieu, afin d'y faire un mâtage. Pour faire cette opération, l'on dresse la extrémité des feuilles de tôle suivant un plan incliné a b (fig. 201), puis on refoule au moyen d'un ciseau à tranchant émoussé, une petite quantité de fer à la feuille inférieure sous la feuille supérieure. Celle-ci réagit par son élasticité et presse sur le petit bourrelet métallique

avec une force considérable. Cette pression est d'autant plus forte que la saillie en a de la tête est plus faible; cette saillie se nomme la pince.

Cette considération fait reconnaître pourquoi l'on recommande de ne pas donner à la pince trop de longueur. L'ouverture se trouve alors parfaitement bouchée. On obtient ainsi des chaudières très étanches, où l'eau et la vapeur peuvent être soumises à des pressions considérables.

Pour percer les trous destinés à recevoir les rivets, on se sert d'une machine composée d'un fort levier à bras inégaux, mobile autour de deux tourillons. Un excentrique, placé à l'extrémité de son plus grand bras et mu par la vapeur, lui fait subir un mouvement alternatif. Le bout du plus petit bras de levier porte un cylindre dans lequel un poinçon se trouve fixé par une vis de pression. La course du poinçon n'excède pas l'épaisseur de la plus forte tôle. Une enclume porte une ouverture circulaire placée directement sous le poinçon. On place la tôle sur l'enclume, et le morceau de fer enlevé par le poinçon tombe dans une cavité où l'on peut le recueillir. La place que doivent occuper les trous de la tôle est marquée à la craie, ou leur circonférence est tracée au compas. L'ouvrier place successivement chaque marque sous le poinçon et parvient aisément à obtenir un perçage très parfait. Dans la machine dont nous venons de parler, l'extrémité du plus petit bras de levier décrit une portion de circonférence, on y ajoute quelquefois une bielle dont le bout inférieur, mobile entre deux guides, porte le poinçon; mais ce perfectionnement est de peu d'importance, l'arc de cercle décrit se rapprochant beaucoup d'une ligne droite à cause de la faible épaisseur de la tôle.

Les trous que l'on perce par ce moyen sont quelquefois tout-à-fait cylindriques, mais il vaut mieux les faire coniques; pour cela, on donne à l'ouverture pratiquée dans l'enclume un diamètre un peu supérieur, d'un dixième par exemple, à celui du poinçon. Le trou qui se forme présente alors la forme d'un tronc de cône dont la base supérieure a le diamètre du poinçon, et l'inférieure celui du trou de l'enclume. Cette disposition diminue l'effort nécessaire pour percer la tôle et permet de donner aux rivets mis en place la forme de deux troncs de cône opposés par leurs sommets qui doivent se trouver sur la ligne de jonction des deux feuilles. L'action des deux surfaces inclinées s'ajoute à celle des têtes pour s'opposer à la séparation des deux pièces de tôle.

Les procédés qu'on emploie pour river les plaques de cuivre sont les mêmes que ceux que nous avons indiqués; seulement les rivures se font à froid, le cuivre ayant à la température ordinaire la malléabilité qu'a le fer à chaud.

Quand on a besoin de réunir deux surfaces a et b formant entre elles un angle, on les fixe l'une et l'autre, au moyen de rivets, sur une même barre de fer d'angle c d (fig. 203). Le commerce fournit maintenant ces fers d'angle en grande quantité. On les obtient au laminoir comme les barres de fer ordinaire.

Quelquefois on remplace le fer d'angle par une feuille de tôle courbe qui est fixée par des rivets aux deux feuilles à réunir. Cette disposition moins fréquemment employée que la précédente est indiquée fig. 204.

On réunit enfin quelquefois deux feuilles de tôle sans les superposer en les rivant à une même bande de tôle. Cette méthode est souvent employée pour la partie cylindrique des chaudières de locomotives (fig. 205).

On a quelquefois de très grandes surfaces de tôle parallèles, qui se voileraient

aisément si on ne les maintenait par des pièces de fer. On les rive à des barres de fer à T, qu'on met parallèlement l'une en face de l'autre, et qu'on relie par des barres terminées en fourche, boulonnées ou rivées au fer à T.

Pour former avec des feuilles de tôle des enveloppes capables de contenir des liquides ou des gaz, l'idée qui se présente le plus naturellement est de donner, à ces enveloppes la forme de surfaces développables. La plus simple des surfaces de ce genre est le cylindre.

On donne très facilement à une feuille de tôle la forme cylindrique en la faisant passer entre deux paires de cylindres A, B, C (fig. 206) animés d'un mouvement de rotation comme ceux des laminoirs. On peut faire varier la distance des cylindres de chaque paire afin de pouvoir travailler des tôles de différentes épaisseurs. On conçoit d'ailleurs qu'en changeant la position relative des trois systèmes de cylindres, le rayon du cercle tangent aux cylindres varie. Ce qui permet de donner à la tôle toute espèce de courbure.

La figure 207 représente l'élevation et la coupe de la machine à couber les tôles employée dans les ateliers de M. Cavié. Dans cet appareil, la tôle est coubée par l'action de trois rouleaux a, b, c.

L'arbre m porte à l'une de ses extrémités deux poulies folles tournant dans des sens différents, qui peuvent s'embrayer successivement avec lui, et à l'autre extrémité un pignon qui conduit la grande roue fixée sur l'axe du cylindre a, qui mène à son tour au moyen des roues r, le cylindre b. Le cylindre supérieur c peut se transporter parallèlement à lui-même par l'action des vis v de même par et conduit par des écrous garnis de dents qui engrenent avec des vis sans fin portées sur le même arbre g. Les cylindres a et b peuvent aussi changer de position par l'action des vis h. La table t placée au dessous d'eux s'oppose à leur flexion. Ces deux cylindres sont en fonte; le troisième est composé d'un cylindre en fonte traversé par un arbre en fer.

Pour former un cylindre d'un mètre de diamètre, comme celui des chaudières de locomotives par exemple, on prend deux feuilles de tôle, on coube chacune d'elles en forme de demi-cylindre et on les unit par des rivets. Quand ensuite cette enveloppe est soumise à une pression intérieure qui agit suivant les normales à sa surface, cette pression tend à séparer les feuilles. La traction produite par chaque pièce de tôle sur le rivet donnerait naissance à un couple qui affaiblirait l'assemblage, si le rivet était normal au cylindre. Mais on plie les bords de la tôle que l'on doit river et l'on place le rivet comme l'indique la figure 208.

La figure 209 représente la machine à percer et à river inventée par M. Lemaître.*

La figure a est une élévation latérale de la machine, munie de toutes ses pièces, et la figure B une élévation vue de face; la figure d est une section verticale de l'extrémité du support et du mécanisme à river; la figure II une section horizontale du support; la figure q une projection horizontale de l'extrémité du support; enfin la figure w une section verticale de l'extrémité inférieure du cylindre à vapeur et de la soupape à trois.

* La description de cette machine est tirée du bulletin de la société d'encouragement pour l'industrie nationale, livraison d'Avril 1845, page 147 et suivantes.

Les mêmes lettres indiquent les mêmes objets dans toutes les figures.

Les deux feuilles de tôle ou de cuivre A qu'on veut assembler, sont placées horizontalement l'une sur l'autre entre deux matrices, le tar fixe a et l'étampe mobile b. Le tar, qui est creusé pour recevoir la tête du rivet, est ajusté vers l'extrémité d'une forte pièce en fer corroyé B, sur un support ou de point résistant, tant à l'étampe pour river qu'à la virole pour rapprocher les feuilles de tôle, et enfin au poinçon pour les percer.

L'étampe mobile b, qui est comme le tar, en acier fondu et trempé, et creusé en dessous pour former la tête du rivet, doit descendre verticalement sur celui-ci; il est à cet effet ajusté dans une douille en fer forgé c, qui reçoit un mouvement rectiligne alternatif d'ascension et de descente d'un grand levier ou balancier en fer forgé C, dont le point d'appui est sur la tête d'un fort bâti de fonte D. Ce levier se replie par son autre extrémité avec la bielle E, qui s'articule avec un petit piston F fig. w. La vapeur arrivant sous ce piston par la partie inférieure du cylindre G, dans lequel il se meut, soulève le grand bras du balancier et fait descendre son petit bras avec l'étampe qui y est suspendue. L'action de la vapeur est donc directe, c'est-à-dire qu'elle est transmise sans intermédiaire d'excentriques ni d'engrenages, comme dans l'appareil de Fairbairn. Cette disposition permet de maintenir la pression sur le rivet aussi longtemps qu'il est jugé nécessaire, et de donner le temps de changer le cylindre de tôle de position pour faire une nouvelle rivure.

Le bâti D est composé de deux flasques réunies par des boulons et par une frette H, puis solidement assises sur des pièces de charpente I, portées par d'autres pièces transversales JJ, reliées et boulonnées entre elles, de manière à former une seule masse établie sur une maçonnerie KK. Le support horizontal B est serré entre les deux flasques, et malgré la grande portée engagée et ses fortes dimensions, il fléchit encore de quelques millimètres par l'effet de la violente pression que l'étampe mobile et la virole exercent sur lui; néanmoins le système a une stabilité suffisante pour le travail.

L'étampe b est entourée d'une espèce de virole ou de canon d (fig. d) destiné à comprimer les feuilles de tôle à assembler, avant et pendant la rivure. Cette virole, dont le mouvement est indépendant de celui de l'étampe, est ajustée dans une pièce L qui glisse entre deux coulisseaux MM, que l'on peut régler au besoin et qui sont rapportés sur la partie avancée et bien dressée des deux flasques réunies qui composent le bâti de fonte D. La pièce L est pressée par le bout d'un levier en fer forgé N, dont le centre d'oscillation est autour du même point que le balancier C; ce levier se relie par l'autre extrémité à la bielle O, du second piston à vapeur renfermé dans un cylindre à simple effet P, d'un diamètre plus petit que le précédent. L'action de la vapeur que l'on fait arriver au dessous du piston est transmise ainsi directement aux leviers par une disposition de tiroirs et detringles analogues à celles du premier piston.

Le cylindre à vapeur G est à simple effet, la vapeur ne devant arriver qu'au dessous du piston pour le faire monter, et non au dessus pour le faire descendre; le poids du piston, celui de la bielle et du grand bras du balancier étant suffisant pour vaincre les frottements des pièces mobiles; le piston descend dès que la vapeur s'est échappée; le porte-outil remonte donc seul, et c'est pendant ce temps qu'on effectue le changement de position des feuilles à river.

Le tiroir destiné à mettre le cylindre en communication avec la chaudière à vapeur ou avec l'air extérieur est renfermé dans la boîte e, fig. w; il est manœuvré à la main au moyen d'une combinaison de tringle et de leviers f, g, h, i, disposés de manière à être à la portée de l'ouvrier. En tirant la tringle i, on fait descendre le tiroir, et la vapeur venant de la chaudière par le tuyau j s'introduit immédiatement dans le cylindre G au dessous du piston F et fait monter celui-ci. Lorsque l'ouvrier abandonne la tringle i, le tiroir descend, interdit l'entrée de la vapeur et établit la communication du cylindre avec l'extérieur. La vapeur, après avoir produit son effet sous le piston, s'échappe par le tuyau K; aussitôt le piston descend.

Il est facile de comprendre que, lorsque la bielle O s'élève, le canon mobile d descend, et appuie fortement sur les feuilles de tôle, qui, trouvant une résistance sur le tas fixe a, sont rapprochées et restent serrées avant que l'étampe arrive sur elles et pendant que celui-ci opère; lorsque l'étampe commence à remonter et que le rivet est fait, le canon c se relève également.

Fonctions de la machine. Pour faire une rivure quand les deux feuilles de tôle A sont placées sur le support horizontal B, un ouvrier introduit le rivet chauffé au rouge dans le trou percé à l'avance dans les deux feuilles; puis l'ouvrier ouvre le tiroir de la boîte l, en tirant la seconde tringle i', afin de laisser entrer la vapeur dans le cylindre P, sous son piston celui-ci monte aussitôt, le canon mobile d descend et comprime les tôles; alors l'ouvrier ouvre le tiroir du cylindre G, la vapeur s'introduit sous le piston F, et l'étampe b descend à son tour, il a le soin en même temps de laisser encore ouvert l'autre tiroir de la boîte l pour que le piston se maintienne au haut de sa course et que le canon reste appuyé sur les tôles et les presse sur le tas fixe a.

Pour obtenir une forte pression de l'étampe sur le rivet, il faut que l'ouvrier tire la tringle avec vivacité; il produit ainsi un mouvement très brusque, une espèce de secousse qui augmente considérablement l'énergie du coup; il donne ordinairement deux coups pour obtenir une rivure plus parfaite.

Afin d'amortir le choc des leviers C et N, on a disposé un billot en bois S sur lequel ils s'appuient lorsqu'ils prennent la position indiquée par les lignes ponctuées, fig. α.

La rivure étant faite, l'ouvrier abandonne la tringle i, pour que le tiroir de la première boîte e laisse échapper de la vapeur par le tuyau K et que le piston F descende, l'étampe remonte alors; puis il abandonne la tringle i' afin que le second tiroir l'livre également passage à la vapeur, par le tuyau de sortie m, et que le piston du second cylindre P descende à son tour.

La machine que nous venons de décrire sert également à percer les feuilles de tôle avant l'opération de la rivure, et cela par la simple addition d'un poinçon mobile p placé en avant de l'étampe; il fonctionne par le mécanisme qui produit la descente de la visole destinée à tenir les tôles rapprochées.

Ce poinçon est ajusté dans une douille en fer Q, fig. β, tournant autour d'un rouillon n; lorsqu'on ne perce pas, on le relève et on l'arrête au moyen d'une cheville t, position indiquée fig. α, β et δ. Cette douille et son axe sont ajustés sur une pièce à coulisse R rendue solidaire avec la pièce M au moyen de boulons qui traversent des oreilles saillantes adaptées

sur les côtés verticaux.

La pièce R glisse entre des coulisseaux qui la guident dans la direction verticale suivant laquelle elle doit fonctionner; elle est mue par le grand levier N qui presse sur sa partie supérieure.

La tôle à percer se place sur la matrice O fixée à l'extrémité du support horizontal B; quatre vis de pression permettent de la centrer et de l'assujettir exactement à la place qu'elle doit occuper par rapport à la distance ménagée entre les rivures, en laissant toutefois un trou de rivet intermédiaire.

On voit par cette disposition que l'ouvrier, en tirant la tringle i pour ouvrir le tiroir du second cylindre P, élève le piston et sa bielle O, et fait presser sur le porte-poinçon le levier N; le poinçon p descend aussitôt et perce le trou dans la tôle.

Cette opération doit se faire très promptement; pour cela, il faut ouvrir subitement le tiroir d'admission de la vapeur au cylindre, afin que le coup de piston soit très brusque et produise une percussion, car, si l'on ouvrait le tiroir lentement, le poinçon s'appliquerait sur la tôle sans la percer. Les trous devant être percés à des distances égales, M^r Lemaitre a adapté contre l'une des faces de la pièce à coulisse R, une alidade q, fig. β, formée d'une douille qui s'ajuste sur l'axe r et s'y fixe par une vis de pression, et d'un morceau recourbé qui se termine par un cercle dont le diamètre est égal à celui du trou du rivet. Pour s'assurer si le centre de ce trou est bien dans la direction du centre du poinçon, l'ouvrier saisit la poignée s qu'il fait tourner jusqu'à ce que le bout de l'alidade corresponde à la base du poinçon; il fait ensuite mouvoir la feuille de tôle à percer, à droite ou à gauche, en avant ou en arrière, jusqu'à la partie circulaire de l'alidade.

On préfère généralement opérer le percement et la rivure séparément; on commence alors par percer une première rangée de trous sur l'un des bords de la feuille avant de percer ceux correspondants de la deuxième feuille, qui doit s'assembler avec celle-ci; on rapproche les deux bords qui doivent se superposer, et on perce cette seconde feuille, en se guidant par les trous de la première.

Si on considère une enveloppe cylindrique d'un diamètre D, formée d'un corps dont la résistance est T et soumise à une pression P, dirigée de l'intérieur à l'extérieur, on sait que l'épaisseur e de cette enveloppe est donnée par la formule

$$e = \frac{\frac{1}{2} DP}{T}$$

Les règlements administratifs exigent une épaisseur donnée par la formule suivante:

$$e = \frac{\frac{1}{2} DP}{277} + 0,3^{\text{cm}}$$

Dans cette formule e et D sont exprimés en centimètres; P est la pression par centimètre carré. Le terme constant 0,3 est destiné à tenir compte de l'oxydation de la tôle; la

résistance par centimètre carré que suppose la formule est donc de 277^k .

Tout les chaudières des locomotives l'Administration a, sur les réclamations des Compagnies de chemin de fer, diminué d'un tiers l'épaisseur exigée pour les cas ordinaires; l'épaisseur légalement nécessaire est donc pour ces chaudières :

$$e = \frac{1}{2} \frac{DP}{414} + 0,2^{cm}.$$

Les unités dans cette dernière formule sont les mêmes que dans le cas précédent; la résistance par centimètre carré y est supposée de 414^k ; on a ajouté $0,2^{cm}$ à l'épaisseur donnée par la formule mathématique pour tenir compte de l'oxydation.

La décision de l'Administration, relative à la diminution de l'épaisseur exigée pour les chaudières des locomotives, est parfaitement motivée par les circonstances spéciales dans lesquelles se trouvent ces chaudières.

Les chaudières des machines à vapeur reçoivent ordinairement la chaleur extérieurement; les chaudières des locomotives au contraire la reçoivent intérieurement.

Dans les chaudières qui reçoivent la chaleur extérieurement, la partie extérieure de l'enveloppe peut être soumise à une température très élevée, tandis que la partie intérieure est à la température du liquide, peu supérieure à 100° . Il en résulte que les molécules de la partie extérieure tendent à se séparer des molécules de la partie intérieure soumises à un moins grand effort de dilatation et que les pressions suivant le rayon normal sont inégalement distribuées, la partie extérieure devant beaucoup moins travailler que la partie intérieure. En second lieu, dans les chaudières qui reçoivent la chaleur extérieurement, le fer perd beaucoup de sa ténacité par suite des variations considérables de température. Il se produit dans ce cas dans la tôle une diminution de ténacité, par un phénomène analogue à la perte de cohésion que le recuit produit dans le fil de fer. Enfin, dans ces mêmes chaudières, lorsque l'eau vient à manquer, la tôle rougit et se brûle en s'oxydant.

Les chaudières des machines locomotives qui reçoivent la chaleur intérieurement, ne sont pas soumises aux mêmes causes de détérioration; on a donc pu sans crainte adopter une épaisseur notablement plus faible pour ces chaudières.

Des expériences très concluantes et très étendues ont été faites en Amérique, il y a une dizaine d'années, sur la résistance des matériaux employés dans la construction des chaudières à vapeur. Ces expériences ont été faites par une Commission de l'Institut de Franklin, par ordre des Assemblées politiques des Etats-Unis émues par un grand nombre d'accidents arrivés dans la navigation à vapeur.

On n'avait avant les travaux de cette Commission que des expériences fort incomplètes sur la résistance du cuivre et du fer en feuilles. Dans tous les cas, on n'avait opéré qu'à la température ordinaire. Il importait cependant beaucoup de connaître la loi de la variation de la résistance avec la température.

La Commission s'est d'abord occupée de la résistance du cuivre. Elle a exécuté 66 expériences sur 8 échantillons différents. La plus forte résistance obtenue a été de $23,65^k$ par

millimètre carré. La plus faible résistance moyenne a été de $22^k,50$ par millimètre carré; et enfin la plus faible ténacité, obtenue a été de $21^k,22$ par millimètre carré. C'est à ce dernier nombre qu'il convient de s'arrêter dans les calculs.

Quand la température augmente, la ténacité diminue, comme on devait s'y attendre. En désignant par t et t' deux températures, par d et d' les diminutions correspondantes de ténacité, les expériences satisfont assez bien à la relation :

$$t^x : t'^x :: d : d'$$

Dans laquelle $x = 1,5$, ou bien à celle-ci $t^3 : t'^3 :: d^2 : d'^2$ comme l'indique le tableau suivant :

Numero de l'expérience.	Température.	Diminution de ténacité.	Valeur moyenne de x en comparant chaque point aux 13 autres.	Différence de chaque expérience avec la moyenne.
1	50°	0,0175	1,536	+ 0,036
2	100	0,0540	1,462	- 0,038
3	150	0,0926	1,518	+ 0,018
4	200	0,1513	1,444	- 0,056
5	250	0,2046	1,489	- 0,011
6	256	0,2133	1,474	- 0,026
7	285	0,2446	1,447	- 0,053
8	294	0,2558	1,466	- 0,034
9	367	0,3425	1,474	- 0,026
10	427	0,4398	1,570	+ 0,070
11	450	0,4944	1,565	+ 0,065
12	490	0,5581	1,542	+ 0,042
13	545	0,6691	1,557	+ 0,057
14		0,6781	1,458	- 0,042
Moyenne 1,50 = x .				

La courbe tracée fig. 210 représente les résultats obtenus dans les expériences de la Commission : La ligne ab étant la ténacité du cuivre à 0° , la ligne horizontale donne la température observée au dessus de ce point et la ligne verticale donne la diminution de ténacité.

Les ténacités des fers observées par la Commission ont varié dans des limites fort étendues avec les différents échantillons. La ténacité de certains fers en barres n'était que de $33^k,50$ par millimètre carré, tandis qu'elle s'est élevée à 62^k pour certains fils de fer et à 98 pour certains aciers.

La nature des fontes qui ont servi à fabriquer le fer paraît influencer assez peu, toutes choses égales d'ailleurs, sur la ténacité du fer. Les différences n'ont été que de 5 p 100 de la résistance maximum. On peut admettre en moyenne que la résistance de la tôle est de 46^k par millimètre carré dans le sens du laminage et de 43 seulement dans le sens perpendiculaire.

Le fer présente un phénomène fort remarquable : sa ténacité augmente avec la température jusqu'à une certaine limite comprise entre 260° et 300°, suivant la nature de l'échantillon. Cette résistance maximum est de 15 p 100 environ supérieure à la ténacité à la température ordinaire.

Au dessus de cette température, la ténacité diminue comme on le voit dans le tableau suivant :

Température observée.	Ténacité observée par millimètre carré.	Maximum de la ténacité au point de fracture.	Ténacité à la température ordinaire.	Diminution de la ténacité.
272	40,90	44,36	38,43	0,0738
300	42,30	42,30	"	0,0869
314	40,39	40,50	38,50	0,0899
317	39,83	44,30	38,52	0,0964
334	42,00	46,95	"	0,1047
350	40,75	46,10	"	0,1155
383	38,23	45,15	39,20	0,1436
390	37,50	44,00	"	0,1491
392	40,60	48,00	41,58	0,1535
408	38,50	45,70	"	0,1589
410	38,40	45,90	39,74	0,1627
440	39,20	49,10	42,60	0,2010
500	32,00	47,80	41,51	0,3324
510	39,80	46,40	"	0,3593
555	26,40	47,75	41,50	0,4478
600	19,30	43,20	37,50	0,5514
625	15,35	38,50	33,50	0,6000
630	18,00	45,00	39,10	0,6011
642	15,33	42,20	36,55	0,6352
670	14,95	44,25	38,30	0,6622
675	14,55	44,25	38,30	0,6715
715	13,27	44,25	38,30	0,7001

Quand on fait des trous dans la tôle pour le passage des rivets, on diminue évidemment la section et par conséquent la résistance de la feuille. Pour compenser cette diminution de résistance, on n'a que le frottement exercé par l'une des feuilles sur l'autre en vertu de la pression des rivets. Dans une expérience de la Commission Américaine, la distance des rivets était de 0,0084 d'un bord à l'autre, et leur diamètre était de 0,0052. La diminution réelle de résistance fut de 39 p^o de la résistance totale de la barre, et l'influence due au frottement fut de 88 p^o de la résistance.

D'après ce qui vient d'être dit, la ténacité du fer serait de 4600^K par centimètre carré. Dans la pratique, l'Administration admet pour le calcul de ses formules une résistance de 250^K seulement. Voici comment on peut justifier l'adoption de ce nombre. Les rivets diminuent d'un tiers la résistance, ce qui la réduit déjà à 3066 par centimètre carré. Les alternatives de chaud et de froid doivent encore diminuer ce dernier nombre d'un tiers, ce qui le réduit à 2034^K. La continuité d'action de la pression dans la chaudière oblige à ne prendre que les 0,4 de la force que l'on pourrait admettre pour une résistance momentanée, ce qui réduit la charge que l'on peut faire supporter à 809^K. Enfin, ce dernier nombre est une limite dont on ne doit pas approcher : il convient de n'en prendre que le tiers ou le quart, soit 250 à 300^K, comme on le fait. Dans les chaudières ordinaires, dans les chaudières locomotives, on peut aller jusqu'à 400^K.

En général, le rapport de la résistance que l'on doit admettre dans les formules à la force qui produirait la rupture, dépend nécessairement du degré de confiance que l'on peut ajouter aux formules. Lorsque la détermination des forces auxquelles sont soumis les matériaux laisse quelque incertitude, on doit faire une large part à la prudence. Dans ce cas, il convient de ne prendre que $\frac{1}{10}$ environ du poids qui produirait la rupture. Quant, au contraire, on peut apprécier la résistance avec une grande exactitude, on peut se contenter du $\frac{1}{4}$ ou du $\frac{1}{5}$.

La forme des chaudières a une grande influence sur leur résistance. Les surfaces des chaudières doivent être des surfaces d'égale résistance ; les surfaces cylindrique et sphérique sont les seules qui satisfont à cette condition.

La surface sphérique est celle qui, sous une surface donnée, comprend un volume maximum, et sous ce point de vue elle pourrait être préférable à la surface cylindrique, si sa fabrication n'était difficile et n'exigeait des opérations qui peuvent altérer la ténacité du fer. Une demi-sphère (fig. 211) se forme d'une calotte et d'un certain nombre de segments rivés ensemble par la méthode ordinaire ; pour donner à ces différentes parties la forme sphérique, on emboutit la tôle, préalablement portée au rouge cerise, en la frappant avec des marteaux de bois sur une enclume sphérique ; les deux demi-sphères sont ensuite rivées ensemble. Mais si la difficulté de fabrication et la faible surface offerte à l'action de la chaleur font rejeter la forme sphérique pour les chaudières, on peut l'employer avec avantage pour fermer le fond des cylindres. La fermeture des cylindres s'opère en y rivant deux demi-sphères par le procédé ordinaire ; l'ouvrier placé à l'intérieur sort ensuite par une ouverture réservée à cet effet et que l'on nomme trou d'homme. Cette ouverture se ferme au moyen d'un anneau cylindrique de tôle dont le bord inférieur est replié et rivé sur la chaudière et sur lequel on boulonne à la partie supérieure un couvercle en tôle légèrement combe (fig. 212).

Dans le cas où la pression s'exerce intérieurement, la surface tend à prendre la forme pour laquelle elle enveloppe un volume maximum; la surface cylindrique est pour ce cas une surface d'équilibre stable. Il n'en est pas de même lorsque les pressions s'exercent extérieurement; la surface cylindrique est alors une surface d'équilibre instable qui tendra à se déformer de plus en plus si pour une cause quelconque la déformation a commencé. Dans la construction des surfaces cylindriques soumises à des pressions extérieures, il faut donc avoir recours à des précautions particulières. On doit d'abord chercher à obtenir une surface aussi parfaitement cylindrique que possible, ce pour cela incliner les rivets comme il a été dit précédemment, mais il est impossible d'avoir des surfaces mathématiquement cylindriques et il est nécessaire d'avoir recours à un procédé particulier de consolidation. On rive sur la surface extérieure des chaudières des fers d'angle espacés à peu-près d'un mètre. Lorsque le cylindre qu'il s'agit de consolider est placé dans l'intérieur d'une chaudière, on le rattache quelquefois à celle-ci par des tirants qui contribuent avec les fers d'angle à maintenir la forme cylindrique (fig. 213, 214) et à rendre l'équilibre stable, d'instable qu'il serait sans cette précaution.

Les dimensions des rivets et leur espacement doivent être calculés de telle sorte qu'il y ait égalité de résistance dans les deux sens, c'est-à-dire que la tendance des rivets à se rompre suivant le plan de séparation des deux feuilles soit la même que celle des feuilles à se détacher suivant le plan passant par les axes des rivets. On a fait à ce sujet beaucoup d'expériences qui ont démontré que la résistance des rivets devait être regardée comme égale à celle de la tôle; d'où il suit que la section des rivets doit être égale à celle de la tôle dans un plan passant par les axes des rivets.

Si l'on désigne par a l'intervalle compris entre deux rivets (fig. 215), par d le diamètre des rivets, par e l'épaisseur de la tôle, on aura la formule

$$ae = \frac{\pi d^2}{4}$$

Si on fait $e = 1^c$, $d = 2^c$, cette formule donne $a = 3^c, 14$.

On a vu précédemment qu'on peut faire supporter à la tôle une pression de 400^k par centimètre carré. La grande résistance dont cette matière est susceptible, a conduit à l'employer dans les constructions. On s'en est servi pour faire des ponts, des bâtiments de plusieurs espèces, et son usage paraît devoir beaucoup s'étendre. On avait depuis longtemps substitué l'usage de la fonte à celui du bois, dans des cas où l'emploi de cette dernière matière était impossible. On trouverait souvent de l'avantage à substituer à la fonte, la tôle qui est supérieure à celle-ci sous plusieurs rapports. Le plus grand poids auquel on puisse prudemment soumettre la fonte n'exède pas 200 par centimètre carré, tandis que ce poids s'élève pour la tôle à 400^k, c'est-à-dire au double. Encore ce nombre limite, qui est le dixième du poids de rupture, a-t-il été indiqué pour le cas d'une chaudière, car où la gravité des accidents commande un excès de prudence. Pour les constructions ordinaires, où les accidents sont moins à craindre, on peut sans scrupule prendre pour nombre limite $\frac{1}{5}$ du poids de rupture, ce qui porte à 800^k la pression qu'on peut faire supporter à la tôle par centimètre carré. De nombreux exemples démontrent que ce chiffre n'est pas trop fort. La tôle présente un autre avantage. La fonte se brise subitement sans qu'aucun

signe précurseur puisse le faire prévoir. Le fer, au contraire, plie avant de se rompre, et des changements de forme très sensibles indiquent le danger. Dernièrement, en Angleterre, près de Chester, le passage d'un train sur un pont de fonte en a déterminé la rupture, et les derniers wagons du convoi sont tombés dans l'eau. Si le pont eût été en fer, il n'eût cédé que petit à petit, et il se serait d'abord produit une flexion qui aurait pu faire éviter les malheurs qui ont eu lieu.

Le prix de revient de la tôle paraît aussi devoir la faire préférer à la fonte. Cette matière, travaillée et mise en place, dans un pont, par exemple, coûte de 25 à 30^f les 100^k; le prix du même poids de tôle dans les mêmes conditions est de 55 à 60^f, et n'est par conséquent que le double de celui de la fonte, quand la résistance de la tôle est quadruple. Le fer résiste mieux à la tension que la fonte; celle-ci supporte mieux la compression que la traction. Lorsqu'on fonde des poutres en fonte, on leur donne une section analogue à celle des rails, mais on a soin de donner à la partie inférieure de cette section une surface beaucoup plus grande qu'à la partie supérieure, afin que la tension qui s'y exerce se répartissant sur plus de matière, l'effort de traction rapporté à l'unité de surface soit moindre que l'unité de compression exercée à l'extrémité opposée de la section qui offre la poutre. La traction à laquelle on peut soumettre la fonte par centimètre carré ne dépasse pas 200^k, tandis qu'on peut sans inconvénient faire supporter à la tôle une tension qui s'élève au moins à 600^k par centimètre carré de la section.

On évite les poutres de grande portée en fonte, à cause de la fragilité de cette matière. Le pont qui s'est rompu dernièrement en Angleterre, était formé (fig. 216) de grandes pièces de fonte reliées entre elles par des boulons et supportées par des chaînes en fer forgé. On espérait que ces chaînes garantiraient la solidité du système, mais il est aisé de voir que cette disposition n'était pas heureuse. Il en a été conclu qu'il est prudent de ne pas donner aux poutres en fonte plus de 5 mètres de portée. Quand on est obligé de dépasser cette limite, il faut employer d'autres systèmes ou une autre matière, de la tôle par exemple. La fonte présente, il est vrai, sur le fer l'avantage de pouvoir prendre aisément toutes les formes; cependant les phénomènes de retrait, dont il a été parlé à propos de la construction des roues, limitent cette importante propriété. Il faut réminir les diverses surfaces par des congés bien ménagés, et faire en sorte que le refroidissement de la pièce fondue s'opère aussi également que possible. On ne pourrait pas fonder des poutres très minces au milieu, et d'une grande épaisseur sur tout leur contour. Cette forme qui présente l'avantage d'offrir le plus de matière là où s'exerce le plus grand effort, s'obtiendrait aisément avec de la tôle. Il arrive souvent que l'épaisseur d'un pont est limitée par les niveaux de la voie qu'il traverse et de celle qu'il supporte. Dans ce cas cette épaisseur peut être très minime. L'emploi des poutres en tôle offrirait alors de grands avantages. Pour former des poutres de ce genre, on peut unir par des fers d'angle et des rivets un morceau de tôle vertical à deux autres horizontaux (fig. 217). On peut aussi les unir par des pièces de tôle recourbées (fig. 218). — Enfin, si l'on juge à propos de donner à la poutre une solidité plus grande, il est facile de doubler les morceaux de tôle horizontaux. On obtient ainsi des poutres très résistantes. Il faut en calculer les dimensions de manière à ne pas faire supporter à leur section plus de

800^k par centimètre carré. Pour cela, l'on calcule les dimensions de la partie centrale par la condition qu'elle puisse résister à l'effort tranchant et à la force qui tend à faire glisser la moitié supérieure sur la moitié inférieure. Pour les branches horizontales du double T, on exprime que, réunies à la partie verticale, elles forment une section capable de développer le moment d'élasticité maximum qui résulte de l'action des poids.

Les pontres de tôle ayant ordinairement une portée de 4, 5 et 6 mètres et quelquefois plus grand encore, il est difficile de former toute leur longueur d'une seule feuille. Les plus grandes feuilles qui aient été faites ont 8 mètres de long, mais on doit les considérer comme tout-à-fait exceptionnelles, et leur dimension n'est pas toujours suffisante. Sur le chemin de fer du Nord, près de Valenciennes, l'on a dû construire dernièrement un pont très bien, dont les pontres ont plus de 12 mètres de longueur. Il n'a pas été possible de fabriquer des feuilles de tôle aussi longues. La principale difficulté consistait dans le poids considérable des morceaux de fer nécessaires pour obtenir des feuilles de 12 mètres de long sur 0^m,80 de large et 0^m,07 d'épaisseur. Les pinces dont on aurait dû se servir pour manœuvrer ces morceaux, auraient rougi presque instantanément et n'auraient plus présenté la solidité nécessaire. On est donc souvent forcé de se servir de plusieurs feuilles de tôle et de les river les unes aux autres, quoique cela présente l'inconvénient de diminuer la résistance de la tôle de près d'un tiers.

Les rivures se font comme on l'a dit précédemment, mais on peut disposer les rivets d'une manière un peu différente. Quand on réunit deux morceaux de tôle pour en faire une enveloppe destinée à contenir des gaz ou des liquides soumis à une forte pression, il faut rapprocher assez les rivets pour qu'on n'ait pas à craindre que l'eau ou le gaz ne trouve une issue en séparant les feuilles de tôle entre deux rivets consécutifs. Le même inconvénient n'est pas à craindre pour les pontres. Dans ce cas on superpose les deux feuilles de tôle et on place les rivets parallèlement à la longueur de la feuille (fig. 219). Les ruptures ont généralement lieu suivant une perpendiculaire $a b$ à cette longueur. Si les rivets sont placés, par exemple, sur trois lignes parallèles à l'axe de la feuille, celle-ci présentera suivant $a b$ sa section ordinaire moins celle de trois rivets, tandis que si les rivets étaient tous placés suivant $a b$, la résistance de la feuille en cet endroit serait beaucoup moindre. Au lieu de superposer les deux feuilles, on les met quelquefois bout à bout (fig. 220) et l'on met leurs extrémités entre deux feuilles de tôle. On réunit ensuite le tout par des rivets. Pour que la rivure faite par ce procédé cède, il faut que les deux feuilles additionnelles se déchirent. Quand on se sert de deux feuilles superposées, on peut disposer la rivure comme l'indique la figure 221. En s'arrangeant de façon que la somme des sections des rivets égale la section de la feuille supplémentaire $a b$, il n'y a pas plus de raison pour que la feuille se déchire sur le point où la rivure est faite que sur tout autre de sa longueur. L'expérience ayant démontré que la résistance qu'opposent les rivets à la force qui tend à les séparer, en faisant glisser les deux portions l'une parallèlement à l'autre et perpendiculairement à la longueur du rivet, est égale à la force qui les ferait rompre en agissant parallèlement à leur longueur, il résulte de ceci qu'entre l'épaisseur e des feuilles, l'écartement a entre deux trous consécutifs

et le diamètre d des rivets, doit exister la relation

$$\frac{\pi d^2}{4} = ae.$$

On a fait sur les ponts en tôle des expériences importantes, à l'occasion d'un pont en chaudronnerie récemment élevé sur le chemin de fer de Chester au port de Holyhead, dans l'île d'Anglesey. Il était important de prolonger le réseau des railways d'Angleterre jusqu'à ce port, dont la distance à la côte d'Irlande n'est que moitié de celle des autres ports de la Grande-Bretagne. L'île d'Anglesey est séparée de l'Angleterre par un bras de mer de 414 mètres de largeur. On avait déjà réuni à l'île à la terre ferme par un pont suspendu, qui est l'un des plus grands qui existent en Europe; mais on ne pouvait pas se servir pour un chemin de fer d'un pont de ce genre, à cause de sa mobilité. L'Amirauté anglaise exigeait que tous les bâtiments à voile pussent passer en tout temps sous le pont. On proposa de construire un pont en fonte de deux arches de 138 mètres d'ouverture. Ces arches se seraient appuyées sur une pile fondée sur un rocher qui se trouve au milieu du détroit. Mais la hauteur des naissances au dessus de hautes mers étant inférieure à celle fixée par le Gouvernement, l'Amirauté s'opposa à l'exécution de ce projet. M. Robert Stephenson, à la suite d'études très approfondies, se décida pour un pont-tube en tôle, formé de longues caisses prismatiques à section rectangulaire. Chaque caisse contient une voie du chemin de fer; le pont a quatre travées, dont deux de 138 mètres appuyées sur une pile construite au milieu du détroit, et deux de 69 mètres. Les efforts les plus grands s'exerçant à la partie supérieure et inférieure de la caisse, c'est en ces endroits qu'on a mis la plus grande quantité de matière. On a formé ces parties d'une série de tubes prismatiques rectangulaires. Les parois supérieure et inférieure du pont sont formées d'une feuille de tôle horizontale, sur laquelle d'autres feuilles sont fixées verticalement par des cornières comme l'indiquent les figures 222 et 223. Sur les feuilles verticales est fixée une seconde feuille horizontale qui complète ainsi les petits tubes rectangulaires. Pour faire les rivures, un homme s'introduit dans chaque tube, qui a de 0^m,50 à 0^m,60 de hauteur, et appuie une masse sur la tête du rivet pendant qu'on termine la rivure au dehors. Les parois latérales du pont-tube sont formées de feuilles rivées dans le sens de leur largeur par superposition de leurs extrémités, tandis qu'elles sont jointes suivant leur longueur par un fer à T auquel elles sont rivées (fig. 224). On a mis deux caisses parallèles entre deux piles consécutives. Quand l'une des caisses a été finie sur le chantier, on l'a transportée jusqu'au dessous de la place qu'on lui destinait, puis on l'a placée en la soulevant au moyen de presses hydrauliques. Le poids total du pont est de 10570 tonnes. Le prix en est de 930^f par tonne, ou de 93^f les 100^k mis en place. Ce prix élevé est dû principalement à la difficulté de lever le tube. Le mètre courant du pont a coûté 40000^f somme dans laquelle le prix du fer figure pour 21,000^f. Les grands ponts en pierre construits en France coûtent au plus 10,000^f par mètre courant.

Avant d'exécuter ce pont, on a fait de nombreuses expériences sur modèle construit à l'échelle de $\frac{1}{6}$. On voulait calculer les dimensions du tube de telle sorte qu'il présentât une égale résistance à la compression qui s'exerce à sa partie supérieure et à la

traction qui agit sur sa partie inférieure. On fit d'abord un tube dans lequel les sections des parties inférieure et supérieure étaient égales. On l'a chargé de poids dont on a augmenté le nombre jusqu'à ce que le tube eut cédé. La rupture fut déterminée par le refoulement de la tôle à la partie supérieure, qui céda à la pression à laquelle elle était soumise. On en conclut que la partie supérieure devait offrir plus de section que la partie inférieure, et l'on en augmenta successivement les dimensions jusqu'à ce que la rupture ait eu lieu par le déchirement des feuilles inférieures. On a constaté de cette manière que les parties supérieure et inférieure du tube résistent respectivement à la compression et à la traction avec une égale force, lorsque les sections de ces parties sont entre elles dans le rapport des nombres 24 et 22. Il en résulte aussi que le fer résiste moins à la compression qu'à la traction. La rupture du modèle avait ordinairement lieu sous un poids de 4160^k par centimètre carré de sa section horizontale. Les chiffres auxquels on est arrivé dans ces expériences coïncident à-peu-près avec ceux qu'avaient fournis les expériences faites aux Etats-Unis.

On a vu au chapitre VII de ce cours quelle est la forme qu'on donne à la chaudière des locomotives. La partie postérieure est une caisse prismatique à base carrée. Cette caisse est surmontée d'un dôme et sa face antérieure se fixe à un cylindre horizontal, ses parois sont formées de feuilles de tôle rivées entre elles. On peut relier deux faces voisines de cette boîte en les rivant à un fer d'angle; mais cette disposition présente un inconvénient. Les cornières n'offrent pas la même résistance que les feuilles de tôle. Celles-ci sont en général d'un fer fabriqué au bois et d'excellente qualité. Les fers d'angle sont nécessairement faits au laminoir, et, dans les forges où on lamine, l'on fait généralement usage de houille dont les parties sulfureuses altèrent le fer. Le laminoir ne produit pas une pression aussi forte que celle du marteau ou du laminoir particulier qui sert à fabriquer la tôle; aussi le fer laminé est-il toujours inférieur à la tôle et au fer battu. Il est presque impossible d'obtenir des fers d'angle dont la matière soit aussi bonne que celle de la tôle. Les cornières sont sujettes à se fendre dans l'angle. L'on préfère ordinairement, quoique ce procédé soit plus coûteux, réunir les parois verticales de la chaudière en les rivant à une feuille de tôle courbée suivant un quart de circonférence (fig. 225). L'on obtient, par l'un ou l'autre de ces procédés, une caisse rectangulaire qu'il faut recouvrir. Pour cela l'on donne à ces parois verticales la forme d'une ouverture rectangulaire surmontée d'une ogive. L'on courbe la partie supérieure de ces parois de manière à rapprocher leurs bords et à former une voûte en arc de cloître. On réunit les parties de cette voûte en les rivant aux cornières qui joignent les parties verticales de la boîte; ces cornières sont prolongées suivant les arêtes de la voûte; leur angle est ouvert au marteau, de manière à s'appliquer exactement sur les deux feuilles de tôle dont l'angle varie suivant le point de leur ligne d'intersection.

Lorsque les parois verticales de la caisse sont unies par des feuilles de tôle courbées, ces feuilles se prolongent aussi pour fermer la partie supérieure de la boîte. La facilité avec laquelle on peut faire varier leur courbure rend aisée leur application sur les angles de la voûte. La difficulté qu'offrirait la formation du sommet de cette voûte est évitée par un trou rond qu'on y pratique, et qu'on fait communiquer à un cylindre de bronze portant des

appareils de sûreté qui seront décrits plus tard. Pour combler la partie supérieure des feuilles, on fait en bois un moule intérieur de la boîte sur lequel on applique ces feuilles au marteau. — C'est ce que peuvent exécuter sans peine les ouvriers les plus ordinaires.

Quand la boîte de la chaudière est faite, on y adapte le tronc cylindrique. Il faut se servir pour cela de l'une des formules de construction précédemment indiquées. L'on peut donner à un fer d'angle une forme circulaire, de façon à le river au cylindre et à l'ouverture ronde qu'on pratique dans la partie antérieure de la caisse. Mais cette méthode présente un inconvénient. Il arrive souvent que la tôle se déchire à l'endroit de la rivure, ou que la cornière se fend; pour réparer cet accident, on est forcé de démonter presque toute la chaudière. On peut remplacer avec avantage le fer d'angle par la tôle même qui forme la face antérieure de la caisse. L'on forme cette face d'une tôle de qualité supérieure, et l'on y fait une ouverture d'un diamètre un peu plus petit que celui du cylindre. On relève au marteau les bords de la tôle comme l'indique la figure 226, et l'on y rive le tronc cylindrique. Cette méthode exige beaucoup de précautions, et serait inapplicable si la tôle n'était pas de très bonne qualité. Si cette dernière condition n'était pas remplie, il se produirait des gerçures dont on s'apercevrait aisément. Il faudrait alors prendre une tôle meilleure.

On fixe le cylindre à la plaque postérieure de la boîte à fumée par une cornière a (fig. 227) que l'on comble en cercle et qu'on rive au cylindre et à la boîte à fumée. On peut aussi recouvrir en dehors le bout des feuilles qui forment le cylindre, et le river à la boîte à fumée (fig. 226).

Les chaudières des machines locomotives sont recouvertes de planches de bois qui les enveloppent de toutes parts en laissant un petit espace entre elles et le corps de la chaudière. Cette disposition évite la perte par voie de rayonnement d'une grande quantité de chaleur. On ne saurait trop la recommander, non seulement pour les locomotives, mais encore pour les chaudières et les cylindres des machines fixes, des dragues et des paquebots. Une enveloppe de coton cordé convenablement disposée autour du cylindre d'une machine fixe, peut produire une économie de $\frac{1}{12}$ ou $\frac{1}{15}$ au moins de combustible.

La boîte à fumée a la forme d'un prisme rectangulaire surmonté d'une partie cylindrique qui porte la cheminée. La plaque postérieure de cette boîte dépasse le fer d'angle a d'une quantité capable de porter une seconde cornière b. Celle-ci la fixe à une feuille recombée qui forme le dessus cylindrique et les côtés verticaux de la boîte. Des fers d'angle c fixent la feuille combe à une feuille horizontale qui forme le dessous de la caisse, et à une plaque antérieure qui porte une ouverture ronde d'un diamètre égal à celui du cylindre. Une cornière est rivée à cette ouverture et reçoit une porte en tôle. Pour empêcher cette porte de se voiler, on l'emboutit, c'est-à-dire qu'on la chauffe et qu'on la moule avec un marteau de bois sur une calotte sphérique exécutée en fonte de fer. Cette opération se fait aisément si la flèche de la combe n'est pas trop considérable par rapport au diamètre de la porte. Au centre de celle-ci se trouve une poignée qui fait marcher quatre verrous perpendiculaires entre eux (fig. 228). Ces verrous se meuvent entre des guides et portent de petites goupilles en fer. Sur ceux-ci s'adaptent les extrémités de quatre bielles attachées

au bout d'une croix de fer. Il est aisé de voir que la poignée centrale qui fait mouvoir la croix, fait glisser les quatre verrous. Ceux-ci entrent dans des trous ménagés dans la cornière.

La cheminée est réunie au corps de la caisse au moyen d'un anneau en fer d'angle (fig. 227) auquel on donne la forme de la corbe à double courbure produite par la pénétration de deux cylindres. Les constructeurs masquent ordinairement ce raccordement au moyen d'une pièce de cuivre d'une forme plus ou moins élégante.

La figure 227 représente la disposition des machines de Sharp et Roberts. Les parties polies et brillantes conservées dans les machines produisent dans leur ensemble un effet agréable; elles présentent d'ailleurs un moyen de constater jusqu'à un certain point, du premier coup d'œil, le degré de soin et d'attention apporté par le mécanicien à l'entretien de la machine qu'il dirige.

Quand l'enveloppe extérieure de la chaudière et la boîte à fumée sont terminées, l'on place la boîte à feu. C'est un parallépipède à base carrée qui occupe une partie de la caisse de la chaudière. On lui donne une dimension telle qu'il reste un espace de 9 à 10 centimètres entre ses parois et celles de la caisse. La boîte à feu est faite en cuivre rouge, tandis que toutes les parties dont on a précédemment parlé sont en tôle. Le cuivre est préféré dans ce cas parce qu'il s'oxyde plus difficilement que le fer. Les parois de la boîte à feu sont en contact d'une part avec l'eau, de l'autre avec le feu, qui sont l'une et l'autre à des températures constantes mais fort différentes. La différence des températures des deux faces d'une lame métallique dans ces circonstances, est en raison inverse de son pouvoir conducteur. Celui du fer est 374 et celui du cuivre 898. La température est par suite plus uniforme dans une feuille de cuivre que dans une feuille de fer, et l'on conçoit que l'oxydation de la première doit être moins rapide, le fer étant plus oxydable que le cuivre. Les faces antérieure et postérieure de la boîte à feu sont formées d'une feuille de cuivre dont les bords latéraux et supérieur sont recombés (fig. 229) afin d'éviter l'emploi d'une cornière. Cette opération se fait au marteau, après avoir préalablement chauffé les feuilles de cuivre. Les faces supérieure et latérales de la boîte sont faites d'une seule feuille deux fois recombée à angle droit. On réunit les diverses parties de la boîte avec des rivets en cuivre que l'on place à froid. La feuille de devant a une épaisseur de 22 à 25 millimètres dans toute la partie qui correspond au tronc cylindrique. Au dessous elle reprend l'épaisseur de 12 millimètres qui ont les autres parties de la boîte à feu. Cette différence est motivée par les tubes qui traversent la partie antérieure de la boîte.

Il reste à fermer l'espace de 9 à 10 centimètres compris entre la caisse de la chaudière et la boîte à feu. L'on emploie pour cela plusieurs méthodes. On se sert de deux cornières rivées entre elles comme l'indique la figure 230. On les fixe d'abord à la boîte à feu, on perce des trous dans la caisse de la chaudière, et on introduit la boîte à feu et les cornières que l'on rive aisément. Quelquefois pour éviter plus sûrement les fuites, on unit les cornières à l'enveloppe extérieure de la chaudière par un double rang de rivets. Cette méthode est la plus classique, mais elle a l'inconvénient d'exiger un grand nombre de rivures. Si le cuivre qui forme la boîte à feu est de très bonne qualité, on peut déformer la partie inférieure de cette boîte de manière à en augmenter les dimensions jusqu'à ce qu'elle s'applique exactement

sur la caisse extérieure (fig. 231). Cette opération, qui est fort difficile, surtout pour les angles, exige du cuivre de très bonne qualité et des ouvriers fort habiles. C'est du reste la méthode qu'on doit préférer lorsqu'on a de bons ouvriers et du cuivre de qualité supérieure. Un autre moyen consiste à déformer le bar de la boîte à feu, mais moins que ne l'indique la méthode précédente. On réduit d'abord de 0^m.04 la distance de la boîte à feu, à la caisse de tôle, et l'on remplit cet espace au moyen d'un cadre en fer forgé. On rive les deux feuilles au cadre (fig. 232), au moyen de rivets d'environ 0^m.06 de long. Il faut avoir soin de marteler le cuivre sur une assez grande hauteur, pour ne pas avoir à craindre d'y produire des fissures. Un autre système (fig. 233) consiste à river une pièce de bronze ayant à peu près la forme d'un Z à la caisse de tôle et à la boîte à feu. Cette forme est difficile à donner au marteau à une feuille de cuivre, mais on obtient aisément la pièce voulue en la coulant en bronze. Cette matière est préférée à la fonte comme moins cassante. Cependant les ruptures sont encore fréquentes et donnent lieu à des fuites d'eau considérables. Cette eau chaude est remplacée dans la chaudière par de l'eau froide, ce qui augmente la dépense en combustible. De toutes ces méthodes, les deux meilleures sont celles qui consistent à modifier au marteau les dimensions de la partie inférieure de la boîte à feu.

Dans les machines Crampton, le tronc cylindrique contient la boîte à fumée (fig. 234). La chaudière en est séparée par une feuille de tôle circulaire à dont les bords sont relevés et rivés au cylindre. L'extrémité de celui-ci est fermée par une porte qui s'y emboîte exactement. Cette disposition évite les cornières et beaucoup de main d'œuvre, mais les angles de la feuille de tôle à sont perdus, et sa qualité doit être très supérieure pour qu'on puisse en rabattre les bords. Cette opération, du reste, est toujours difficile. À la partie postérieure de la chaudière se trouve une boîte formée du prolongement de la partie supérieure du cylindre, de deux feuilles de tôle verticales qui lui sont tangentielles et de deux feuilles perpendiculaires aux premières. La feuille antérieure est rivée à la partie inférieure du cylindre : pour éviter les cornières on recouvre en avant le bord supérieur de cette feuille, et l'on plie en arrière ses bords verticaux pour les souder aux feuilles latérales ; de telle sorte que les courbes de cette feuille faites en bc et cd ont les formes indiquées par la figure 234^{bis}. La chaudière des machines Crampton n'offre que deux pièces difficiles à exécuter ; elle est d'une construction simple, et marque un progrès dans l'art de la chaudronnerie.

L'accroissement d'épaisseur de la plaque de devant de la boîte à feu est nécessaire par le grand nombre de trous qu'elle porte pour recevoir l'extrémité des tubes à fumée. Pour le même motif, on donne de 15 à 18 millimètres d'épaisseur à la plaque de tôle qui forme la paroi de devant de la chaudière. Avant de placer cette feuille, on y trace au compas les circonférences des trous, en les disposant en quinconce, c'est-à-dire de telle sorte que les centres de trois cercles voisins forment les sommets d'un triangle isocèle, comme on le voit dans les coupes en travers pl. 24 et 25. On perce ces trous jusqu'à une hauteur un peu moindre que celle du niveau de l'eau dans la chaudière. On porte la plaque de tôle sur la machine à percer, puis on la met sur une feuille de tôle très mince, sur laquelle on indique avec une pointe le contour des trous qu'on vient de faire. On fixe convenablement cette dernière feuille sur la plaque de cuivre

qui doit former le devant de la boîte à feu. On est alors certain qu'en portant celle-ci à la machine à percer, l'on obtiendra une série de trous parfaitement identique à la première. Après avoir monté la chaudière et la boîte à feu, l'on élève progressivement celle-ci dans la chaudière jusqu'à ce que les trous destinés à un même tube se trouvent à la même hauteur. On indique alors avec une pointe la position des trous qu'on doit percer dans la partie inférieure de la caisse de la chaudière, on les y pratique, on fait la rivure, et il reste à placer les tubes.

Les tubes ont été d'abord faits en cuivre rouge de 2 millimètres d'épaisseur. Pour les fabriquer, l'on combat une bande de cuivre suivant sa longueur, de manière à superposer ses deux bords. On plaçait entre eux de la soudure forte (alliage de zinc et de cuivre), et l'on portait au feu les tubes ainsi préparés. La soudure fondait et réunissait fortement les bords de la feuille de cuivre. On introduisait dans le tube un cylindre qui écrasait les bords de la feuille, puis on passait le tube lui-même dans une espèce de filière qui lui donnait une épaisseur très égale. Mais les tubes ainsi obtenus s'altéraient rapidement. Le cuivre qui est peu résistant était entamé par les petits morceaux de coke brûlants enlevés au foyer par la violence du courant d'air. On observa que la soudure résistait mieux que le cuivre, et l'on fut ainsi conduit à exécuter les tubes en laiton. Cette matière est suffisamment malléable, plus dure que le cuivre, et son prix est inférieur d'un tiers environ à celui de ce métal.

La porte *p* du foyer (fig. 235, 236) doit traverser les faces antérieures de la caisse et de la boîte à feu. La réunion de ces deux lames métalliques doit être très bien faite, car les variations de température auxquelles est exposée cette partie de la chaudière rendraient les fuites très nombreuses. Voici comment on l'exécute. On évide un peu la lame de cuivre, de manière à lui donner la forme *a'a* pour la rapprocher de la feuille de tôle *t't*. On fait alors un cadre avec une barre de fer carrée, représenté en coupe en *o'o'*, et on place une série de rivets qui traversent à la fois et qui réunissent d'une manière invariable la feuille de cuivre, celle de tôle et le cadre en fer. La figure représente, aussi en coupe la double porte destinée à former l'entrée du foyer; on la voit de face dans la figure 236, dans laquelle *cd* indique la plateforme du mécanicien. On remarque sur la coupe, que la porte est préservée de l'action directe du rayonnement de la chaleur par une plaque de tôle *m'n* placée à distance de la porte proprement dite *p* et fixée à celle-ci par des rivets passant par des visoles minces de fer fondu.

Les boîtes à feu en cuivre peuvent durer une dizaine d'années, quand elles ne subissent par des causes exceptionnelles d'altération.

On a essayé de faire des boîtes à feu en fer, mais ce métal s'oxyde beaucoup plus rapidement que le cuivre et s'altère en se combinant au soufre que contient la houille. La différence de température des deux faces des plaques de ces boîtes est plus grande que dans les boîtes à feu en cuivre. La dilatation y est donc aussi plus inégale et produit de nouvelles causes de destruction. La tôle est faite de plusieurs plaques de fer superposées, passées au laminier, et par suite soudées entre elles; l'inégalité de dilatation fait céder ces soudures et produit des bouffonnements dans les parois de la boîte à feu. Cet inconvénient est moins à craindre dans les boîtes en cuivre: ce métal se soude plus facilement, ses soudures exigent une température moindre et sont généralement mieux faites. Des boîtes à feu qui ont été

faites en fer n'ont pas duré plus de deux ans.

L'enveloppe extérieure de la chaudière n'étant pas exposée à l'action directe du feu, dure beaucoup plus longtemps. On se trouve ainsi obligé de remplacer quelquefois une boîte à feu. Cette opération n'offre pas de bien grandes difficultés. On supporte la chaudière à une certaine hauteur au dessus du sol, on coupe les rivets qui réunissent la boîte à feu à l'enveloppe extérieure de la chaudière; on enlève l'ancienne boîte à feu, on remet en place la nouvelle et on la fixe avec de nouveaux rivets.

Quand on a fixé la boîte à feu dans sa position définitive, on place les tubes. On ouvre la porte de la boîte à fumée, on introduit dans chaque trou de la plaque tubulaire un tube que l'on pousse jusqu'à ce qu'il entre dans le trou correspondant de la boîte à feu. L'eau de la chaudière subissant une forte pression, tend à s'échapper par les moindres fissures. Il importe donc que la réunion des tubes aux plaques soit assez intime pour ne pas laisser plus d'issue que la jointure de deux plaques rivées et mâtées. Dans ce but, on se sert de la méthode suivante qui date du concours sur le chemin de Liverpool à Manchester. Le diamètre des trous de la boîte à fumée surpasse de 2 millimètres celui des trous de la boîte à feu, qui est d'environ 0^m.05. Les tubes tels que les fournissent les fabriques, ont 2 millimètres d'épaisseur et un diamètre constant. On les prend tels que leur diamètre extérieur soit un peu moindre que celui des trous de la plaque tubulaire antérieure. On diminue d'environ 1 millimètre les dimensions de l'un des bouts de chaque tube, en le martelant à chaud sur un petit cylindre de fer. On augmente aussi d'un millimètre environ le diamètre de l'autre bout, en y introduisant de force et à chaud un morceau de fer conique. On dressé à la lime, quelquefois même au tour, les extrémités du tube, de manière à leur donner des diamètres égaux à ceux des trous des plaques tubulaires. Après avoir placé le tube, on entre, à coups de marteau, dans chacune de ses extrémités, un mandrin conique a (fig. 237) dont le bout est assez petit pour entrer sans efforts. Le tube, fait d'une matière malléable, cède à la pression du mandrin, il se moule sur les bords de la plaque tubulaire de façon à remédier aux inégalités que présentent souvent les contours du trou ou du tube. On prend une virole, ou bague d'acier, épaisse de 2 millimètres $\frac{1}{2}$, dont le diamètre extérieur est un peu plus fort que le diamètre intérieur du tube. On a donné à cet anneau un peu d'entrée, c'est-à-dire que l'un de ses bords a un diamètre un peu moindre que celui du reste de la bague (fig. 238); on peut ainsi l'entrer à la main dans le tube de quelques millimètres. L'autre bord est relevé. Pour ne pas déformer l'anneau en le plaçant, on y introduit un cylindre en fer terminé par une tête. On frappe sur cette tête et l'on place la virole. Elle augmente le diamètre du tube qui est alors pressé très fortement contre les bords de la plaque. Cette pression suffit pour intercepter tout passage à l'eau de la chaudière.

On a remarqué que lorsque deux surfaces sont en contact, les liquides peuvent s'écouler en passant par les vides qu'elles laissent entre elles. Mais si l'on presse avec force ces deux surfaces l'une contre l'autre, il paraît que ces vides diminuent ou même disparaissent, puisque le liquide cesse de passer. C'est en vertu de ce phénomène que la pression des tubes contre les plaques suffit pour fermer exactement toute issue.

Ce moyen de réunion des tubes avec les plaques métalliques est d'autant plus

remarquable que l'élevation de la température rend son action encore plus énergique. La virole d'acier en contact direct avec la flamme acquiert en effet une température bien supérieure à celle de la plaque de cuivre toujours en contact avec l'eau. La dilatation de la virole est par conséquent plus considérable que celle de la plaque, de sorte que la pression de la virole sur le tube et, par suite, de celui-ci sur la feuille métallique est d'autant plus grande que la virole tend à acquies un volume plus considérable, c'est-à-dire que sa température est plus élevée relativement à celle de la plaque de cuivre.

On prend quelquefois la précaution, de laisser suillir sur les plaques l'extrémité des tubes et de la rabattre à coups de marteau comme l'indique la figure en A. Cette précaution est bonne mais n'est pas fort importante, la fermeture exacte du trou étant due à la pression de la virole.

Quand le fer est soumis à une température croissante, sa ténacité augmente jusqu'à 250° , où elle éprouve une espèce de maximum. Elle diminue ensuite, et le fer tend de plus en plus à céder à l'effort qu'il supporte. La température des viroles est ordinairement de plus de 250° ; elle est plus forte vers la surface externe des plaques tubulaires que vers leur surface intérieure qui est en contact avec l'eau. Aussi est-ce vers sa tête que la virole diminue le plus aisément de diamètre; il importe à la durée de la pression qu'elle s'exerce plutôt vers le bout de la virole que vers sa tête. Dans ce but, il convient de donner au corps de l'anneau une forme un peu conique vers le bord extérieur. Malgré cette précaution, les viroles se resoulent au bout d'un certain temps sur elles-mêmes, leur diamètre diminue d'environ $\frac{1}{10}$ de millimètre, et elles ne tiennent plus dans les tubes. Quand la locomotive est de service, on aperçoit quelquefois sur la plaque tubulaire de la boîte à feu, ordinairement blanche, un suintement d'eau qui la noircit, qui coule sur le foyer et en diminue la chaleur. C'est qu'alors les viroles ne pressent plus assez les tubes, et il devient nécessaire de les remplacer.

On remarque que si la température du foyer est très forte, il se produit rarement des fuites. Des suintements qui ont lieu, quand la machine est encore froide, cessent quand la température s'élève. Si on laisse la porte du foyer assez longtemps ouverte pour que l'air extérieur puisse refroidir sensiblement la plaque tubulaire, on voit parfois se produire des fuites qui cessent quand la chaleur du foyer augmente. Ces faits se rapportent à des phénomènes de caléfaction qui ont fixé dernièrement l'attention des savants. Lorsqu'on met de l'eau sur une plaque très chaude, elle passe à l'état sphéroïdal, se met en gouttelettes et s'évapore lentement. Si la plaque se refroidit à 400° ou 500° , on voit tout-à-coup l'eau s'étendre et s'évaporer avec rapidité.

Un anglais, Terkins, fit vers l'année 1826, des expériences sur un mode particulier de génération de la vapeur qu'il avait imaginé. Il chauffait dans un vase très épais de l'eau jusqu'à une température blanche; cette eau introduite partie par partie dans les cylindres moteurs se réduisait immédiatement en vapeur en produisant de la force motrice, ou bien introduite dans une chaudière ordinaire, chauffait celle-ci et réduisait en vapeur l'eau qui y était contenue. Il se servait comme générateur d'une culasse de

canon fermé par une vis. Il remarqua que le suintement auquel elle donnait lieu cessait quand la température était suffisamment élevée. Il fit alors un trou de $\frac{1}{2}$ m.m. de diamètre environ dans son canon qu'il chauffa fortement. L'eau qui s'échappait d'abord par le trou, était remplacée au moyen d'une pompe; l'écoulement cessa lorsque le métal fut porté au rouge blanc, quoique la pression de l'eau fut de 300 à 400 atmosphères. Quand le canon fut refroidi à 400° environ, l'eau sortit avec une grande violence. On peut expliquer ces phénomènes par une force répulsive des corps en contact; la sphère d'activité de cette force s'accroît avec la température. Dans les expériences précédentes, quand son rayon a été égal au demi-diamètre du trou, l'écoulement a cessé, il a recommencé lorsque ce rayon est devenu plus petit. On conçoit que cette force explique de la même manière les phénomènes qu'on remarque dans les plaques tubulaires des locomotives.

Lorsqu'une machine marche dans les meilleures conditions, il faut ouvrir le moins possible la porte du foyer. L'air froid qu'elle laisse pénétrer refroidit la plaque tubulaire. Souvent alors une fuite se produit, l'eau coule sur la plaque, refroidit d'autres viroles et cause de nouvelles fuites; il faut bientôt s'arrêter. Aussi les chauffeurs évitent-ils le plus possible cet inconvénient. Quand on veut mettre du charbon, le mécanicien ouvre la porte, la referme après l'introduction de la houille et ne l'ouvre que pour donner passage à une nouvelle pelletée.

Les viroles finissent par céder à la pression qu'elles supportent, et il faut en mettre d'autres. Pour rendre cette opération aussi rare que possible, on les fait souvent en acier, métal qui se repoule plus difficilement sur lui-même. On en coupe une bande de la longueur voulue, on la courbe et on soude les lèvres. On relève l'un de ses bords, et on termine au tour. On en fait quelquefois sans soudure avec de la tôle emboutie, et en fonte malléable.

La rupture d'un tube étant toujours un accident grave, on exige que la construction de ces appareils soit très soignée. On leur fait subir une épreuve avant de les recevoir. On bouche les extrémités de chaque tube de manière à ne laisser qu'un petit orifice; on y introduit de l'eau et on la soumet, au moyen d'une presse hydraulique, à une pression de 15 à 18 atmosphères. Si le tube résiste, il est admis. Malgré cette précaution, il peut se crever au bout d'un certain temps de service: la formation d'un dépôt, en s'opposant à la transmission de la chaleur, peut faire brûler le tube; le passage d'un peu de charbon incandescent, de cendres ou de petites pierres contenues dans le coke, matières qui entraînent le courant d'air du foyer, produit une usure, diminue l'épaisseur du tube, l'affaiblit et peut finir par causer sa rupture. Quand cet accident arrive, l'eau se répand dans la boîte à fumée et sur le foyer, la machine est hors de service et l'on doit appeler une locomotive de secours. S'il ne se fait qu'une légère fissure dans un tube, le mécanicien y place avec une pince, un bouchon de bois dont il est toujours muni, et l'enfonce à coups de marteau par l'intermédiaire d'une barre. L'eau se répand dans la boîte à fumée, mais elle cesse momentanément de couler sur le feu, et le bouchon se détruit assez lentement pour que l'on puisse arriver à la station la plus prochaine. Si l'on est forcé de parcourir un long

trajet avec cette même machine, il faut éteindre le feu et boucher le tube avec des bouchons de fer. La locomotive a alors un tube de moins, mais elle peut fort bien servir dans cet état. Au bout d'un certain temps, qui se manifeste par une rupture plus fréquente des tubes, on reconnaît que ceux-ci devenus trop minces, doivent être renouvelés. Pour cela l'on coupe avec un burin les viroles parallèlement à une génératrice; on coupe aussi le bout du tube s'il a été rabattu, et l'on fait passer le tube par le trou de la plaque antérieure qui a été fait plus grand pour ce motif. Des incrustations calcaires fortement adhérentes sont quelquefois déposées par l'eau sur les tubes et les empêchent de sortir facilement par les trous à travers lesquels ils étaient entrés. On les pousse alors à coup de marteau, au moyen de tiges introduites par la boîte à feu, ou l'on y introduit de longs boulons, terminés par deux écrous d'un diamètre plus fort que celui du tube. Celui de devant porte une espèce de plateforme appuyée sur la plaque tubulaire. En tournant l'écrou, il attire à lui le boulon et le tube qu'il extrait de la chaudière. Cette opération fatigue les feuilles métalliques et ajoute à la nécessité de leur épaisseur.

Quand les tubes ont une longueur de plus de 2^m à 2^m,50 ils seraient exposés à fléchir par l'action seule de leur propre poids, s'ils n'étaient soutenus que par leurs deux extrémités. On place alors au milieu du corps de la chaudière une feuille de tôle mince percée de trous que traversent librement les tubes.

Les surfaces cylindriques et sphériques étant celles qui embrassent le plus grand volume sous la plus petite surface et qui résistent par elles-mêmes aux pressions auxquelles elles sont soumises, il semblerait qu'il faut donner aux chaudières l'une de ces formes. Mais les dimensions de la chaudière sont limitées par l'écartement des rails. Si l'on remplaçait la boîte à feu de la chaudière par une force cylindrique, sa base devrait être inscrite dans les rails, et elle ne pourrait être assez grande pour contenir tout le liquide nécessaire et offrir la surface de chauffe suffisante à des machines de la dimension de celles dont on se sert aujourd'hui. Cette forme ne présenterait par d'ailleurs tous les avantages qu'on serait porté à en attendre. La construction est moins simple que celle ordinairement employée. D'un autre côté, l'équilibre d'un cylindre pressé extérieurement est instable, c'est-à-dire que la première déformation produite tend sans cesse à augmenter, jusqu'à ce que le cylindre soit complètement écrasé.

M. Bury a fait des machines dont la caisse à feu est un cylindre surmonté d'une calotte sphérique, et dont la boîte à feu présente une forme analogue (fig. 239, 240); elle n'offre de partie plane que l'espace dans lequel s'ajustent les tubes. Une de ces machines a éclaté sur le chemin de Londres à Douvres. La boîte à feu a pris d'abord la forme indiquée par la ligne ponctuée (fig. 240); la feuille métallique se déchira bientôt après, et la vapeur sortit avec violence par cette ouverture, de sorte que la pression exercée sur la face opposée n'étant plus contrebalancée, la locomotive sortit des rails du côté opposé à celui où la déchirure avait eu lieu.

La distance de 1^m,50 laissée entre les rails était bien suffisante lors de l'établissement des chemins de fer; elle n'est plus aussi satisfaisante maintenant qu'on veut

donner aux machines une plus forte dimension pour obtenir une vitesse plus grande. Les rails ont été plus écartés par M. Brunel sur le Great Western railway, et c'est sur ce chemin que l'on a obtenu la plus grande vitesse.

Les deux surfaces voisines de la caisse et de la boîte à feu céderaient à la pression de 5 à 6 atmosphères qu'elles supportent, si elles n'étaient reliées entre elles. On les réunit par des tiges de cuivre horizontales (fig. 241). Quand la boîte à feu est placée, on perce dans sa paroi et dans celle de la caisse qui l'entoure, avec un foret ordinaire, deux trous correspondants, d'environ 0,015 de diamètre. On tarande ces trous et l'on trace une vis du pas convenable sur un cylindre de cuivre, terminé par une tête carrée. En plaçant cette vis, on réunit les deux surfaces des boîtes, et l'on ferme exactement les trous qu'on avait percés. On termine en rivant à froid les deux bouts de la vis de cuivre, après en avoir enlevé la tête.

On tarande le trou dans lequel doit s'engager la vis avec un tarand. Pour faire cet instrument, on prend une vis du pas voulu, taillée sur un cylindre en acier non trempé. On enlève au tour une partie de la vis suivant une surface conique ab (fig. 242) et on laisse une partie cylindrique bc . On taille aussi la vis suivant sa longueur, de manière à donner à sa coupe la fig. 243. Une saillie df du tarand a donc pour côtés df et gh . Le plus petit diamètre am du tarand est égal à celui du trou qu'il faut tarander. On introduit dans le trou le bout de l'instrument, et on le fait tourner au moyen d'un levier qui s'adapte sur la tête carrée du tarand. L'instrument enlève des copeaux du métal et s'y enfonce jusqu'à ce que toute l'opération soit terminée. Il occupe alors la position qu'indique la figure.

Pour tarander deux trous correspondants de la caisse et de la boîte à feu, on donne au tarand assez de longueur pour qu'il ait entamé la seconde ouverture avant d'avoir complètement fini la première. On est ainsi certain que les filets taillés dans les deux trous correspondent exactement à ceux de la vis comme si le métal tarandé continuait dans l'intervalle des deux plaques.

Deux surfaces parallèles, reliées par le moyen que nous venons de décrire, ne peuvent se séparer l'une de l'autre que si les filets de la vis ou du trou se déchirent, ou si les entretoises se rompent. Celles-ci sont espacées de 0,12 environ; chacune d'elles supporte à ses deux extrémités une force équivalente à la pression de la vapeur sur un carré mm de 0,12 de côté (fig. 244). Si la tension de la vapeur est de 6 atmosphères, cette pression est de $6^k \cdot 1,033 \cdot 12^2 = 89^k \cdot 2512$, le poids d'une atmosphère étant de $1^k \cdot 033$ par centimètre carré. Il est facile de voir d'après les formules de la résistance des matériaux, qu'une entretoise de cuivre ou de fer de 1 cent. $\frac{1}{2}$ de diamètre, suffit amplement pour supporter un pareil effort. On verrait de même que ces pièces sont assez rapprochées pour que les parties planes $abcd$ qu'elles laissent entre elles résistent aisément à l'action de la vapeur.

On a employé quelquefois des entretoises de fer et non de cuivre. Pendant longtemps on a été indécis sur la préférence à donner à l'un ou à l'autre de ces métaux; l'expérience a décidé les constructeurs pour le cuivre. Quelque pure que soit l'eau qu'on emploie, elle dépose des incrustations calcaires sur les parties qu'elle touche. Ces dépôts facilitent

l'oxydation du métal en s'opposant à ce que la chaleur qu'il reçoit du foyer se répande librement dans l'eau. Comme le cuivre s'oxyde plus difficilement que le fer, c'est un premier motif de le préférer. On a remarqué que l'oxydation la plus forte se produit sur le fer, et surtout près des points où il est en contact avec le cuivre; cette action paraît être due à des phénomènes galvaniques. Si l'entretoise est en fer, elle s'oxyde près de son point d'attache à la boîte à feu; le diamètre successivement réduit finit par être hors d'état de résister à la pression; la rupture de l'entretoise reporte sur les voisines la pression qu'elle supportait, et peut les rompre, surtout si elles sont déjà attaquées. Il est rare qu'une seule entretoise se casse à la fois, et si le nombre des boulons rompus est considérable, il peut en résulter une explosion. Si l'on a fait les entretoises en cuivre, l'oxydation se porte sur la tôle qui s'oxyde près de leur rivure, mais dans ce cas le fer est supporté par les têtes des entretoises, et son épaisseur étant la plus grande au milieu de l'intervalle de deux boulons, sa section suivant leur axe est à peu près celle d'un solide d'égale résistance. Il en résulte que l'oxydation ne produit pas la séparation des deux surfaces parallèles aussi rapidement que lorsque les boulons sont en fer. Enfin, le cuivre se rivant à froid, des entretoises en cuivre se rivent aisément, tandis que la rivure des entretoises en fer est plus difficile.

La plaque tubulaire de la boîte à feu est maintenue par les tubes; elle a plus d'épaisseur que les autres parties de la boîte, et peut résister à la pression de l'eau quoiqu'elle soit affaiblie par un grand nombre de trous. Lorsqu'on perce ces trous pour la première fois, il faut laisser entre leurs bords un espace d'au moins 15 m. m., afin que la plaque puisse conserver longtemps une résistance suffisante. En plaçant les tubes, on affaiblit la plaque par les efforts auxquels on la soumet; en changeant les tubes, on les coupe au burin, et il est difficile de frapper sur cet instrument avec assez de précision pour ne pas entamer la plaque. Les bords du trou deviennent alors irréguliers, et on ne peut leur rendre une forme parfaitement circulaire qu'en refaisant les trous à l'aide d'un foret à main sur un diamètre plus grand. De cette façon la distance des ouvertures se réduit bientôt à 12 ou 13 m. m. Elle finit ainsi avec le temps par ne plus avoir la résistance suffisante, la tôle cède et une fissure se produit d'un trou à l'autre qui donne lieu à des fuites; il faut alors remplacer la boîte à feu extérieure. D'autres fois, par la négligence du mécanicien, le niveau d'eau s'abaisse au dessous de la plaque supérieure ou même de la première rangée de tubes. La température de ces parties s'élève alors à plus de mille degrés, tandis que celle des parties voisines est d'environ 160° comme celle de l'eau. Il en résulte une grande tension de la plaque tubulaire près du niveau du liquide. La plaque peut alors se rompre en ses points les plus faibles, suivant a b (fig. 245) et il faut en mettre une autre. Toutes ces considérations réunies conduisent à éviter de laisser jamais moins de 12 à 13 m. m. d'intervalle entre deux trous voisins.

La plaque supérieure de la boîte à feu ayant un mètre carré de surface supporte une pression considérable; si on ne la consolidait pas, elle céderait à cette pression, s'enfoncerait en prenant une forme courbe et ne serait arrêtée momentanément que par les tubes et les entretoises sur lesquels elle exercerait un violent effort. Les formules relatives à la résistance des corps montrent que la traction qu'elle produirait serait de beaucoup supérieure au

poind que supporte sa surface; elle briserait nécessairement les entretoises et produirait une explosion. Pour éviter un pareil danger, on s'est servi de plusieurs moyens. On a d'abord rivé à la plaque des fers d'angle comme l'indique la figure 246. La face supérieure de cette plaque étant à la température de l'eau, et la température de la face inférieure augmentant avec l'épaisseur du métal, l'oxydation sera d'autant plus lente que l'épaisseur de la feuille métallique sera moindre. Les cornières avaient donc l'inconvénient d'augmenter cette épaisseur par bandes assez larges, et de faciliter ainsi l'altération de la boîte à feu. Elles ne présentaient par du reste une force suffisante. On les a remplacées par des entretoises (fig. 247) qui ont à-peu-près la forme d'un solide d'égale résistance. Leur hauteur est très grande relativement à leur épaisseur, et plus considérable en son milieu que vers ses extrémités. Elles portent des renflements a dans lesquels passent des boulons. Des parties planes b sont taillées au burin pour recevoir la tête des écrous; enfin, l'entretoise ne porte que par ses deux extrémités, de telle sorte que l'eau baigne presque toute la surface de la plaque. On taille dans les deux points d'appui des entretoises un trou capable de recevoir la tête du rivet c. Ces pièces de forge sont d'une fabrication difficile. On emploie deux méthodes pour les faire: l'une consiste à prendre une plaque de l'épaisseur des renflements a, à chauffer successivement chaque partie intermédiaire a a et à l'étréper au marteau; on peut aussi prendre une plaque de l'épaisseur de la partie plane b, chauffer les points a et leur donner l'épaisseur voulue en y refoulant le fer à coups de marteau frappés sur les bouts de l'entretoise. La première méthode est la meilleure à cause du martelage qu'on fait éprouver aux parties minces et qui en durcit la matière. Chaque boulon qui a 0^m,012 de diamètre, est enduit vers sa tête de minimum d'élage dans de l'huile. Cette précaution suffit pour qu'on soit sûr d'avoir un joint bien fait. Les parties planes taillées dans la surface supérieure des entretoises sont suffisamment grandes pour supporter toute la surface de l'écrin.

Il est facile de calculer l'effort que supporte chaque entretoise, et les dimensions qu'il faut lui donner: Supposons ces pièces espacées de 0^m,12 d'axe en axe; elles supportent par conséquent chacune pour une pression de 6 atmosphères ou 7437^k,6 uniformément réparties sur toute sa longueur. Ce poids produit aux deux extrémités de l'entretoise une réaction du point d'appui équivalente à 3718^k,8. Ce poids uniformément réparti équivaut à un poids moitié moindre, soit 3718^k appliqué au milieu de l'entretoise et produisant une pression de 1859^k sur chaque extrémité. Le milieu de cette pièce doit donc résister à un effort de 1859^k agissant de chaque côté sur un bras de levier d'environ 0^m,50. Or, on a, d'après une formule connue:

$$\text{So. } 1859 = \frac{1}{6} 1000 \times 2 \cdot h^2$$

le maximum de la résistance du fer étant supposé de 1000^k par c. q., et l'épaisseur de l'entretoise de 0^m,02. Cette formule donne en centimètres la hauteur cherchée h de la pièce de forge. On trouve h = 17. Cette valeur de h est sans doute trop forte, attendu le frottement des extrémités de l'entretoise sur les rivets, qui fait jouer à la plaque de tôle le rôle d'un entraînement, abaissant beaucoup l'axe neutre, ajoute considérablement à la résistance de l'entretoise; il faut cependant remarquer que c'est aller très loin que de donner 1000^k par centimètre carré à supporter au fer

On a substitué souvent aux entretoises en fer des entretoises faites de deux feuilles de tôle parallèles (fig. 248), taillées suivant la forme d'un solide d'égale résistance, en laissant entre elles l'espace nécessaire au passage des boulons. Leur contour supérieur porte des parties planes destinées à recevoir les courons. Pour relier les deux plaques de tôle, on a percé une série de trous au milieu de leur hauteur, de manière à suivre autant que possible l'axe neutre de résistance de la feuille, et à ne pas amoindrir sa solidité. On met entre deux trous correspondants un petit cylindre en fonte et on place un rivet qui traverse les trous et le cylindre. Les bouts des deux feuilles sont portés par de petites pièces de fer qui épousent la forme des rivets. Le principe sur lequel est fondée la construction de ces entretoises est le même que pour celles que nous avons décrites plus haut; mais celles qui sont faites en tôle sont moins chères et présentent l'avantage de substituer le travail d'un outil mécanique à des travaux de forge plus coûteux et plus imparfaits.

Il y a quelques années, une machine qui remorquait du ballast sur le chemin de Chartres fit explosion. La feuille supérieure de la boîte à feu s'enfonça en se déchirant en a (fig. 246), l'eau se répandit sur le foyer, et la pression sur le dôme n'étant plus contrebalancée fit sauter la machine. Plusieurs personnes furent victimes de cet accident. On en attribua la cause aux cornières qui consolidaient la plaque et qui ne s'étendaient pas jusqu'au dessus des parois verticales de la boîte à feu. On exige maintenant que les constructeurs évitent ce porte-à-faux, et que les entretoises portent sur les plaques verticales d (fig. 249). Cette précaution est bonne, mais les entretoises disposées comme l'indique la figure 247 présentent une solidité suffisante, leurs extrémités étant très près des feuilles verticales.

On fait aussi des entretoises en fonte (fig. 250), ayant la forme d'un arc de cercle dont les naissances sont reliées par deux boulons horizontaux. Ce système est à peu près celui des poutres armées.

La partie supérieure des faces de la caisse de la chaudière ne correspond pas à des faces parallèles de la boîte à feu, et ne pourrait résister à la pression si elle n'était soutenue. Pour la consolider, on se sert de fer à T horizontal, que l'on rive sur sa surface et auquel on fixe avec des goupes des barres terminées par des fourches (fig. 251). Ces barres relient entre elles les faces opposées de la caisse de la chaudière, et joignent une partie de sa face postérieure à la portion la plus haute de la plaque tubulaire de la boîte à fumée.

Dans la plupart des dernières locomotives construites, la caisse de la chaudière est surmontée d'une voûte en arc de cloître, dont les parties courbes résistent suffisamment par elles-mêmes. Entre cette voûte et le plan supérieur de la boîte à feu, se trouvent des faces planes qu'on soutient par le moyen que nous venons d'indiquer. Le fer à T le plus haut doit être mis un peu au dessus de la naissance de la voûte. M. Stephenson, dans des machines qu'il avait construites pour le Gouvernement Belge, avait cru devoir mettre le fer à T le plus haut un peu au dessous de la naissance de la cornue. Mais la partie qui est au dessus de ce fer d'angle étant composée d'une partie plane et d'une partie courbe, tendait à se déformer, comme l'indique la ligne ponctuée (fig. 252). Cette déformation produisait de grands efforts sur les rivets. Cette construction a donné lieu à une explosion sur une machine

Sortie des ateliers de M. Stephenson et en service en Belgique. La feuille postérieure de la voûte s'est déchirée par des rivets en A, et s'est repliée en arrière sur le mécanicien qui a été tué sur le coup. M. Stephenson s'est ému de ce malheur et a invité tous ceux à qui il avait vendu des locomotives semblables, à placer un fer à T horizontal un peu au dessus des naissances de la voûte en arc de cloître.

Les barres dont on se sert pour réunir les faces planes opposées des chaudières ont l'inconvénient d'empêcher d'y pénétrer, soit pour vérifier les rivets, soit pour détruire les incrustations que l'eau dépose. Pour enlever les barres et pour pouvoir réparer la chaudière, on est souvent obligé de couper au burin ou de casser les extrémités de ces tiges de fer, les bouts des clavettes étant engagés dans le dépôt calcaire.

Pour obvier à ces inconvénients, on propose de remplacer les barres par des entretoises horizontales analogues à celles qui consolident la face supérieure de la boîte à feu. Mais ces entretoises n'auraient pas la même forme : elles seraient rectangulaires (fig. 253), formées de deux feuilles de tôle parallèles, liées l'une à l'autre et rivées aux deux faces voisines de la boîte ; des boulons joindraient ces entretoises à la feuille à soutenir. Ce système ne peut manquer de réussir.

M. Bury avait pour but, dans ses chaudières cylindriques, d'éviter les entretoises, mais les accidents qui ont eu lieu ont fait voir qu'elles étaient indispensables. On peut seulement les espacer plus que dans les chaudières ordinaires, parce qu'elles n'ont pour but que de maintenir un équilibre instable par lui-même. Une machine de Bury sur laquelle on n'avait pas placé de ces entretoises fit explosion sur un chemin de fer Anglais ; la figure 240, comme on l'a déjà dit, indique par une ligne ponctuée comment eut lieu la déformation. La machine fut enlevée de la voie et projetée latéralement à une certaine distance. Près de Londres, la partie supérieure d'une boîte à feu d'une machine locomotive s'est déchirée, a percé un viaduc sur lequel on passait, et le reste de la locomotive, projeté à une hauteur considérable, est allé tomber à une assez grande distance.

Dans ce cas, on peut évaluer ainsi la quantité d'action développée pour la comparer au travail fait. Celui-ci est le poids de la machine, soit 16000^k multiplié par la hauteur h. Le travail développé est la pression de la vapeur sur le dessus du dôme qui a pour projection un mètre carré environ multiplié par l'espace décrit pendant le temps qu'a duré la pression. C'est faire une hypothèse plausible que d'admettre que cet espace ait été de 4^m et que la pression moyenne pendant le temps correspondant ait été la moitié de la pression normale de 4^k par centimètre carré ; on a alors :

$$h. 16000^k = 10,000. 8 \text{ d'où } h = 5.$$

On conçoit ainsi que la machine ait pu être projetée à 5^m de hauteur, et cette quantité pourrait être plus forte encore si la pression intérieure dépassait beaucoup la pression normale. L'eau mise subitement en contact avec une grande masse de charbon incandescent a pu aussi ajouter beaucoup à l'intensité du phénomène.

§. 2^e. Grille.

La partie inférieure de la boîte à feu, telle que nous l'avons décrite, n'est pas fermée; elle doit recevoir un appareil capable de soutenir le combustible et de donner passage à l'air nécessaire à la combustion. On emploie dans ce but une grille supportée par un cadre en fer. Dans la barre rectangulaire qui réunit ordinairement la caisse à la boîte à feu (fig. 254), on perce des trous verticaux, qui s'élèvent jusqu'à un centimètre de la surface supérieure de cette barre. Ces trous sont au nombre de quatre, dont deux sont placés dans le côté antérieur et deux dans le côté postérieur du cadre. On taraude chaque trou et l'on y visse une pièce de fer recombée qui offre une petite surface plane. On a ainsi sur deux côtés opposés de la boîte à feu deux points fixes sur lesquels on met une barre de fer. Sur les extrémités de ces deux premières barres et normalement à elles on rive deux autres barres, et l'on a ainsi un cadre solidement soutenu. Quand la caisse et la boîte à feu sont unies par un système différent, on supporte la grille au moyen de quatre pièces de fer, dont la forme épouse celle de la boîte à feu (fig. 255); elles sont fixées par quelques uns des rivets, qui joignent la caisse à la boîte à feu. Sur le cadre on place une grille formée de barreaux indépendants et de la forme qui indique la figure; les vides de la grille suffisent pour laisser passer librement tout l'air nécessaire au foyer; les barreaux sont assez fortement maintenus par leur poids et par celui du charbon pour ne pas être déplacés par les mouvements brusques de la machine; leur section verticale est à-peu-près celle d'un solide d'égale résistance; une certaine rigidité est nécessaire pour qu'ils puissent supporter le charbon et leur propre poids, bien qu'amollis par la chaleur du foyer.

La grille est composée de barreaux mobiles, afin qu'on puisse se débarrasser aisément du feu. Quand une machine s'arrête, la pompe alimentaire ne fonctionne plus, et l'eau qui s'évapore dans la chaudière cesse d'être remplacée. Si l'on est forcé de s'arrêter quelque temps, on peut craindre que le niveau ne s'abaisse assez pour faire émerger dans la chaudière la partie supérieure de la boîte à feu, que cette partie ne s'échauffe et ne s'amollisse assez pour céder à la pression de la vapeur et qu'une explosion n'en résulte.

Lors même que cet accident n'arriverait pas, l'échauffement du métal en produirait l'oxydation et en diminuerait la force; ou bien, ce qui arrive fréquemment, quand le niveau s'abaisse à 8 ou 10 centimètres au dessous du ciel de la boîte à feu, la partie émergée, portée à une température très élevée, se dilate beaucoup plus que la partie en contact avec l'eau; alors cette différence donne naissance à une fissure qui se produit dans la plaque tubulaire, dans le voisinage du niveau de l'eau restée dans la chaudière, et passe par le milieu d'une rangée de tubes qui est la partie la plus faible.

Il peut arriver aussi que, pendant la marche, les soupapes de la pompe alimentaire se dérangent, ou que quelques corps étrangers s'y introduisent et les empêchent de fonctionner.

L'eau cesse alors de se renouveler dans la chaudière, et les mêmes accidents sont à craindre. Dans ces circonstances le mécanicien se sert d'une lance à feu (fig. 256), barre de fer dont un bout se termine par un anneau, et l'autre en fer de lance. Il introduit dans le foyer le bout pointu de cet instrument, et parvient aisément à le faire passer entre deux barreaux consécutifs. En faisant décrire à la lance un quart de tour autour de son axe, son extrémité ne peut plus passer entre les deux barreaux, et le mécanicien les soulève en tirant la lance à lui. Bientôt les barreaux se dégagent, tombent sur la voie et laissent dans la grille une ouverture par où l'on fait tomber le charbon. Si ce vide n'était pas suffisant, il serait aisé de l'élargir en faisant tomber avec la lance à feu d'autres barreaux sur la voie.

Pour les grandes locomotives construites dans ces derniers temps, on se sert d'une autre méthode. Pour obtenir plus de vitesse, il est nécessaire de produire plus de vapeur; dans ce but on donne au foyer de plus grandes dimensions. Le poids des barreaux et du charbon qu'ils supportent rendrait difficile la manœuvre que nous avons décrite, et l'on emploie d'autres méthodes pour faire tomber les barreaux. Une des dispositions à recommander consiste à faire en trois morceaux la barre postérieure du cadre de la grille (fig. 257). Le morceau du milieu est supporté par une pièce de fer mobile autour d'un axe horizontal; on peut faire tourner cette pièce autour de son axe, ou la maintenir dans sa position normale au moyen d'une tige verticale. Celle-ci porte une espèce de crémaillère qui sert à la fixer. Quand on soulève la tige, le morceau central du côté du cadre et plusieurs barreaux tombent sur la voie. Ils laissent une ouverture par laquelle on peut se débarrasser du charbon en le poussant avec une barre de fer.

§. 3.

Incrustations.

Les incrustations que l'eau dépose sur les parois des chaudières, sont la cause principale de leur détérioration et de leur destruction. Sur les chemins de fer, on dispose, à des distances de 30 ou 40 Kilomètres d'intervalle, des réservoirs plus élevés que le tender des locomotives, et alimentés d'ordinaire par une petite machine à vapeur. Ces réservoirs sont placés aux stations, afin qu'on puisse renouveler la provision d'eau pendant le temps d'arrêt nécessaire au service des voyageurs. L'eau qu'on introduit dans la machine peut contenir diverses substances en dissolution ou en suspension. On y trouve souvent du carbonate de chaux qui reste dissous par l'action d'un excès d'acide carbonique. Ce cas se présente pour toutes les eaux qui ont traversé un terrain calcaire. La chaleur du foyer fait dégager l'acide carbonique, et le carbonate de chaux se dépose. Les terrains qui forment le bassin de Paris comprennent des argiles mêlées de cristaux de plâtre. Ces argiles sont pour ainsi dire imprégnées de cette substance, et les eaux qui les traversent en sont bientôt chargées.

On peut dire en général que l'eau n'est à-peu-près pure que dans les grands cours d'eau qui prennent leur source dans des pays granitiques. L'analyse indique, comme

on devait s'y attendre, qu'elle y est plus pure que dans les rivières qui coulent sur des terrains de sédiment. L'eau se charge souvent dans ces terrains, outre de sulfate et de carbonate de chaux, de chlorure de calcium et de sulfate de magnésie. Toutes ces substances produisent des dépôts dans les chaudières, et l'on ne doit pas reculer devant des dépenses, même considérables, pour se procurer de l'eau pure. On est pour cela quelquefois conduit à percer un puits dans des sables qui avoisinent un grand cours d'eau, afin d'y puiser le liquide dont on a besoin. Mais il arrive souvent que l'eau de ce puits n'est pas la même que celle de la rivière. Elle provient alors des collines voisines dont l'eau se rend par infiltration dans le fleuve, en traversant les sables d'alluvion des vallées. À dix mètres de la rive, l'eau n'est quelquefois pas la même que dans la rivière, et l'on observe, en creusant le puits, que le niveau y est un peu supérieur à celui de la rivière. On est alors certain que le courant se dirige vers elle, et que l'eau du puits vient des collines environnantes.

En général, il faut se servir de tuyaux en fonte dont on fait plonger l'extrémité dans le lit même du fleuve. Quand on est trop loin des grandes rivières, on se sert de l'eau la plus pure que présentent les cours d'eau traversés par le chemin de fer. Enfin, ce n'est qu'en désespoir de cause qu'on doit employer de l'eau de puits. Il est arrivé qu'on a établi pour des chemins de fer, des pompes situées à 30 mètres environ des bords d'un grand fleuve. L'eau y était amenée par un caniveau en maçonnerie; mais les eaux de la colline ont filtré à travers les parois de ce conduit, et il s'y est établi un courant vers le fleuve. Il faut donc apporter les plus grands soins à la construction de pareils caniveaux, et lorsqu'on s'aperçoit qu'ils sont insuffisants, l'on doit y mettre des tuyaux d'une matière parfaitement imperméable, en fonte par exemple, venant prendre l'eau au milieu du courant.

Outre des substances en dissolution, on trouve ordinairement dans l'eau des rivières une assez grande quantité de matières en suspension. Celles-ci ne produisent pas d'ordinaire de dépôts adhérents; de simples lavages suffisent pour s'en débarrasser. Les matières tenues en dissolution forment des dépôts très durs et qui résistent à l'emploi de ces moyens.

Les matières en dissolution existent dans les eaux de la Seine dans la proportion de 0,000 19, et dans les eaux de l'Ouse dans la proportion de 0,000 25. L'amélioration graduelle de celles-ci est au reste sensible par suite du lavage des terrains traversés par le canal depuis son ouverture. Le carbonate de chaux forme ordinairement plus de la moitié de ces dépôts.

L'eau de Seine peut être considérée comme d'une qualité satisfaisante, et les dépôts qu'elle produit dans les chaudières ne donnent pas lieu à des inconvénients sérieux. Les dépôts contiennent presque exclusivement du carbonate de chaux; les autres sels, le sulfate lui-même, restent ordinairement en dissolution et sont enlevés par les lavages qui s'effectuent après 300 ou 500 Kilomètres de parcours, suivant le degré de pureté des eaux.

Une eau contenant 0,000 2 de son poids de carbonate de chaux, doit en déposer 1^{re} 40 environ pour un parcours de 100 Kilomètres. Ces dépôts rendent difficile la transmission de la chaleur à travers le métal; sa température s'élève; il perd sa ténacité et il éprouve des dilatations et des contractions nombreuses. Ce dernier phénomène ne peut avoir lieu sans

produire des disjonctions. Ainsi les viroles se refoulent très rapidement sur elles-mêmes quand l'extrémité des tubes est chargée d'incrustations dans la chaudière, et cette déformation cause bientôt des fuites. C'est pour cela que les locomotives qui font un très bon service sur le chemin de fer du Nord, entre Paris et Amiens, présentent en peu de temps des fuites lorsqu'on les emploie au delà d'Amiens, où l'eau dépose beaucoup. On conçoit donc l'importance pour les machines d'une eau bien pure, et l'on peut faire raisonnablement de grandes dépenses pour s'en procurer.

Les dépôts sont les plus nombreux dans les endroits de la chaudière où l'évaporation est la plus active. Aussi se forment-ils principalement autour de la boîte à feu. Lorsque la machine rentre à l'atelier, que le feu vient d'être éteint et que la vapeur possède encore une forte tension, on ouvre un robinet de 0^m.04 ou 0^m.05, de diamètre, placé dans la face postérieure de la chaudière; l'eau s'échappe avec violence et entraîne la partie non adhérente des dépôts. L'autre partie est cristalline, semblable à de la pierre, et s'attache fortement aux parois sur lesquelles elle se dépose. La caisse de la chaudière est percée de distance en distance et à ses angles inférieurs, de trous fermés par des tampons de lavage ou vis enduites d'un mastic au minimum et à la cernuse. Lorsque les parties inférieures de la cuisse et de la boîte à feu sont réunies par un cadre en fer forgé, les côtés de ce cadre portent chacun deux trous de lavage a (fig. 258). Par tous ces orifices on introduit des tiges de fer, avec lesquelles on peut atteindre presque toutes les parties de la boîte à feu et détacher les incrustations qui les couvrent. On fait ensuite passer dans la chaudière un jet d'eau, lancé violemment par une pompe ou provenant d'un réservoir situé à une grande hauteur; ce lavage entraîne toutes les parties calcaires qu'on avait détachées. Si l'eau dont on se sert sur le chemin n'est pas très bonne, il faut renouveler cette opération tous les deux ou trois jours.

Pour nettoyer la surface des tubes, on n'a pas la ressource des tampons de lavage; le cylindre de la chaudière est entouré d'une enveloppe en bois; des tiges introduites par des trous percés dans ce cylindre, ne pourraient d'ailleurs pas atteindre tous les tubes. On est réduit à enlever quelques uns d'entre eux et à raclez les autres, avec des tiges introduites par les trous laissés par les premiers.

Lorsqu'on veut nettoyer une chaudière aussi parfaitement que possible, on s'y introduit par le trou d'homme après avoir ôté les tubes, et on enlève au marteau toutes les incrustations.

On a cherché à empêcher ces dépôts, de se former et surtout d'adhérer, par l'emploi de réactifs chimiques. Les matières qui ont paru réussir le mieux jusqu'à présent sont le chlorure de sodium, la soude caustique et le tannin en dissolution. Le premier de ces corps tend à décomposer en partie le carbonate de chaux et à former du chlorure de calcium, corps essentiellement soluble. Les dépôts attaqués se délitent, cessent d'être adhérents, et les lavages les entraînent avec des chlorures de calcium et de sodium. Mais cette action n'est pas complète, parce qu'il faudrait que la matière qui forme le dépôt se détachât à mesure qu'elle est attaquée, afin que le réactif put agir aussi sur les parties les plus voisines du métal; cette réaction ne se produit d'ailleurs qu'en présence de beaucoup d'eau. Le plus souvent le chlorure de sodium

n'agit qu'en partie sur le carbonate de chaux; car deux sels se trouvent dans la chaudière en même temps que le carbonate de soude et le chlorure de calcium auxquels ils donnent naissance. Ce commencement de réaction suffit cependant pour désagréger et détacher une partie des dépôts. La soude caustique agit sur le sulfate de chaux, et cette décomposition, si partielle qu'elle soit, suffit pour désagréger les incrustations. Le tannin empêche les dépôts de prendre une forme cristalline et la tôle de s'oxyder.

Ces divers corps ont l'inconvénient de rendre l'eau mousseuse, elle monte alors en écume et pénètre dans les cylindres par les tubes qui conduisent la vapeur. La machine s'arrêtent alors plus lentement, et on dit qu'elle pousse.

On a aussi proposé l'emploi de matières insolubles telles que des copeaux de bois de Campêche, des pommes de terre râpées et de l'argile délayée, pour s'opposer à l'adhérence des dépôts. Mais ces diverses substances rendent l'eau mousseuse. La craie réduite en poudre impalpable et versée dans l'eau de la chaudière n'a pas cet inconvénient et paraît fort bien réussir. L'expérience n'a pas encore suffisamment consacré ce moyen. D'autres procédés sont à l'étude. L'un consiste à précipiter dans les réservoirs d'alimentation le carbonate de chaux tenu en dissolution par un excès d'acide carbonique, par du lait de chaux introduit dans la proportion rigoureusement nécessaire et à laisser déposer le carbonate neutre.

On parvient à dissoudre les incrustations par l'emploi de l'acide pyroligneux qui ne paraît pas attaquer le métal.

L'étude de cette question présente une grande importance. On peut évaluer à 0,0140 par Kilomètre parcouru, la dépense d'entretien que l'emploi d'eau de qualité médiocre nécessite pour maintenir en état les viroles, les tubes et les entretoises. Avec de l'eau de qualité ordinaire, la même dépense se réduit à 0,0044. La dépense totale relative à l'entretien de la chaudière entière, revient à 0,035 environ par Kilomètre parcouru dans des conditions ordinaires.

Chapitre X.

Appareils de sûreté.

Les explosions peuvent être dues, dans les machines ordinaires, à un trop grand accroissement de la pression dans la chaudière. Quelquefois la tension de la vapeur a été volontairement augmentée par le mécanicien pour obtenir une force plus grande. Le plus souvent un abaissement du niveau d'eau explique les explosions qui ont eu lieu. Avant le moment d'un semblable malheur, on remarque que la machine marche avec peine; souvent aussi l'explosion se produit lorsqu'après un moment d'arrêt, la machine se met en mouvement. Des bateaux à vapeur ont sauté au moment où, après une station, le capitaine venait de donner le signal du départ. Ces faits s'expliquent par un abaissement trop considérable du niveau de l'eau dans la chaudière. Quand ce cas a lieu, des surfaces émergent, cessent d'être en contact avec l'eau, et le feu en amollit beaucoup

la matière. La surface chauffée qui est en contact avec le liquide diminuant, il se produit moins de vapeur et la machine marche avec peine. Si on part après un temps d'arrêt dans ces circonstances, la pompe alimentaire est mise en jeu par le mouvement de la machine et introduit de l'eau dans la chaudière. Le niveau s'élève, les surfaces rougies par le feu sont subitement immergées et produisent une grande quantité de vapeur. En outre, en ouvrant le tube à vapeur, on diminue tout-à-coup la pression dans la chaudière; l'eau qui s'était élevée à une haute température pour produire de la vapeur sous la pression qui existait, conserve cette température quand la pression a diminué, et se vaporise tout à coup dans toute la masse liquide jusqu'à ce que le refroidissement produit par cette évaporation subite, abaisse la température au degré que comporte la nouvelle pression; les bulles de vapeur qui se produisent de toutes parts font gonfler subitement le liquide qui se répand sur les surfaces qui s'étaient rougies par l'abaissement du niveau d'eau, et leur contact avec l'eau produit d'énormes quantités de vapeur qui peuvent produire une explosion.

Un phénomène de calefaction peut s'ajouter à ce que nous venons de décrire. Quand la surface de chauffe est à une très haute température, l'eau qui est en contact avec elle passe à l'état sphéroïdal et cesse de se vaporiser aussi rapidement. Si la pression de la chaudière diminue subitement, de la vapeur se forme à la fois dans tous les points de la masse liquide, et ce phénomène donne lieu à un abaissement notable de la température. Les surfaces de chauffe se refroidissent un peu, l'eau qui est en contact avec elles cesse d'être à l'état sphéroïdal et se vaporise tout-à-coup. De tous ces phénomènes résulte une pression subite et très forte, qui fait céder les parois amollies de la chaudière et peut donner lieu à de graves accidents.

Dans les locomotives, ceux-ci sont plus rares. Les parties exposées à sortir de l'eau sont la partie supérieure de la boîte à feu et les tubes les plus élevés. Si un tube se creève, il ne cause pas d'explosion, et la face supérieure de la boîte à feu est fortement consolidée par des entretoises. Mais le meilleur moyen d'éviter les explosions consiste à faire usage d'appareils qui empêchent d'eux-mêmes la pression de trop s'accroître dans la chaudière.

Souppes de sûreté. La soupape de sûreté encore employée aujourd'hui dans les machines fixes, se trouve décrite dans les ouvrages de Denis Papin, imprimés dans le courant du 17^e siècle*. Cet appareil (fig. 259) se compose d'un disque de métal *a* qui s'applique exactement sur l'entrée d'une tubulure *b* fixée par des boulons à la partie supérieure de la chaudière. Un poids *P* suspendu à l'extrémité d'un levier mobile autour du point *C*, force la soupape à rester fermée dans les circonstances ordinaires. Mais quand la pression devient trop considérable dans la chaudière, la vapeur soulève le disque et s'échappe dans l'atmosphère.

Pour calculer le poids que l'on doit appliquer à l'extrémité du levier, il suffit (abstraction faite du poids des différentes parties de la soupape) de multiplier la pression maximum que doit supporter toute la surface du disque, par le rapport des deux bras du levier.

Les chocs continuels auxquels les machines locomotives sont exposées pendant

* 1^o Description d'une machine propre à amollir les os et à en faire du bouillon. Paris, 1682, in-12

2^o Fasciculus dissertationum de quibusdam machinis. Marburgi, 1695, in-12. fig.

leur marche, ne permettent pas d'appliquer aux soupapes de sûreté de ces appareils le poids dont nous venons de parler. On le remplace (fig. 260) par un ressort à boudin a fixé d'une part à une tige taraudée bb qui traverse le levier, de la soupape et de l'autre à une pièce fixe oo . En tournant l'écrou C , on élève ou on abaisse la tige bb , on allonge ou on raccourcit de la même quantité le ressort à boudin, et par conséquent on augmente ou on diminue la pression exercée par le levier d sur la soupape g . Un point d'arrêt i empêche le mécanicien d'augmenter outre mesure la tension du ressort et, par suite, la pression exercée sur la soupape.

Le ressort à boudin est renfermé dans une boîte en métal fixé à la tige taraudée et dont la partie antérieure (fig. 261) est formée d'une plaque de cuivre m , fendue dans une certaine longueur pour laisser passer un index K , attaché à la pièce bb . Deux échelles sont tracées sur la plaque de cuivre. La première indique le poids nécessaire pour produire l'allongement du ressort indiqué par l'index, l'autre fait connaître la pression de la vapeur correspondante à cet allongement.

On détermine par expérience les allongements du ressort dus à des poids connus. On doit s'assurer de temps en temps, en répétant ces expériences, que le ressort n'a rien perdu de son élasticité.

Les machines locomotives sont ordinairement munies de deux soupapes semblables à celle que nous venons de décrire. L'une d'elles reste à la disposition du mécanicien. L'autre est disposée de manière à ce qu'il ne puisse pas augmenter la résistance qu'elle doit opposer à la sortie de la vapeur. Cette dernière soupape est réglée de manière à ne se soulever qu'à une pression un peu supérieure à celle qui fait fonctionner la première.

Les soupapes de sûreté doivent être visitées souvent pour s'assurer qu'un commencement d'oxydation n'a pas fait adhérer le disque et la coquille dans laquelle il repose. Si cet accident s'était produit, il faudrait roder de nouveau les surfaces l'une sur l'autre.

Pour que cet appareil atteigne parfaitement le but qu'on se propose, il faudrait qu'à la pression voulue, il laissât échapper une quantité de vapeur égale à celle qui se produit en excès dans la chaudière. Il y aurait alors une espèce d'équilibre, et la pression resterait constante. Mais il n'en est point ainsi. Quand une soupape a été calculée de manière à s'ouvrir sous une pression donnée, elle ne se souleve sous cette pression qu'à une hauteur insuffisante pour laisser échapper tout l'excès de vapeur qui se produit; la tension s'accroît et finit par soulever assez la soupape pour laisser échapper toute la vapeur en excès. La pression reste alors constante, mais n'est pas celle sur laquelle on avait réglé la soupape. Si la quantité de vapeur en excès vient à s'accroître, par un temps d'arrêt par exemple, il faudrait, pour que la pression restât la même, que la soupape se soulevât sans nouvel effort et suffisamment pour donner passage à tout l'excès de vapeur. Mais elle ne s'ouvre davantage que par un accroissement de pression; cet accroissement doit être d'autant plus considérable que le ressort exige, pour s'allonger d'une même quantité, un effort qui augmente à mesure qu'il est déjà plus tendu. En général, on n'obtient avec les soupapes une pression voulue qu'à environ un demi-atmosphère près.

Les soupapes de sûreté ne sont pas un moyen absolu d'éviter le danger d'explosion.

Si une locomotive qui produit sur une partie horizontale du chemin autant de vapeur qu'elle en use, vient à rencontrer une rampe, sa vitesse diminue et ses cylindres consomment moins de vapeur. — Comme la chaudière en produit toujours la même quantité, la pression s'accroît et les soupapes se soulèvent. Il y a donc à la fois une perte de vapeur et de vitesse. Si le convoi est en retard, le mécanicien appuie sur les soupapes pour augmenter la force et la rapidité de sa machine, arriver à temps et éviter l'amende. Les soupapes de sûreté exigent donc encore la volonté de s'en servir. Des locomotives ont sauté, tandis que le convoi qui était en retard, franchissait une rampe; il paraît probable que ces accidents ont eu lieu parce que les mécaniciens pesaient sur la balance ou levier des soupapes.

Rondelles fusibles de d'Arcet. On a cherché à suppléer à l'insuffisance des soupapes par d'autres appareils. M. d'Arcet a trouvé divers alliages métalliques qui fondent à des températures peu élevées. On adapte des rondelles de ces alliages à des trous ménagés dans les chaudières, et on les applique contre des grilles de manière, à ce qu'elles ne se déforment pas sous la pression de la vapeur. La température de celle-ci s'accroît avec sa tension, et quand elle a atteint le degré près pour limite, l'alliage se fond et la vapeur se répand dans l'atmosphère. Voici la composition des principaux alliages employés.

Nombre d'atmosphères.	Température correspondante.	Température réelle de la fusion.	Composition de l'alliage.		
			Bismuth.	Plomb.	Etain.
0,774	93	93	8	4	4
1	100	100	8	5	3
1 1/2	112, 2	113, 3	8	8	4
2	121, 4	123, 3	8	8	8
2 1/2	128, 8	130	8	10	8
3	135, 1	136, 4	8	12	8
3 1/2	140, 6	143, 3	8	16	14
4	145, 4	145, 4	8	16	12
5	153, 8	153, 8	8	22	24
6	160, 2	160, 2	8	32	36
7	166, 5	166, 5	8	32	28
8	172	172	8	30	24

L'expérience n'a pas répondu à tout ce qu'on attendait, de ce moyen. Des chaudières ont sauté sans que leurs rondelles aient fondu. En analysant ces rondelles, on a trouvé à leur ensemble sa composition primitive, mais il s'était opéré en elles un travail moléculaire, et elles avaient cessé d'être homogènes; une espèce de liquation avait eu lieu, le plomb s'était séparé de l'étain et l'alliage n'était plus intime et avait perdu ses propriétés. Après un certain temps d'usage les rondelles fusibles cessent donc de fondre à la température voulue; en outre, elles ne peuvent pas s'opposer aux explosions qui ont lieu par la formation subite d'une grande quantité de vapeur. Dans les locomotives on placait un robinet au dessus de la plaque fusible, afin de pouvoir arrêter la perte de la vapeur si la plaque fondait dans un moment où la machine ne devait pas s'arrêter; cet appareil était donc encore à la disposition du machiniste. Dans les machines fixes on fait souvent couler sur les rondelles un petit courant d'eau, qui les empêche de fondre. Ainsi ce moyen, qui a été primitivement fait en usage, est-il maintenant presque abandonné. Les règlements de police qui en ordonnaient l'emploi, ont cessé de l'exiger.

Bouchons fusibles. La plus grande partie des explosions est due à un abaissement trop considérable du niveau de l'eau dans la chaudière. Pour éviter les accidents dus à cette cause, on fait, dans la plaque supérieure de la boîte à feu, une ouverture taraudée dans laquelle on visse une virole (fig. 262). Cette virole est évidée de manière à recevoir un bouchon en plomb de 0,03 de diamètre, et sa tête est dans la boîte à feu. Quand l'eau cesse de mouiller la face supérieure du plomb, il fond et laisse un trou par lequel la vapeur se précipite sur le foyer. Il faut alors faire tomber le feu, enlever la virole et remettre un bouchon fusible. Toutes les fois que la machine rentre à l'atelier, on doit visiter les bouchons de plomb de crainte que la chaleur du feu n'en ait fondu une partie, et que le reste ne finisse par céder à la pression de la vapeur.

Manomètres. Le meilleur moyen d'éviter les accidents consiste à avoir des appareils qui indiquent la pression et qui montrent aux machinistes le danger auquel ils s'exposent en appuyant sur les soupapes. L'un de ces appareils est le manomètre à air libre; c'est un tube ouvert à ses deux extrémités et plein de liquide; il communique avec la vapeur par un bout, et par l'autre avec l'atmosphère; la hauteur du liquide indique la pression. Si ce liquide est du mercure, il s'élève de 0^m.760 par atmosphère, et de 4^m.56 pour une tension utile de 6 atmosphères. Un tube vertical d'une pareille longueur peut aisément se fixer contre un mur quand il s'agit d'une machine fixe, mais est inadmissible quand il s'agit d'une locomotive. On se sert alors du manomètre à air comprimé; ce manomètre est semblable au précédent, mais l'un de ses bouts est fermé et contient de l'air; le mercure comprime cet air dont le volume varie suivant la loi de Mariotte, en raison inverse des pressions qu'il supporte. Cet appareil finit par se déranger; le verre soumis à une pression continue s'étend à la longue, le volume intérieur du tube s'accroît et les différentes hauteurs du mercure ne correspondent plus aux pressions qu'indique l'instrument. L'emploi du mercure est un autre défaut: la vapeur porte sur ce liquide une petite quantité de matière grasse dont on lubrifie la plupart des organes de la machine. Le mercure se mélange à la graisse, se met en bulles qui sont bientôt projetées par les mouvements de la locomotive contre les parois supérieures du tube, y adhèrent et rendent la

lecture de la graduation impossible. Enfin, le mercure ne mouillant pas le verre, un petit intervalle paraît exister entre ces deux corps; une petite quantité d'eau pénètre au dessus du mercure, fausse la graduation et rend sa lecture difficile. Ce phénomène a presque toujours lieu au bout d'un certain temps, et les indications du manomètre cessent d'être exactes.

On pourrait recomber plusieurs fois sur lui-même (fig. 263) un tube de verre a, et remplir de mercure toute sa partie inférieure, et d'eau sa partie supérieure. Les deux extrémités du tube étant ouvertes, si on met l'une en contact avec l'atmosphère et l'autre avec la vapeur, le mercure s'élèvera d'un côté des coudes inférieurs du tube, et s'abaissera de l'autre. La pression en b sera plus forte que celle de l'atmosphère d'une quantité représentée par une colonne de mercure de hauteur h. Cette pression se transmettra par l'intermédiaire de l'eau sur la face supérieure d'un mercure, et la pression sera en b' plus forte que celle de l'atmosphère du double de ce qu'elle l'est en b. Cette différence sera représentée par une hauteur nh de mercure sur la surface inférieure de ce liquide dans le N^e coude où elle sera en contact avec la vapeur. Si donc on représente par d la densité du mercure, s la section du tube et P la pression utile de la vapeur, on aura :

$$Ps = sdnh \quad \text{ou} \quad h = \frac{1}{dn} P.$$

On voit donc que la hauteur h de mercure sera proportionnelle à la pression et bien moindre que dans le manomètre à air libre, ordinaire. Un même tube en verre recombé à la lampe d'émailleur, se briserait aisément dans les coudes. On y a substitué l'instrument que représente la figure 264. Deux tubes métalliques portent des tubulures latérales dans lesquels sont fixés des tubes en verre; des cloisons en métal sont mises dans chaque tube métallique de manière à laisser deux tubulures entre elles. Il est facile de voir que cet appareil constitue un seul conduit plusieurs fois recombé, et fonctionne comme le tube a. Cet instrument a malheureusement le défaut d'exiger l'emploi du mercure qui se graisse bientôt, et il se déränge si aisément que son emploi pratique est à-peu près impossible; ensuite le mercure est une matière si chère que l'entretien des appareils qui l'emploient est toujours très coûteux.

La figure 267 représente un autre appareil fondé sur le même principe. C'est un tube métallique plusieurs fois recombé sur lui-même, qui est mis en communication avec la vapeur par son extrémité F et dont le bout I, recombé horizontalement, communique avec l'air extérieur par de petites ouvertures i. La dernière partie verticale D, du tube est en verre, et correspond à des échelles qui indiquent la pression et la température de la vapeur. Un réservoir B est destiné à recevoir le mercure qui peut être projeté dans le tube I par une variation subite de la tension dans la chaudière.

On essaie en ce moment un manomètre métallique. Ce manomètre consiste en un tube de cuivre (fig. 265) courbé en arc de cercle, dont un bout est fermé, et qui communique par l'autre avec la vapeur. La section transversale de ce tube est une ellipse assez allongée dont le petit axe est vertical. La pression de la vapeur qui pénètre dans le tube tend à transformer cette courbe en cercle et fait varier ses deux axes. Cette variation ne peut avoir lieu sans modifier la courbure du tube. Si l'on désigne par r et r' les rayons des arcs de cercle a et a', qui forment les lignes supérieure et inférieure du tube, on aura par un théorème connu :

$$\frac{a}{a'} = \frac{r}{r'} ; \quad \text{d'où} \quad \frac{a-a'}{a'} = \frac{r-r'}{r'}$$

La longueur des arcs a et a' restant la même pendant la déformation, la valeur de la fraction $\frac{r-r'}{r'}$ reste constante. Donc, $r-r'$ étant l'expression du petit axe de l'ellipse qui augmente de valeur, il faut que r' augmente; par suite la courbure du tube diminue, et s'il est fixé par un bout à la chaudière, l'autre extrémité se relève. On profite de ce mouvement pour faire marcher l'aiguille d'un petit cadran qui marque les pressions. Cet appareil est fort ingénieux, et l'on espère que la pratique répondra aux espérances que l'on en a conçues.

On se sert quelquefois d'un thermomanomètre, instrument fondé sur ce que la température de la vapeur varie avec sa tension. C'est un thermomètre très sensible, portant deux échelles; l'une indique la température, l'autre la pression correspondante. Il ne faut pas plonger le réservoir dans la chaudière, la pression le déformerait. On fixe donc à la chaudière (fig. 256) un tube a en cuivre assez mince, fermé à sa partie inférieure et plongeant dans la vapeur. Le réservoir du thermomètre est plongé dans ce tube, rempli d'huile ou de limaille de cuivre destinée à transmettre la chaleur. La double échelle est gravée sur un manchon de laiton fendu sur une partie de sa longueur pour laisser voir la tige du thermomètre qu'il renferme. Le tube est le manchon dont réunit par un pas de vis. Cet instrument est très sensible; il indique les plus petits changements de pression. Mais il est fragile, et il s'écoule toujours un temps assez long entre le moment où une pression se produit et où le thermomètre s'est mis en équilibre de température avec la vapeur.

Robinet d'épreuve. On établit sur toutes les machines un appareil propre à faire connaître le niveau de l'eau dans la chaudière. Il consiste ordinairement en trois robinets dont l'un est situé à la hauteur normale du niveau, un autre un peu au dessus, et le troisième au dessous. Le robinet le plus élevé donne en général de la vapeur, les deux autres doivent donner de l'eau. Si cette condition n'est pas remplie, le mécanicien ouvre le tuyau des pompes alimentaires jusqu'à ce que le niveau se soit élevé à une hauteur convenable.

Niveau d'eau. Pour voir à chaque instant le niveau de l'eau dans la chaudière, on emploie un tube de verre vertical, appelé niveau d'eau, communiquant avec l'eau de la chaudière par son extrémité inférieure, et avec la vapeur par l'extrémité supérieure (fig. 268). L'eau se trouve à la même hauteur dans la chaudière et dans le tube, de sorte que l'on connaît à chaque instant le niveau de l'eau dans la machine. Deux robinets gg' permettraient d'intercepter toute communication si un accident brisait le tube. Un repère indique le niveau normal dans la chaudière. Cet appareil est en outre fort commode pour montrer comment fonctionnent les deux pompes alimentaires. On les fait marcher séparément, et l'exhaussement du niveau indique qu'elles vont d'une manière satisfaisante. Si le niveau ne s'élève pas quand les deux pompes marchent ensemble, il faut en conclure qu'elles sont dérangées, jeter le feu et appeler une locomotive de secours.

Dans les nouvelles machines locomotives, on a rapproché le tube de verre et

les trois robinets, comme l'indique la figure 268. Un large tube de cuivre ab , boulonné sur le devant de la chaudière, comme on le voit dans la coupe figure 269, communique avec l'eau par sa tubulure inférieure, et avec la vapeur par sa partie supérieure, de sorte que l'eau s'y trouve au même niveau que dans la chaudière. Les trois robinets d'épreuve r, r', r'' sont vissés sur l'un des côtés de ce cylindre. Le tube de verre vv est engagé par ses deux extrémités dans des viroles de cuivre cc' qui communiquent avec ab au moyen de robinets gg' que l'on fermerait si le tube de verre était brisé par un accident. Si le mécanicien suppose que l'un des robinets g ou g' est engorgé, il ferme l'autre et ouvre en même temps le robinet du tube de décharge K ; l'eau ou la vapeur se précipite par cette ouverture et il se produit une chasse qui débouche le tuyau obstrué. Si ce moyen ne réussit pas, on dévisse la vis m correspondante au conduit obstrué, et on le débouche avec une tige de fer. Si le tube lui-même est bouché, on peut le dégager en y introduisant une tige par la vis qui est au dessus de ce tube. Quand il est brisé par un accident quelconque, le mécanicien ferme les robinets gg' et peut connaître le niveau en consultant les trois robinets d'épreuve.

Pour joindre aussi exactement que possible le reste de l'appareil au tube de verre, on donne à la partie extrême de l'ajutage métallique qui doit le recevoir, un diamètre intérieur un peu plus grand que le diamètre extérieur du tube. Entre le métal et le tube on met de l'étoupe et une virole qui s'applique sur elle. Enfin la surface extérieure de l'ajutage porte une vis sur laquelle s'adapte un bouchon qui laisse passer le tube de verre, mais qui presse la virole. La pression de l'étoupe sur le verre et sur l'ajutage suffit pour rendre le joint parfaitement étanche.

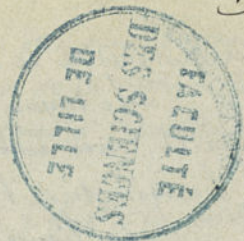
Les appareils que nous venons de décrire indiquent au mécanicien la pression dans la chaudière, et lui montrent le danger auquel il s'expose en appuyant sur les soupapes de sûreté. On met sur chaque machine deux soupapes de ce genre, assez éloignées l'une de l'autre pour que le machiniste ne puisse presser sur toutes les deux sans prendre une position gênante, ou sans se faire aider par le chauffeur. Le machiniste, en tournant l'écrou par lequel le ressort à boudin presse sur le bras de levier de la soupape, pourrait tendre ce ressort de manière à rendre la soupape inutile. Pour l'en empêcher, on fixe une rondelle à une certaine hauteur sur la vis. Les règlements établis par les Compagnies disent que l'une des soupapes sera à la disposition du mécanicien, et que l'autre sera réglée à une pression plus forte que la première; le machiniste peut donc augmenter l'effort de la locomotive sans compromettre son existence et celle de la machine. Grâce à ces précautions, l'explosion d'une machine locomotive est un accident fort rare.

Le sifflet à vapeur est destiné à annoncer le passage des convois et à donner différents signaux. Son principe est le même que celui du sifflet ordinaire. La lame de vapeur sort par la fente circulaire aa et vient frapper le biseau bb également circulaire placé au dessus (fig. 260).

On doit toujours siffler avant de mettre la locomotive en mouvement, pour que les ouvriers qui pourraient se trouver sur son chemin aient le temps de se ranger. Il convient aussi de faire parler le sifflet avant les stations, à l'entrée des courbes et en général toutes les fois que des obstacles empêchent d'apercevoir une grande longueur de chemin.

Chapitre XI.

Régulateurs.



Boîte à étouper ou stuffingbox. Quand on doit réunir deux pièces qui n'ont pas de mouvement relatif, il suffit de les serrer l'une contre l'autre après avoir interposé entre elles de la filasse imprégnée d'un mastic composé de minium, de céruse et d'huile de lin. Mais quand il faut rendre étanche la réunion de deux pièces animées d'un mouvement relatif, laisser passer une tige de piston ou tout autre organe de la machine, en arrêtant la vapeur, on est obligé d'avoir recours à un mécanisme particulier, connu sous le nom de boîte à étouper, qui se trouve répété un grand nombre de fois dans la machine à vapeur et que nous allons décrire. Cet appareil (fig. 270) se compose d'un espace cylindrique en métal a a. Un trou b b, plus large que la tige p à laquelle il doit donner passage est pratiqué à la partie inférieure de cet espace. Une bague en cuivre c remplit le vide qui existe entre la tige et l'ouverture b b. On remplace cette bague toutes les fois que le frottement en a trop agrandi l'ouverture. Une autre pièce métallique d d entre dans la cavité a a. Le chapeau de cette pièce reçoit deux boulons g g' fixés à la pièce principale a a. On met des étoupes ou des tresses de chanvre imprégnées de suif dans l'espace laissé entre les pièces a a et d d. En serrant les écrous h h on comprime ces étoupes et on les force à s'appliquer exactement sur la tige p dans toutes les positions qu'elle peut occuper. Il résulte de ces dispositions que la vapeur ou les liquides comprimés qui se trouvent d'un côté de la boîte à étouper, ne peuvent pas s'écouler au dehors; quand une fuite commence à se produire, on la fait cesser en serrant les écrous.

Régulateur. Après avoir décrit la chaudière et ses principales accessoires, nous allons étudier le mécanisme au moyen duquel on introduit la vapeur dans les cylindres, en quantité plus ou moins considérable, suivant les effets que l'on veut produire. On doit prendre la vapeur à la plus grande hauteur possible au dessus de l'eau de la chaudière, afin qu'elle soit plus sèche. Le tuyau de prise de vapeur a a (fig. 271) débouche dans le haut du dôme de la chaudière, au dessus de la boîte à feu. L'ouverture de ce tuyau est recouverte d'une plaque b b percée de trous, et parfaitement dressée. Une seconde plaque c c, pleine et également dressée avec le plus grand soin peut glisser sur la première. Quand elle en recouvre les ouvertures, elle intercepte toute communication entre la chaudière et les cylindres. Si au contraire elle n'est pas sur les ouvertures de la première plaque, la communication se trouve établie. En faisant avancer plus ou moins la seconde plaque, on peut donc à volonté, augmenter ou diminuer la quantité de vapeur qui s'écoule, et par conséquent modérer autant que les besoins l'exigent l'action de la vapeur sur les pistons. Le mouvement est communiqué à la plaque c c au moyen d'une tige d dont la partie inférieure est fixée à un excentrique e, monté sur un arbre g qui traverse les parois de la chaudière au moyen d'une boîte à étouper. En faisant faire une demi-révolution à la manivelle K dont l'arbre g est muni, on voit que l'on peut ouvrir

ou fermer le registre cc.

Le tuyau de prise de vapeur est maintenu dans sa position verticale par une bride en fer ll, rivée aux parois de la chaudière. Il porte aussi la cogpandine, dans laquelle s'engage l'extrémité de l'arbre g.

La figure 272 indique le mode de raccordement du tuyau en fonte a a avec le tube de chaudiromerie qui conduit la vapeur jusqu'à la sortie de la chaudière. Au moyen de cette disposition, on met facilement en place les deux parties du tube.

Le régulateur que l'on vient de décrire est l'un des plus ordinairement employés; nous allons en faire connaître quelques autres.

Dans d'anciennes machines construites par Taylor en Angleterre, et qui fonctionnaient sur le chemin de St. Germain, la prise de vapeur se fait soit dans un réservoir placé sur la chaudière près de la boîte à fumée, au moyen du tube ab (fig. 273) débouchant dans un espace cylindrique cc. Un second tuyau dd, placé dans l'intérieur du premier, communique avec les cylindres au moyen des conduits ee. L'entrée du cylindre dd est recouverte d'une plaque bien dressée, figurée à une plus grande échelle et de face dans la figure 274. Cette plaque est percée de deux ouvertures oo. Une seconde plaque gg, semblable à la première, peut tourner en glissant sur elle. Quand les ouvertures des deux plaques coïncident, il est évident que la communication est établie entre la chaudière et les cylindres. Si au contraire les ouvertures de la plaque mobile sont vis-à-vis des parties pleines de la plaque fixe, toute communication est interrompue. La plaque mobile g est montée sur un arbre hh qui traverse toute la chaudière et se termine par une manivelle placée à la portée du mécanicien. Cette arbre passe à travers deux boîtes à étouper ii, fixées aux parois de la chaudière. La visite des plaques se fait facilement dans ce régulateur, puisqu'on n'a qu'à enlever le couvercle k qui se trouve dans la boîte à fumée, où il est toujours facile de pénétrer. Mais cet avantage est plus que compensé par la position du stuffingbox i, qui ne peut être réparé qu'en pénétrant dans la chaudière, et qui se trouvant plongé dans l'eau, en laisse arriver avec la vapeur dans les cylindres tout le foie qu'il éprouve quelque dérangement.

Les surfaces frottantes qui forment les organes essentiels des régulateurs dont nous avons parlé jusqu'à présent, sont constamment plongées dans la vapeur; elles se recouvrent bientôt d'une couche de substance terreuse que l'eau en ébullition projette de toutes parts; elles adhèrent l'une à l'autre et il devient très difficile de les mettre en mouvement. On a cherché à éviter ces inconvénients, en employant dans les locomotives des régulateurs analogues aux soupapes à contrepois des machines des mines de Cornouailles.

Le tuyau de prise de vapeur (fig. 275) porte une espèce de renflement a a présentant une surface conique; sa partie supérieure a' a' est également terminée en forme de cône tronqué. L'espace compris entre le bouchet a a et la partie supérieure est percée d'un grand nombre d'ouvertures o. Un chapeau en métal bb repose exactement par ses parties tronquées, sur les deux collets a a et a' a'. La communication entre la chaudière et les cylindres se trouve ainsi interceptée; mais si on soulève le chapeau bb, la vapeur pourra s'introduire entre lui et le tuyau p; elle se précipitera par les ouvertures o et se dirigera vers les cylindres.

La pression à vaincre pour soulever la cloche bb peut être rendue pour ainsi dire aussi faible que l'on voudra, puisqu'elle est égale seulement au produit de la somme des projections des surfaces coniques de contact faites sur un plan perpendiculaire à l'axe du tuyau p multipliée par la pression de la vapeur sur l'unité de surface.

Le chapeau bb porte une bride ee traversée par un guide f fixé à la partie supérieure du tuyau p. Deux boulons ii, réunis à la bride e, s'attachent à leurs parties inférieures dans un cadre g mis en mouvement par un excentrique h monté sur un arbre qui traverse, dans une boîte à étouper, la paroi intérieure de la chaudière. Les boulons ii glissent dans deux pièces fixes l qui avec le guide f assurent le mouvement vertical du système.

L'avantage de ce régulateur est d'exiger très peu de force pour être mis en mouvement. Il est même si mobile que son poids seul suffit quelquefois pour le fermer. Il serait facile de s'opposer à cet effet au moyen d'un arrêt fixé à la manivelle au moyen de laquelle on met en jeu l'arbre qui porte l'excentrique h, ou bien en établissant un contrepois qui s'opposerait à la descente du chapeau bb.

Ce régulateur offre un grave inconvénient : quel que soit le soin apporté à rodre et à ajuster le chapeau sur les deux collets coniques, les inégalités de dilatation font qu'il n'y a jamais contact parfait aux hautes températures où se trouve l'appareil pendant le jeu de la machine, de sorte qu'il y a toujours quelques perles de vapeur. On a cherché à remédier à ces inconvénients en remplaçant le collet inférieur par une boîte à étouper, comme l'indique la figure 276. Malgré ce perfectionnement, il y a toujours quelques fuites avec ce système.

Le régulateur appliqué par Rothwell à quelques machines livrées par lui au chemin de fer de St Germain, fait un bon service. Dans cet appareil (fig. 277) le tuyau de prise de vapeur est recouvert d'une plaque dressée et percée de trous. Une autre plaque a a, également dressée et aussi percée de trous, glisse sur la première. La communication de la chaudière avec les cylindres est établie ou interrompue, suivant que les ouvertures de la plaque supérieure correspondent aux ouvertures ou aux parties pleines de la plaque inférieure. La plaque a a est armée de deux crémaillères mises en mouvement par des segments de roues dentées, montées sur le même arbre. Le levier b fixé au même arbre est articulé avec des tiges c qui se réunissent par le même moyen à un levier d traversé par l'arbre e qui porte la manivelle sur laquelle agit le mécanicien. Au moyen de cette disposition, le mouvement de rotation imprimé à la manivelle se transforme en un mouvement horizontal communiqué à la plaque a.

La figure 278 représente ce mécanisme vu de côté. Les mêmes lettres représentent les mêmes objets dans cette figure et dans la précédente.

Les régulateurs que nous venons de décrire ne sont pas les seuls qui aient été proposés. Chaque constructeur a pour ainsi dire le sien. Le plus simple de tous serait un robinet ordinaire, mais ce que nous avons dit relativement à l'adhérence des plaques frottantes suffit pour faire comprendre que cet instrument qui présente une très grande surface de contact, serait bien vite hors de service.

Les régulateurs imaginés jusqu'ici présentent de graves inconvénients. Les surfaces de frottement rendues rugueuses par le dépôt de matières terreuses, donnent lieu à un frotte-

ment considérable; le mécanicien, contraint d'exercer un effort pour vaincre la résistance, n'est pas assez maître du mouvement qu'il donne à la partie mobile, qui règle la section ouverte au passage de la vapeur. On remédie à cet inconvénient en lubrifiant les surfaces frottantes à l'aide de robinets graisseurs.

Le régulateur est l'appareil principal auquel le mécanicien a recours pour régler selon les besoins le mouvement de la machine. Lorsqu'accidentellement les roues motrices glissent par suite de l'état d'humidité des rails ou par toute autre cause diminuant l'adhérence, le mécanicien se hâte de fermer le régulateur pour prévenir une dépense inutile de vapeur. S'il s'aperçoit que la pression diminue dans la chaudière, il diminue la section d'écoulement. Il a recours à la même manœuvre quand la machine prime, c'est-à-dire lorsque la vapeur entraîne avec elle beaucoup d'eau. Il semble alors que la vapeur éprouvant de la difficulté à se dégager tend à rester à l'état de bulle au milieu de l'eau; cet effet se produit quand l'eau contient des matières étrangères en dissolution ou en suspension, quand l'évaporation se fait avec trop d'abondance. Les machines qui sortent de réparation sont particulièrement sujettes à primer; on attribue cette circonstance à des matières grasses laissées par les ouvriers dans la chaudière où ils s'introduisent avec des bouts de chandelles destinées à les éclairer.

La quantité d'eau entraînée paraît varier du $\frac{1}{6}$ au $\frac{1}{4}$ de la masse d'eau évaporée. Cette eau, à une température élevée, doit être nécessairement remplacée par l'eau froide du tender; il résulte de là une perte inutile de chaleur; ensuite la vapeur ayant une masse plus grande, l'équilibre de pression s'établit moins vite, et il en résulte des pertes de force motrice, l'eau s'accumule quelquefois dans les cylindres par cette cause en telle abondance, qu'à de grandes vitesses on risque souvent de casser les couvercles ou les pistons. On remédie à cet inconvénient à l'aide de robinets purgeurs placés sur les couvercles des cylindres, et qui procurent une évacuation plus facile à l'eau. Ils sont manœuvrés par le mécanicien à l'aide d'une transmission de mouvement.

On a fait des efforts, peu fructueux jusqu'ici, pour empêcher les machines de primer; on atteint autant que possible cet inconvénient par l'emploi d'un grand espace ménagé pour emmagasiner la vapeur au dessus du niveau d'eau, en prenant la vapeur dans un point élevé; les dômes, d'un usage si fréquent sur les locomotives, sont établis dans ce but. On y parvient encore en conduisant la vapeur au régulateur à l'aide d'un tube placé horizontalement au dessus du niveau de l'eau, parallèlement à l'axe de la machine et dans toute sa longueur. Ce tube est percé d'une fente longitudinale très étroite dans toute l'étendue de son arête supérieure; de cette façon la vapeur est puisée simultanément dans toute l'étendue de la chaudière.

Le mécanicien peut remédier instantanément à un trop grand entraînement de l'eau en réduisant beaucoup la section d'introduction ouverte par le régulateur. Alors la vitesse d'écoulement devient considérable, la vapeur se refroidit en raison de la diminution de pression; mais la paroi du tube entourée de vapeur à la pression de la chaudière ou à la température la plus élevée qui y correspond, réduit en vapeur tout ou partie de l'eau entraînée et la ramène à un état de sécheresse relative. Malheureusement cet avantage est compensé par une

perte de pression. Il serait à désirer qu'on put trouver un moyen pratique, d'introduire à volonté dans la vapeur conduite aux cylindres moteurs une certaine quantité de vapeur sur-échauffée, dont le mélange avec la vapeur humide produirait de la vapeur sèche. Les locomotives attendent de la solution de cette difficulté l'une des améliorations les plus désirables.

Pompes d'alimentation. L'évaporation enlève à chaque instant une certaine quantité d'eau qu'il faut restituer à la chaudière pour que le niveau reste constant. On obtient ce résultat au moyen de pompes dont nous allons étudier les détails.

Le principe des pompes qui servent à l'alimentation des machines locomotives est le même que celui des autres machines de cette espèce. Ce sont des pompes aspirantes et foulantes à plongeur, c'est-à-dire que le piston ne frotte pas dans un corps de pompe aligé; c'est un simple cylindre de métal tourné *a* (fig. 279) qui passe à travers une boîte à étoupes *b* placée à l'entrée du corps de pompe *c* qui n'a besoin dans ce système d'aucun travail d'ajustement. Cette disposition permet de faire disparaître les fuites, entre le piston et le corps de pompe, sans arrêter la machine puisqu'il suffit de serrer l'écrou de la boîte à étoupes, avantage que ne présentent pas les pompes ordinaires, puisqu'il faut les arrêter pour visiter le piston et remédier aux fuites qui existent entre lui et le corps de pompe.

L'eau qui sert à l'alimentation de la chaudière est presque toujours échauffée; on ne peut donc pas employer de soupapes en cuir, car elles ne résistent pas à l'eau chaude.

La tige du piston de la pompe est liée directement à celle du cylindre à vapeur. Les soupapes métalliques à coquille sont rapidement détruites par les chocs qui résultent de ces mouvements précipités. On a été ainsi conduit à employer plus ordinairement dans les pompes qui nous occupent, les soupapes à boulet. Cet appareil se compose d'une coquille en cuivre percée d'une ouverture évasée en forme de sphère sur laquelle peut s'appliquer la sphère *e*. Pour empêcher la sphère d'être entraînée par le courant d'eau, on visse au dessus de la coquille une pièce nommée chapelle, formée de quatre montants réunis par le sommet. Cette pièce limite à un centimètre au plus la quantité dont le boulet est soulevé et facilite son retour sur l'orifice qu'il doit boucher, lorsque le piston marche dans le sens opposé. La fabrication de la boule exige beaucoup de soin. Elle est creuse afin de ne pas être trop lourde et il faut que les centres de figures et de gravité coïncident parfaitement. Si cette condition n'était pas remplie, la boule retomberait toujours sur le même côté, elle serait bientôt déformée et tout-à-fait hors de service. On visite facilement cette soupape en dévissant la pièce *m*.

La soupape supérieure *A* ne diffère pas de celle que nous venons de décrire. Un couvercle *g* est vissé au dessus d'elle. La vis *K* qui le traverse retient la soupape dans la position qu'elle doit occuper. On visite cette soupape plus facilement encore que la précédente, puisqu'il n'y a qu'à dévisser le couvercle *g*. Quand on veut faire cette opération, il faut d'abord fermer la soupape *i*, car si on négligeait cette précaution, la vapeur sortirait de la chaudière par cette ouverture et viendrait brûler l'ouvrier.

Le jeu de cette pompe est facile à comprendre. Quand on tire le piston, il laisse un vide derrière lui qui se trouve aussitôt rempli par l'eau qui vient du tender en sou-

levant la soupape inférieure. Si, au contraire, on pousse le piston, la soupape inférieure pressée de haut en bas se ferme, tandis que la soupape supérieure se soulève et laisse passer l'eau qui s'introduit dans la chaudière.

Il y a sur chaque locomotive deux pompes semblables à celle que nous venons de décrire.

Un robinet R permet d'intercepter à volonté la communication des pompes avec le réservoir d'eau du tender.

Le mécanicien peut s'assurer si les pompes marchent bien, en ouvrant le robinet placé au bout d'un petit tube qui communique avec les pompes entre les deux soupapes. — Quand il sort, à chaque coup de piston, un jet d'eau rapide, la pompe fonctionne bien. Si au contraire, il sort un jet continu de vapeur ou d'eau très chaude, on a la preuve que la pompe est dérangée, que les soupapes supérieures, par exemple, n'interceptent plus la communication avec la chaudière.

Si une des pompes n'allait pas, le mécanicien ferait jouer l'autre. S'il lui arrivait de ne pouvoir alimenter, il serait forcé d'éteindre le feu.

Le raccordement du tuyau en chaudronnerie, qui amène l'eau du tender, avec le corps de pompe, se fait très simplement au moyen de l'écrou L qui serre fortement l'une contre l'autre les extrémités des tubes à réunir (fig. 280).

L'introduction de corps étrangers, tels que de la filasse détachée des joints de la machine ou un morceau de coke, suffit souvent pour empêcher les pompes de jouer; on ne saurait donc apporter trop de soin à empêcher leur entrée dans les tenders; ils doivent toujours être fermés, et l'ouverture, qui sert à l'introduction de l'eau, constamment garnie d'un panier en cuivre percé d'une multitude de petits trous, destinés à retenir toutes les matières étrangères.

La dimension de chacune des pompes alimentaires est calculée de manière à fournir, quand elle fonctionne, un volume d'eau au moins égal à trois fois celui que l'évaporation peut enlever dans le même temps. On n'est donc obligé d'alimenter, que de temps en temps, ce qui permet de faire varier, dans de certaines limites, la puissance de la machine. L'eau du tender étant, à cet effet, beaucoup moins chaude que celle de la chaudière produit, quand elle y arrive, un abaissement de température qui diminue la pression de la vapeur. Le mécanicien doit donc avoir le soin de faire jouer les pompes quand il n'a pas besoin de toute la force de sa machine en descendant les pentes, ou bien quand il ralentit la marche du convoi pour s'arrêter à une station ou à la gare d'arrivée. Il suspend, au contraire leur action pour gravir les rampes et dans toutes les circonstances où il est nécessaire que la vapeur atteigne une pression considérable.

Les pompes alimentaires ne peuvent fonctionner que pendant la marche de la machine, puisqu'elles reçoivent leur mouvement directement des pistons à vapeur. Quand on est obligé d'alimenter dans les gares, où il n'y a pas un espace libre suffisant pour faire aller et revenir la locomotive jusqu'à ce que sa chaudière soit alimentée, on est obligé d'avoir recours à un appareil particulier. Ce sont deux roues de wagon calées sur un même essieu, qui peuvent tourner sur des coussinets solidement établis sous la voie, à une profondeur égale au rayon de ces roues, qui arrivent ainsi tangentiellement aux rails interrompus sur une certaine lon-

guerre pour leur donner passage. On amène les roues motrices de la locomotive sur ces roues mobiles, et on met des coins sous les autres roues. On ouvre alors le régulateur, et les roues motrices peuvent tourner sans qu'il y ait déplacement de la machine. L'alimentation se fait ainsi sans changer de place.

L'alimentation exige des soins et de l'attention de la part du mécanicien. Il doit toujours éviter de produire un refroidissement trop brusque qui altère plus ou moins la chaudière et qui peut même quelquefois faire naître des suites, comme on l'a déjà indiqué dans un autre chapitre.

Chapitre XII.

Cylindre à vapeur - Piston - Tiroir.

Nous passons à la description des cylindres à vapeur. Ils doivent être travaillés avec le plus grand soin et coulés en fonte un peu dure, afin que le frottement des pistons ne les détériore pas trop vite.

L'extrémité antérieure du cylindre (celle qui se trouve en avant dans la marche directe) est entièrement ouverte comme l'indique la figure 281; elle reçoit un couvercle *a* fixé par des boulons. L'autre extrémité porte une boîte à étouper *c* traversée par la tige du piston.

Sur un côté du cylindre se trouve l'appareil de distribution dont nous allons expliquer le jeu.

La partie *bb* est plane. Elle a été parfaitement dressée à la machine à raboter. On appelle ainsi une machine outil dont les dispositions varient, mais dont la partie essentielle est toujours un brin d'acier animé d'un mouvement de va-et-vient rectiligne, et dont l'extrémité tranchante enlève un copeau de métal à chaque passe; l'outil s'avance d'une quantité égale à la largeur du copeau, et l'ensemble de ces espèces de sillons forme une surface parfaitement plane.

Trois conduits débouchent sur cette surface; les deux premiers *cc'* communiquent avec le cylindre à vapeur, le troisième *d* communique avec l'atmosphère.

Une pièce *e*, nommée tiroir, dont les bords sont parfaitement dressés, glisse sur la partie plane *bb*. C'est une espèce de petite boîte, comme l'indique la coupe perpendiculaire à l'axe du cylindre (fig. 282). Le tiroir est enveloppé dans l'espace *gg* appelé chambre du tiroir, qui communique avec le régulateur par un tuyau *r* uni à la tubulure *K*.

Le tiroir est entouré d'une bride *m* en fer forge, terminée par une tige *n* qui traverse une boîte à étouper *o* placée sur un des côtés de la chambre du tiroir. La figure 283 représente le plan de la bride *m*. La tige *n* est terminée par un pas de vis qui traverse une petite pièce *a* qui s'assemble par des tourillons à deux petites bielles *b* réunies à leur autre extrémité par une traverse *c*. Un levier *d*, dont on voit la disposition dans la projection verticale fig. 284 de l'appareil que nous décrivons, communique le mouvement oscillatoire dont il est

animé à la traverse c, et par suite un mouvement rectiligne de va-et-vient à la tige o qui conduit le tiroir.

La distribution de la vapeur est maintenant facile à concevoir. Supposons le piston au bas de sa course et le tiroir dans la position indiquée par la figure. La vapeur arrivera sous le piston par le conduit c et le poussera devant elle jusqu'à l'extrémité de sa course. Un mouvement imprimé alors au tiroir par le mécanisme du levier dont nous avons parlé, l'amène dans la position (2) indiquée par des points. La vapeur arrive sur la face supérieure du piston par le tuyau c pendant que la vapeur introduite sous le piston, pendant la course précédente, s'élançe par les tuyaux c et d dans la cheminée. Quand le piston arrive au fond du cylindre, le tiroir est ramené à sa première position et le jeu de la machine peut continuer ainsi indéfiniment.

Nous venons d'indiquer le principe de la marche du tiroir; nous parlerons plus tard avec détail des dimensions de ses parties frottantes et de son mouvement. Revenons maintenant sur quelques détails de construction. Le tiroir est animé d'un mouvement très rapide, et il est pressé sur la surface sur laquelle il glisse par une force assez considérable, puisqu'elle est égale à la projection de sa surface, multipliée par l'excès de la tension de la vapeur sur la pression de l'atmosphère. La force nécessaire pour le mettre en jeu est par conséquent assez grande. D'un autre côté le tiroir peut éprouver accidentellement plus de résistance sur un de ses côtés que sur l'autre, de sorte qu'il tend à combler la tige n. On doit donc donner une force assez considérable au raccordement de cette tige avec la bride, laquelle au reste ne fait qu'entourer le corps du tiroir, lequel est libre de s'approcher de la table de la quantité dont le frottement aura usé les surfaces frottantes.

On introduit le tiroir et sa tige par la partie postérieure de la chambre du tiroir. La partie supérieure de cette même chambre est mobile, de sorte que l'on peut de temps en temps visiter le tiroir et reconnaître si son mouvement est convenablement réglé. S'il ne l'était pas, on ferait avancer ou reculer l'érou de la pièce a de manière à ramener le tiroir dans une position convenable relativement à l'entrée des tuyaux c et d.

Le piston d'une machine à vapeur est un de ses organes les plus importants. Il doit s'appliquer parfaitement sur les parois du cylindre, afin de ne pas laisser échapper la vapeur. Il ne doit pas exiger trop d'entretien et enfin son frottement ne doit pas être trop dur.

On a employé pendant longtemps dans les machines fixes un piston garni de tresses de chanvre. Il se composait (fig. 285) de deux plaques a a et b b que l'on peut rapprocher l'une de l'autre au moyen des vis v v. L'espace de gorge qui elles laissent entre-elles est remplie de tresses en chanvre. Quand le frottement a usé ces tresses, il suffit de rapprocher les disques du piston pour forcer le chanvre à s'appliquer de nouveau contre les parois du cylindre.

Les garnitures en chanvre sont assez bonnes pour les machines dont le piston ne parcourt pas plus d'un mètre par seconde; mais leur emploi serait tout-à-fait mauvais pour les locomotives. On a donc été conduit à remplacer les pistons en chanvre dont nous venons de parler, par des pistons entièrement métalliques. Nous décrivons deux pistons

de cette espèce qui paraissent les meilleurs.

Le piston de Stephenson se compose d'une plaque de fonte *a a* (fig. 286) fixée à la tige du piston par une clavette. Le diamètre de ce disque est de 3 ou 4 millimètres plus petit que celui du cylindre à vapeur. La partie frottante du piston est formée de deux anneaux de cuivre *bb b'b'*, tournés exactement du diamètre du cylindre et fendues d'un trait de scie suivant une de leurs génératrices; de sorte qu'en appliquant de l'intérieur à l'extérieur de ces anneaux une certaine force, leur élasticité leur permet de s'appliquer exactement sur les parois du cylindre. Pour que la vapeur ne puisse pas s'échapper par l'ouverture laissée par le trait de scie, on superpose les deux anneaux de manière que leurs traits de scie correspondent aux extrémités d'un même diamètre. Enfin, pour que le contact des deux anneaux soit plus parfait, ils sont réunis par une languette, comme l'indique leur coupe faite sur une grande échelle (fig. 287). Derrière le double anneau dont nous venons de parler, est placé un autre anneau *c*, également fendu d'un trait de scie et sur lequel s'exerce la pression de quatre ressorts (fig. 288) qui se trouve ainsi reportée sur les anneaux extérieurs eux-mêmes. On comprend comment en serrant plus ou moins les écrous doubles *e* on peut augmenter ou diminuer la tension des ressorts, et par conséquent la force avec laquelle les anneaux de cuivre s'appliquent sur le cylindre. Un second disque de fonte *g* complète le piston que nous venons de décrire. Il est réuni à la première plaque par quatre écrous qui s'engagent dans les parties saillantes *h*, ménagées dans la pièce *a a*. Pour empêcher le mouvement de trépidation du piston de desserrer ces vis, on engage leurs têtes dans les ébranlures d'une feuille de tôle *b*, comme l'indique la figure 289. Elle est traversée par le prolongement de la tige du piston, et retenue en place au moyen d'une petite clavette *a* en fil de fer ou d'acier double, dont on écarte les extrémités après l'avoir mise en place dans le petit trou destiné à la recevoir.

On visite facilement le piston que nous venons de décrire, en enlevant le couvercle du cylindre à vapeur. On peut alors enlever la plaque de tôle, dévisser les écrous et examiner l'état des ressorts et des autres parties intérieures du piston. Cette opération n'exige qu'une demi-heure. Ce piston ne renferme que quatre ressorts, de sorte que la pression exercée sur l'anneau en cuivre n'est peut-être pas aussi également répartie que l'on pourrait le désirer. On a cherché à éviter cet inconvénient dans un autre genre de piston employé sur le chemin de fer de St. Germain: l'anneau de cuivre porte intérieurement des appendices *a* (fig. 290) taillés en forme de coins *aa* comme l'indique la coupe sur une plus grande échelle (fig. 291). Une espèce de couronne en fonte *bb* (fig. 292) en forme de tronc de cône, s'appuie sur les appendices de l'anneau de cuivre et tend à l'ouvrir et à l'appliquer contre les parois du cylindre à vapeur. Cette couronne reçoit la pression de ressorts à boudin *r* dont on peut faire varier la pression au moyen des vis sur lesquelles ils sont montés. Une plaque de fonte maintenue par quatre écrous, comme celle du piston précédent, complète l'appareil que nous venons de décrire.

La pression exercée par les parois élastiques du piston contre la surface cylindrique ne doit pas être très énergique, surtout lorsque la machine atteint une grande vitesse. Les

directions opposées dans lesquelles la pression s'exerce se succédant alors avec une grande rapidité, il arrive que la vapeur n'a pas le temps de chasser pour se faire jour, l'eau ou les matières grasses interposées entre le cylindre et le piston.

Les figures 293, 294, 295, 296 donnent la description des pistons nouvellement étudiés pour les chemins de fer du Nord et de St. Germain.

Nous avons dit que les anneaux qui forment la circonférence extérieure des pistons dont nous venons de parler sont en cuivre. Nous devons ajouter que pour les très fortes machines à vapeur, ils sont en fonte et même qu'on en met souvent de cette espèce dans les locomotives. Il existe, en effet, des variétés de fonte dont le frottement sur d'autres pièces du même métal est extrêmement doux.

On reconnaît facilement si un piston présente quelques fuites. Il suffit de faire arriver la vapeur sur la face supérieure du piston et de voir s'il sort beaucoup de vapeur par un robinet situé à la partie inférieure du cylindre. Ce robinet est terminé par un petit entonnoir et sert en même temps à introduire de la graisse ou de l'huile dans le cylindre pour adoucir le frottement du piston.

Lorsque l'on fait arriver la vapeur dans les cylindres froids, elle se condense. Cette eau accumulée dans les cylindres offre une grande résistance au jeu de la machine, et même si on voulait aller trop vite on s'exposerait à briser les cylindres. La vapeur l'entraîne avec elle dans la cheminée, mais alors elle retombe en pluie sur le mécanicien. Il importe donc, sous tous les rapports, de s'en débarrasser. On y parvient en ouvrant deux robinets placés au bas des cylindres. L'eau, pressée par la vapeur, sort par les ouvertures qui lui sont affectées, et les cylindres se vident ainsi sans accident. Quand ils sont assez échauffés pour ne plus condenser la vapeur, on ferme les robinets au moyen d'une tige de renvoi dont la poignée est à la portée du mécanicien.

La tige du piston dont le mouvement est rectiligne, et la bielle dont le mouvement est oscillatoire, doivent être réunies par un assemblage à articulation que nous allons décrire.

La tige du piston a (fig. 297) est terminée par une partie légèrement conique, qui s'engage dans une ouverture de même forme pratiquée dans la pièce b. Une clavette en forme de coin, engagée dans une mortaise pratiquée dans la tige du piston et dans la pièce b, réunit ces deux pièces.

Cette clavette (fig. 298) est composée de deux barres d'acier soudées seulement à la partie supérieure. Pour empêcher la clavette de sortir de la place qu'elle doit occuper, on chasse un petit coin entre les deux barres de métal, puis on perce un trou à travers la clavette et le coin et on y fait passer une gouville formée d'un fil métallique plié en deux dont on écarte les extrémités après l'avoir mis en place.

Tous les écrous de locomotives sont sujets à se desserrer par suite du mouvement de vibration auquel ils sont constamment soumis. On est obligé d'employer différents moyens pour s'opposer à cette action. On emploie souvent les petites boucles en fil de fer dont nous venons de parler. Dans d'autres circonstances on met deux écrous l'un au dessus de l'autre. Le second, en serrant fortement celui qui est dessous, s'oppose à son déplacement. Enfin, les écrous que l'on

doit tourner souvent, ceux des boîtes à étoupes par exemple; portent à leur partie inférieure (fig. 299) une roue à rochet contre laquelle s'appuie un ressort qui s'oppose à tout mouvement de rotation tendant à desserrer l'écrin; ce ressort porte le nom de frein.

Revenons à la réunion de la bielle avec la tige du piston. La pièce b dont nous venons de décrire l'assemblage avec le piston, est maintenue par deux barres d'acier m, lesquelles sont fixées par une de leurs extrémités au couvercle du cylindre à vapeur n, et par l'autre extrémité à une pièce de fer forgé que l'on fixe, en lui donnant une forme plus ou moins contournée, aux parties les plus voisines du chassis de la locomotive.

La tige du piston doit être animée d'un mouvement rectiligne. L'extrémité de la bielle fixée à la manivelle est obligée au contraire de parcourir un cercle. Ces deux pièces font donc entre elles un angle variable, d'où résulte une force verticale qui tend sans cesse à écarter la tige du piston, de la position qu'elle doit occuper. Cette force, que le piston avance ou recule, est toujours dirigée de bas en haut dans le mouvement direct de la machine, et toujours de haut en bas dans le mouvement rétrograde. La pièce d'acier supérieure résiste à cette force dans le premier cas, la pièce inférieure la supporte dans le second cas. Le frottement qui en résulte est atténué à l'aide d'un godet graisseur fixé sur la pièce supérieure qui, supportant le frottement pendant la durée du mouvement direct de la machine, travaille incomparablement plus que la pièce inférieure. Ces deux pièces m (fig. 300) portent le nom de glissières.

La pièce b porte latéralement deux touillons c lesquels s'assemblent chacun avec l'une des branches de la bielle qui, pour cet effet, est fourchée. Les deux parties de la fourche se réunissent en un tronc commun, en un point assez éloigné de l'extrémité de la tige du piston, pour que dans le mouvement de va-et-vien ce point ne vienne pas rencontrer la pièce de forge f à laquelle sont fixées les glissières.

Dans beaucoup de machines, les extrémités des bielles sont garnies de coussinets en bronze disposés comme dans la figure 301. La bride en fer a qui retient les coussinets, est fixée à la tête de bielle par une clavette et un mentonnet b; quand l'usure a augmenté la distance des coussinets, il suffit de serrer la clavette pour les ramener à leur écartement primitif.

Dans quelques machines, la bielle a une forme beaucoup plus simple et son extrémité la plus voisine du piston est réunie à la pièce b par un assemblage à fourche. Celle-ci est prise sur la tête du piston et la bielle porte un œil par lequel passe un boulon qui le réunit à la fourche de la tête du piston, mais il est nécessaire alors que les glissières m soient beaucoup plus écartées pour n'être pas rencontrées par la bielle dans ses excursions au dessus et au dessous de sa position moyenne. Le frottement a lieu alors entre le boulon et les parois de l'œil percé dans l'extrémité de la bielle. Ces surfaces frottantes doivent être trempées en paquet.*

* La trempe en paquet se fait en plaçant les pièces sur lesquelles on veut opérer, dans une boîte en tôle remplie de suie, de noir de fumée ou de charbon de bois; on porte le tout au rouge vif pendant un certain temps, et ensuite on plonge la masse

Le diamètre de l'œil des coussinets varie beaucoup suivant le système des machines : ainsi, il n'a que $0^m,07$ à $0^m,08$ dans les machines à cylindre extérieur. Dans les machines à essieu courbé, il doit avoir de $0^m,12$ à $0^m,13$. C'est un des inconvénients de ce système de machines.

Si on serrait trop la clavette, il pourrait y avoir une trop forte adhérence entre l'essieu et les coussinets. La bielle, dans le mouvement de la machine, tendrait à se plier en prenant la position indiquée par les points dans la figure 302 et finirait même par se rompre en *ab*. C'est presque toujours ainsi en effet que les bielles se cassent. On doit donc leur donner plus de hauteur que d'épaisseur, augmenter leurs dimensions près de la tête et dans tous les cas les faire beaucoup plus fortes que ne l'indiquerait le calcul, si on cherchait seulement les dimensions nécessaires pour qu'elles pussent transmettre la pression de la vapeur.

Les constructeurs doivent apporter beaucoup d'attention à ne pas trop serrer la clavette. Ils y parviennent ou l'enfonçant d'abord fortement d'un coup de marteau et la faisant ensuite ressortir en frappant sur l'extrémité inférieure à petits coups de marteau jusqu'à ce qu'elle n'éprouve presque plus de résistance.

Si la clavette était enlevée de la position qu'elle doit occuper, le piston ne se trouverait plus lié aux roues motrices ; il serait violemment poussé contre l'un des couvercles du cylindre à vapeur qu'il ne pourrait manquer de briser. On doit employer pour éviter ces accidents des précautions multipliées. La clavette est d'abord percée de trous à sa partie inférieure. On passe une cheville dans celui de ces trous qui est le plus voisin de la tête de bielle, et des coins entre cette cheville et la bielle. De plus, trois vis *v v v*, placées dans le côté de la tête de bielle, pressent fortement la clavette. Enfin, comme dernière précaution, la clavette est quelquefois terminée par une vis qui s'engage dans le prolongement du mentonnet avec lequel elle est réunie par un double écrou.

Il faut que le coussinet soit toujours enduit de graisse ; une boîte à huile n doit donc être placée sur la bride en fer qui retient les coussinets. Elle est traversée par un tube *a t* contenant une mèche de coton qui apporte l'huile goutte à goutte dans le coussinet. Autrefois on faisait cette boîte à graisse en cuivre et on la fixait à la bride par des vis, mais cet ajustage se dérangeait quelquefois. On a donc pris le parti aujourd'hui de la construire dans une masse de fer venue de forge avec la bride elle-même, ce qui offre la plus grande solidité.

Nous avons dit que si la bride qui retient les coussinets de la tête de bielle venait

dans l'eau. Le fer se transforme partiellement en acier par l'espèce de cémentation à laquelle il a été soumis, et alors sa surface peut acquies une grande dureté par un refroidissement brusque.

Cette manière de durcir la surface du fer est employée fréquemment dans toutes les parties où le fer supporte un frottement ; une cémentation prolongée transforme ainsi le fer en acier sur une épaisseur qui peut aller jusqu'à quelques millimètres ; mais cette opération produit souvent une déformation dans les pièces de fer qui y ont été soumises. On remarque en particulier que lorsqu'une tige a été dressée à froid, cette opération lui rend sa forme primitive ; un simple recuit produirait également ce résultat. On emploie souvent la trempe en paquet pour durcir la surface de la fusée, des essieux et prévenir leur usure trop rapide.

à se détacher, le piston, abandonné à la force impulsive de la vapeur, irait frapper le fond du cylindre et le briserait inévitablement. Cet accident n'est pas le seul qui pourrait résulter de l'absence de la bride. La bielle n'étant plus soutenue tomberait sur le sol, formerait arc-boutant et pourrait soulever la machine et la faire décailler. Nous avons décrit les moyens assez compliqués employés dans les machines à essieu courbé, pour prévenir ces graves accidents. Dans les machines à cylindres extérieurs, on peut éviter l'emploi d'une bride pour retenir les coussinets, ce qui simplifie beaucoup l'ajustage. La tête de la bielle reçoit à la forge la forme indiquée par la figure 303. On fait ensuite, à la machine à percer et à tailler, une grande mortaise aa bb , assez large à l'une de ses extrémités pour que l'on puisse y introduire la première moitié c du coussinet en bronze. On apporte ensuite la bielle sur le bouton de la manivelle, on place la seconde moitié du coussinet, et enfin, on fixe tout le système au moyen d'un mentonnet et d'une clavette retenue à sa place par les moyens qui ont été expliqués.

Les coussinets doivent être carrés, comme le montre la figure, et non pas à pans coupés, comme on les fait en général dans les machines fixes, afin qu'il leur soit absolument impossible de tourner dans la chape qu'ils doivent occuper.

Les figures 303 et 304 indiquent la disposition adoptée depuis peu sur le chemin de fer du Nord pour assurer le maintien en place des clavettes de la tête de bielle.

Nous avons vu que le tiroir doit être animé d'un mouvement rectiligne de va-et-vient. Ce mouvement est pris sur l'essieu des roues motrices. On a donc à transformer un mouvement de rotation continu en un mouvement rectiligne alternatif. Or, nous savons déjà que l'on transforme le mouvement du piston en mouvement circulaire au moyen d'une manivelle. La première idée qui se présente est donc de faire un nouveau coude sur l'essieu et d'y appliquer une bielle qui transmettrait au tiroir un mouvement rectiligne. Mais ces nouveaux coudes compliqueraient encore la forme de l'essieu courbé et rendraient presque impossible son exécution déjà si difficile. On évite l'emploi de ce moyen compliqué, en remarquant que l'amplitude d'un mouvement rectiligne alternatif ne dépend nullement du diamètre du touillon de la manivelle qui le produit, mais seulement de la distance des centres de l'arbre et de ce touillon. De sorte qu'en supposant même que le diamètre aa (fig. 305) du touillon soit assez grand pour que la circonférence oa puisse envelopper l'arbre de rotation o , la longueur du mouvement rectiligne communiqué à une bielle qui embrasserait le cercle oa serait toujours égale à deux fois oa .

Le frottement du touillon augmentant comme la circonférence o deviendrait très grand quand la pression serait elle-même considérable. On ne pourrait donc employer ce moyen pour transmettre le mouvement des pistons à l'arbre, mais il convient parfaitement pour mettre en jeu les tiroirs, dont la course varie de $0^m,10$ à $0^m,13$ et qui d'ailleurs n'exigent qu'une force relativement peu considérable. D'ailleurs la facilité que présente alors l'exécution, compense amplement la petite perte de force produite par cette disposition.

Un grand cercle dont le centre est ainsi différent de celui de l'arbre sur lequel il est fixé, porte le nom d'excentrique. Nous allons décrire cette pièce importante de la machine locomotive.

L'excentrique se compose de deux parties (fig. 306) embrassant l'arbre o et retenant

par deux goujons en fer, fixés par un pas de vis et une clavette rivée c.

Pour empêcher l'excentrique de tourner sur l'arbre, on fait une rainure r en partie dans l'arbre et en partie dans l'excentrique, et on y enfonce une clavette. On augmente encore la fixité de cet assemblage au moyen de vis v, terminées en pointe, qui s'appuient sur l'arbre et qui traversent des écrous coniques en acier, logés dans l'épaisseur de la pièce de fonte b.

Le collier de l'excentrique cc est en cuivre; il est composé de deux parties réunies par des boulons d. Il porte une boîte à huile venue de fonte avec lui, et disposée comme celle dont nous avons parlé plus haut. Le collier s'engage dans la gorge que présente l'excentrique, comme on le voit dans la coupe (fig. 307) faite par un plan passant par l'axe de l'arbre de rotation.

Le collier et la tige t de l'excentrique sont réunis par un assemblage à queue d'hironde et par quatre rivets. La figure 308 donne la coupe de cet ajustage.

Quelquefois la ligne xx n'est pas perpendiculaire à la tige t, afin que toute la force ne soit pas transmise par les boulons d'assemblage d.

La figure 309 représente un autre assemblage du collier de l'excentrique avec sa bielle.

Chapitre XIII

Remarques sur le calcul

des dimensions des diverses parties d'une machine.

Le moyen de calculer les dimensions d'une pièce dans une machine a généralement consisté jusqu'ici à supposer cette machine arrêtée tout à coup à un instant quelconque de son mouvement, à examiner les forces qui agissent en cet instant sur la pièce que l'on considère, et à en conclure les dimensions cherchées. Ainsi, pour connaître les dimensions à donner à une tige de piston, on étudiait les forces qui agissent sur son extrémité, sur le piston lui-même, les frottements de la tige sur ses guides ou dans la boîte à étouper, et l'on en concluait le diamètre de la tige. Mais la pratique indiqua bientôt que les dimensions données par ce calcul étaient beaucoup trop faibles, et l'on admit que les corps destinés au mouvement doivent avoir des dimensions plus grandes que s'ils devaient rester en repos. Aussi, dans les machines nouvelles, toutes les parties qui doivent se mouvoir sont elles plus fortes que dans les anciennes machines. Cet accroissement de dimensions est nécessaire par la force d'inertie dont le calcul ne tenait aucun compte. Cette force se produit toutes les fois que le mouvement du point matériel que l'on considère n'est pas à la fois rectiligne et uniforme. La force centrifuge agissant sur un corps qui tourne au bout d'un fil est une force d'inertie. Son expression est $\frac{v^2}{\rho}$ ρ étant la longueur du fil et v sa vitesse. Cette force est égale et contraire à la tension du fil, et ferait décrire un corps s'il était libre la circonférence qu'il décrit. Lorsqu'un corps éprouve un mouvement qui n'est pas à la fois rectiligne et uniforme, il faut nécessairement tenir compte de la force d'inertie dans le calcul des dimensions de ce corps.

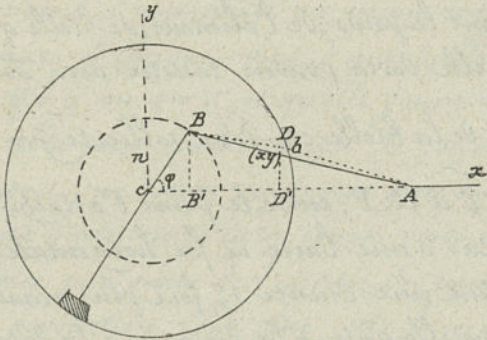
Les forces auxquelles est soumis un point (x, y, z) de masse m se mouvant d'une

manière quelconque dans l'espace, peuvent toujours se réduire à trois composantes totales dirigées suivant les trois axes coordonnés. L'expression de ces composantes est :

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = X, \quad m \frac{d^2y}{dt^2} = Y, \quad m \frac{d^2z}{dt^2} = Z;$$

x, y, z sont des fonctions du temps t .

Si nous considérons un point d'une bielle de locomotive, nous trouverons aisément la valeur de ces trois forces. Prenons pour axes coordonnés l'axe horizontal du piston, une verticale passant par le milieu de l'essieu, et l'axe de cet essieu. La bielle se mouvant dans un plan vertical, la force horizontale Z est nulle. Si l'on désigne par b la longueur de la bielle, par a la distance du point considéré à la tête du piston, on aura :



$y = r \sin \varphi \frac{a}{b}$. L'angle φ est fonction du temps et varie uniformément si le mouvement de la locomotive est uniforme. On a, en différentiant :

$$\frac{dy}{dt} = r \frac{a}{b} \cos \varphi \frac{d\varphi}{dt}$$

$\frac{d\varphi}{dt}$ est la vitesse avec laquelle s'accroît l'angle φ ;

si nous la supposons constante, nous aurons :

$$m \frac{d^2y}{dt^2} = -m \frac{ar}{b} \sin \varphi \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 = Y.$$

On voit que plus la vitesse sera grande, plus cette force sera considérable. Au point A elle est nulle, et c'est au point B qu'elle est la plus intense; aussi donne-t-on en général de plus grandes dimensions à cette partie de la bielle.

Pour la valeur de x on trouve $x = r \cos \varphi + (b-a)$; car si l'on suppose la bielle très longue, on peut considérer $D'B'$ comme ne différant pas sensiblement de $DB = b-a$. En différentiant, on a

$$\frac{dx}{dt} = -r \sin \varphi \frac{d\varphi}{dt}, \quad \text{d'où } \frac{d\varphi}{dt} \text{ étant constant,}$$

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -m r \cos \varphi \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 = X.$$

On peut donner une autre forme à X et Y . En appelant A la vitesse $\frac{rd\varphi}{dt}$ du bout de la manivelle, on a

$$X = -m \cos \varphi \frac{A^2}{r}, \quad Y = -m \frac{a}{b} \sin \varphi \frac{A^2}{r}.$$

Ces deux forces varient avec l'angle φ . La première atteint son maximum $-\frac{mA^2}{r}$, quand $\varphi = 0$ ou $\varphi = \pi$, et la seconde quand $\varphi = \frac{\pi}{2}$ ou $\varphi = \frac{3\pi}{2}$. Sa valeur absolue est alors $m \frac{a}{b} \frac{A^2}{r}$.

Il est intéressant de substituer des nombres dans ces formules. Supposons qu'une

Locomotive se meuve avec une vitesse de 18 ou 19 lieues à l'heure, ou de 21 mètres par seconde, que sa roue motrice ait 2^m,10 de diamètre, et que le bouton de la manivelle soit à 0^m,30 de l'axe de rotation. La vitesse A de ce bouton sera de $21 \cdot \frac{0,60}{2,10} = 6$ mètres par seconde, et le piston sera

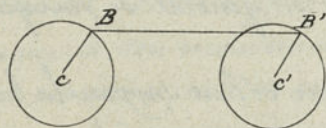
animé d'une vitesse variable qui atteindra 6 mètres vers le milieu de sa course. Beaucoup d'ouvrages sur les machines indiquent la vitesse de 1^m comme la plus grande que doit atteindre un piston; quand on dépassait ce chiffre dans les anciennes machines, leurs organes étaient bientôt brisés, parce que leurs dimensions étaient calculées indépendamment du mouvement.

Comme il faut donner à une pièce une force suffisante pour résister aux plus grands efforts auxquels elle pourra se trouver soumise, calculons les valeurs maximum de X et de Y . Pour X on trouve: $\frac{A^2}{r} = 120$, et en prenant $g = 10$, $m = \frac{P}{10}$, (P étant le poids de l'élément de bielle que l'on considère); la valeur maximum de X à laquelle la bielle devra pouvoir résister sera donc

$X = 12 P$. Pour Y on trouve $Y = 12 \frac{a}{b} P$; chaque point de la bielle est donc sollicité par une

force perpendiculaire à la longueur de la pièce, et qui varie de 0 à $12 P$, entre le point d'attache du piston et le bouton de la manivelle. Elle se trouve dans le cas d'une barre de fer horizontale supportée à ses deux extrémités et dont toutes les parties auraient une densité 12 fois plus grande que celle du fer vers la tête de bielle et décroissant proportionnellement à la distance à la tête de la tige du piston où sa densité serait réduite à celle du fer. On voit combien ces conditions diffèrent de celles qu'on avait en supposant la bielle arrêtée à un moment donné, et en considérant les forces qui agissent alors sur elle.

Si au lieu d'une bielle ordinaire, nous considérons une bielle d'accomplissement qui réunit les jantes de deux roues d'égal diamètre, nous pourrions en calculer aisément les dimensions en ayant égard à ce qui vient d'être dit plus haut. Chaque point de cette bielle décrit une combe égale à celle que parcourt le bouton de la manivelle.



Si la vitesse de la machine est de 21^m par seconde, chaque point se trouve donc comme le point B de la bielle ordinaire sollicité par deux forces variables; l'une d'elles perpendiculaire à sa longueur atteint son maximum quand le bouton de la manivelle occupe le point le plus élevé ou le plus bas de sa course.

Supposons que l'on veuille donner à la pièce une longueur de deux mètres et une section rectangulaire plus haute que large. Soit p le poids de la bielle. La force verticale étant uniformément répartie sur toute la longueur de la pièce, peut être considérée comme donnant lieu à une résultante égale à $\frac{1}{2} 12 p$ ou $6 p$ placée au milieu de la bielle et à deux autres

de $\frac{1}{4} 12 p$ ou $3 p$ agissant sur ses extrémités. Celles-ci donneront lieu à une réaction $3 p$ de chaque point d'appui. Si l'on considère maintenant la pièce comme encastree en son milieu, elle sera dans le cas d'une pièce d'une longueur d'un mètre sur le bout de laquelle agit une force $3 p$. Dans ces conditions les dimensions de la pièce seront données par les formules: $\frac{1}{6} T b a^2 = 3 p \cdot 100$, dans lesquelles T est la plus grande résistance par centimètre carré de la

matière de la pièce, b le côté horizontal, a le côté vertical de la section de la pièce supposée rectangulaire. Il faut prendre dans ces formules le centimètre pour unité de longueur et le kilogramme pour unité de poids. On a $p = 200$. $ab = 0,007788 = 557600 ab$, d'où $4,67 ab = \frac{1}{6} T b a^2$ et $467 = \frac{1}{6} T a$; si on suppose $T = 400^k$, on trouve $a = 7$ pour la hauteur à donner à la bielle.

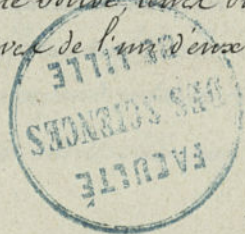
Les dimensions qu'on trouve par ce moyen avaient été indiquées par la pratique, mais on ne se rendait pas compte des raisons qui les motivaient, parce qu'on négligeait les forces d'inertie produites par le mouvement. Les considérations que nous venons d'exposer sont d'une application récente et pourront donner lieu à de nombreux perfectionnements. Elles conduisent à une autre remarque importante. Si l'on considère la force horizontale $X = m \cos \varphi \frac{A^2}{r}$ appliquée à chaque point d'une bielle ordinaire, on voit qu'elle atteint son maximum d'intensité pour $\varphi = 0$ ou $\varphi = \pi$, et qu'elle donne lieu à des efforts variables pour les valeurs intermédiaires de φ . On peut évaluer à 180^k le poids de la bielle, du piston et de sa tige; la force horizontale qui agit sur toutes ces pièces sera ainsi égale à 12×180^k soit 2160^k chaque fois que le piston atteint l'extrémité de sa course pour une vitesse de la machine de 21^m par seconde. Cet effort est exercé par suite de l'inertie des masses mouvantes, tantôt en avant, tantôt en arrière à chaque demi-révolution. De plus, cette force agissant avec son maximum d'intensité tantôt sur une bielle, tantôt sur l'autre, se transmet, par l'intermédiaire des coussinets, au chassis de la machine, et tend à lui imprimer un mouvement alternatif auquel on a donné le nom de mouvement de lacet.

Cet effet se produit plusieurs fois par seconde, et il en résulte une usure considérable. Pour remédier à ces inconvénients, on place un contrepoids E à l'extrémité du rayon placé dans le prolongement de la manivelle et de l'autre côté de l'axe de rotation (fig. page 207). Ce contrepoids est calculé de façon à ce que sa force centrifuge soit égale à la force de 2160^k que nous venons de calculer. On fait disparaître ainsi les effets de ce mouvement alternatif dans le sens horizontal. Malheureusement on le reproduit dans le sens vertical, et la pression sur les rails se trouve accrue ou diminuée de 2160^k à chaque demi-circonférence parcourue par la roue motrice.

Nous terminons ici ce qui est relatif à la description des détails du mécanisme de la locomotive et nous arrivons à des considérations plus théoriques, mais non moins importantes pour comprendre d'une manière complète le jeu de cette machine.

Nous établissons d'abord d'une manière générale les relations géométriques qui existent entre les différentes positions du piston et celles du bouton de la manivelle qu'il conduit, le théorème que nous allons établir s'appliquant aussi au mouvement d'une tige animée d'un mouvement rectiligne alternatif, conduite par une manivelle ou un excentrique).

Supposons (fig. 310) que O soit le centre du cercle décrit, soit par le bouton de la manivelle, soit par un point de l'excentrique. La tige du piston doit se mouvoir sur la ligne droite OA . Tous les points de cette ligne formant un système solide, leurs distances respectives sont invariables, et il suffit de chercher les positions relatives de l'un d'eux seulement. Nous choisirons



M.V. 27.

le point ou la tige du piston est réunie à la bielle.

Il est évident que pour obtenir la position de la tête de la tige du piston sur la ligne OA , répondant à une position quelconque du bouton B de la manivelle, il suffit de décrire de ce point avec un rayon égal à la longueur de la bielle, un arc de cercle qui coupe OA en p . Nous obtiendrons les points extrêmes p' et p'' de la course du piston, en décrivant avec le même rayon des arcs de cercle des points a et a' comme centres.

Réciproquement on obtiendra la position du bouton de la manivelle correspondant à une position donnée p de la tige du piston, en décrivant de ce point un arc de cercle avec la longueur de la bielle pour rayon.

Remarquons maintenant que $a a' = p'' p'$, de sorte que nous pouvons marquer sur le diamètre lui-même les différentes positions de la tige et les positions correspondantes du point B . Il suffira en effet de projeter le point B en P au moyen d'un arc de cercle décrit du point p avec la longueur de la bielle pour rayon.

Nous voyons par cette construction très simple que la manivelle parcourt aux environs des points a et a' des espaces assez considérables, tandis que le piston n'éprouve qu'un déplacement insensible. Quand la manivelle sera aux points a et a' sa vitesse sera toujours la même, c'est-à-dire égale au produit du rayon o par la vitesse angulaire qui est constante, tandis que la vitesse du piston sera nulle. Le rapport de ces deux vitesses sera donc égal à l'infini. Ces points remarquables de la course de la manivelle portent le nom de points morts.

L'espace parcouru par le piston, quand la manivelle est arrivée de a en un point quelconque B de son mouvement de rotation, est égal à $aP = a p - pP$, ou bien au sinus versé de l'arc décrit par la manivelle, diminué du sinus versé de l'angle que fait avec OA la direction de la bielle.

Quand, au contraire, le piston se ment de droite à gauche, l'espace $a'P'$ qu'il a parcouru est égal à la somme des sinus versés de l'angle $a'OB'$ parcouru par la manivelle et de l'angle OB' formé par la bielle et la ligne OA .

La loi qui exprime la relation de position de la tige du piston et du bouton de la manivelle est donc assez compliquée puisqu'elle varie avec le sens du mouvement du piston. Nous n'avons presque jamais besoin de l'appliquer dans toute sa rigueur, et dans presque tout ce que nous avons à dire, nous obtiendrons une approximation suffisante en prenant, pour la position du piston répondant à une certaine position B du bouton de la manivelle, le pied p de la perpendiculaire abaissée du point B sur la ligne OA . Le point ainsi obtenu est exactement la moyenne de la position du piston par rapport à son point de départ dans le mouvement de droite à gauche et de gauche à droite pour un même espace angulaire décrit par la manivelle à partir du point mort. Ce qui revient à admettre que la longueur de la bielle est infinie.

Nous suivrons dans l'explication des détails de la distribution de la vapeur, dont nous allons maintenant nous occuper, l'ordre historique. L'explication des moyens fort simples employés d'abord nous conduira facilement à comprendre les dispositions plus étudiées adoptées aujourd'hui par les constructeurs.

Nous décrirons d'abord le mode de distribution employé dans l'origine, et que nous pouvons appeler distribution normale. Dans cet appareil (fig. 311) les parties pleines a a' du tiroir ont précisément la longueur des lumières, de sorte que toutes les communications sont fermées quand le tiroir est au milieu de sa course, comme l'indique la figure. Mais elles s'ouvrent aussitôt qu'il avancera à droite ou à gauche. L'excentrique et la manivelle doivent être placés à angle droit dans cette disposition; car si on applique au cercle o qui peut servir à représenter à la fois (à deux échelles différentes) les positions relatives du piston, de la manivelle, du tiroir et de l'excentrique, le principe que nous avons établi, on verra que le tiroir sera au milieu de sa course quand le piston sera à l'un des points morts. La lumière c' commencera alors à s'ouvrir et la lumière c a' communiquera avec l'atmosphère par le tuyau d. Le piston s'avancera alors de droite à gauche; quand il atteindra le milieu de sa course, l'excentrique sera au point mort b et les lumières sont entièrement ouvertes. Le piston continuant à avancer, le tiroir commence à revenir de gauche à droite, et quand le piston sera en b, le tiroir sera revenu à sa position moyenne, puis il continuera à avancer; le conduit c communiquera avec la vapeur, c' avec l'extérieur, de sorte que le piston commencera à revenir et à se mouvoir de gauche à droite. Ce mouvement continuera ainsi indéfiniment.

Le double mouvement du piston et du tiroir ainsi combiné présente une propriété remarquable; c'est que l'ouverture des lumières et, par suite, la vitesse avec laquelle la vapeur est introduite, sont à chaque instant proportionnelles à la vitesse du piston. En effet, si nous considérons la manivelle arrivée en B, après avoir décrit l'angle α , le chemin parcouru par le piston sera $bp = r(1 - \cos \alpha)$, et le chemin parcouru par le tiroir, ou l'ouverture de la lumière, sera $ot = Bt = r \sin \alpha$. Mais si on appelle v la vitesse avec laquelle la vapeur se précipite dans le cylindre à l'instant considéré, le volume introduit dans le temps dt sera :

$$v \cdot dt \cdot r \sin \alpha \dots \dots \dots (1)$$

Le volume engendré dans le même temps par le piston est égal à sa surface s multipliée par l'élément linéaire qu'il parcourt, ou bien à $s \cdot d \{ r(1 - \cos \alpha) \} = sr \sin \alpha d\alpha \dots \dots (2)$

Les expressions (1) et (2) doivent évidemment être égales, ce qui donne

$$v \cdot dt \cdot r \cdot \sin \alpha = s \cdot r \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha \quad \text{ou} \quad v = s \frac{d\alpha}{dt}$$

Or $\frac{d\alpha}{dt}$ = la vitesse angulaire, constante de l'arbre de rotation, donc v vitesse d'introduction de la vapeur dans le cylindre est une constante, ce qui établit le fait que nous avons annoncé.

La distribution que nous venons de décrire est ce que l'on peut nommer la réglemation normale. Dans les machines ainsi disposées, le recouvrement du tiroir est précisément égal à la surface des lumières et l'excentrique est perpendiculaire à la manivelle, de sorte que la vapeur cesse d'arriver sur une face du piston à l'instant même où elle arrive sur l'autre. Si l'on admet que l'équilibre s'établit instantanément entre la chaudière et le cylindre et entre celui-ci et le condenseur, ou l'air libre quand il n'y a pas de condenseur, on représentera facilement le travail produit pendant une course du piston. Il suffira en effet d'élever à l'extrémité de la droite AB (fig. 312) égale à la course du piston, une perpendiculaire AC représentant la force qui pousse le piston (cette force est égale à la section du piston multipliée par la pression de la vapeur sur

l'unité de surface) et d'achever le rectangle $ABDC$ construit sur ces deux droites, et enfin de retrancher de cette figure le rectangle $ABcd$ dont la hauteur ad représente la résistance opposée au mouvement du piston par la pression dans le condenseur ou à l'extérieur.

L'hypothèse sur laquelle s'appuie la construction précédente est loin d'être exacte. L'équilibre ne peut pas s'établir au moment même de l'ouverture des lumières, de sorte que le piston éprouve dans les premiers instants de sa course une résistance beaucoup plus considérable que celle de l'atmosphère. En admettant que l'équilibre ne soit établi qu'au moment où le piston arrive en p , on conçoit que la résistance a dû varier pendant qu'il parcourait l'espace Bp , comme les ordonnées d'une certaine courbe $p'mD$ et alors le travail utile produit pendant la course entière est représenté seulement par la surface $cdp'mD$. La position du point p où est arrivé le piston quand l'équilibre est établi, varie avec un grand nombre de circonstances, mais il est dans tous les cas d'autant plus éloigné de l'origine B que le mouvement du piston est plus rapide. Cette considération est importante pour les locomotives dont le piston est animé d'une très grande vitesse, puisque l'essieu moteur fait souvent deux cents révolutions par minute.

On peut facilement faire disparaître la perte de force dont nous venons de signaler la cause. Supposons en effet que la ^{course} du piston soit augmentée d'une longueur $BE = Bp$ et que l'on arrête l'introduction de la vapeur quand le piston est en B et que l'on établisse en même temps la communication avec l'air extérieur, sans toutefois laisser venir en même temps la vapeur sur l'autre face du piston (comme cela avait lieu dans la réglementation normale), ce que l'on obtient en faisant le recouvrement du tiroir plus grand que la lumière. Il est alors évident que l'équilibre s'établira pendant que le piston parcourra l'espace BE , et que le travail produit pendant ce même temps sera représenté par la surface $CDm'p'$, la courbe $Dm'p'$ étant analogue à $Dm p$. D'un autre côté, nous n'aurons plus à vaincre pendant le retour du piston le travail résistant représenté par la portion de surface $p'mDc$, de sorte que nous gagnerons une quantité de travail représentée par toute la surface $Dp'p''$ en avançant le moment où l'introduction de la vapeur cesse et où la communication avec l'atmosphère commence. Il résulte de là que le tiroir doit avoir dépassé le milieu de sa course quand le piston est à l'extrémité de la sienne et, par suite, que la ligne qui passe par les centres de l'excentrique et de l'arbre de rotation, au lieu d'être perpendiculaire à la manivelle, doit prendre une certaine inclinaison dépendant de l'avance que l'on veut donner au tiroir. Ainsi, par exemple, si oa (fig. 313) est la direction de la manivelle oa , ce sera celle du grand rayon de l'excentrique*. L'angle $Ao\alpha$ est appelé angle d'avance.

Tout ce que nous venons de dire nous conduit à apporter trois modifications à la réglementation normale : 1° ne pas mettre l'excentrique perpendiculaire à la manivelle ; 2° interrompre la communication du cylindre avec la chaudière avant la fin de la course du piston ; 3° faire communiquer le cylindre avec l'air, ou le condenseur, avant la fin de la course du piston.

* Cette figure suppose implicitement que la transmission du mouvement au tiroir se fait directement.

Nous allons maintenant déterminer d'une manière rigoureuse, au moyen du théorème établi plus haut, les différentes phases du mouvement du piston relativement à l'ouverture et à la fermeture des communications.

Nous n'examinerons que ce qui se passe sur l'une des faces du piston. Nous n'avons besoin que de considérer une des moitiés du tiroir; nous supposons (fig. 314) qu'il est au milieu de sa course, dont nous supposons l'amplitude égale à deux fois ac ; de sorte que le tiroir oscille à droite et à gauche de la position qu'il occupe dans la figure de quantité égale à cette ligne ac .

Représentons maintenant par AA' (fig. 315) la course du tiroir. Le tiroir étant au milieu de sa course, on doit supposer que le point d est en o , milieu de AA' , et la position correspondante de l'excentrique sera en B . Pour déterminer sa position quand la vapeur commence à entrer dans le cylindre, il suffit de porter la largeur ab du recouvrement extérieur de o en p et d'élever une perpendiculaire au diamètre AA' dont l'intersection avec le cercle décrit sur AA' donnera le point B' où se trouve alors l'excentrique. La vapeur s'introduira dans le cylindre pendant tout le temps que le tiroir emploiera à se transporter de pen A et à revenir de A en p . L'excentrique aura parcouru pendant ce temps l'arc $B'AB''$ déterminé en prolongeant la perpendiculaire $B'p$. On obtiendra d'une manière semblable l'arc $T'A'T'$ parcouru par l'excentrique pendant que le cylindre communique avec l'air extérieur en portant à gauche du point o la longueur cd du recouvrement intérieur. Toutes les communications sont fermées pendant que l'excentrique parcourt l'arc $B'T'$; la vapeur renfermée dans le cylindre peut alors s'y dilater en poussant devant elle le piston: c'est la période de détente. Enfin, toutes les communications sont interrompues de nouveau quand l'excentrique décrit l'arc $T'B'$ et le piston est obligé de comprimer la vapeur renfermée derrière lui: c'est la période de compression.

Nous pouvons maintenant déterminer les différentes positions du piston qui correspondent aux points remarquables de la course du tiroir, dont nous venons d'indiquer la détermination. La vapeur doit être introduite sous le piston au moment même où il arrive à la fin de sa course. Quand le piston est en A' il faut donc que l'excentrique qui conduit le tiroir soit en B' et même un peu au delà, en K je suppose, pour que l'ouverture ait lieu un peu avant la fin de la course*. Cette relation angulaire entre la manivelle et l'excentrique est évidemment la même à toutes les époques du mouvement; de sorte que, pour obtenir sur le cercle oA' la position de la manivelle, qui correspond à une position donnée, B'' par exemple, de l'excentrique, il suffit de porter en arrière de ce point l'arc $A'BK$ qui déterminera la position de la manivelle. On obtiendra la position correspondante du piston en abaissant du point que nous venons de déterminer une perpendiculaire sur AA' . En opérant ainsi pour les points B', B'', T', R , on obtiendra sur AA' les positions correspondantes du piston. Mais il est évidemment plus simple de supposer

* L'avance linéaire correspondant à l'avance angulaire $B'K$ est en général de 3 à 5 millimètres, elle est indispensable surtout pour annuler le retard qui résulterait sans cela du jeu qui s'établit dans les articulations par suite du service.

que la ligne KK' représente la course du piston, et alors on obtient immédiatement les positions qu'il occupe quand l'excentrique se trouve aux points $B'B''T'$ ou T , en abaissant de ces derniers points des perpendiculaires sur KK' .

On a ponctué d'une manière semblable dans la figure les périodes correspondantes de la course du piston et du mouvement de l'excentrique, de sorte que toutes les phases du phénomène se trouvent indiquées d'une manière très simple et facile à saisir d'un seul coup d'œil.

La représentation graphique du travail produit pendant une demi oscillation du piston est facile à obtenir d'après ce qui précède ; soit en effet (fig. 316) KK' la longueur de la course du piston, élevons à l'extrémité de cette ligne une perpendiculaire KA égale à la force qui pousse le piston quand le cylindre communique avec la chaudière, et prenons Km égale à la longueur de la période d'introduction. (déterminée dans la figure 315), et enfin achevons le rectangle $KAA'm$. La surface de cette figure représentera le travail produit pendant cette période. Portons ensuite de m en m' une longueur égale à celle de la période de détente et élevons la perpendiculaire $m'd$ que nous supposons égale à la force qui pousse le piston à la fin de cette période. Pendant que le piston parcourt l'espace $m'm'$, la pression de la vapeur aura décroî à peu près suivant la loi de Mariotte, et la force motrice aura varié comme les ordonnées de la courbe $A'd$ ^{**}, de sorte que le travail produit dans cette seconde période sera représenté par la surface..... $A'dm'm$. Enfin, pendant la dernière période $m'K'$ de la course du piston, le cylindre communique avec l'atmosphère. La pression décroît très rapidement suivant une loi que l'on ne peut pas déterminer bien rigoureusement, parce qu'elle dépend d'une foule de circonstances, et se trouve réduite, à la fin de la course, à être peu supérieure à celle de l'atmosphère. En représentant par $K'g$ la force motrice à la fin de la course, le travail de cette troisième période sera représenté par la surface $m'K'gd$.

Pour obtenir le travail utile, il nous reste à retrancher de la surface précédente celle qui représente le travail résistant. Pour cela, prenons Km' égale à la période de compression et élevons la perpendiculaire $m'l$ égale à la force résistante de l'atmosphère. La pression varie pendant cette période suivant une certaine courbe dont les ordonnées peuvent varier depuis $m'f$ jusqu'à KA et même quelquefois au delà. Nous devons donc retrancher d'abord de la surface totale la surface $AKm'l$. En menant ensuite par le point l une parallèle à KK' , et réunissant cette ligne par une petite courbe au point g , nous obtiendrons la surface qui représentera le travail résistant du reste de la course du piston. De sorte que le travail utile ne sera en résumé que la partie non couverte de hachures de la figure que nous venons de construire.

Les dispositions que nous venons d'indiquer sont comme déjà depuis fort longtemps. En 1805, Watt avait déjà adopté le principe de ces perfectionnements ; seulement il donnait très peu de longueur à la période de détente. Mais il faisait un secret de ces détails qui n'étaient connus que de quelques uns de ses élèves. Le Gouvernement Français fit cons-

** L'équation de cette courbe est du 2^e degré ; elle s'obtient avec la plus grande facilité quand on suppose que la vapeur suit dans cet intervalle la loi de Mariotte.

tenue par Miller, élève de Watt, les machines du bateau le Sphinx qui servirent longtemps de modèle aux constructeurs Français; mais aucun d'eux ne remarqua le détail de la réglementation, et leurs machines, en apparence identiques avec celles du constructeur Anglais, donnèrent des résultats beaucoup moins satisfaisants. On fut longtemps sans pouvoir découvrir la véritable cause de cette infériorité. M. Reech, le savant professeur de l'École du Génie maritime, présenta, en 1836, à l'Académie des Sciences, un mémoire dans lequel il déduisait de considérations théoriques le principe des dispositions adoptées aujourd'hui. Ce mémoire resta longtemps dans les mains des Membres de la Commission chargée de l'examiner, et enfin M. Reech le retira sans qu'il en eût été rendu compte. Plus tard, vers 1838, M. Reech renvoya son mémoire au Conseil de l'Amirauté, qui ne lui accorda pas beaucoup plus d'attention que l'Académie des Sciences. Enfin, la question fut agitée par plusieurs Officiers de marine, et on finit par reconnaître la justesse des vues de M. Reech; mais son travail recut très peu de publicité, et on n'appliqua pas immédiatement ses idées aux locomotives. Les machines Anglaises fournies au chemin de fer de la rive droite avaient à très-peu près la réglementation normale. C'est seulement en 1840 que ces importantes modifications furent consacrées par l'expérience, tant en Angleterre que sur le chemin de St. Germain. Depuis cette époque la consommation de combustible a considérablement diminué. Cette économie est due en grande partie à ces perfectionnements mécaniques, et aussi à l'organisation du service qui intéresse le mécanicien à dépenser le moins possible de charbon en lui accordant une prime sur l'économie qu'il réalise.

On a reconnu qu'il n'y avait pas avantage avec les tiroirs à recouvrement à interrompre l'introduction de la vapeur avant les $\frac{3}{4}$ ou les $\frac{2}{3}$ de la course du piston. On voit en effet, d'après la figure 315, que la période de compression augmente en même temps que celle de détente, ce qui fait perdre d'un côté ce que l'on gagne de l'autre. D'ailleurs la pression de la vapeur varie dans les cylindres entre des limites très étendues, et il arrive que si la machine s'arrête dans une certaine position des manivelles, on ne peut plus la remettre en marche directement, et on se trouve obligé, pour repartir, d'employer d'abord la marche en arrière.

On supprime souvent dans la pratique le recouvrement intérieur du tiroir, qui prend alors la forme indiquée dans la figure 317. La construction générale se simplifie un peu dans ce cas particulier. Il suffit, en effet, de prendre (fig. 318) sur la ligne A'A, qui représente la course du tiroir, la distance oa égale au recouvrement extérieur du tiroir et d'élever par le point a la perpendiculaire BB' au diamètre oA, de mener de même par le point o le diamètre cc' et d'abaisser, des points B B', c et C', des perpendiculaires sur la ligne DD', qui représente, à une autre échelle, la course du piston. La ligne DD' fait avec CC' un angle égal à l'angle de calage, comme nous l'avons dit en expliquant la figure 315. La période de détente et celle de compression sont diminuées par cette modification; celle d'échappement se trouve, au contraire, augmentée. Il convient donc de supprimer le recouvrement intérieur du tiroir dans les machines destinées à une marche rapide, et de le conserver pour les machines à petite vitesse.

On n'a pas encore déterminé directement la durée de l'échappement de la vapeur dans les machines locomotives, mais une expérience de M. M. Flachet et Letiez permet

de calculer ce temps d'une manière assez approximative. Ces Messieurs ont fixé un manomètre à l'entrée du tuyau d'échappement. Quand la machine va très lentement, on observe une forte augmentation de pression au moment de l'échappement, puis le mercure redescend pour remonter à l'échappement suivant, et exécute ainsi une série d'oscillations. Mais quand la machine marche avec une vitesse de 8 à 10 lieues à l'heure, le mercure n'a plus le temps d'exécuter ces oscillations en obéissant aux impulsions variées qu'il reçoit, et le manomètre indique une pression moyenne et constante de $\frac{1}{2}$ atmosphère environ. Nous allons, au moyen de cette donnée, nous faire une idée de la durée de l'échappement de la vapeur.

La vitesse de 10 lieues à l'heure répond à $\frac{40,000}{3,600} = 11^m, 11$ par seconde. Le diamètre des roues motrices est de $1^m, 65$, par conséquent elles doivent faire $\frac{11^m, 11}{\pi 1,65} = 2^m, 14$ tours par seconde.

Et, pendant chaque tour de roue, le piston va et revient; il y a donc deux échappements pour chaque cylindre, ce qui fait quatre échappements en tout, à chaque révolution, ou bien $2,14 \times 4 = 8,56$ échappements par seconde. L'intervalle entre chacun d'eux est donc de $\frac{1^s}{8,56} = 0^s, 1168$.

Cela posé, supposons que la pression soit de 4 atmosphères dans le cylindre au moment où commence l'échappement, elle sera égale seulement à celle de l'air extérieur à la fin de cette période; de sorte qu'on peut admettre qu'elle a été en moyenne de 2 atmosphères pendant la durée x de l'échappement. Ce qui nous conduit à poser entre l'inconnue x et les nombres précédemment obtenus la relation

$$2 \times x = \frac{1}{2} \times 0^s, 1168$$

d'où $x = 0^s, 03$. Ainsi, on peut admettre que l'échappement dure environ $0^s, 03$. L'espace angulaire décrit par l'essieu moteur pendant ce temps est égal à $\frac{2,14 \cdot 360^\circ}{0^s, 03} = 23^\circ, 1$. Telle serait la valeur de l'angle de calage déduit de l'observation de la durée de l'échappement. Nous avons vu que cet angle c , dans la pratique 25° à 30° , valeur assez peu différente de la précédente.

Il est à peu près impossible d'arriver par des considérations purement théoriques à la détermination de la largeur la plus convenable à donner au recouvrement extérieur du tiroir. La pratique conduit à le faire à peu près égal à $\frac{1}{4}$ de la course de l'excentrique.

Jusqu'à présent nous n'avons considéré que le mouvement direct de la machine, et nous vu que le rayon de l'excentrique devait être en avant du bouton de la manivelle d'un angle droit augmenté de 25° à 30° . Dans la marche en arrière (c'est-à-dire quand la boîte à feu va en avant) l'excentrique doit occuper une position inverse. Dans les machines qui doivent marcher dans les deux sens, il faut donc employer deux excentriques pour chaque cylindre. Les dispositions du changement de marche ont beaucoup varié. Nous ne décrivons que l'appareil employé dans les dernières machines de Stephenson.

La queue de l'excentrique o de marche en avant (fig. 319) et celle de l'excentrique o' de la marche en arrière sont terminées par des fourchettes ff' qui embrassent et

qui sont fixés par des goujons a et a' à une pièce en fer AB. Cette pièce, vue en dessus, dans le plan (fig. 320) de l'appareil et en coupe à une grande échelle dans la figure 321, est composée de deux parties semblables mn et n'n' (fig. 321) que l'on place l'une après l'autre dans les fourchettes, en introduisant chacun des goujons a dans l'œil destiné à le recevoir. On chasse ensuite aux extrémités des deux pièces les cales c et c' et l'on réunit le tout par des boulons b. La tige T qui conduit le tiroir est maintenue dans son mouvement horizontal par les deux glissières GG et réunie à une pièce carrée en acier P, représentée à une grande échelle (fig. 321) qui peut se mouvoir dans l'espace laissé libre entre les deux pièces combes dont nous venons de parler. Quand l'appareil est dans la position indiquée par la fig. 319, le tiroir est conduit par l'excentrique de la marche en avant; voici comment on peut le faire conduire par celui de la marche en arrière. Le mécanicien pousse le levier L, placé à sa disposition sur la plateforme de la machine, et au moyen de la communication de mouvement indiquée par le dessin, le point B vient de placer en A, et alors le tiroir reçoit le mouvement du second excentrique.

Cette disposition est très simple et elle présente un moyen facile de faire varier la détente. On voit en effet que la course du tiroir a toute son étendue quand la pièce carrée qui termine la tige du tiroir occupe une des extrémités de la coulisse AB, mais elle diminue rapidement d'amplitude quand cette pièce occupe une position intermédiaire; de sorte que le rapport de la longueur de la course à celle du recouvrement du tiroir diminue et que la période de détente augmente par conséquent.

Ce procédé de détente variable est très simple, mais il ne donne de bons résultats qu'autant que la détente ne s'étend pas au delà de la moitié de la course.

Nous allons décrire un autre système de détente variable, celui de Gouzenbach, contre-maître de M. M. Naklin. Dans cet appareil (fig. 322) il y a, au dessus du tiroir, une plaque fixe ab sur laquelle glisse un second tiroir c percé d'une ouverture correspondant, quand le tiroir est au milieu de sa course, à une autre ouverture pratiquée dans la plaque fixe. Ce second tiroir est commandé par l'excentrique de la marche en arrière. Il peut intercepter ou ouvrir la communication de la vapeur avec la boîte du tiroir ordinaire, et par conséquent produire une détente plus ou moins étendue suivant la nature du mouvement qui peut lui être communiqué. Une construction analogue à celle qui nous a déjà servi si souvent nous permet d'analyser les effets de ce tiroir. Soit en effet (fig. 323) AA' la course de ce tiroir, portons à droite et à gauche du cercle décrit sur cette ligne les longueurs oa; oa' égales à l'ouverture a a' du tiroir et élevons par ces points des perpendiculaires au diamètre, enfin, menons la ligne DD' faisant avec la verticale l'angle de calage. La partie d d' de cette ligne pourra représenter à une autre échelle la course du piston. Les pieds des perpendiculaires m' i', m i' à cette dernière ligne seront les points de la course du piston où la vapeur cessera d'arriver sur le piston et recommencera à être introduite par le second tiroir, de sorte que la vapeur sera coupée par le second tiroir pendant la partie i' i' de la course du piston. On voit qu'en augmentant la longueur de cette course, on augmente la durée de la période pendant laquelle la vapeur n'est pas introduite. Au contraire, la période de non introduction diminue en même temps que la course, et enfin, si celle-ci était égale à deux fois l'ouverture de la lumière, le cercle décrit sur cette course a a' serait tangent aux verticales

DK', D'K' les deux points ii se confondraient en un seul, c'est-à-dire que la plaque fixe ne serait fermée qu'un instant infiniment petit. Dans ce cas le tiroir ne produirait pas de détente.

Ce système de détente variable est très simple, mais il offre cet inconvénient que lorsque l'on veut couper la vapeur avant le premier quart de la course du piston, on ne peut plus introduire la vapeur beaucoup au delà des deux tiers de la course, parce qu'alors il arrive que la vapeur se réintroduit avant la fermeture de l'orifice d'introduction par le tiroir distributeur. Il est facile de s'assurer de cette circonstance en discutant l'épave qui correspond à ce système de détente.

Nous avons représenté dans la fig. 324 la coupe du système de distribution à détente variable de Mayer. Le tiroir a qui glisse sur les lumières du cylindre, est conduit par un excentrique comme les tiroirs ordinaires; mais il diffère de ceux-ci en ce qu'il ne laisse pénétrer la vapeur que par deux ouvertures qui le traversent. Sa partie supérieure est, en outre, parfaitement dressée, et deux taquets bb glissent sur cette surface et peuvent intercepter l'introduction de la vapeur à un moment déterminé de la course du piston et forcer ainsi la vapeur déjà introduite à agir par expansion. Ces deux taquets sont montés sur un même arbre qui reçoit un mouvement de va-et-vient d'un levier dont l'autre extrémité est mise en jeu par la tête de la tige du piston. Les prismes bb ferment les ouvertures d'autant plus tard qu'ils sont plus rapprochés: on peut donc faire varier la durée de la détente en changeant la distance respective de ces deux corps; on obtient facilement ce résultat au moyen de la disposition suivante: les taquets b sont montés sur une tige d garnie de pas de vis tournés en sens contraire et terminée par une partie carrée qui traverse une roue dentée e commandée par une chaîne à la Vaucanson qui s'enroule sur un arbre g (fig. 325) terminée par une manivelle placée à la portée du mécanicien. La même chaîne fait tourner en même temps et de la même quantité les arbres filetés des deux cylindres, de sorte que la détente se fait, de la même manière, dans les deux machines.

On se rend compte du mouvement relatif du tiroir et du taquet au moyen d'une construction analogue à celle que nous avons expliquée dans d'autres circonstances. La recherche du moment auquel commence ou finit l'introduction de la vapeur se réduit à un simple problème de géométrie dont la figure 326 donne la solution.

En discutant cette construction géométrique, on reconnaît que la détente de M. Mayer est sujette, quoique à un moindre degré, à l'inconvénient que nous avons signalé dans la détente de M. Gouzenbach.

On a essayé sur le chemin de S^t Germain (R. D.) un système de détente variable applicable à tous les degrés de détente. Le principe de ces nouveaux appareils est facile à concevoir. Une plaque B, percée d'une ouverture, est animée d'un mouvement de va et vient en glissant sur une valve fixe A. On comprend que si la course du tiroir B était égale à la distance ab qui sépare l'extrémité de la valve de l'extrémité de la lumière du tiroir, la vapeur s'introduirait toujours; mais si on avance la valve vers b, la vapeur ne s'introduira plus que pendant une partie du temps, d'autant plus petite que l'intervalle ab sera moindre, et même on pourrait ainsi intercepter toute communication. Ce principe est facile à appliquer; la fig. 327 indique la forme que prendrait dans ce cas une des moitiés du tiroir: a serait la valve fixe, b le tiroir conduit par le piston, comme les taquets de M. Mayer, et d un tiroir ordinaire qui ferait communiquer alternative

ment une des faces du piston avec la vapeur ou avec l'air extérieur.

On a employé une autre disposition du même système, parce qu'elle n'exigeait pas comme la précédente une disposition particulière des cylindres. Le tiroir a, analogue aux taquets, frotte directement sur le tiroir ordinaire c. Les valves bb sont placées au dessus. Une tige t qui traverse une boîte à étouper, permet de les éloigner ou de les rapprocher au moyen du mécanisme indiqué dans le plan fig. 328. Chacune des valves est fixée à des tiges a a' et bb' qui sont réunies d'autre part aux extrémités de petits leviers qui peuvent tourner autour des points fixes o et o'. On comprend alors qu'en poussant ou en tirant la tige t, on rapproche ou on éloigne les valves, et par suite on augmente ou on diminue la durée de la détente.

Ce système est très simple; il présente l'avantage d'employer la détente dans des limites aussi étendues qu'il est possible de le désirer, et les valves ainsi disposées peuvent servir de régulateurs en permettant d'employer toujours la vapeur à pleine pression, avantage que ne présente pas le régulateur ordinaire, puisqu'il ne laisse pénétrer dans les cylindres, quand il n'est pas entièrement ouvert, que de la vapeur à une pression moindre que celle de la chaudière, ce qui entraîne une perte de force. Mais il offre beaucoup de surfaces frottantes.

Nous avons maintenant fait connaître les principaux détails du mécanisme des machines locomotives. Nous terminerons par quelques considérations générales sur leur dépense de combustible, comparé à ce que l'on obtient avec les machines fixes.

On a vu au commencement du cours que le succès obtenu par la machine la Fusée de Stephenson, était dû, en grande partie, à l'emploi d'une chaudière tubulaire et au tirage énergique produit par l'échappement de la vapeur dans la cheminée. Il résultait de ces dispositions une combustion très vive, l'air traversait les tubes à une très haute température, et on produisait ainsi une grande quantité de vapeur dans un temps très court. Pendant quelque temps tous les efforts des constructeurs tendirent à obtenir une grande accélération de vitesse. Ils rendirent par conséquent le tirage plus énergique et par conséquent le passage de l'air plus rapide encore. Mais on s'aperçut bientôt que la consommation de combustible était très considérable et que la détérioration du matériel était rapide. On chercha donc à entrer dans une voie d'économie et les perfectionnements eurent pour but principal la réduction de la dépense de combustible. On fut ainsi conduit à augmenter la surface de chauffe et à diminuer l'intensité du tirage. L'air chaud traversait moins vite la chaudière et avait ainsi le temps d'abandonner une plus grande partie de sa chaleur; d'un autre côté on pouvait élargir le tuyau d'échappement, la vapeur sortait avec moins de pression et son travail résistant était moins considérable. Le poids de la machine augmenta par suite dans une grande proportion, mais l'inconvénient de trouver un poids plus considérable fut compensé parce que l'adhérence s'en accrut et qu'on rendit par là moins fréquent le glissement des roues motrices sur les rails. Ainsi se trouvent en partie expliqués les avantages des machines fortes. Quand on est obligé de faire exécuter à une machine un grand effort, il faut diminuer la détente et rendre le tirage plus actif. La consommation augmente alors dans une bien plus grande proportion que le travail produit.

Nous allons donner quelques nombres relatifs aux machines fixes pour les comparer aux machines locomotives.

Une machine fixe bien construite consomme par heure et par force de cheval... $3,50^k$ de charbon.
 Chaque kilogramme de houille évapore... $7,00$ d'eau.
 L'eau évaporée par heure et par force de cheval est par conséquent de... $24,50$.
 La surface de chauffe par la force de cheval est de... $1^m,12$.
 La surface de la grille de... $0,04$.
 La quantité d'eau évaporée par heure par mètre carré de surface de chauffe est donc de 22^k .

Une machine locomotive peut donner jusqu'à 60^k de vapeur par heure et par mètre carré de surface de chauffe. La surface de la grille n'est que $\frac{1}{75} = 0,013$ de la surface de chauffe.

Une locomotive avec neuf ou dix wagons de voyageurs brûle 7 à 8^k de coke par kilomètre parcouru. Les bonnes machines à détente variable peuvent n'en brûler que 5^k . Les machines pour marchandises consomment de 10 à 11^k par kilomètre parcouru.

Elles dépensent environ 55^k d'eau par kilomètre.

Un convoi abandonné à lui-même sur une pente de $0^m,01$ sur le chemin de Versailles (R. G) prend une vitesse uniforme de $13^m,5$ par 1". Sur le chemin de la rive droite, dans une pente de $0^m,005$ la vitesse uniforme est de 5^m par 1". Ces deux expériences conduisent au coefficient de résistance :

$$R = 0,00421 + 0,0000317v^2$$

v étant la vitesse.

Cette formule est commode à cause de sa simplicité; cependant il ne faut pas la regarder comme absolue. La résistance d'un convoi varie entre d'énormes limites, selon l'état de l'atmosphère, la direction ou l'intensité du vent, le soin apporté au montage, le diamètre des roues et des fusées et mille autres circonstances. À de petites vitesses, on a vu des wagons dont la résistance variait entre $0,01$ et $0,002$ du poids.

Quand on connaît le coefficient de résistance, il est facile de calculer la force en chevaux d'une machine qui traîne un convoi d'un poids donné avec une vitesse connue par seconde. Il suffit en effet de faire le produit de ces trois nombres et de le diviser par 75 . Ainsi, par exemple, soit un convoi de 15 voitures pesant en tout $75,000^k$, marchant avec une vitesse de 14^m par 1" et admettons que $R = 0,01$, on aura pour la force de la locomotive $\frac{75,000 \times 0,01 \times 14}{75} = 140$ chevaux.

Chapitre XIV Quelques résultats économiques relatifs à l'exploitation des Chemins de fer.

Dans les frais d'exploitation des chemins de fer, il est une partie fixe indépendante du nombre des trains et de l'espace parcouru par chacun d'eux. Cette portion de la dépense est affectée à la police du chemin, aux frais généraux d'administration centrale, aux employés des gares et aux frais d'éclairage et de chauffage. Elle comprend aussi les frais d'entretien des bâtiments et le prix de renouvellement de la voie.

Ce dernier article de dépenses a une grande importance. La durée moyenne des traverses convenablement préparées peut être estimée à vingt ans. Le mode de préparation le plus efficace est celui du docteur Boucherie; il s'applique au bois nouvellement abattu et dans lequel la cessation

de la vie végétale n'a pas encore oblitéré les vaisseaux capillaires dans lesquels circule la sève. Il fait pénétrer dans ces tubes, à l'aide d'une pression médiocre, un liquide qui déplace la sève devant lui; celle-ci sort par une extrémité, tandis que le liquide injecté pénètre par l'autre. Le liquide le plus efficace comme agent préservateur de la pourriture est de l'eau contenant du sulfate de cuivre en dissolution. De l'eau et du chlorure de calcium maintiennent le bois dans un état constant d'humidité et préviennent les fentes et les déformations du bois neuf, lorsqu'il perd son eau par suite de son exposition à l'air.

On obtient des résultats assez satisfaisants par une simple immersion du bois dans des dissolutions de sulfate de cuivre bouillant; la surface seule du bois se trouve ainsi modifiée, mais sa conservation paraît protéger l'intérieur contre l'envahissement de la pourriture.

On a employé avec succès en Angleterre l'immersion des traverses dans la créosote liquide résultant de la distillation de la houille dans les usines à gaz.

La durée des rails dépend avant tout de leur qualité et surtout du soin qui a été apporté dans la soudure des mises parallèles entrant dans la composition des paquets; lorsque cette soudure n'est pas bonne, le poids des roues et des charges qu'elles supportent fait glisser les diverses parties parallèlement au plan de soudure, et le rail se décompose en fibres qui se séparent de plus en plus. Quand la soudure est parfaite, la durée du rail est très considérable, et l'on en voit qui paraissent à peine altérés après avoir eu de longues années d'un service considérable.

On peut estimer que les rails de dimension ordinaire composant un chemin à double voie doivent être remplacés après avoir donné passage à 30,000,000 de tonnes tant dans un sens que dans l'autre.

Les bandages des machines locomotives qui ont besoin d'être retournés après un parcours de 20,000 Kilomètres environ, et qui sont fabriqués avec du fer de qualité bien supérieure, offrent une résistance qui s'élève au double au moins de ce chiffre.

Lorsque les rails sont usés sur l'une des surfaces, on les retourne, et lorsque la deuxième face est usée à son tour, on les place autant que possible dans les voies de garage; lorsqu'enfin cette ressource est épuisée, les rails sont livrés aux usines à fer où on les reprend à peu près au prix de la fonte et où ils sont transformés en rails neufs.

Il résulte de cet exposé que l'on peut aisément calculer pour un chemin de fer donné la dépense sur laquelle on doit compter pour le renouvellement de la voie; dans des circonstances ordinaires, une somme de 600^f mise de côté par an et par Kilomètre de double voie, représente la détérioration de la voie; cette somme placée à intérêts composés forme un fonds qui s'accroît dans les premières années où le renouvellement est peu important, est entamé plus tard et disparaît au bout d'une certaine période après laquelle les frais de remplacement deviennent à peu près constants.

Il est inutile d'affecter des fonds au renouvellement du matériel roulant. Sur presque tous les chemins de fer, l'entretien courant a pour résultat de laisser à la fin de l'exercice le matériel dans un état meilleur qu'au commencement.

La partie fixe de la dépense est à peu près proportionnelle à la longueur du chemin, et l'on peut l'évaluer à tant par Kilomètre et par an. Elle varie de cinq à douze mille francs. Le premier de ces deux chiffres correspond à des chemins qui font médiocrement leurs affaires et qui sont dans des provinces éloignées, comme le chemin de Strasbourg à Bâle. Les chemins qui partent de

Paris et qui sont d'une petite longueur, tels que le chemin de Paris à Orléans, offrent des exemples du second chiffre. Quand le railway s'allonge, les frais diminuent à mesure qu'on s'éloigne de la Capitale; ainsi, la partie fixe des frais du chemin de fer du Nord est de 12000^f sur la section de Paris à Amiens, mais est moindre au delà de cette ville.

Le prix du parcours des trains est de 1.^f20 à 1.^f50 par kilomètre. Il varie avec le prix du charbon, le nombre et la raideur des pentes, etc. On peut d'après cela connaître le prix total de la traction en connaissant la marche des convois.

Pour donner une idée de la manière dont se décompose ce chiffre de 1.^f20 à 1.^f50, nous citerons comme exemple le compte suivant:

Frais généraux pour le salaire des employés principaux..... 0,0278^f
 Personnel.

Mécaniciens et Chauffeurs.....	0,1080	}	0,2240
Trimes.....	0,0505		
Déplacements et menues dépenses.....	0,0179		
Personnel des dépôts, nettoyeurs, etc.....	0,0470		

Matières.

Combustible.....	0,3000	}	0,3700
Graissage.....	0,0290		
Service de l'eau.....	0,0256		
Eclairage des machines.....	0,0042		
Dépense des dépôts.....	0,0059		
Entretien de l'outillage.....	0,0033		
Location de matériel.....	0,0012		

Réparations.

Machines.....	0,3060	}	0,3700
Tender.....	0,0640		

Total..... 0,9918^f

La réparation des voitures n'a d'abord coûté que de 0.^f15 à 0.^f20. Ce prix s'accroît à quelque temps à mesure que les wagons deviendront plus vieux; puis deviendra stationnaire. On peut considérer ce dernier article comme devant porter le prix du parcours des trains par kilomètre au prix indiqué de 1.^f20 à 1.^f50.

Étudions à part chacun des éléments de ce prix. Un mécanicien et un chauffeur sont attachés à chaque convoi. Le mécanicien a le chauffeur sous ses ordres et il est responsable de sa machine. Son salaire se divise en deux parties: l'une fixe, et l'autre qu'il peut augmenter par son intelligence. La principale dépense d'une locomotive étant le charbon, il est de l'intérêt de l'Administration du chemin qu'on en brûle le moins possible. En conséquence elle alloue à chaque mécanicien 12^{kg} de coke par kilomètre parcouru, et lui donne la moitié du prix du combustible qu'il économise. Comme on ne brûle ordinairement que 10^{kg} par kilomètre, il peut aisément économiser

deux kilos de coke, et s'il est intelligent, il peut régler son feu de manière à n'en brûler que 8^{kg} ou 9^{kg}. Une prime en aussi attachée à la régularité du service. Elle est proportionnelle à l'espace parcouru par le convoi. Ces deux primes forment la partie variable du traitement des machinistes; elle peut s'élever à-peu-près à la moitié de leurs appointements fixes. Un mécanicien gagne ainsi 300 à 400^f par mois.

La condition de brûler leur fumée prescrite dès l'origine aux locomotives, a été traduite par l'usage de n'employer qu'un combustible qui n'en produise pas, le coke; ce n'est qu'accidentellement et par gros morceaux qu'on brûle de la houille. Cette matière pétille et se brise en petits morceaux qui s'introduisent dans les tubes à fumée et les bouchent. Elle produit en outre une fumée abondante qui couvre d'une poussière noire tous les objets qu'elle touche. On transforme toujours la houille en coke. Cette opération se fait dans de grands fours qui contiennent de trois à huit mètres cubes de charbon. On chauffe d'abord la sole du four, et quand elle est rouge on y verse la houille. La chaleur du four distille cette matière, des gaz se dégagent, brûlent et produisent une nouvelle quantité de chaleur. Les couches supérieures se transforment les premières en coke. Le plan horizontal qui sépare la partie distillée de celle qui ne l'est pas, s'abaisse de 0^m,25 environ par jour. Si donc on a donné un mètre d'épaisseur à la couche de houille, elle mettra quatre jours à se transformer en coke.

Le coke est dur, brillant, brûle sans beaucoup de flamme, et ses parties adhèrent assez entre elles pour que le courant d'air entraîne peu de matières dans les tubes abducteurs. Il doit contenir le moins possible de matières terreuses qui ont l'inconvénient de le diviser. Il importe donc de séparer exactement la houille des schistes et des pierres qui y sont mêlés. En Angleterre où le charbon se présente par grandes masses, cette séparation est aisée; mais elle est plus difficile sur le continent où la houille se trouve en couches contournées, d'épaisseurs très variables. Il faut alors la purifier. Les gros morceaux sont presque purs; ils ne contiennent que 2 à 3 p 100 de matières terreuses. Les petits morceaux sont moins purs et donneraient 20 à 25 p 100 de cendres, si on ne les nettoyait pas. On commence par les jeter sur une claie dont les vides ont environ 0^m,04 et où passe la majeure partie des pierres et de la terre. On lave la houille qui a traversé la claie. On se sert pour cela d'une caisse (fig. 329) rectangulaire, remplie d'eau, traversée par deux séries de barres de fer formant deux grilles superposées. Les barres inférieures sont plus rapprochées que celles qui sont au dessus. La caisse communique à un cylindre plein d'eau dans lequel se meut un piston. On place la matière sur la première grille et on enfonce le piston. L'eau s'élève et soulève la houille; cette matière est moins dense que les parties stériles dont on veut se débarrasser, et tend à se mettre à la partie supérieure de la masse. On soulève le piston, l'eau rentre dans la caisse et entraîne les parties terreuses qui tombent au fond de l'appareil. Quand on a fait manœuvrer plusieurs fois le piston, la houille se trouve à la partie supérieure et les parties stériles au dessous de la première grille. On enlève à la pelle la houille qui la recouvre, et on en met de nouvelle. Quand l'intervalle des deux grilles est plein de matières stériles, on enlève les barres qui forment la première grille et on ôte les matières terreuses dont on a voulu se débarrasser. Ce procédé nettoie fort bien la houille, et économise sur le prix de cette matière plus que ne coûte l'opération elle-même.

Une

Une bonne houille ne doit pas donner plus de 6 p^o de cendres. Quand on doit recevoir le coke, on en brûle une petite quantité dans une compelle, et on le paie en raison de sa pureté. L'introduction de cet usage par la Compagnie du chemin de fer du Nord, dans ses achats de coke, a conduit à une amélioration très remarquable dans sa qualité, et tout porte à croire que le chiffre de 6 p^o sera plus tard notablement réduit. Le lavage de la houille dans les mines de Belgique ajoute de 1^{er} à 2^{es} au prix de revient du coke.

Les chemins de fer ont donné lieu à de très graves accidents dont le renouvellement devient heureusement de plus en plus rare. Ce progrès est dû aux soins minutieux apportés à l'entretien du matériel et à celui de la voie, à la qualité et à la force des essieux et des bandages. En ce qui concerne la voie, il est un point sur lequel l'attention des Ingénieurs doit être appelée surtout: c'est le maintien de l'écartement des rails. On a remarqué que les rails se déplacent et marchent dans le sens du mouvement des trains qui les parcourent; ce mouvement est plus rapide dans les parties en pente et est retardé dans les rampes. Si donc on n'a pas le soin de rétablir les écartements ménagés au moment de la pose, les rails viennent à se toucher, des particules de sable se réunissent aussi dans les joints, une pression souvent considérable se produit d'un rail à l'autre. Elle est quelquefois assez forte pour qu'il devienne impossible d'enlever un rail, à cause de la force avec laquelle il est comprimé par les rails adjacents. Cet effet tend à se produire surtout dans les points où une rampe succède à une pente. Si les rails étant dans cet état de tension, une élévation de température vient à se produire, cette tension peut acquies de très fortes proportions; elle peut aller jusqu'à soulever la voie sur une certaine longueur.

Lorsque les rails sont dans cet état de tension excessive, qui approche de la limite qu'ils peuvent supporter, ils ont une forte tendance à se plier dans le sens de leur plus faible dimension; le passage d'un train est une cause suffisante pour détenir l'équilibre. Les rails se plient latéralement entre deux traverses consécutives; quelquefois, lorsque les traverses ne sont pas très bien maintenues par le ballast, celles-ci suivent ce mouvement latéral. La voie s'ondule d'une manière très prononcée latéralement, de façon à rendre aux rails la longueur qui correspond à l'état de la température et faire cesser la pression. Ce désordre dans la voie rend la position d'un train lancé, à grande vitesse extrêmement dangereuse, et il en résulte souvent une sortie de la voie avec toutes les conséquences redoutables qui en sont la suite.

Ces simples réflexions acquies de l'importance, si l'on remarque que ces grands naufrages deviennent plus rares à mesure que l'expérience acquise par les Agents secondaires augmente les garanties que l'on a quant à l'entretien des voies; qu'ils se sont produits plus souvent sur des lignes droites que sur des courbes, pendant le jour que pendant la nuit, pendant la belle saison que pendant l'hiver. Elles sont de nature à faire regretter qu'on n'ait pu encore trouver un moyen pratique de maintenir les rails à leur place dans les chemins de fer sur traverse, comme cela se fait de soi-même pour les rails posés sur des longrines.

Fin du Cours.



11/68

5763

Q 41563

Pl. I.

Fig. 1.

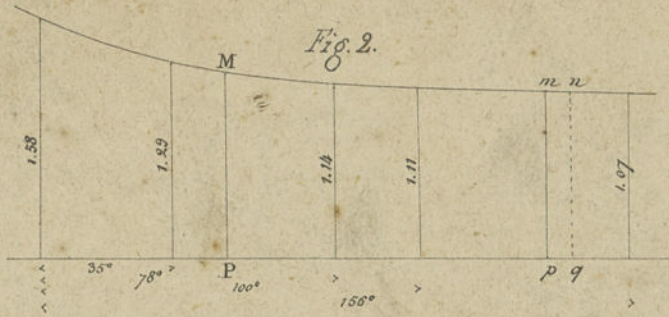
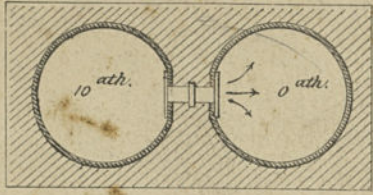


Fig. 4.



Fig. 5.

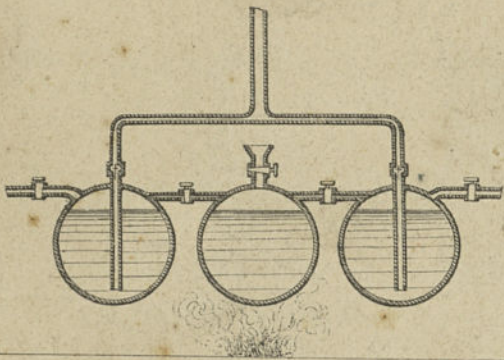


Fig. 6.

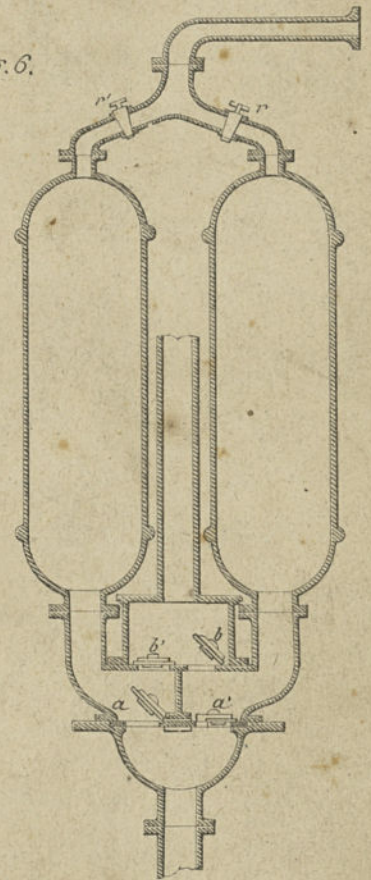


Fig. 3.

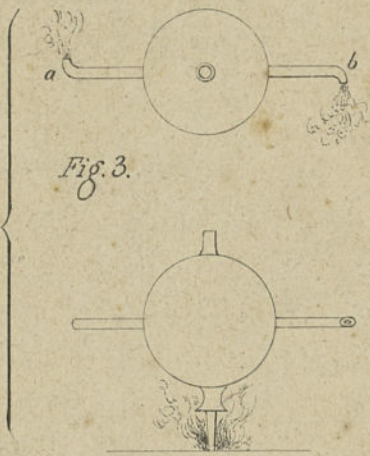


Fig. 7.

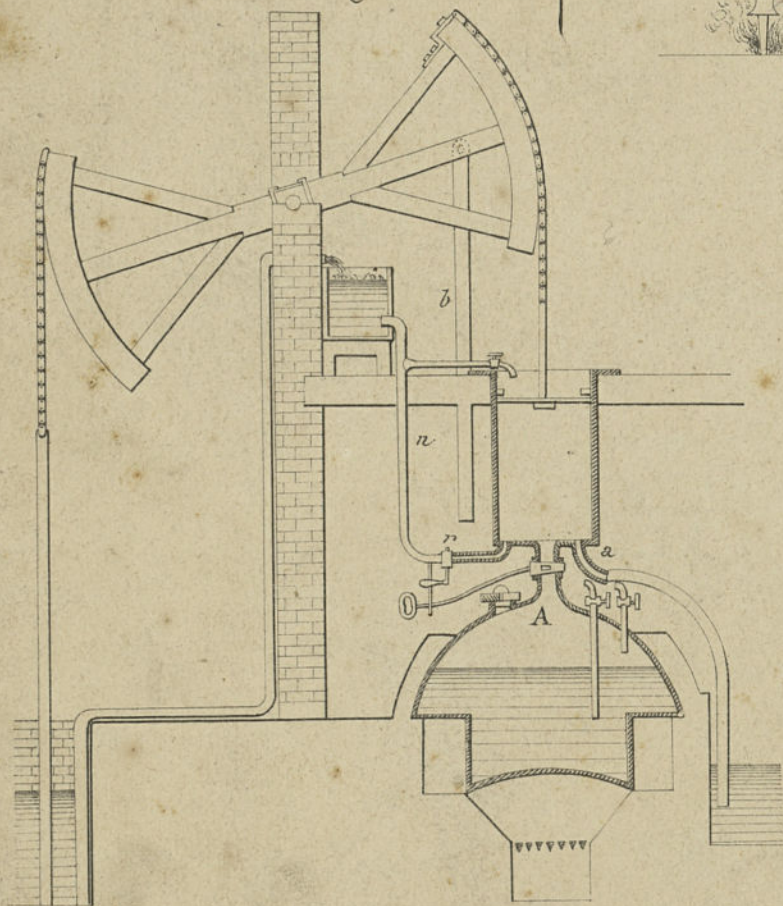
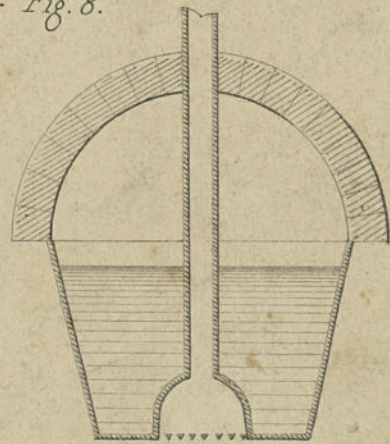


Fig. 8.



BU LILLE

BIBLIOTHEQUE UNIVER
SCIENCES
LILLE

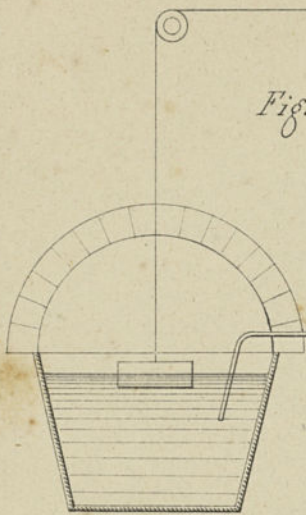


Fig. 9.

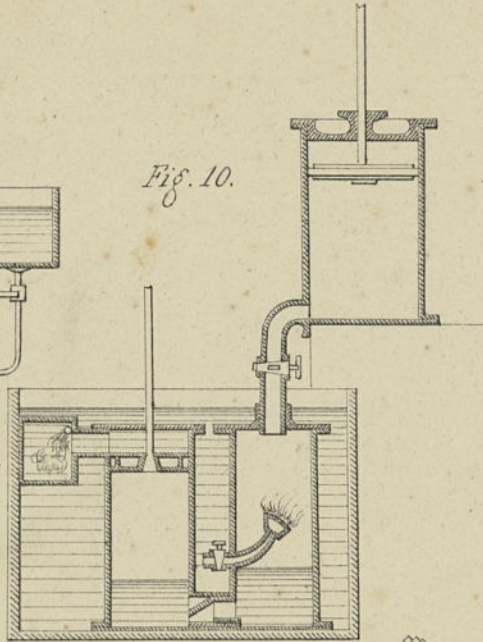


Fig. 10.

Fig. 11.

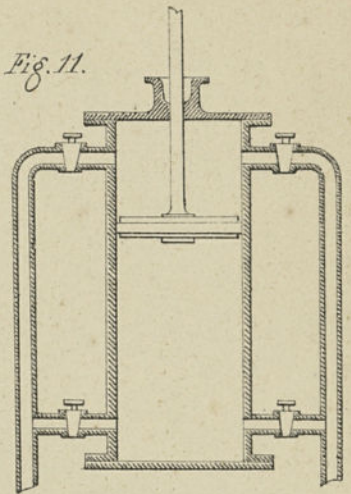


Fig. 12.

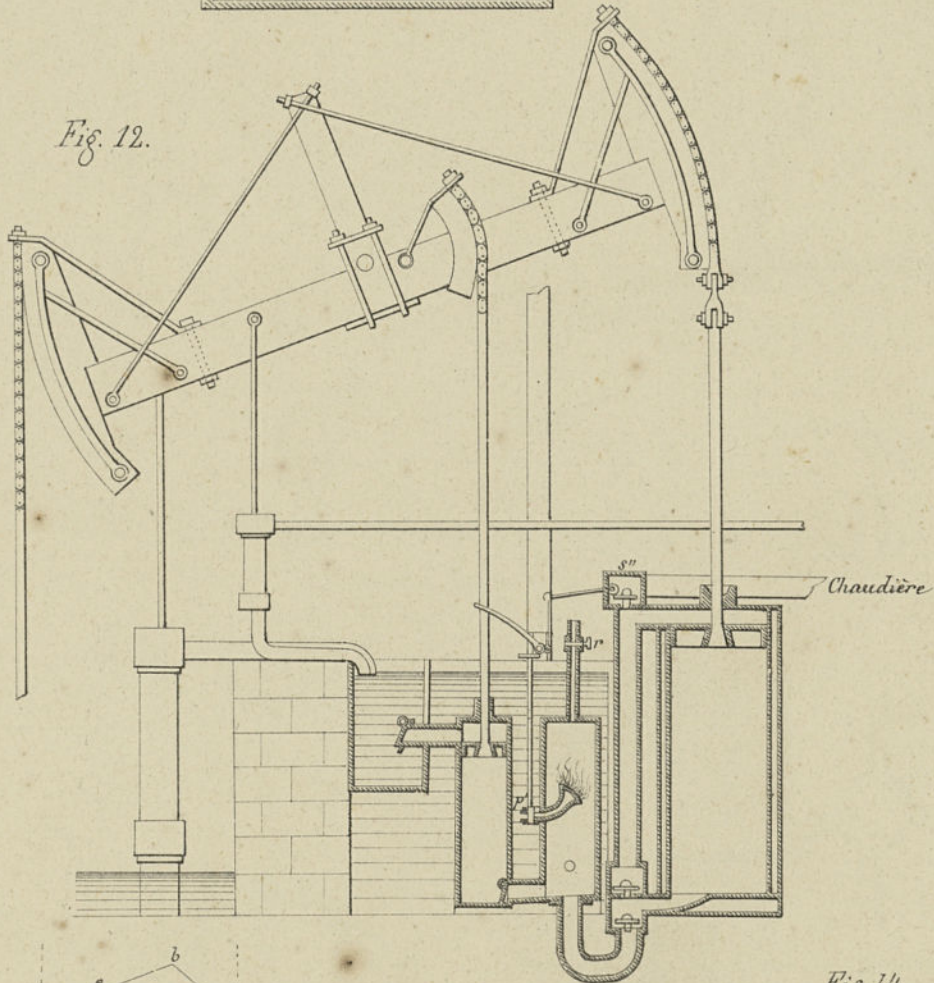


Fig. 13.

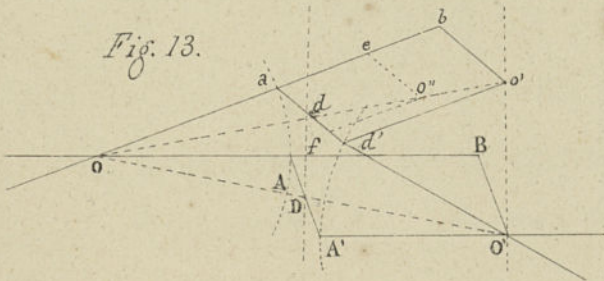


Fig. 14.

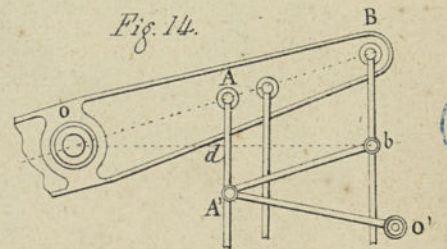


Fig. 15.

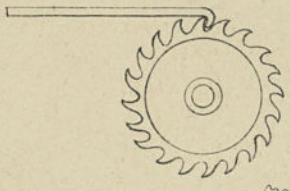


Fig. 16.

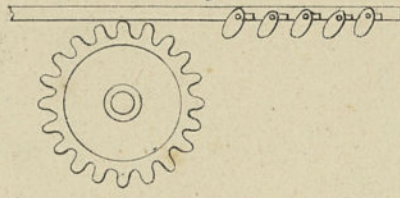


Fig. 17.

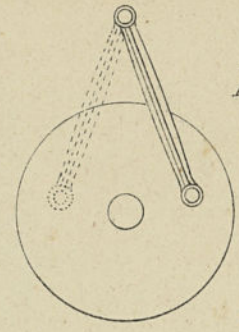


Fig. 18.

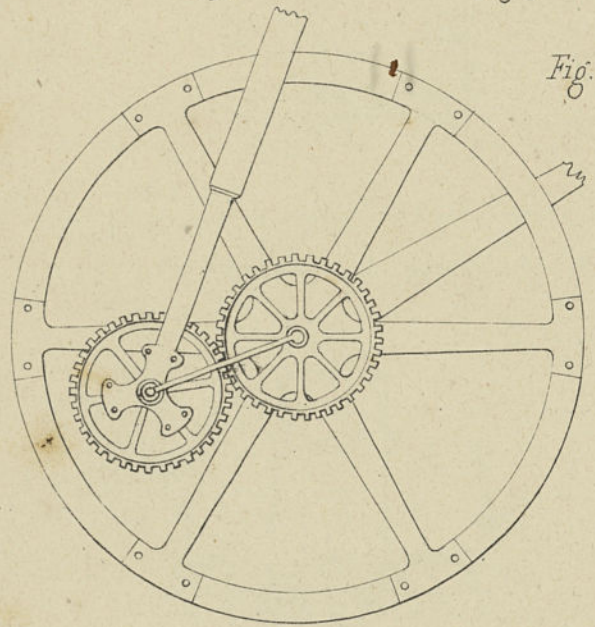


Fig. 19.

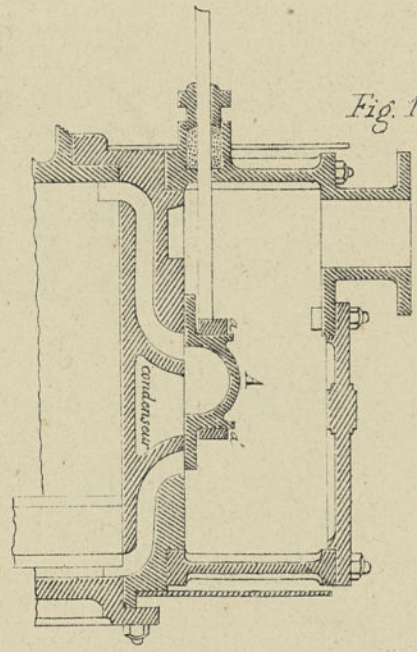


Fig. 20.

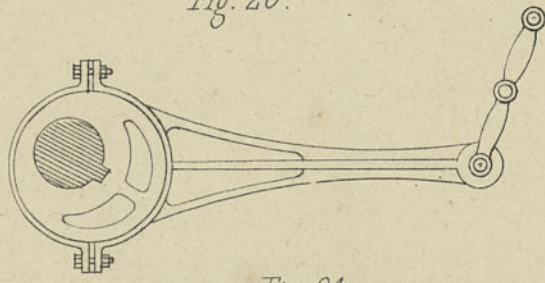


Fig. 22.

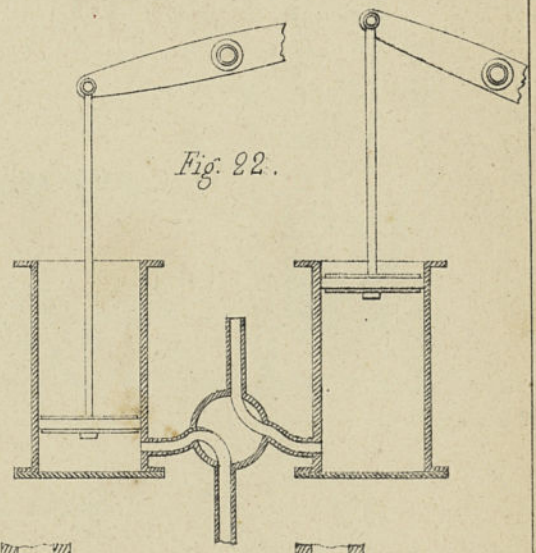
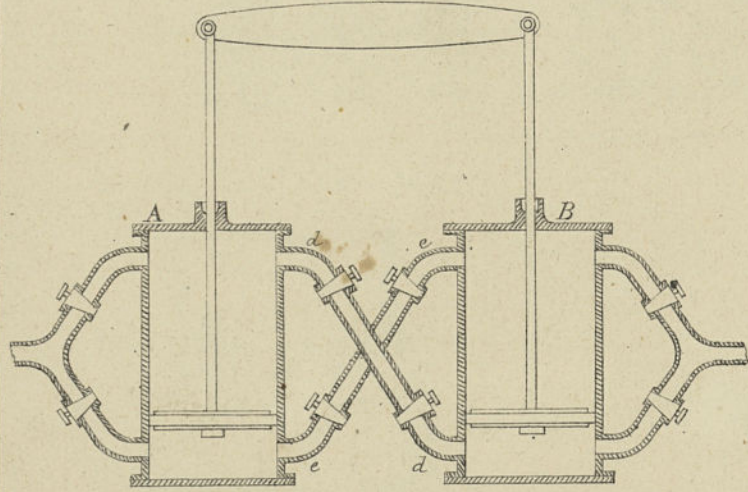
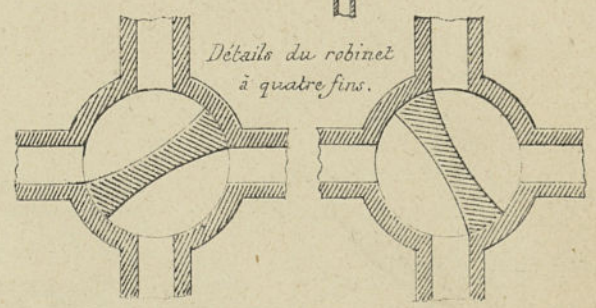


Fig. 21.



Détails du robinet à quatre fins.



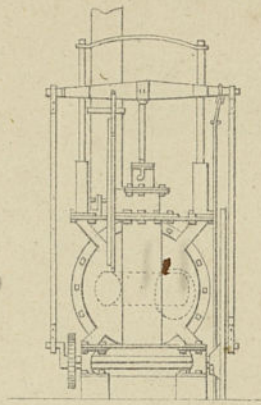


Fig. 23.

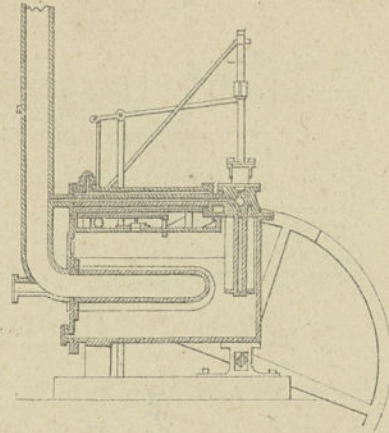


Fig. 24. Locomotives à engrenages.

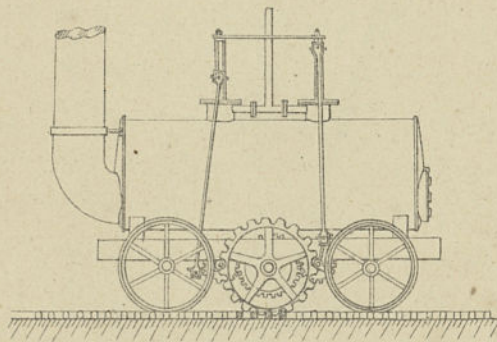


Fig. 25. Locomotives à Patins.

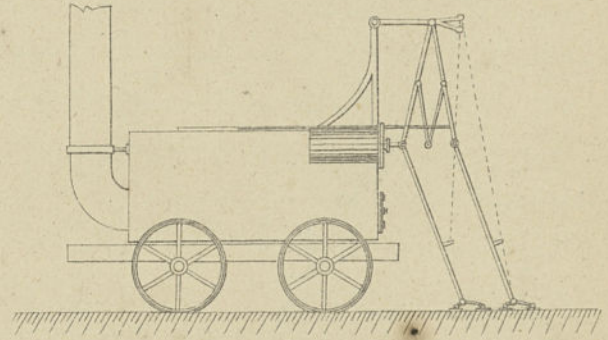


Fig. 26. Locomotives à chaîne sans fin.

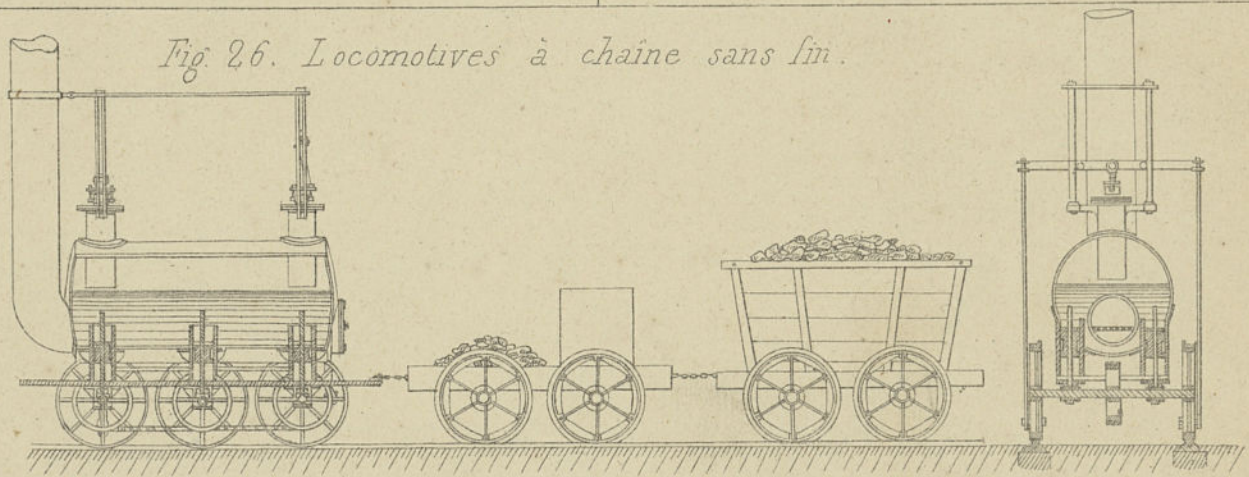


Fig. 27. Locomotives à roues couplées.

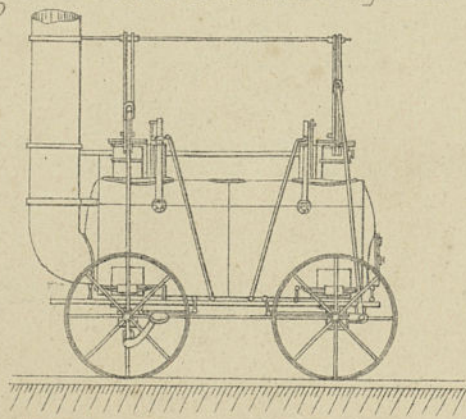
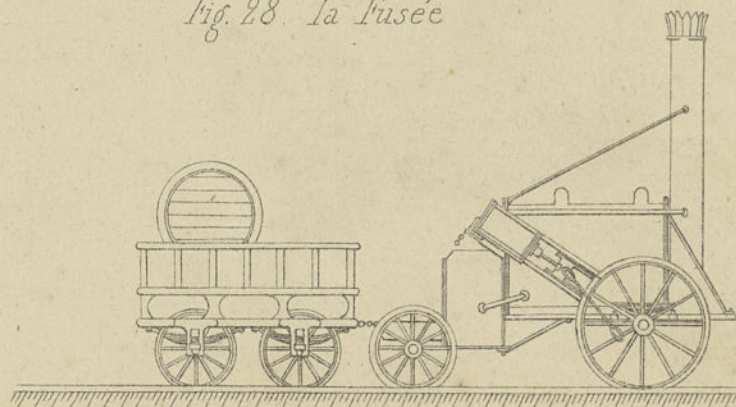


Fig. 28. la Fusée



BU
LILLE

Fig. 29. Chaudière tubulaire de Séguin.

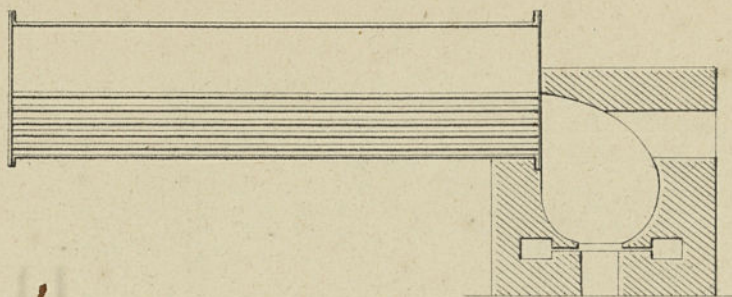


Table des forces élastiques de la vapeur d'eau. (M^r Regnault).

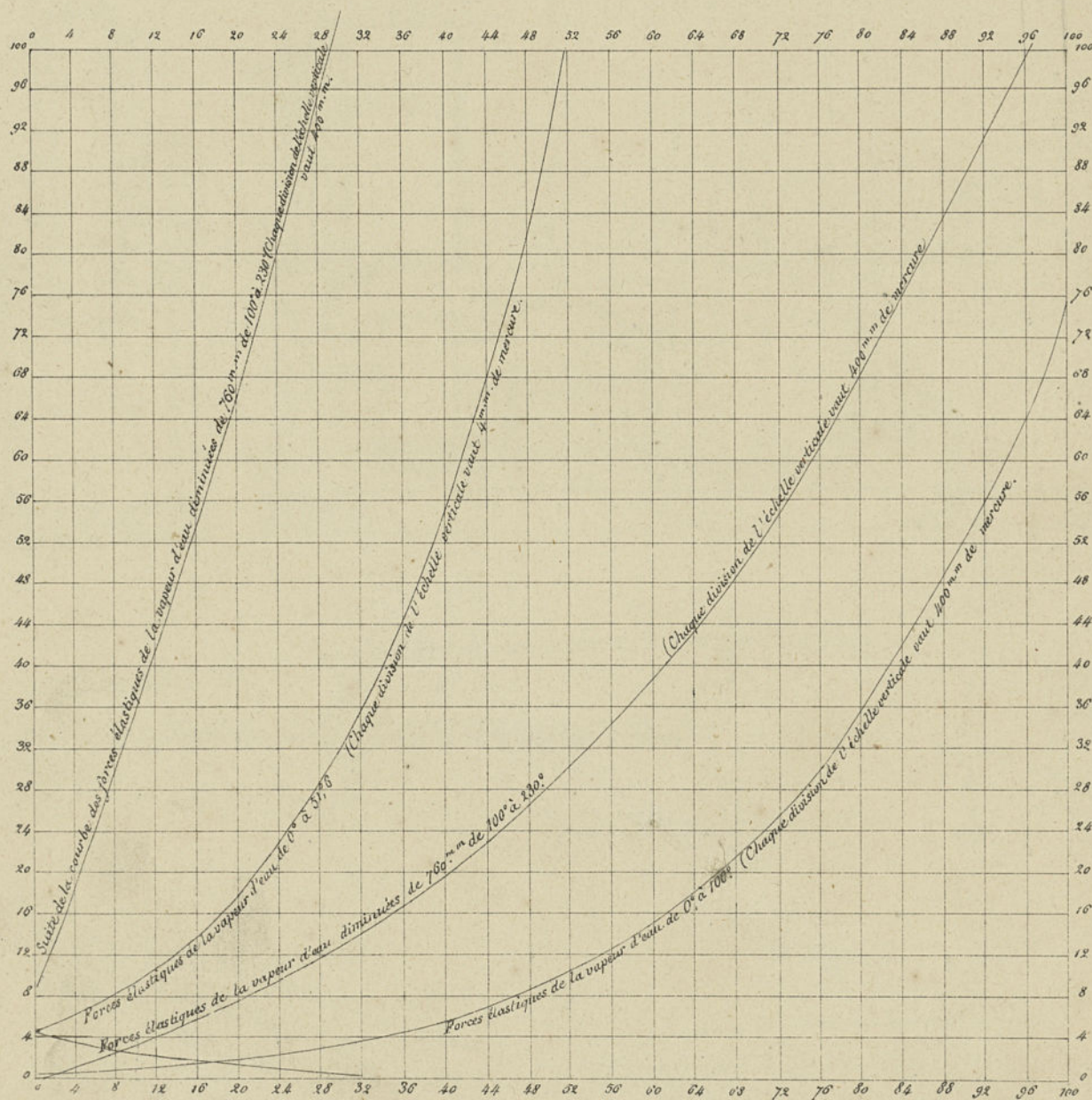


Fig. 30.

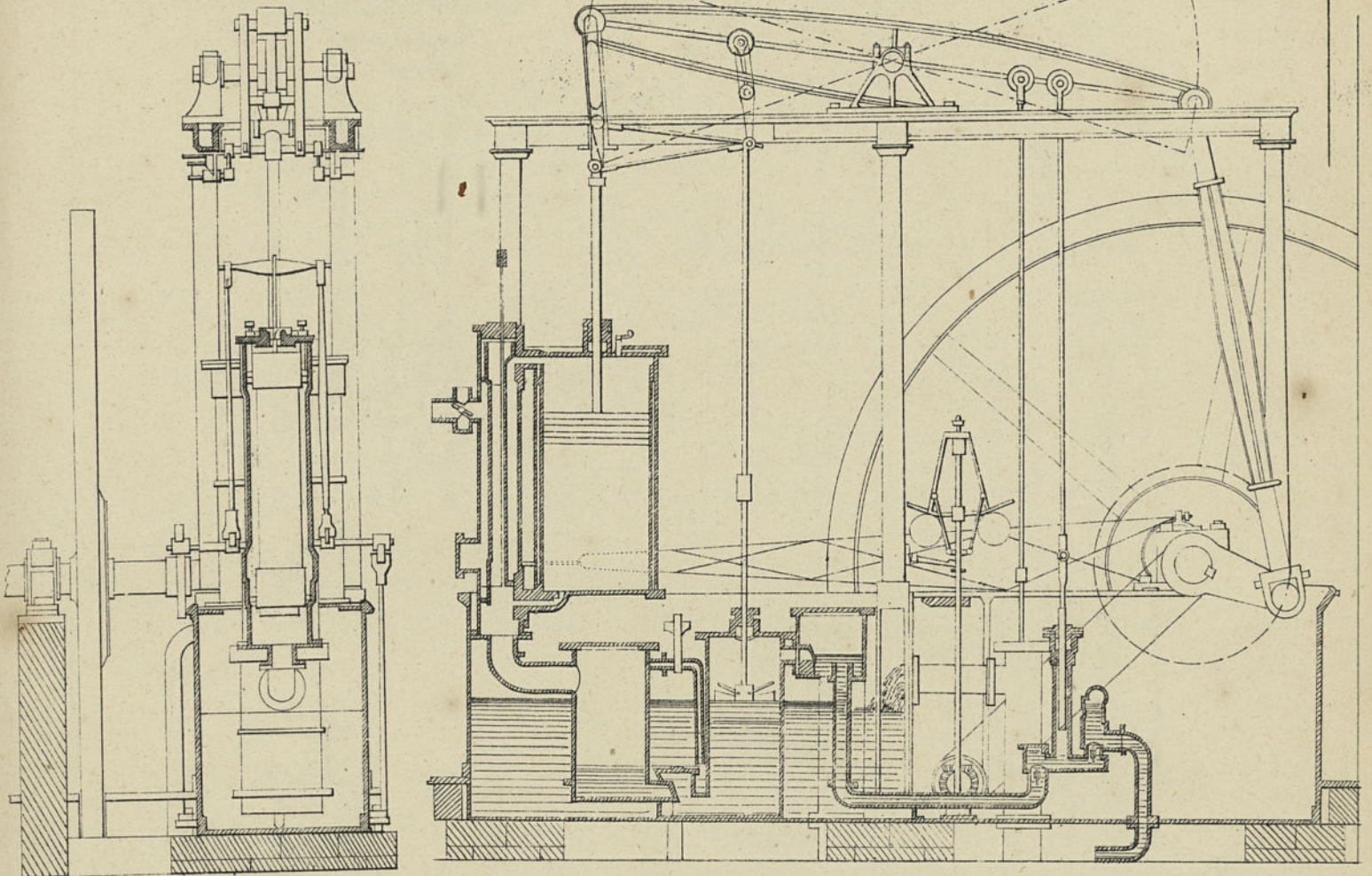


Fig. 31.

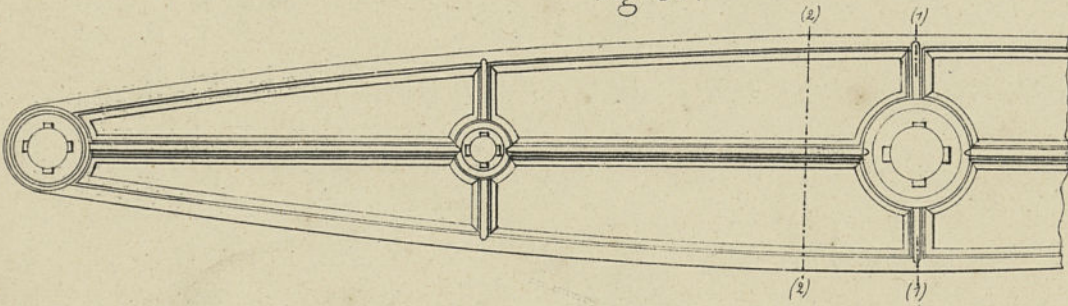


Fig. 32.

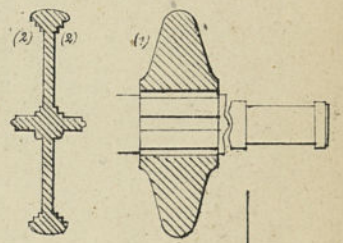


Fig. 33.

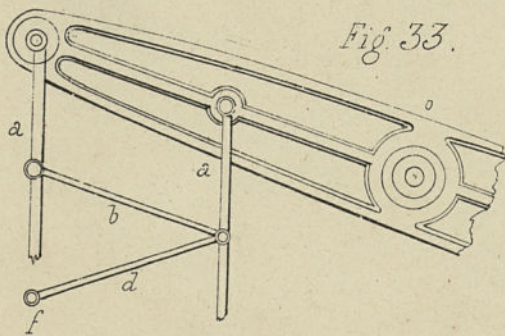
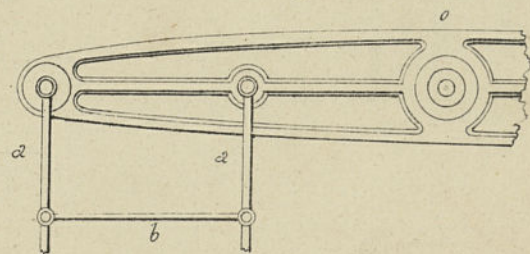


Fig. 34.



M.V.

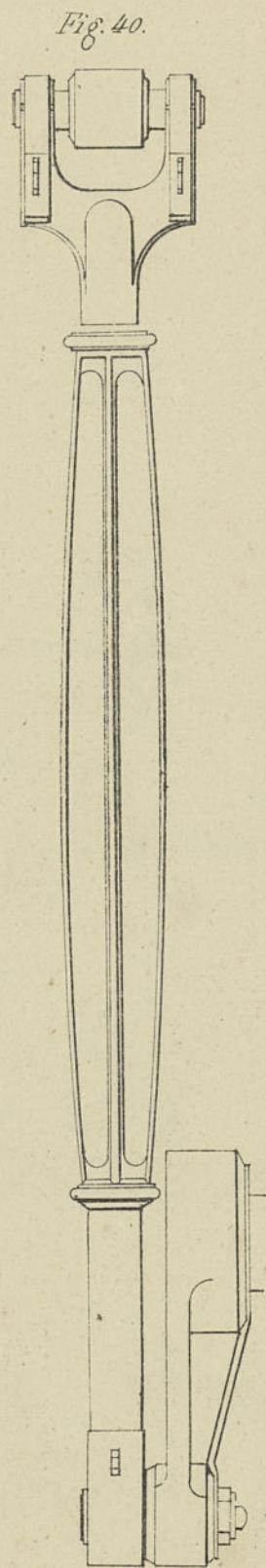
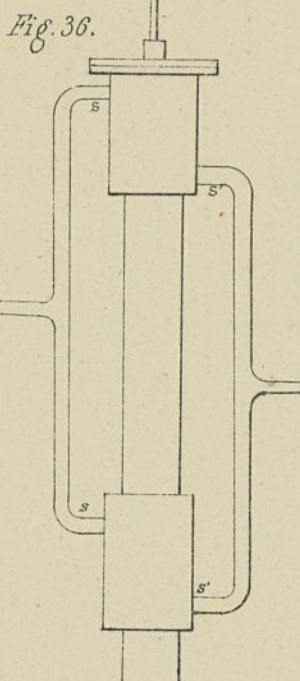
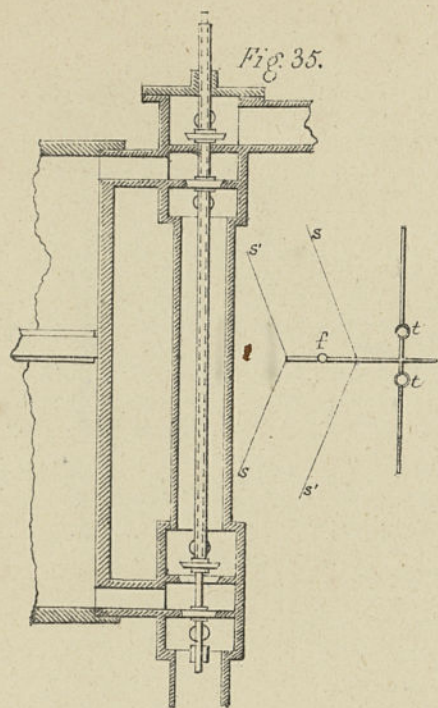


Fig. 37.

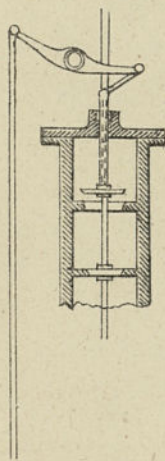


Fig. 38.

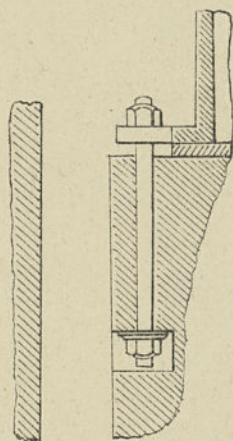


Fig. 39.

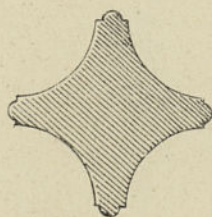


Fig. 41.



Fig. 42.



Fig. 42. bis

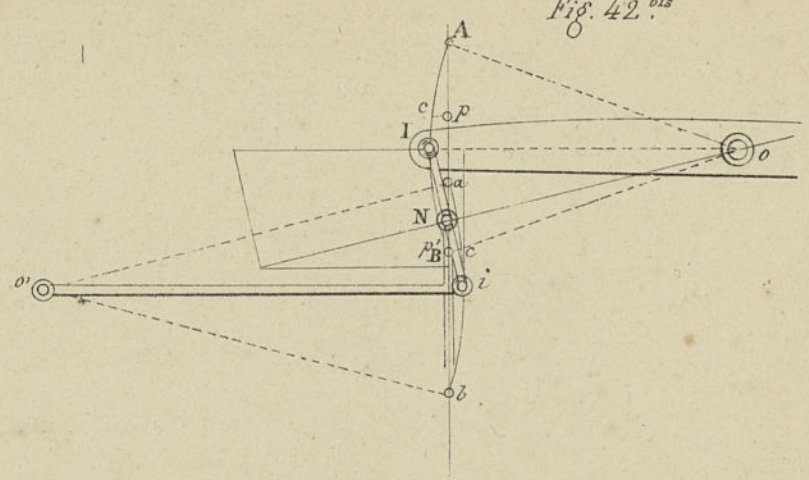


Fig. 42. ter

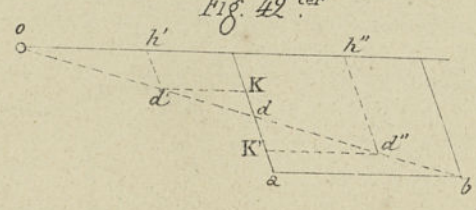


Fig. 44.

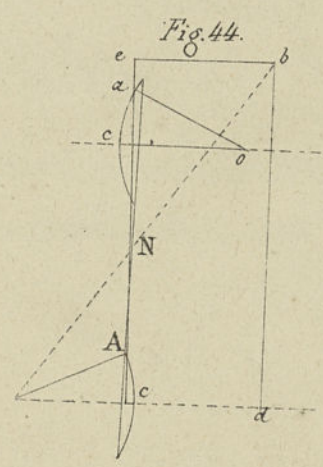


Fig. 43.

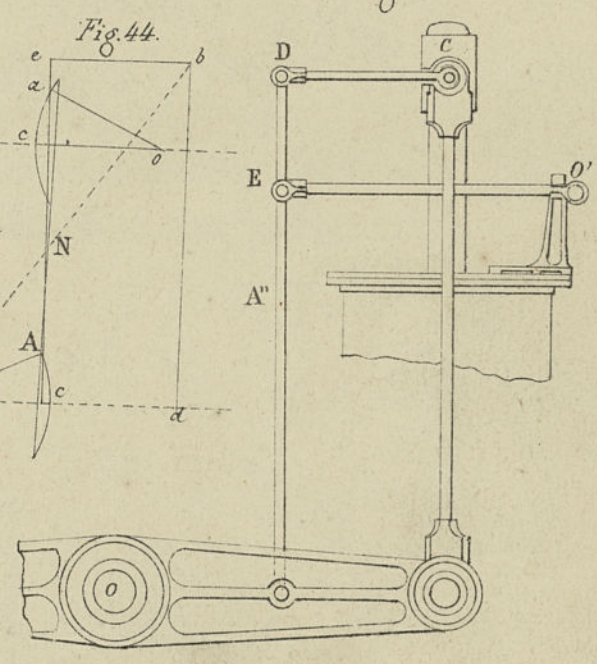


Fig. 46.

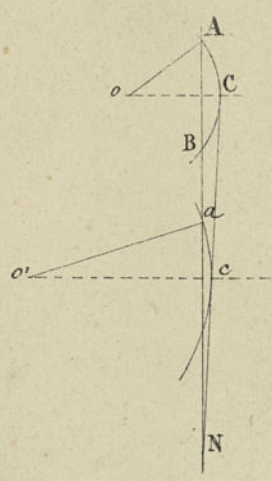


Fig. 45.

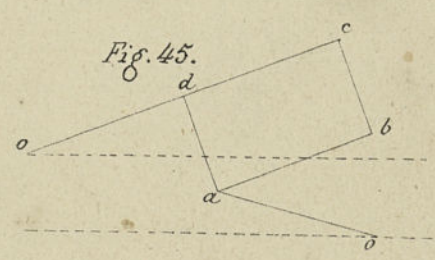


Fig. 47.

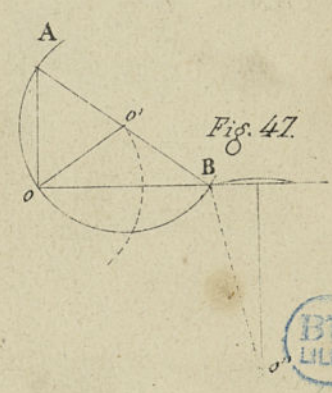


Fig. 55.

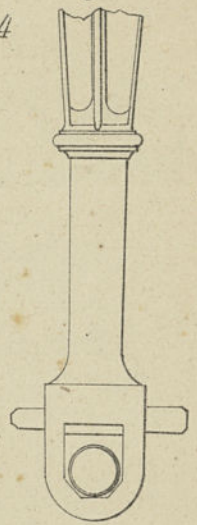


Fig. 54.

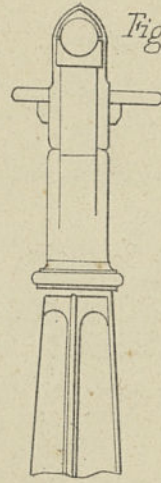


Fig. 49.

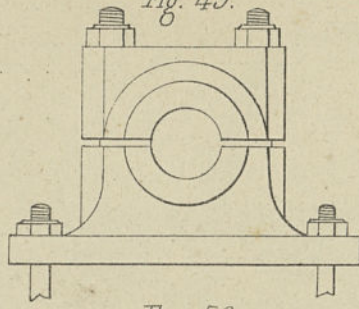


Fig. 50.

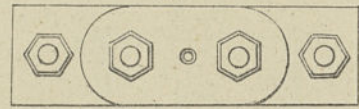


Fig. 48.



Fig. 51.

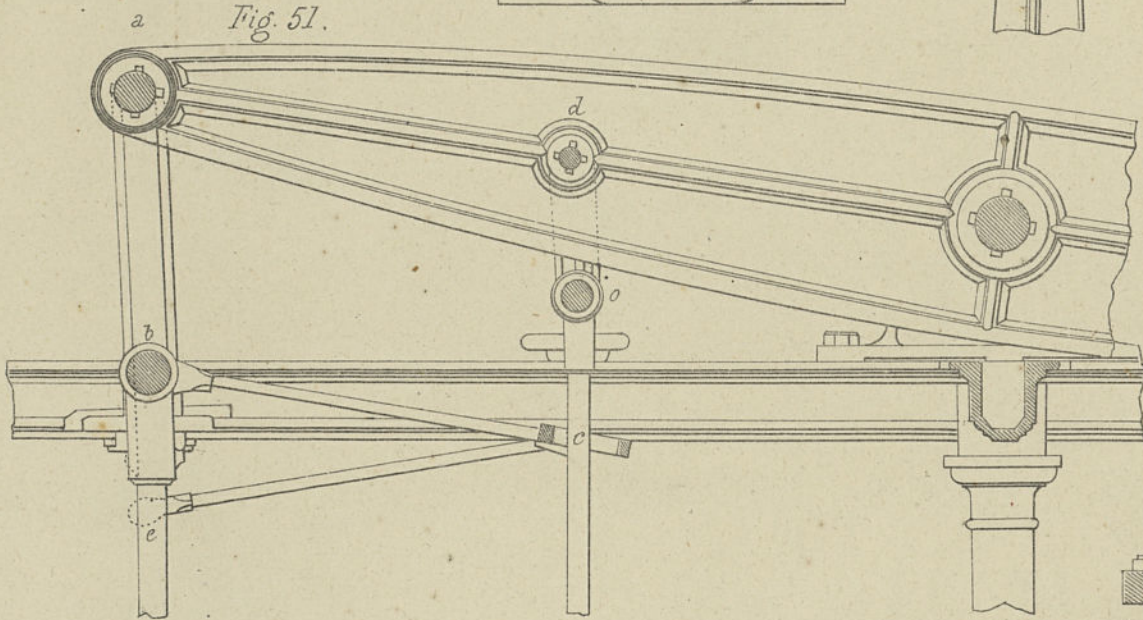


Fig. 59.

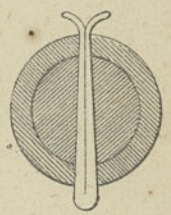


Fig. 57.

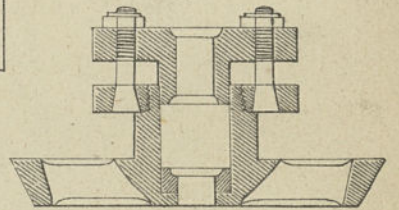


Fig. 56.

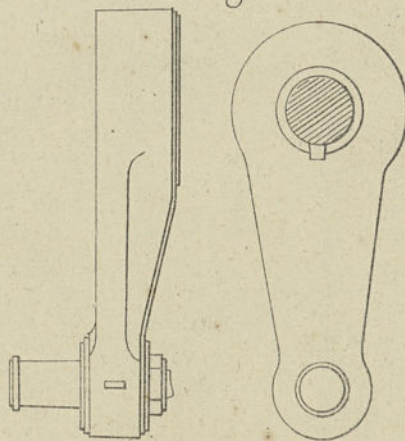


Fig. 58.

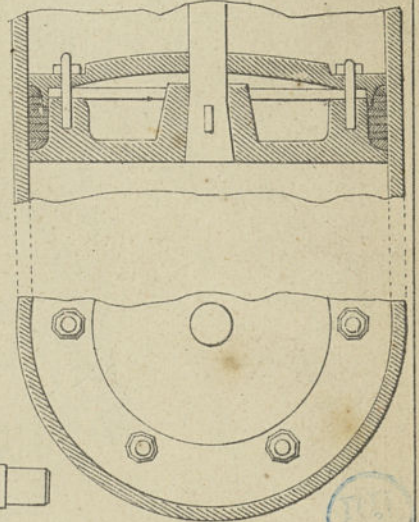


Fig. 52.

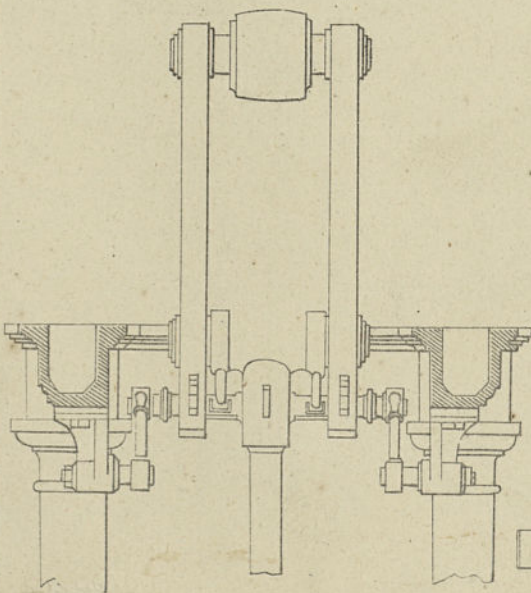


Fig. 53.

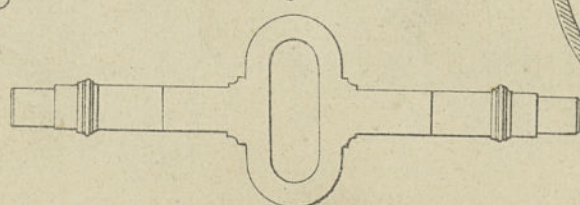


Fig. 60.

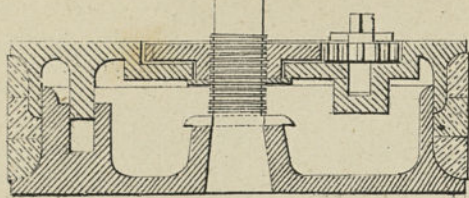


Fig. 61.

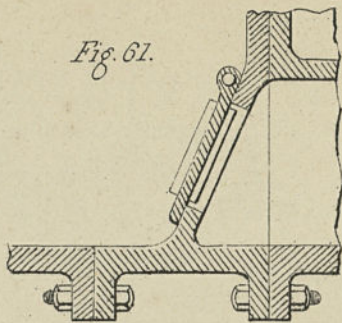


Fig. 63.

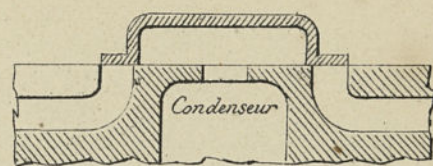


Fig. 62.

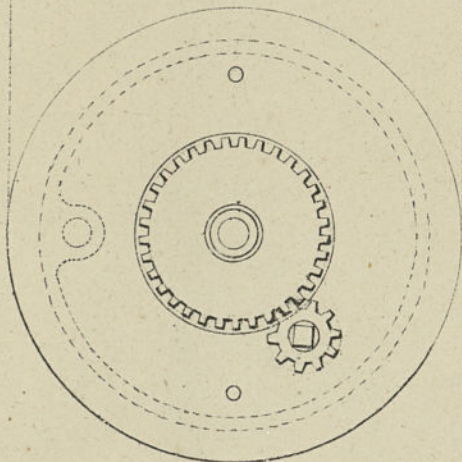
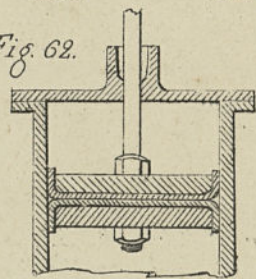


Fig. 64.

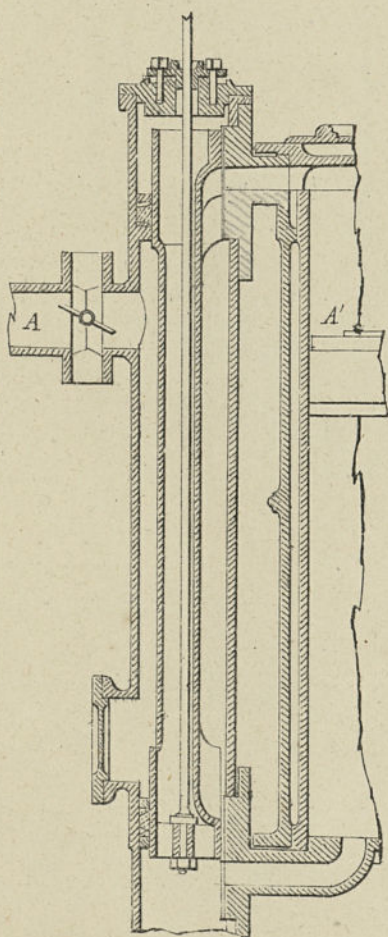


Fig. 65.

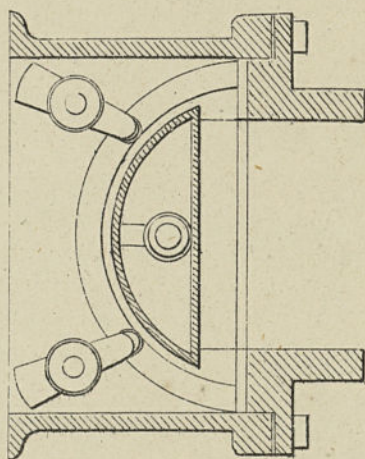


Fig. 66.

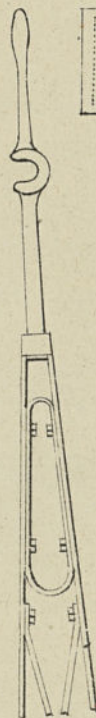
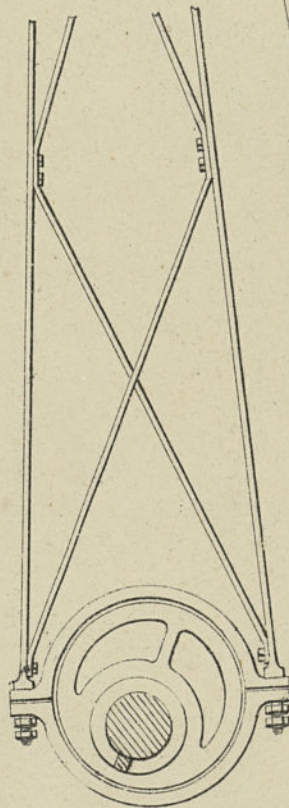
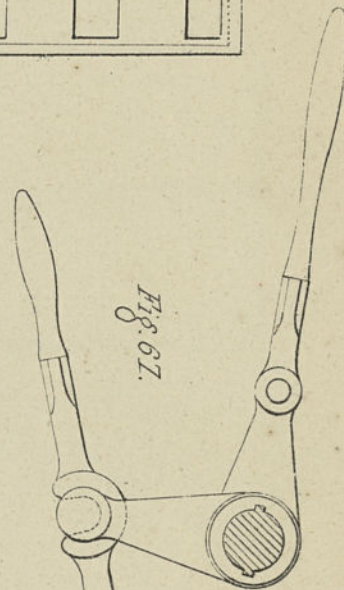


Fig. 67.



BU
1877

Fig. 68.

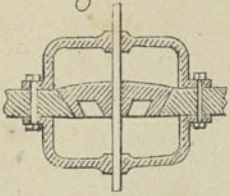


Fig. 69.

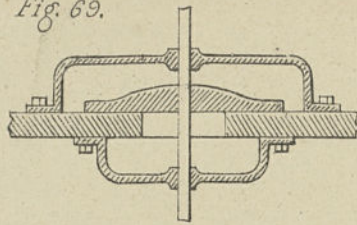


Fig. 71.

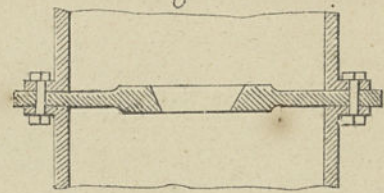


Fig. 70.

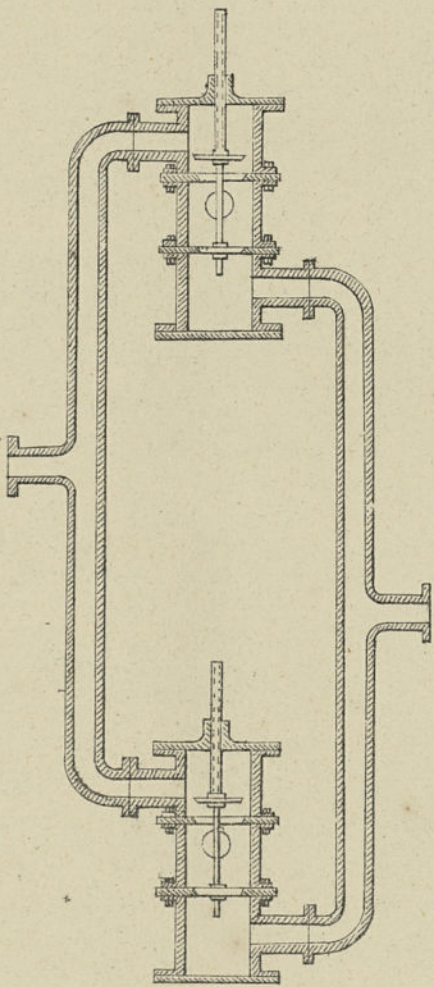


Fig. 73.

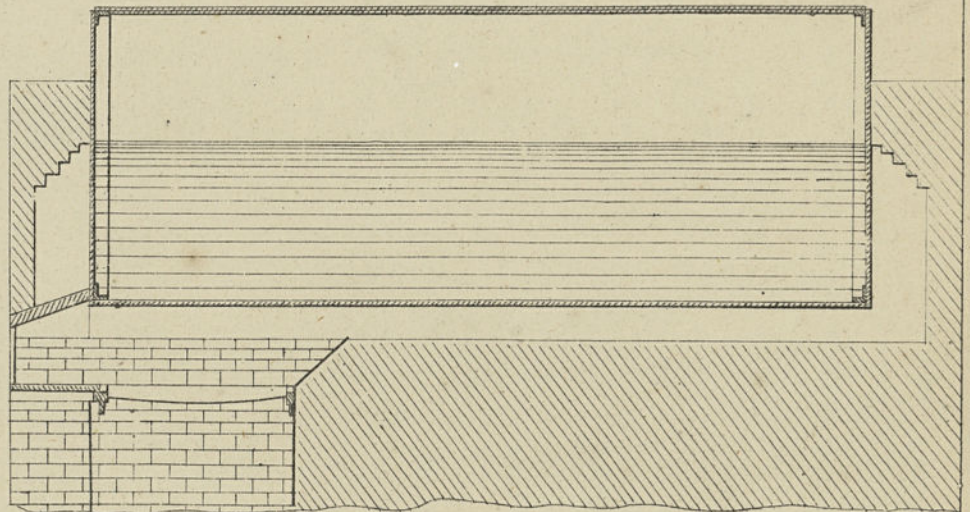


Fig. 75.

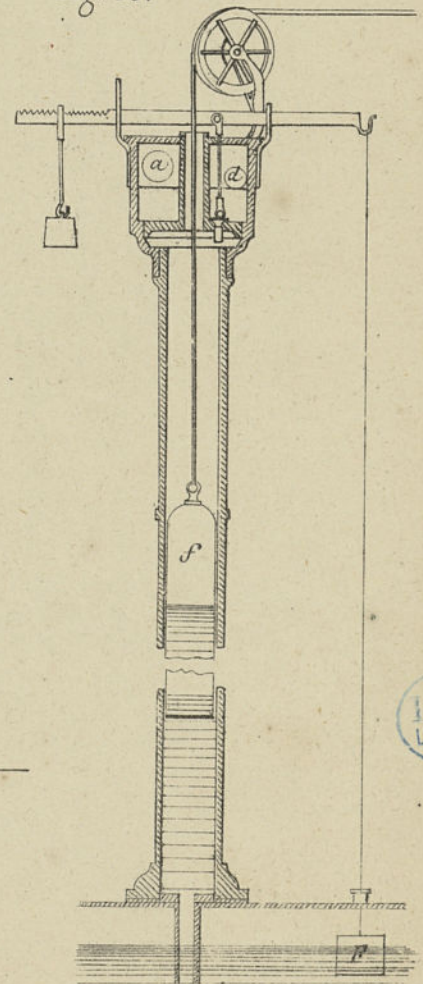


Fig. 72.

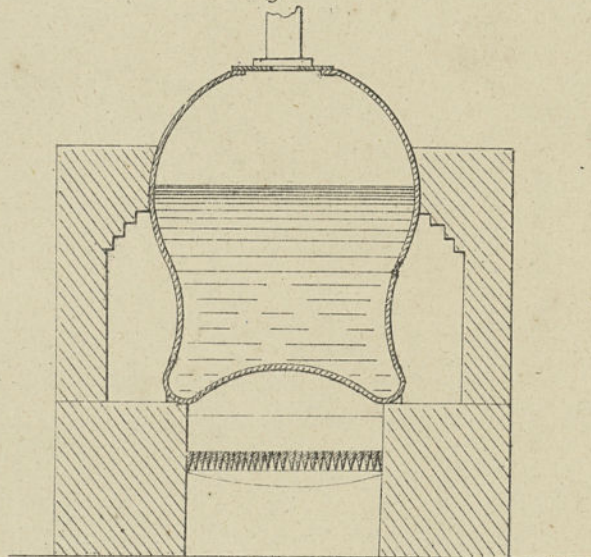
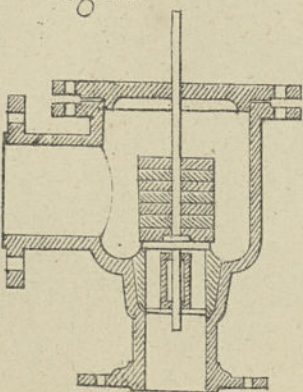


Fig. 74.



BU
LILLE

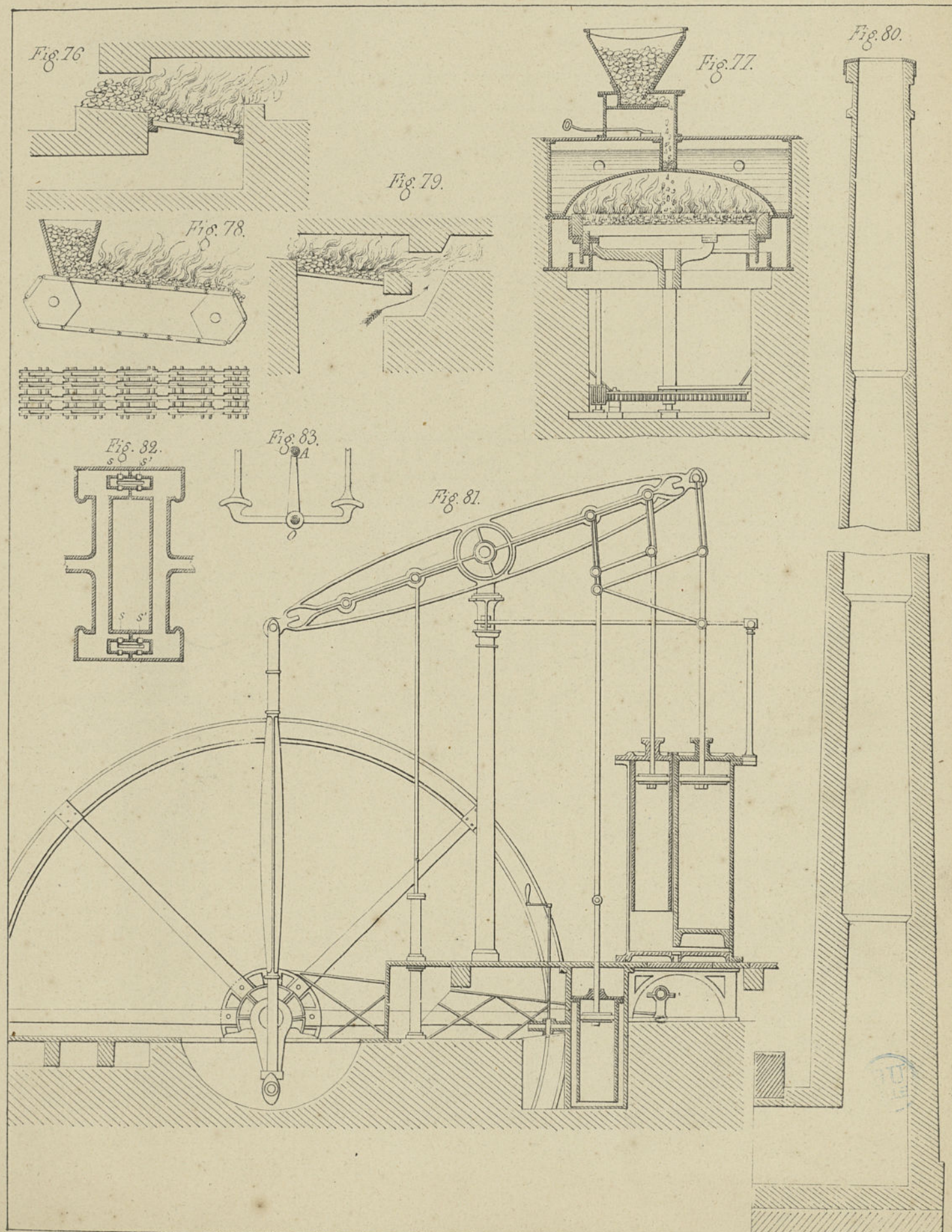


Fig. 84.

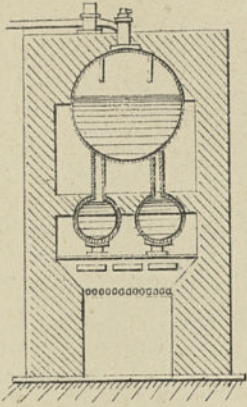


Fig. 85.

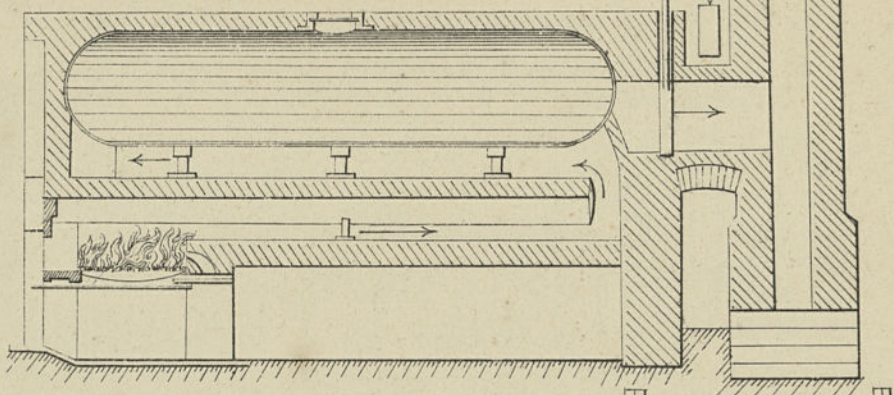


Fig. 87.

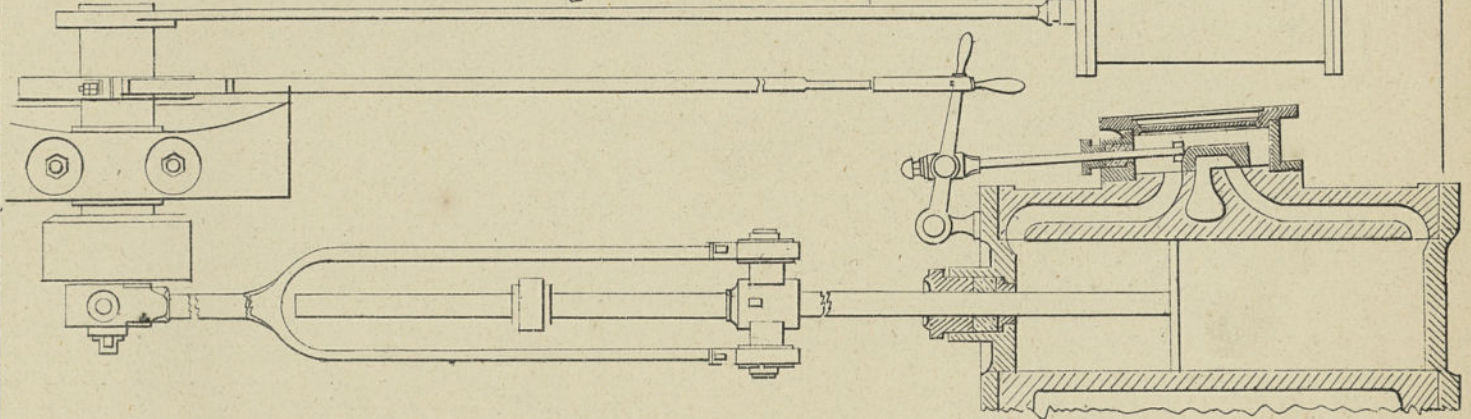


Fig. 91.

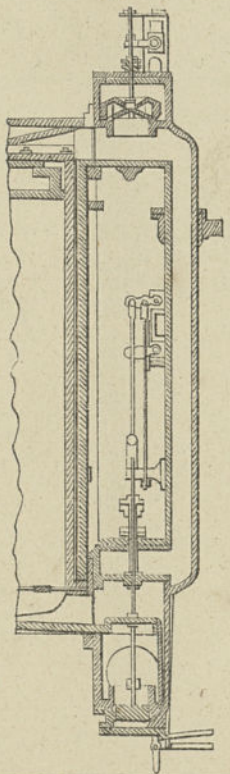


Fig. 88.

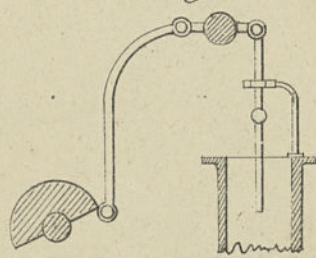


Fig. 89.

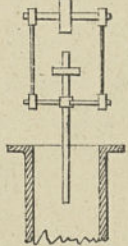


Fig. 90.



Fig. 86.

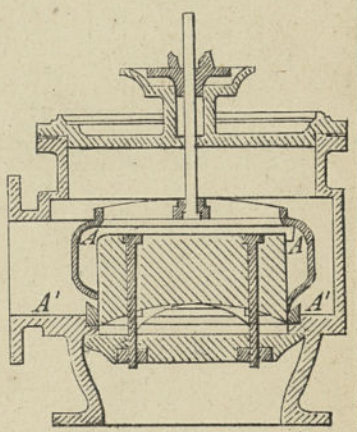
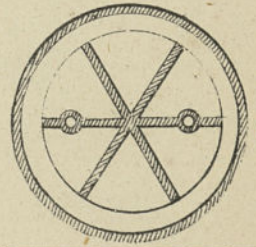
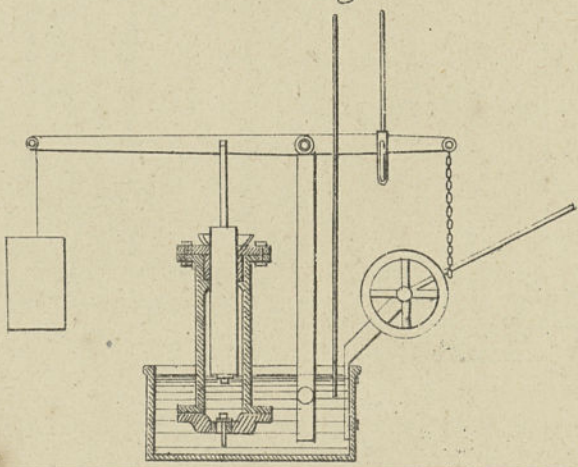


Fig. 92.



BU
LILLE

M. V.

Fig. 93.

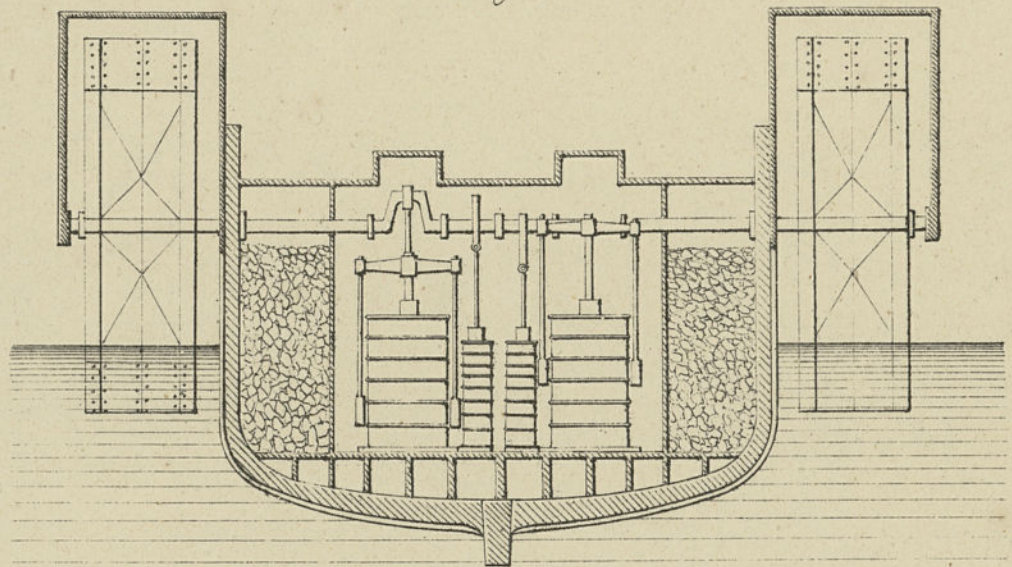
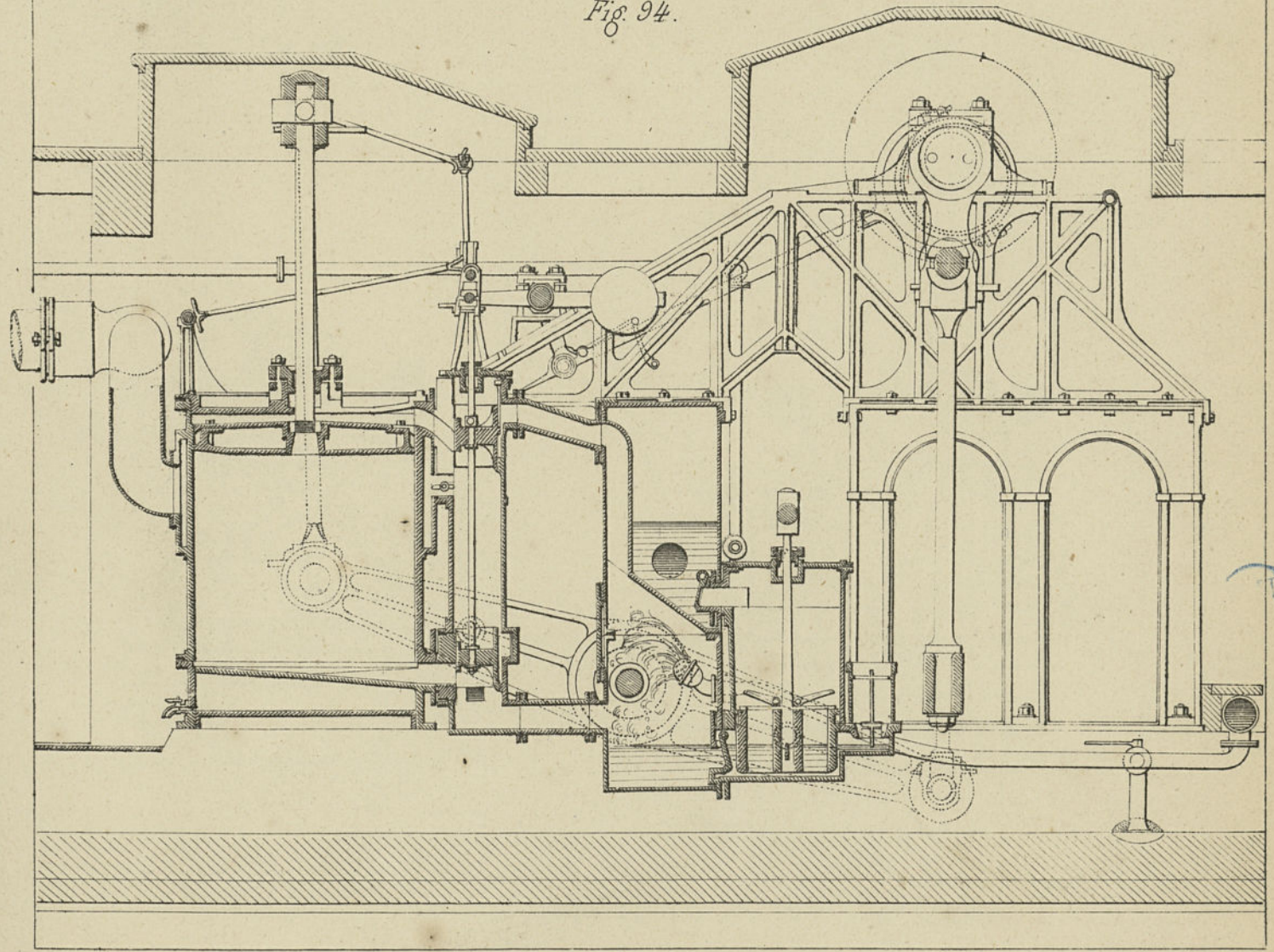


Fig. 94.



M.V.

Fig. 95.

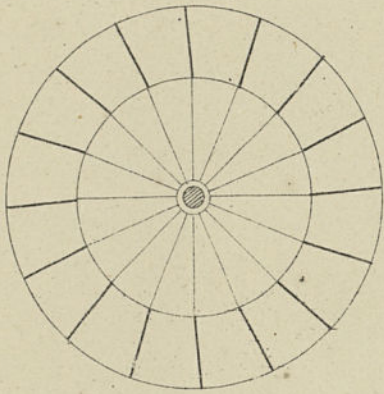


Fig. 96

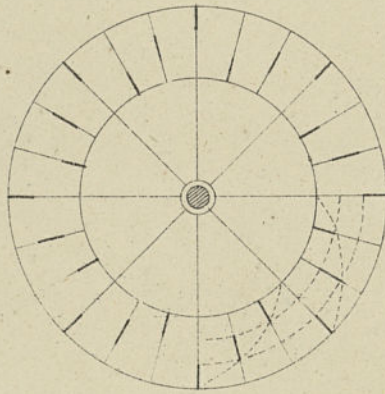


Fig. 97

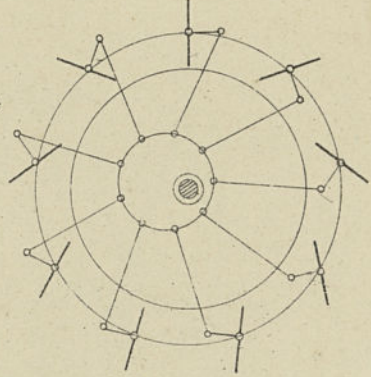


Fig. 98.

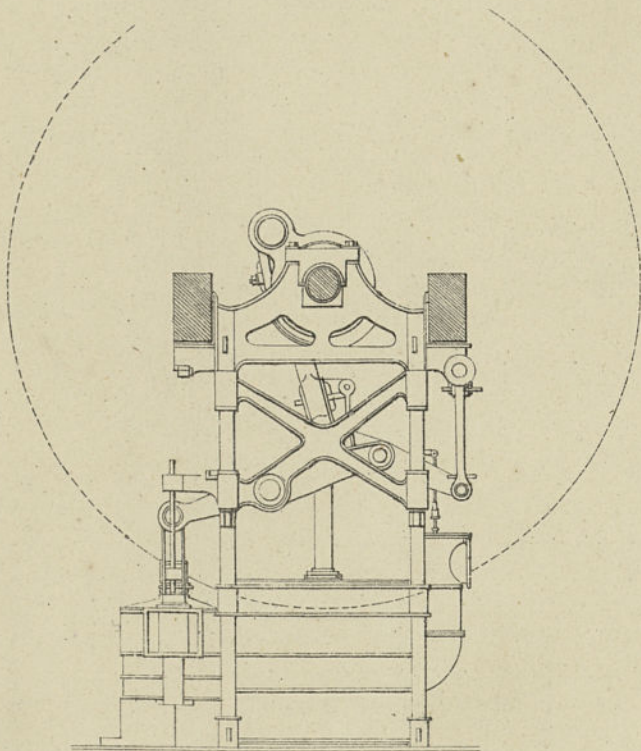
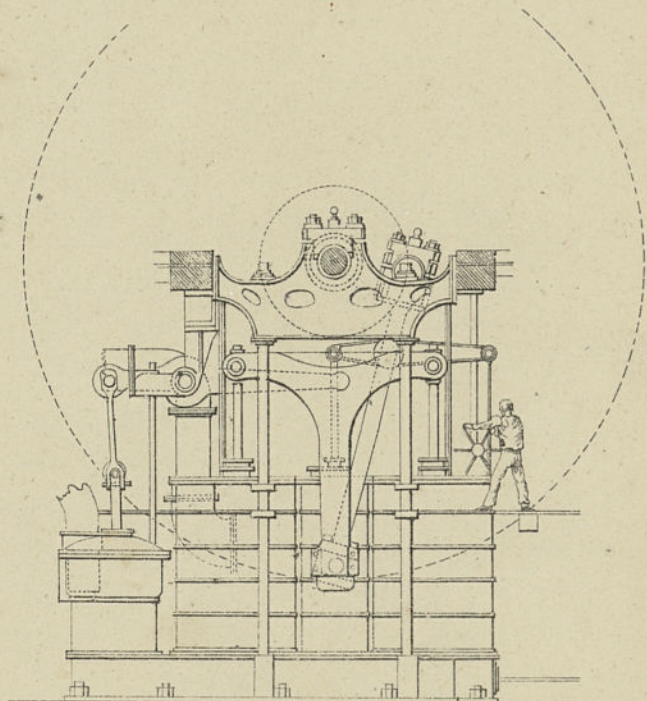


Fig. 99.



BU
LILLE

M.V.

Fig. 100

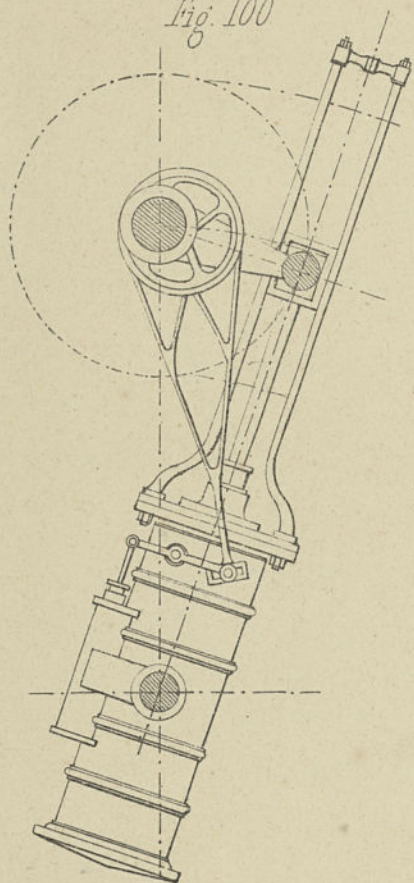


Fig. 101

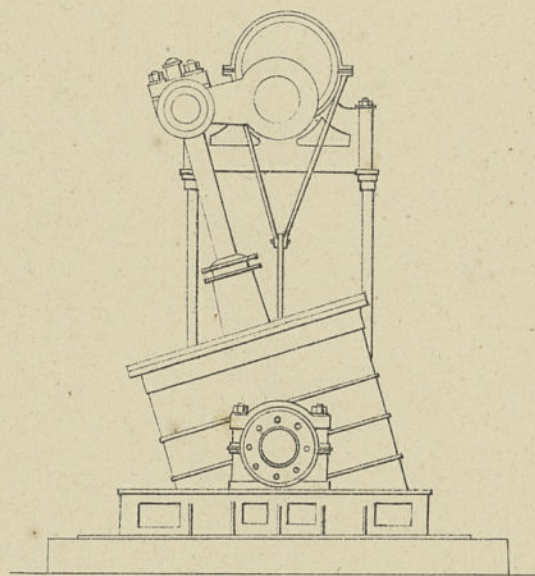


Fig. 102

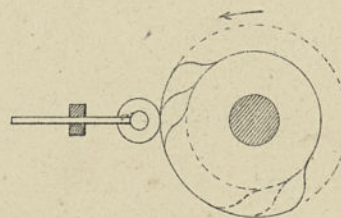
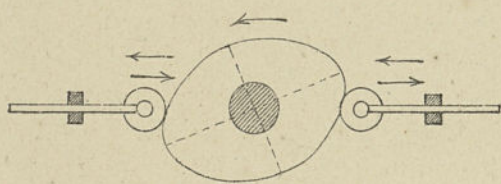
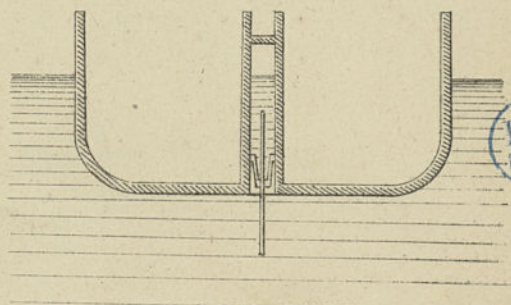
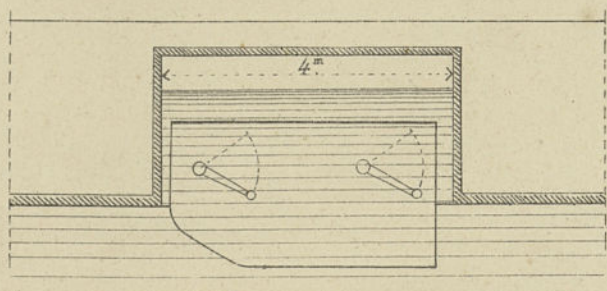


Fig. 103



BU
LILLE

Fig. 103.^{bis}

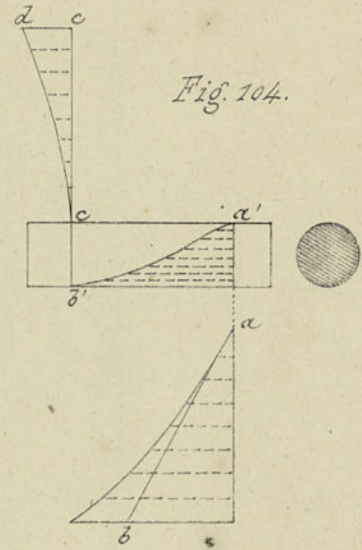
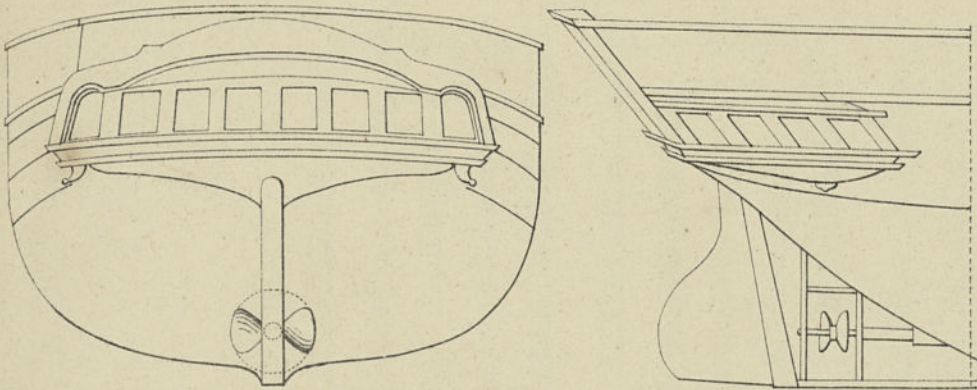


Fig. 104.

Fig. 107

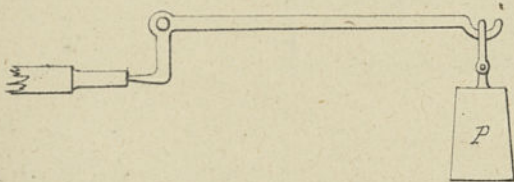


Fig. 105

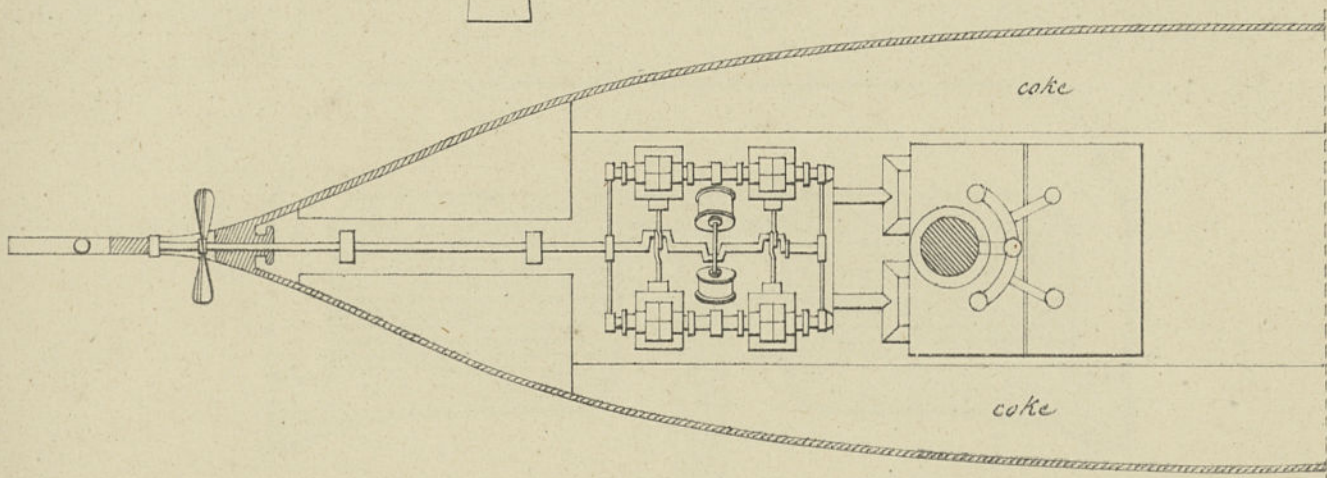


Fig. 106

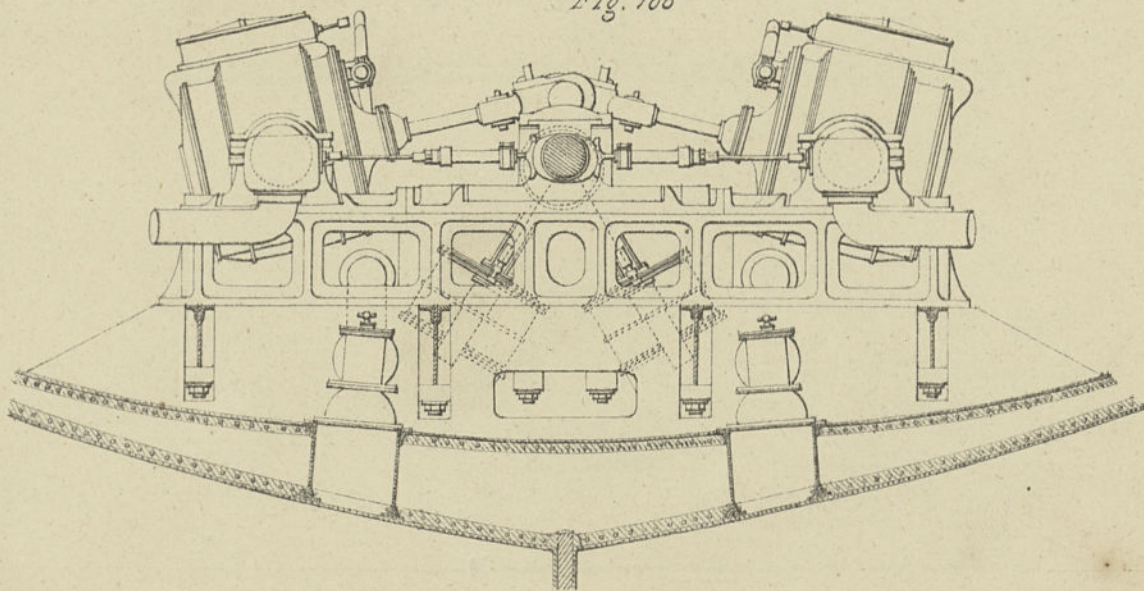


Fig. 108.

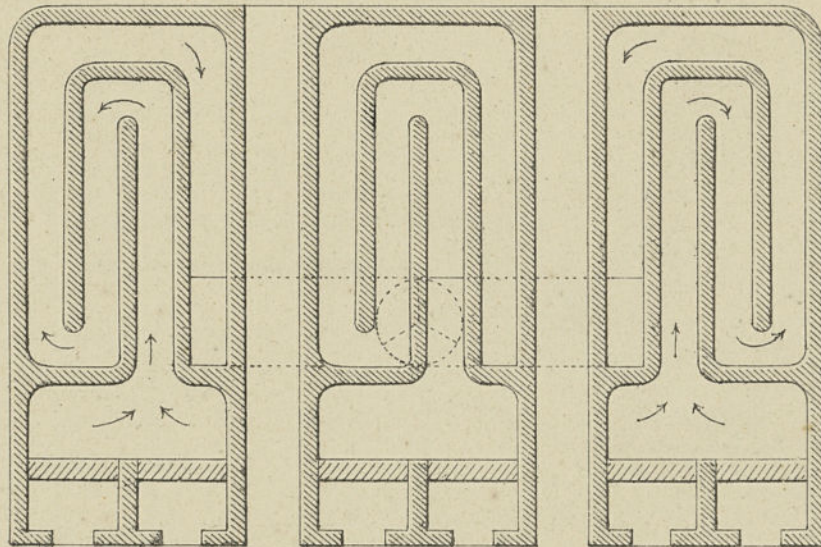


Fig. 109.

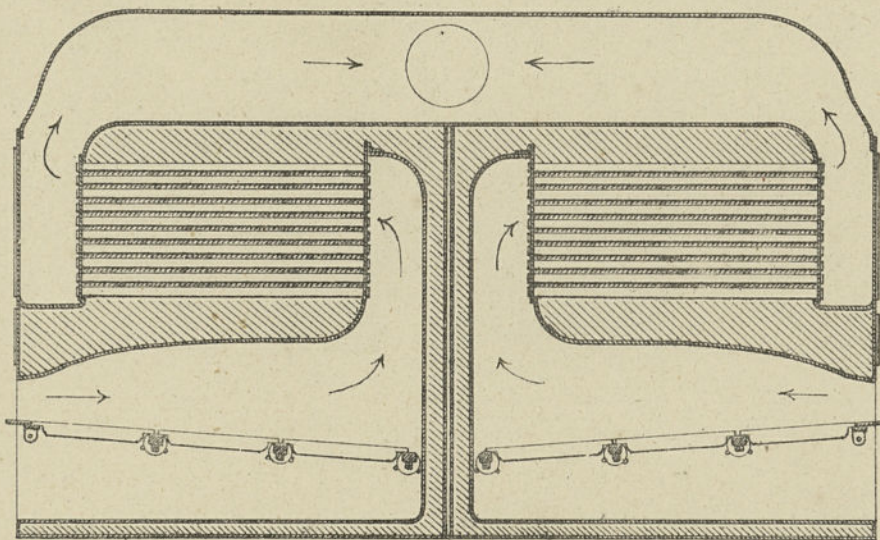
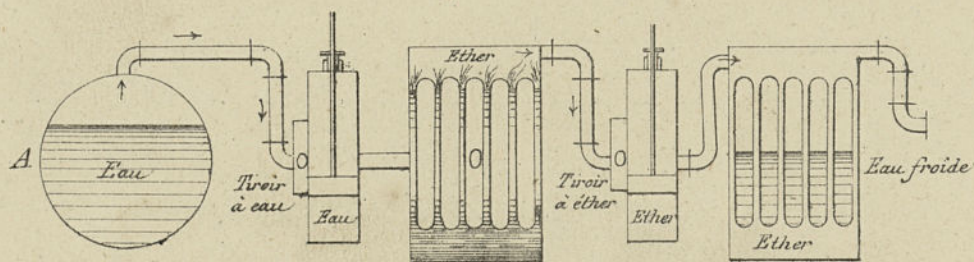


Fig. 110.



BU
LILLE

Fig. 111.

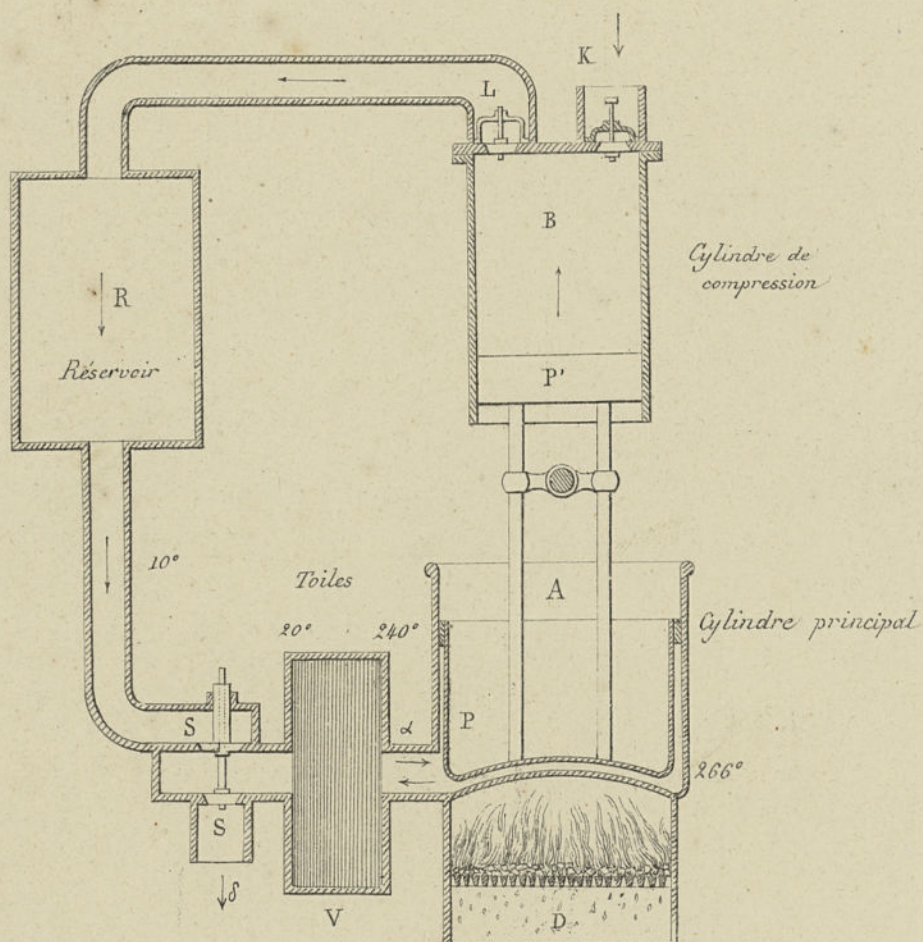


Fig. 112.

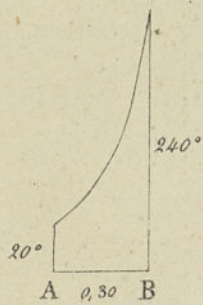
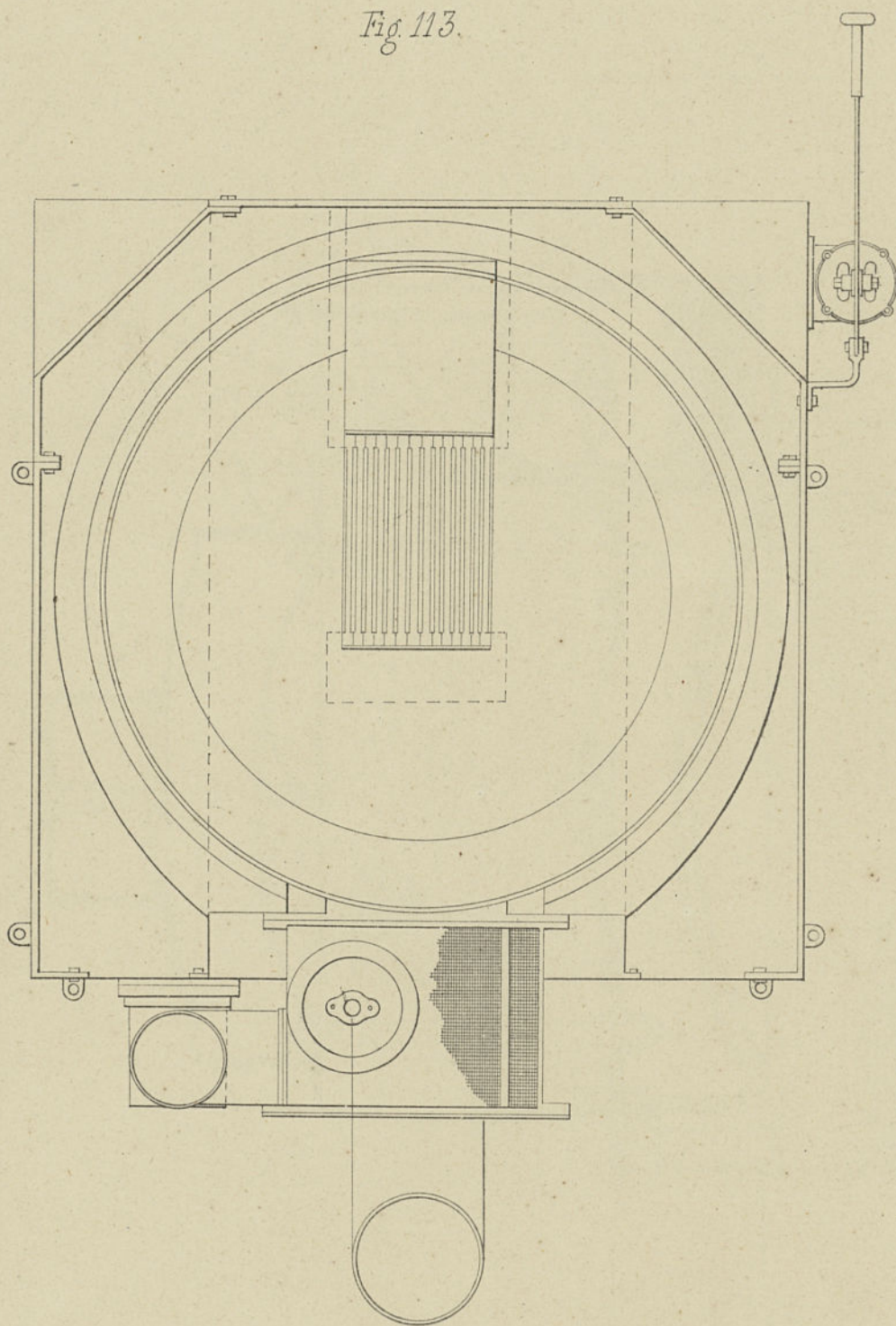


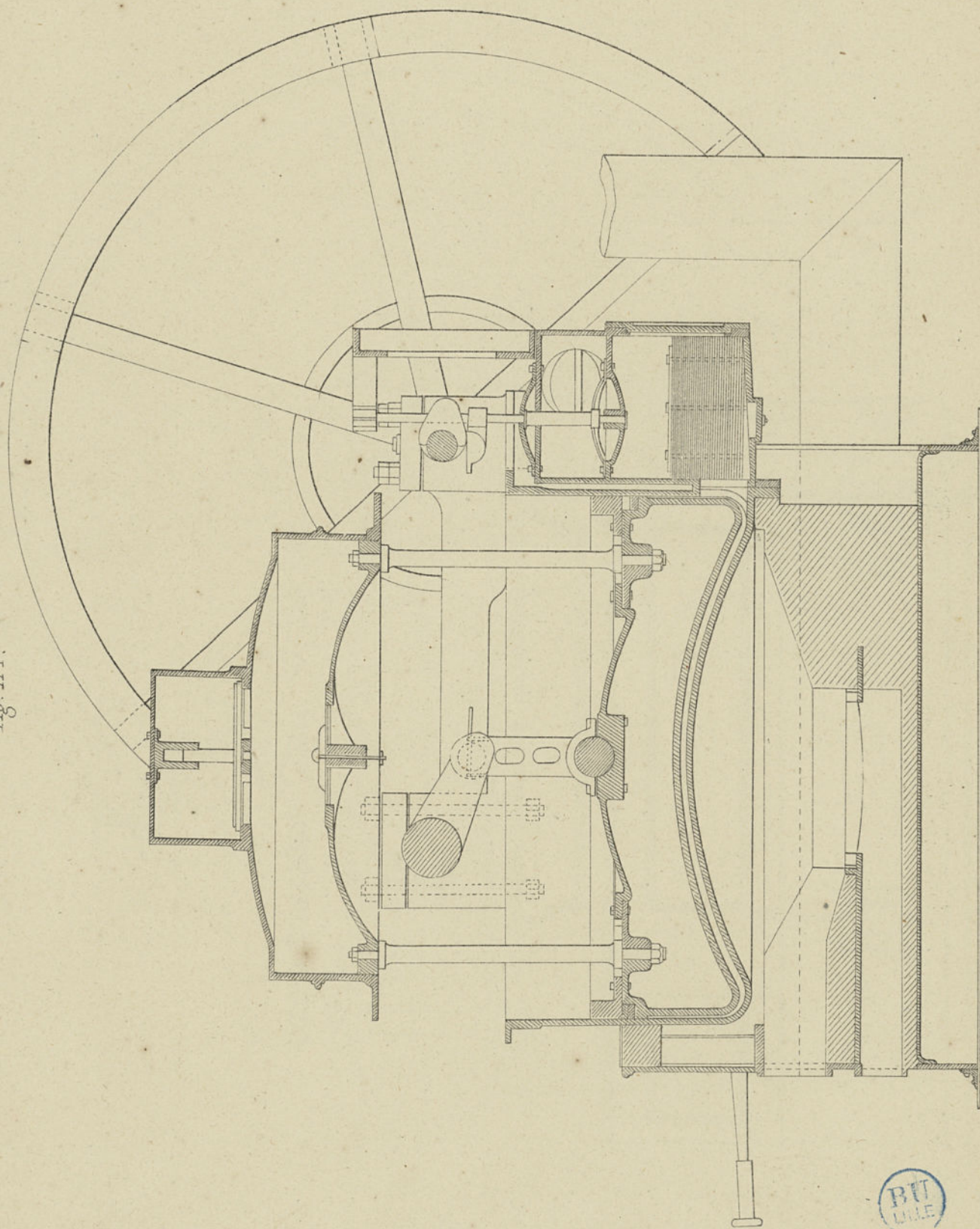
Fig. 113.



BU
LILLE

M.V

Fig. 114.



BUT
LILLE

M.V.

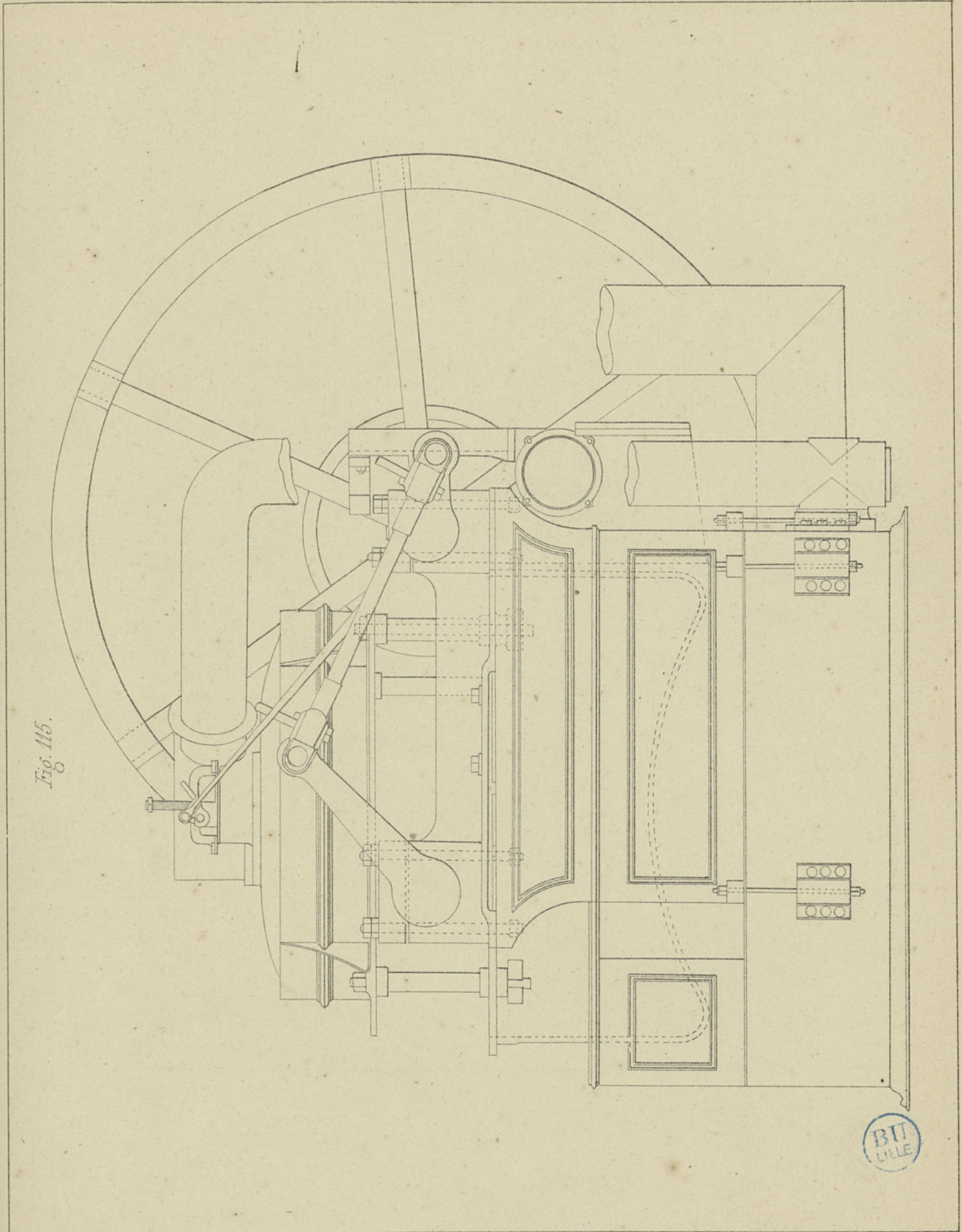
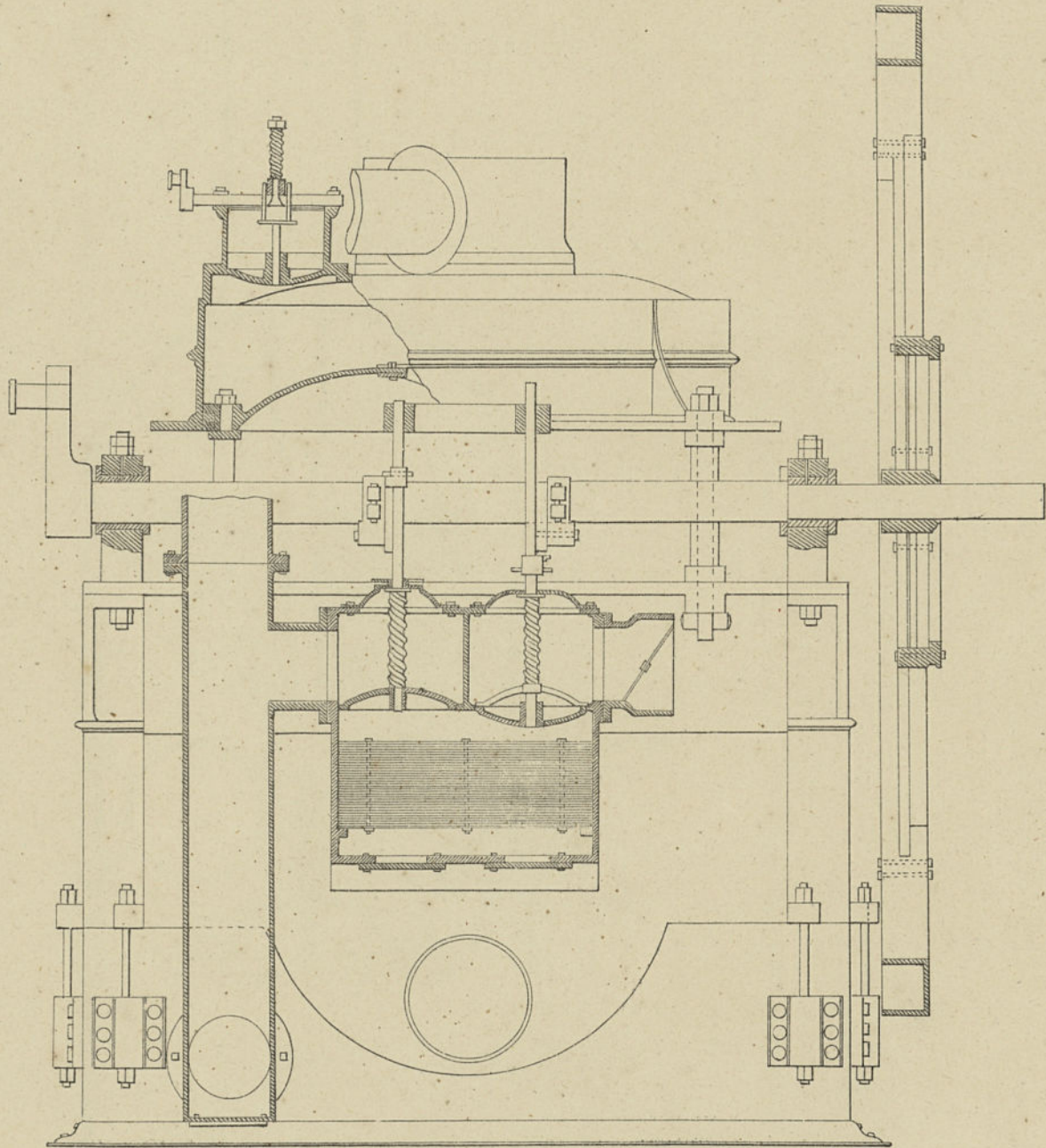


Fig. 115.

M.V.

Fig. 116.

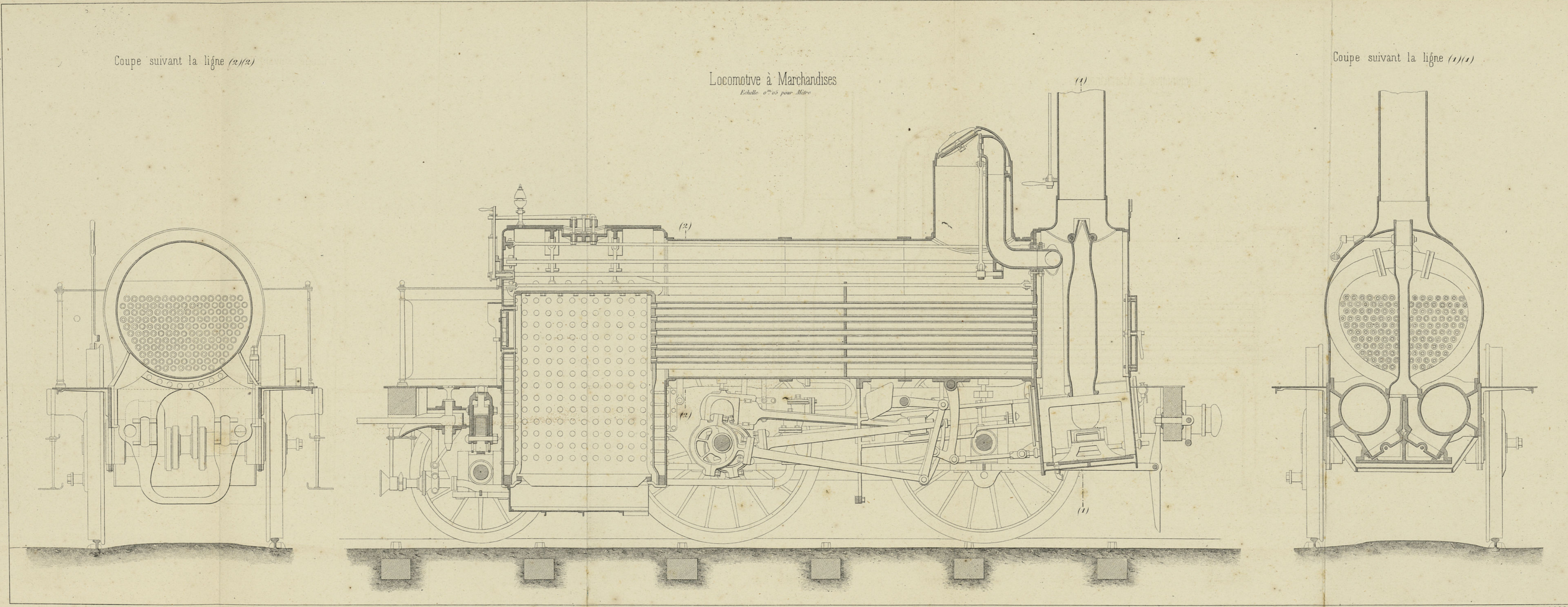


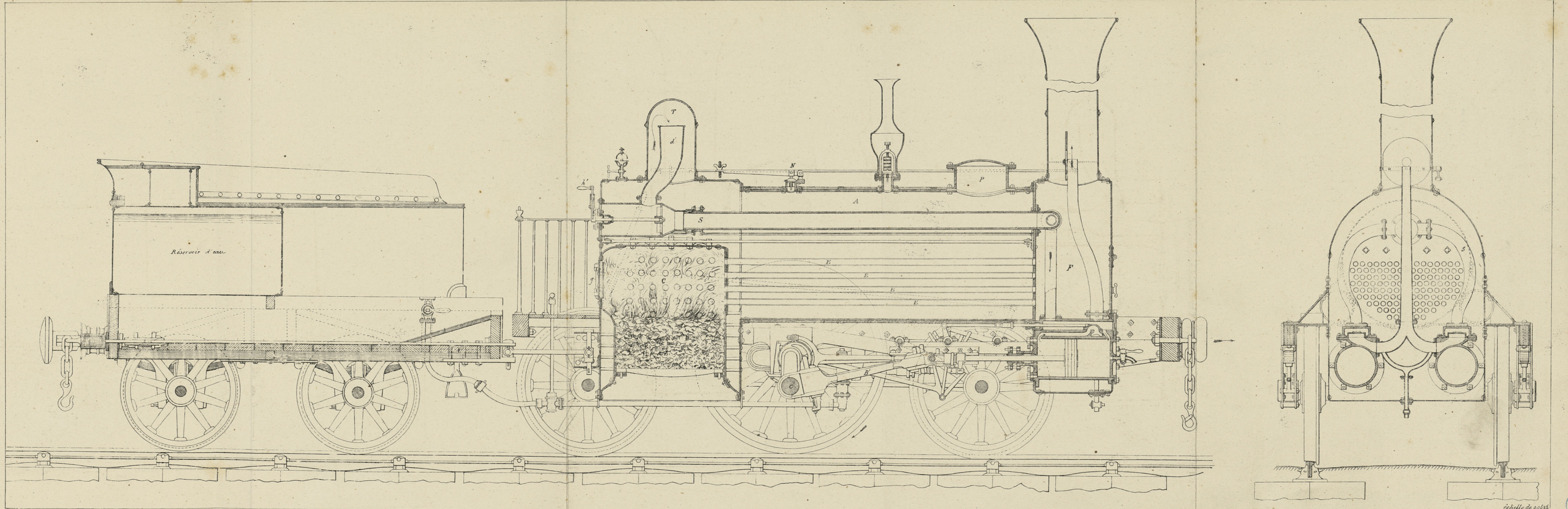
M.V.

Coupe suivant la ligne (2)/(2)

Locomotive à Marchandises
Echelle 0^m63 pour Mètre

Coupe suivant la ligne (1)/(1)

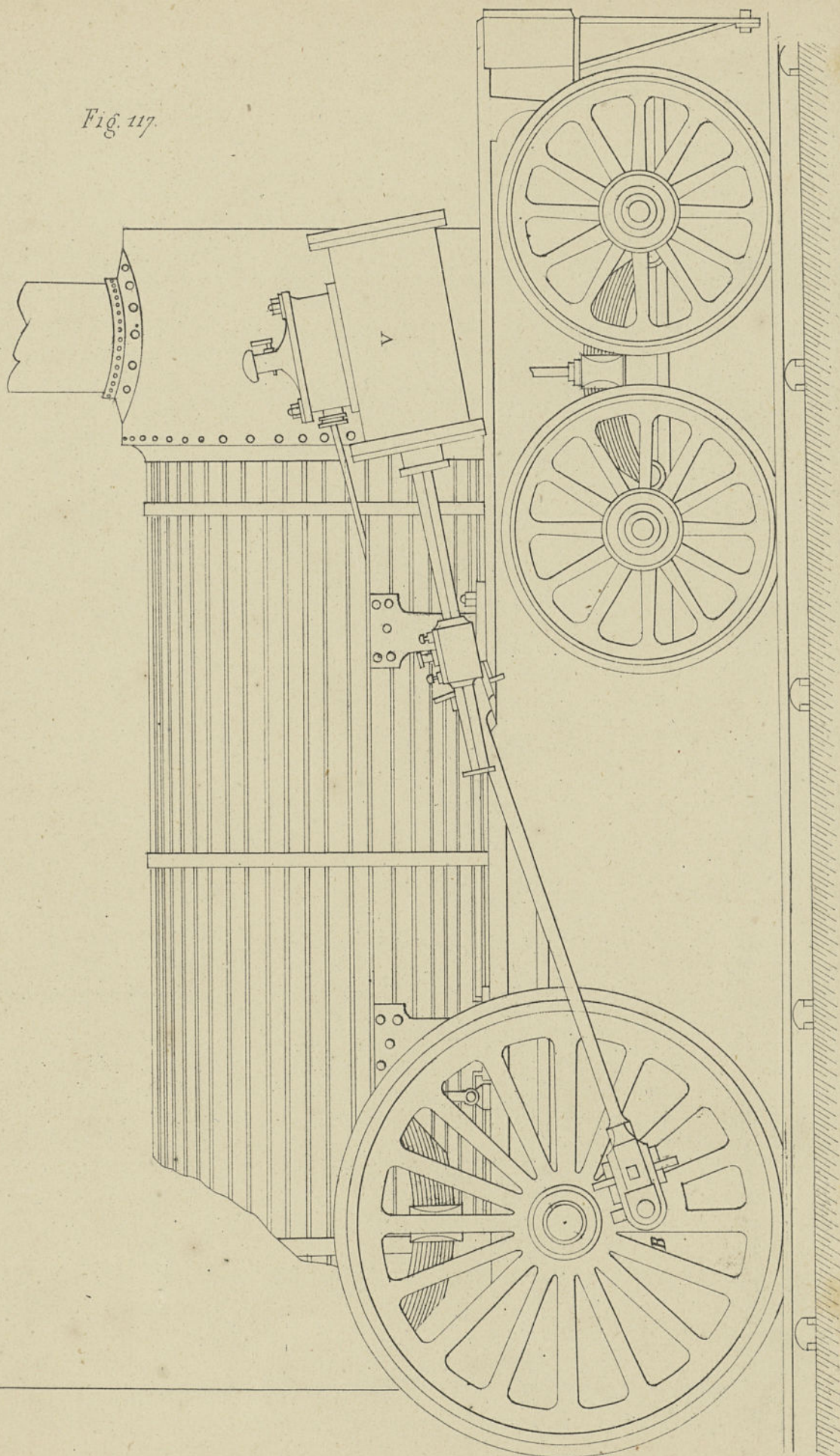




échelle de 0.0625
M.V.



Fig. 117.



BU
LLE

M.V.

Fig. 118.

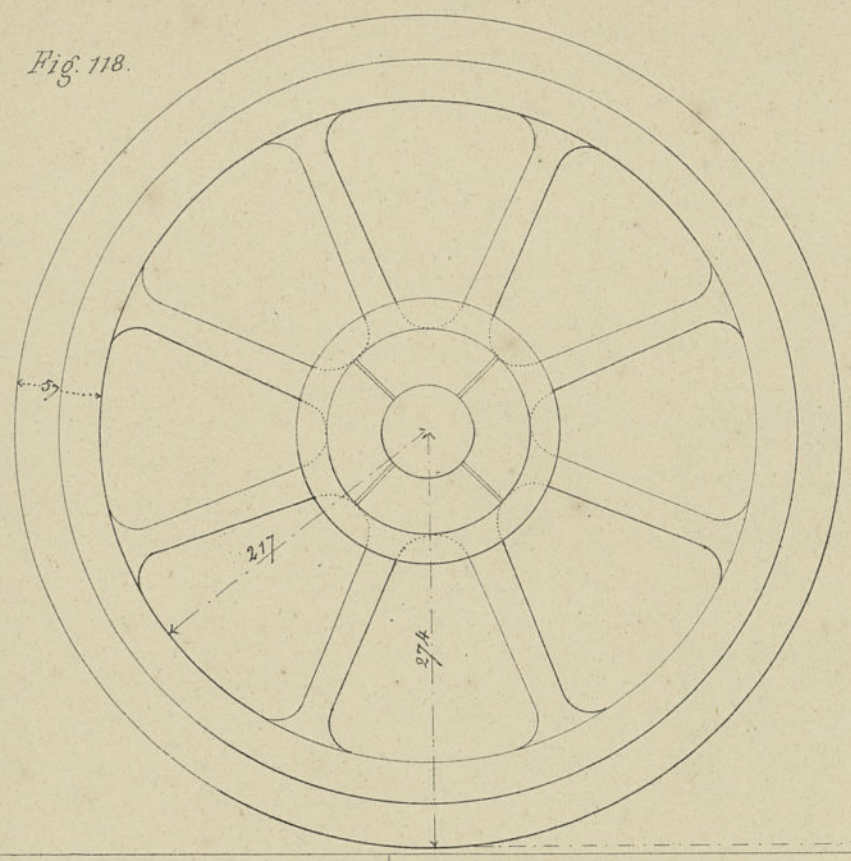


Fig. 119.

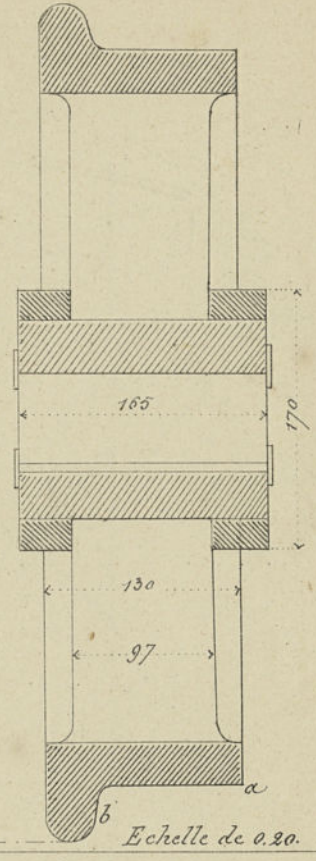


Fig. 120.

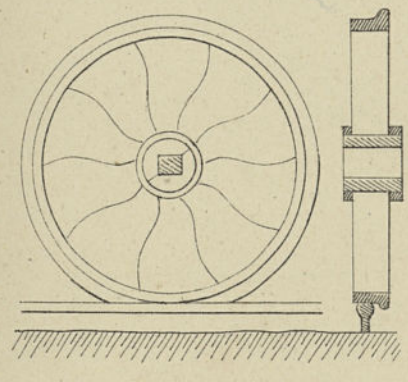


Fig. 121.

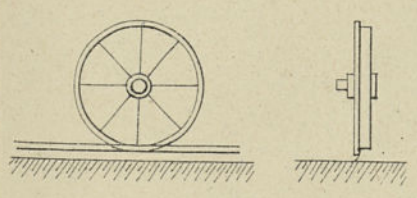
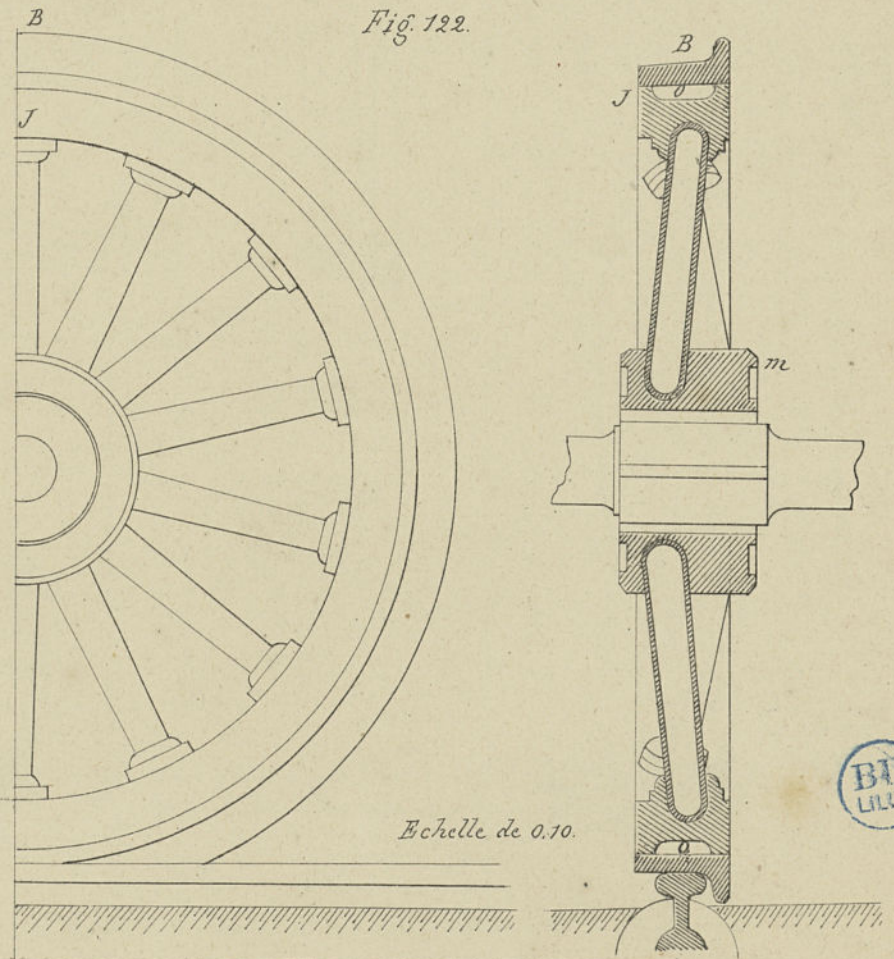


Fig. 122.



M.V.

Fig. 123.

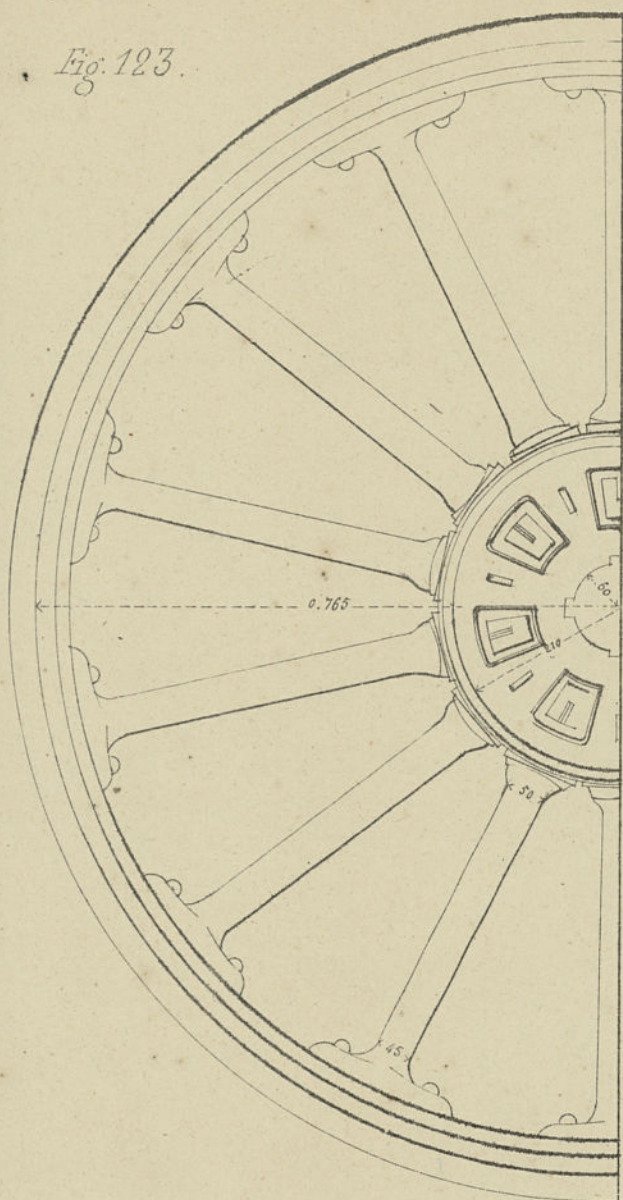


Fig. 124.

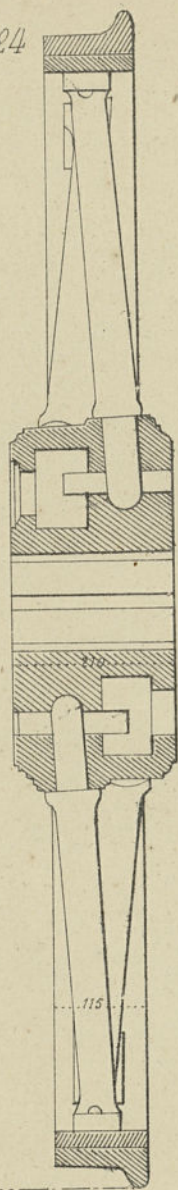


Fig. 127.

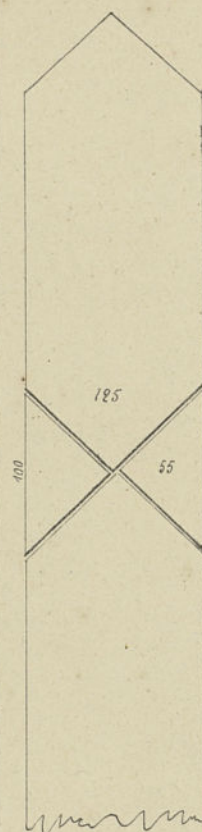


Fig. 128.

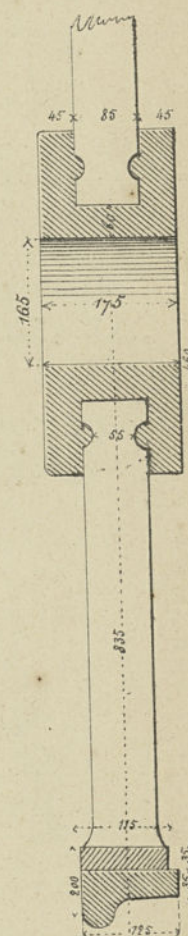


Fig. 125.

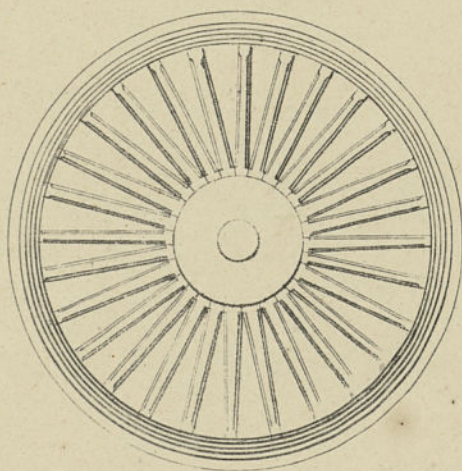
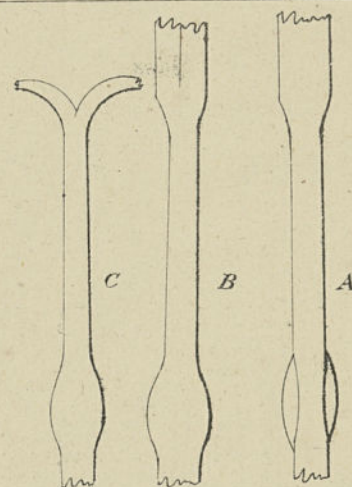
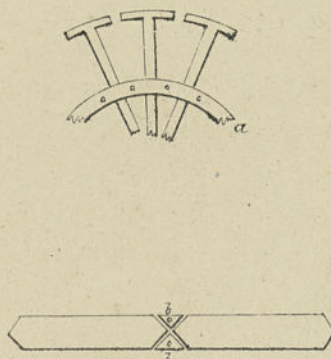


Fig. 130.



BU LILLE

Fig. 129.

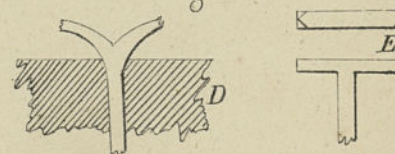


Fig. 126.

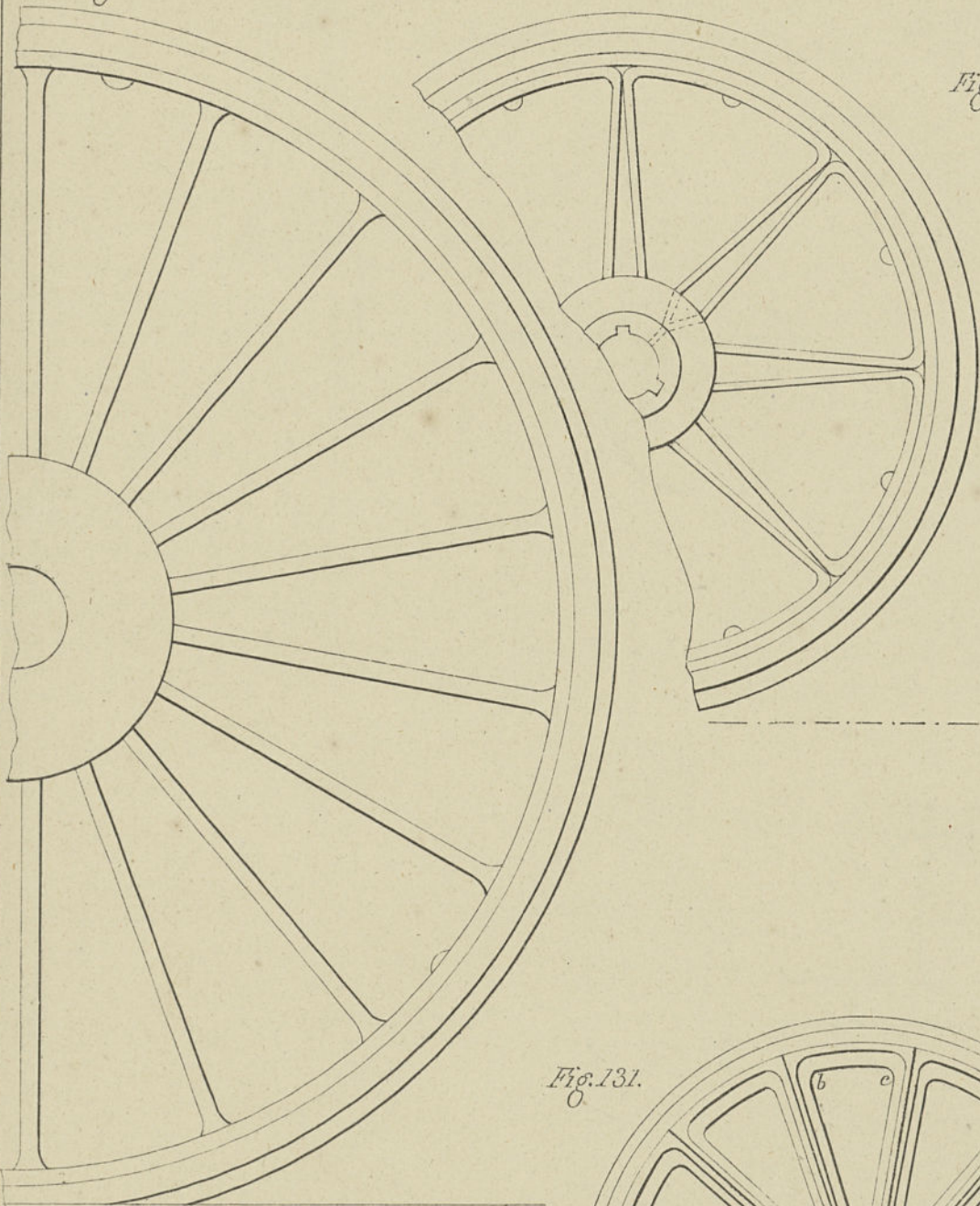


Fig. 134.

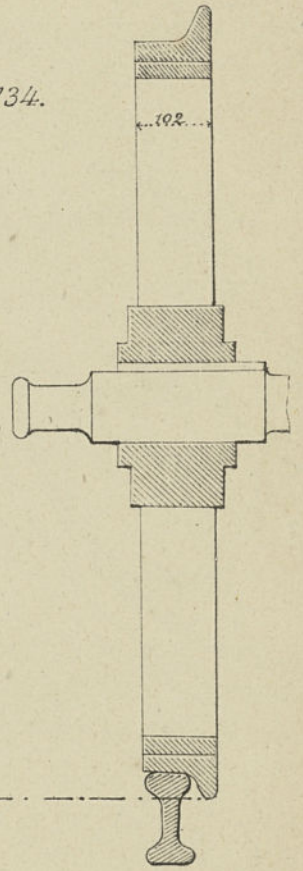


Fig. 131.

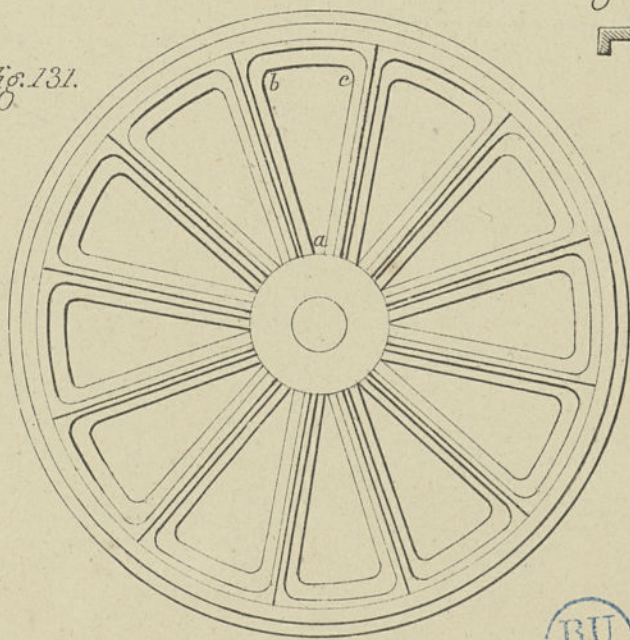


Fig. 132.

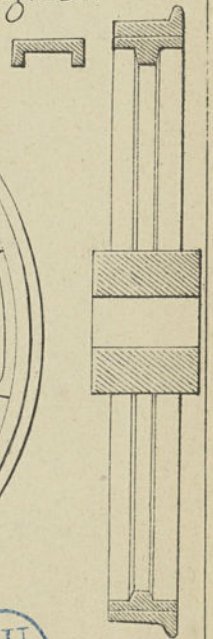
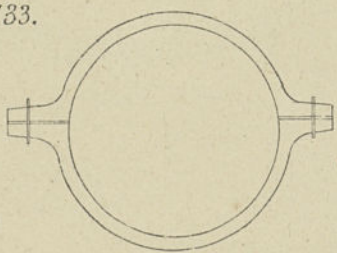


Fig. 133.



BU
LILLE
Echelle de 0.10.

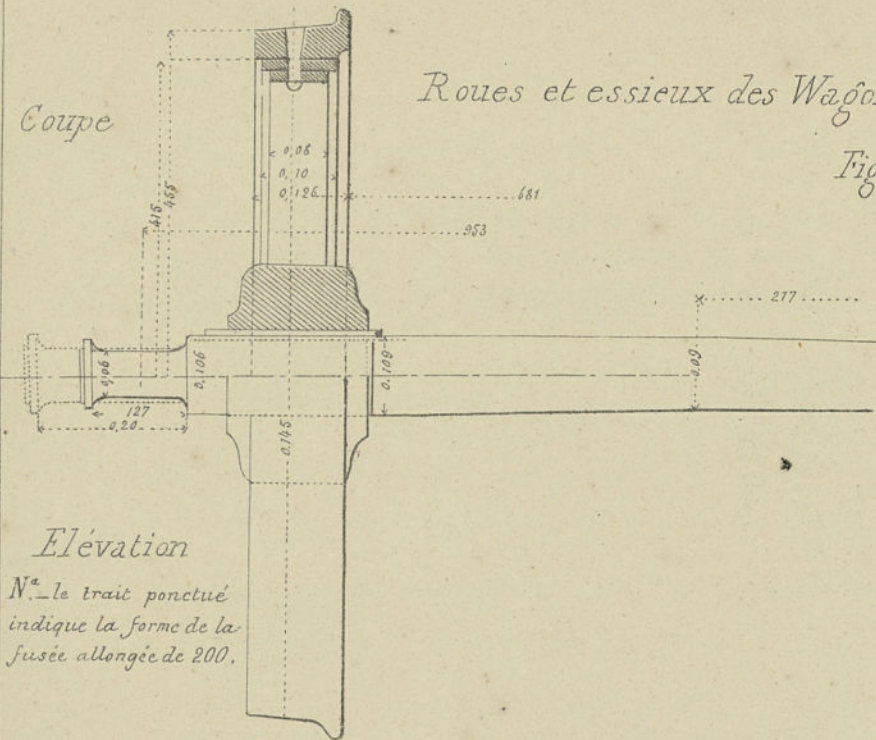
M.V.

Roues et essieux des Wagons.

Demie élévation de face.

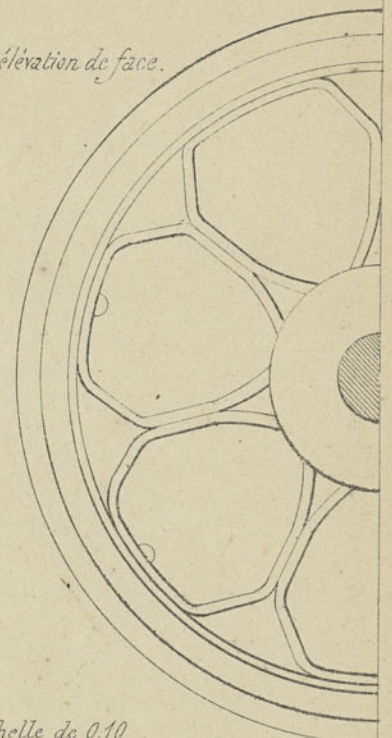
Fig. 135.

Coupe



Elevation

N^o le trait ponctué indique la forme de la fusée allongée de 200.

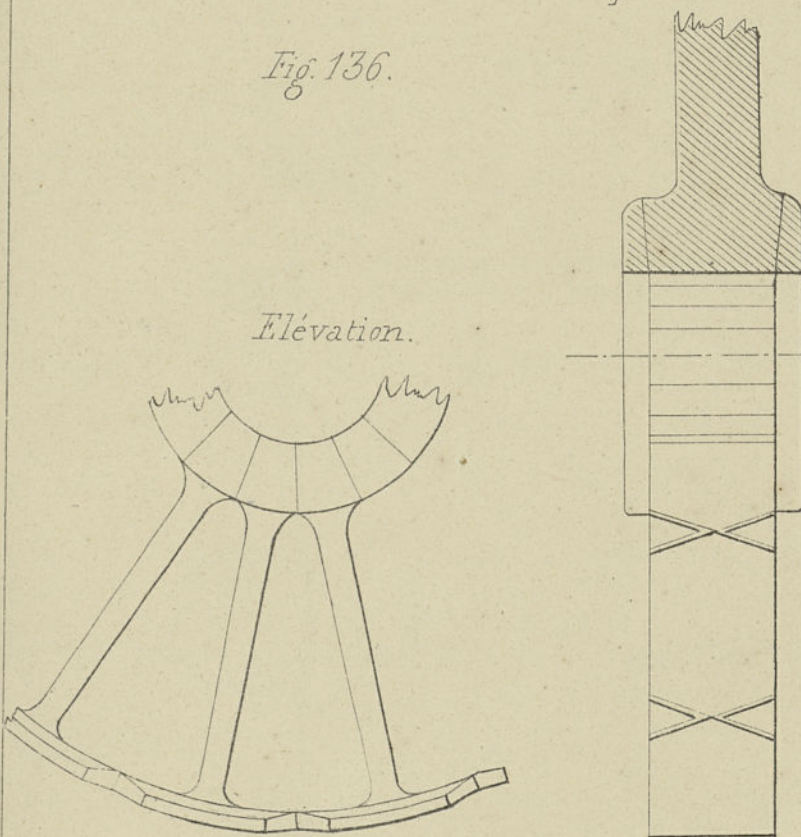


Echelle de 0,10

Coupe et vue

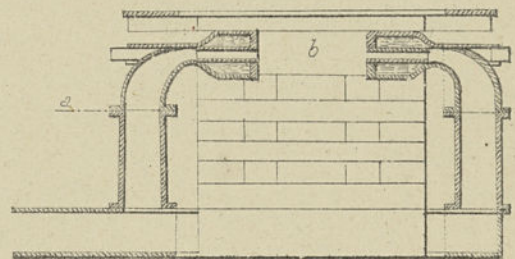
Fig. 136.

Elevation.

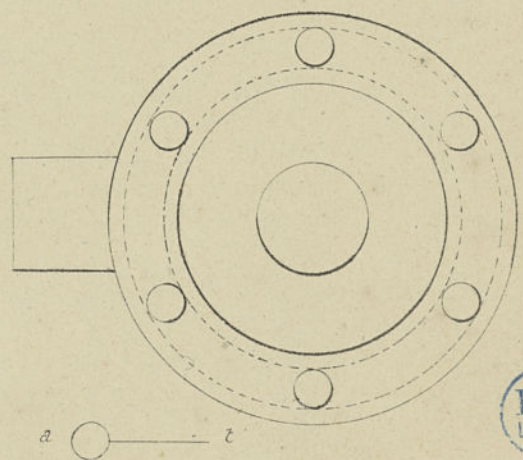


Echelle de 0,05.

Fig. 137.



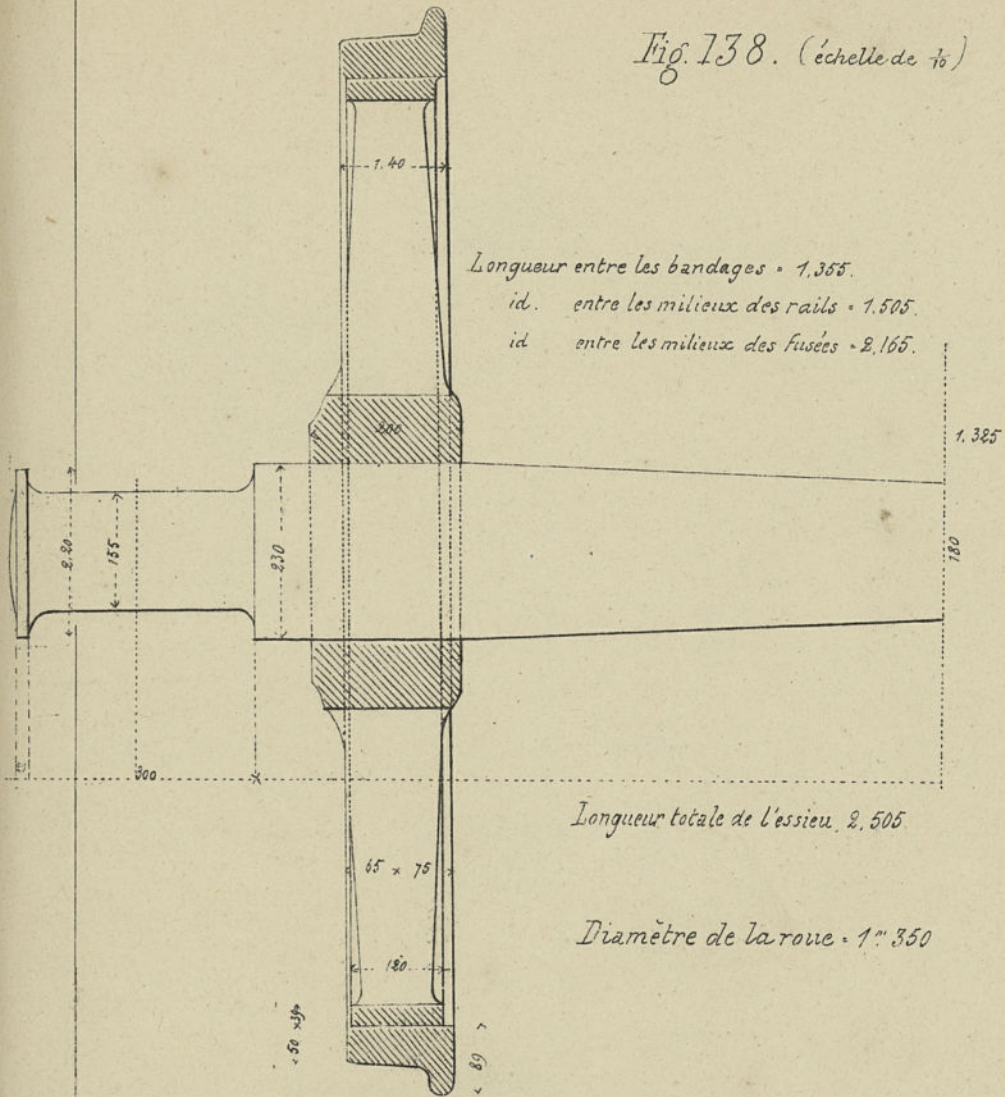
Coupe a b c.



M. V.

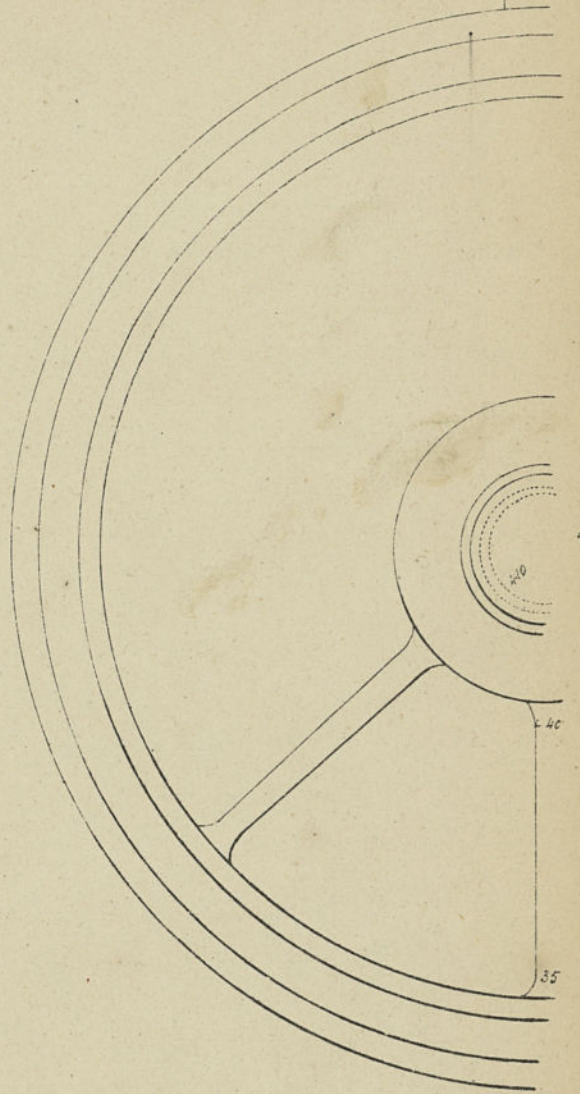
Fig. 138. (échelle de 1/10)

Longueur entre les bandages = 1,355.
 id. entre les milieux des rails = 1,505.
 id. entre les milieux des fusées = 2,165.



Longueur totale de l'essieu 2,505

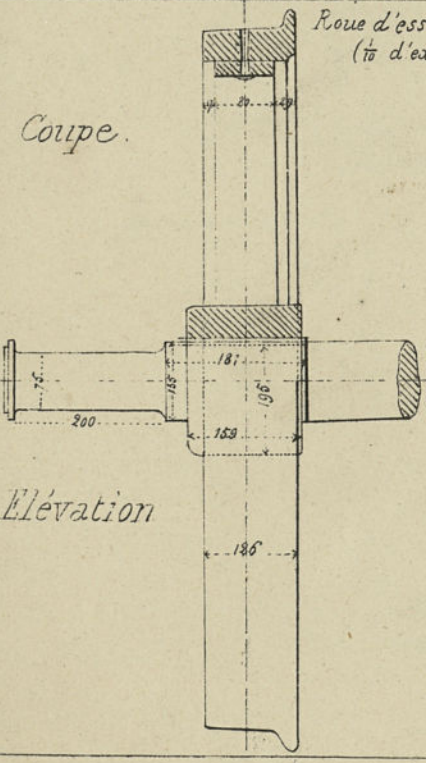
Diamètre de la roue 1^m 350



Roue d'essieu en fer forgé pour Wagon
 (1/10 d'exécution) Crampton.

Fig 140.

Coupe.



Elevation

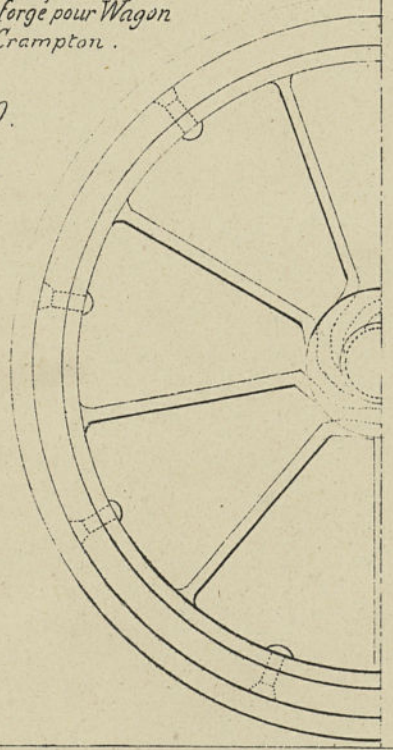
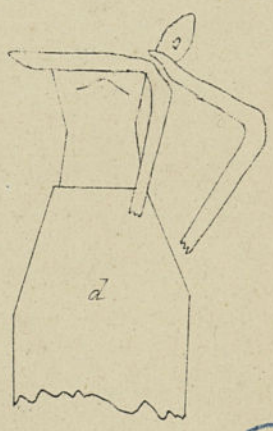


Fig. 141.



M. V.

Coupe du Bandage des Roues
d'une Locomotive
($\frac{1}{3}$ d'exécution)

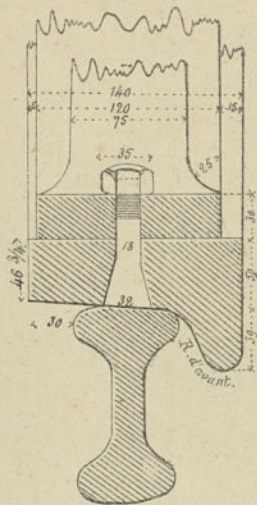
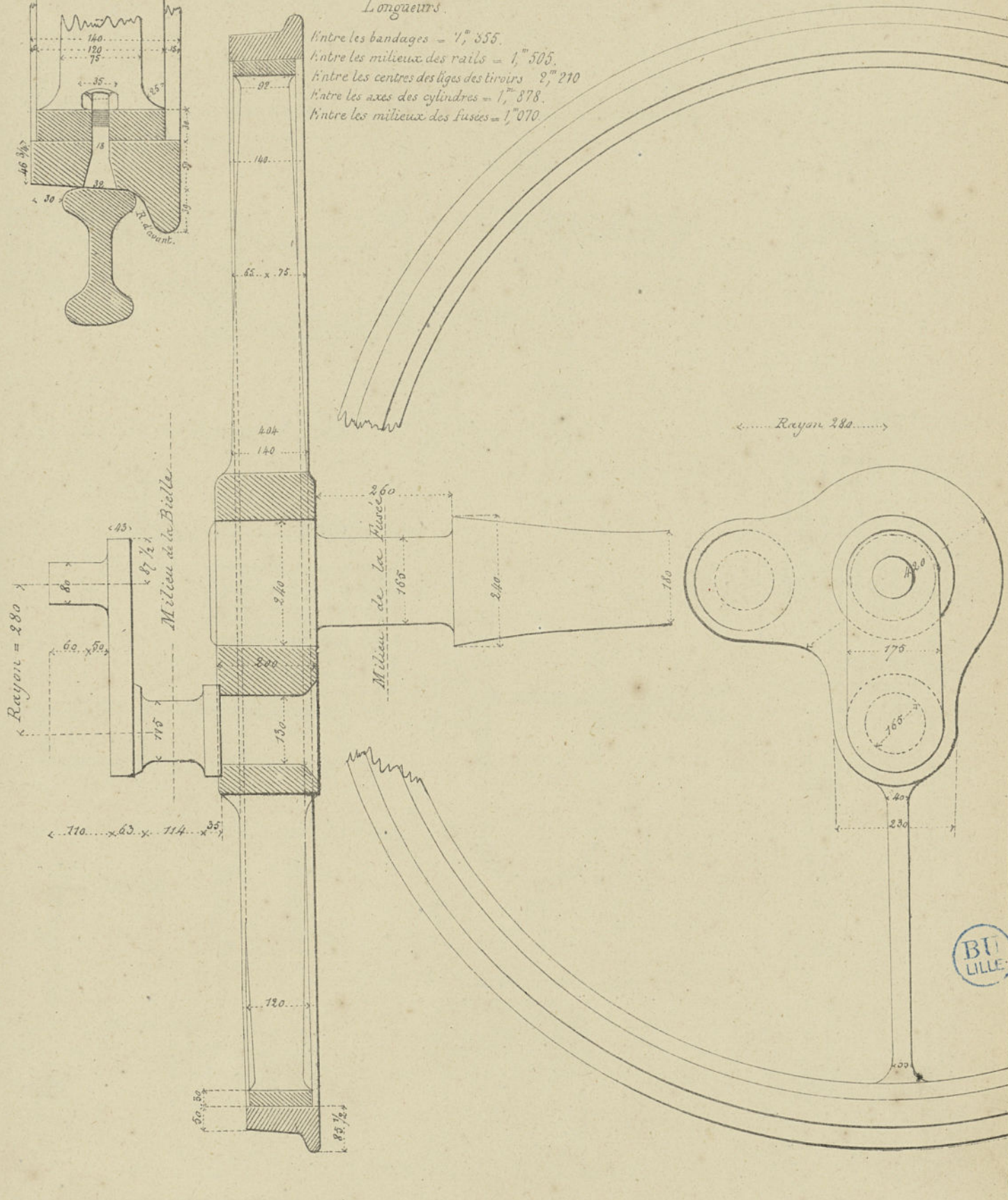


Fig. 139. Roue motrice (Crampton) échelle de 10.

Longueurs.

- Entre les bandages = 1^m, 555.
- Entre les milieux des rails = 1^m, 505.
- Entre les centres des liges des tiroirs = 2^m, 210.
- Entre les axes des cylindres = 1^m, 878.
- Entre les milieux des fusées = 1^m, 070.

Diamètre de la Roue 2^m, 100



BU
LILLE

M.V.

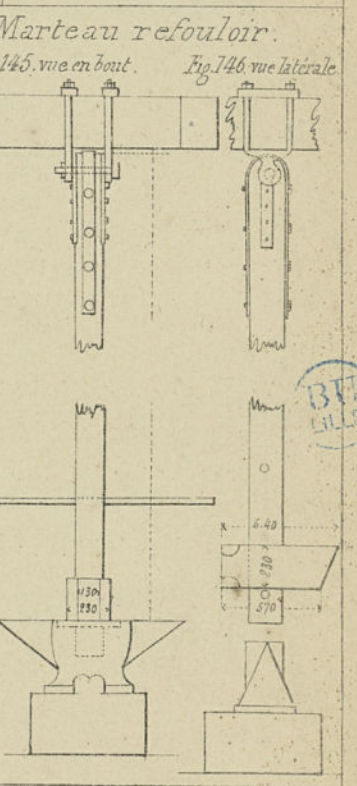
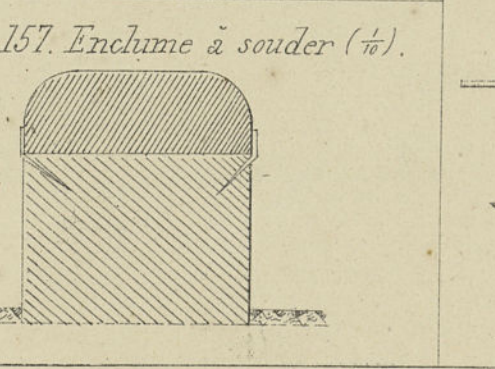
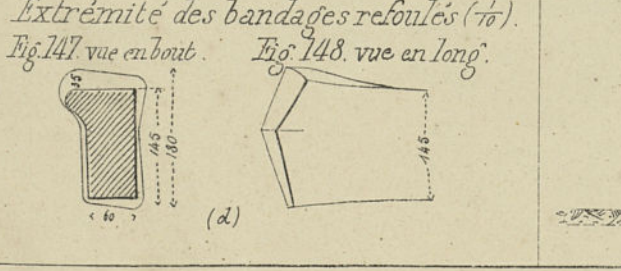
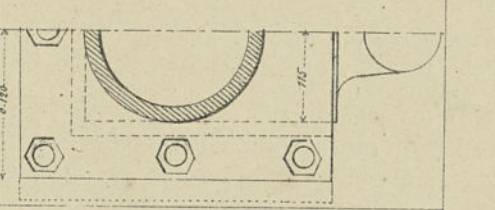
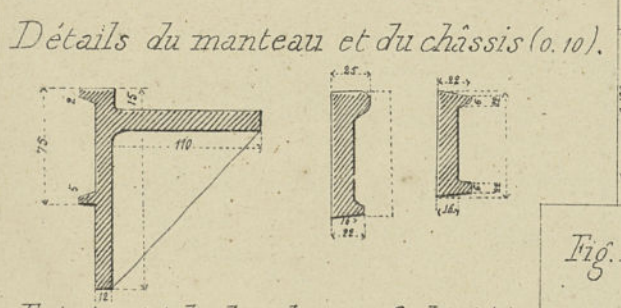
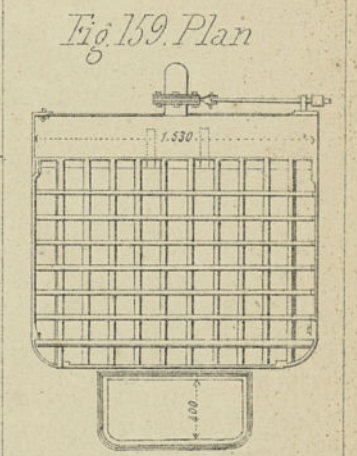
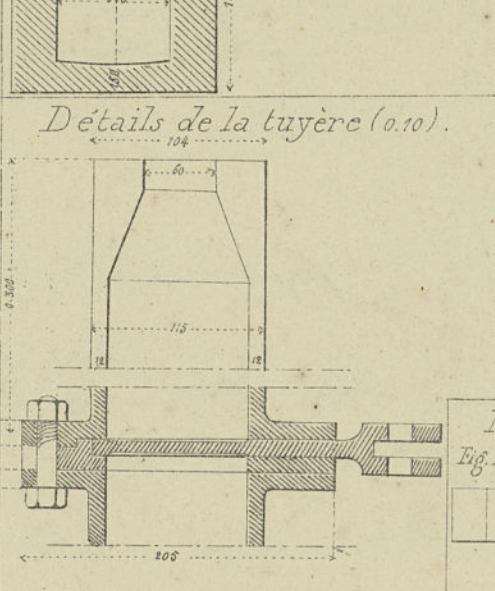
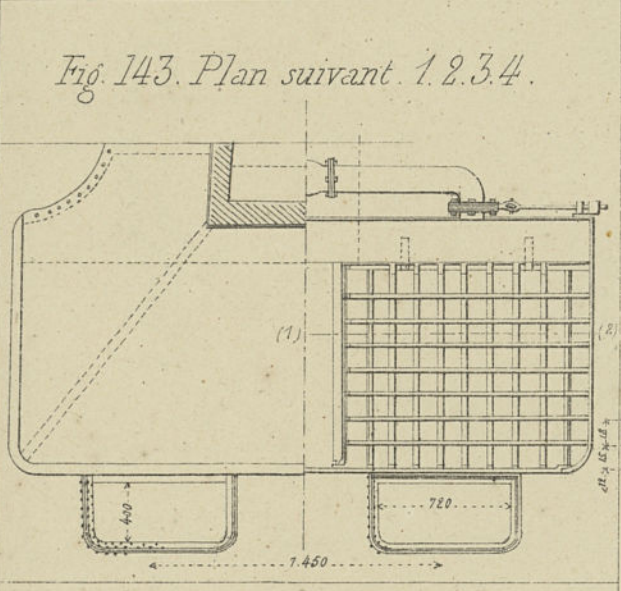
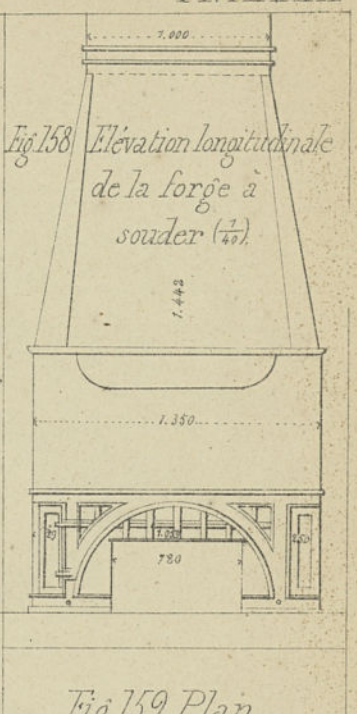
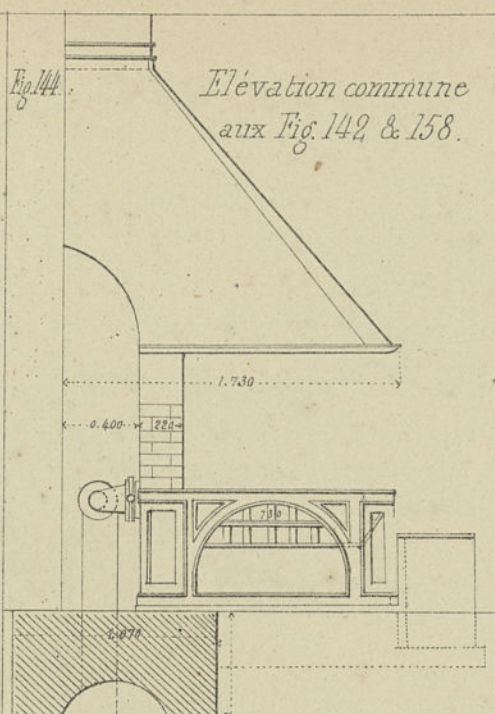
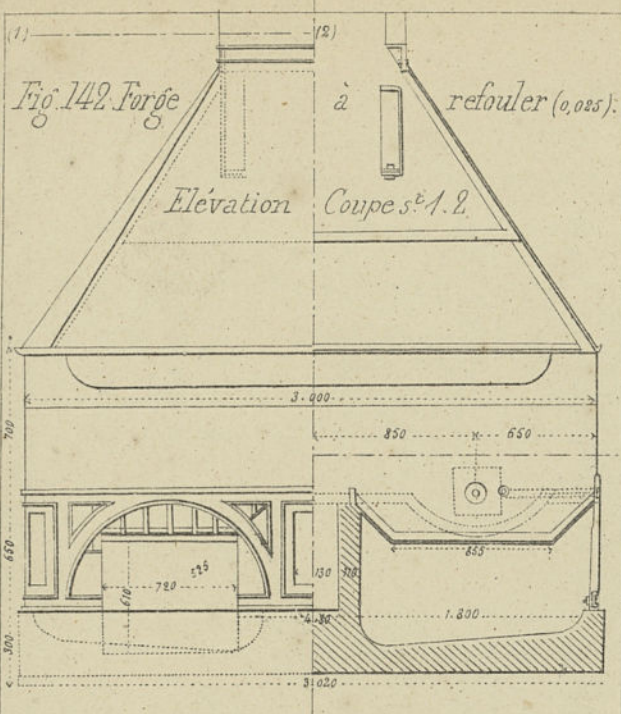


Fig. 150. Four à chauffer les bandages développés
Elevation et coupes longitudinales par C.D.E.F.G.H.

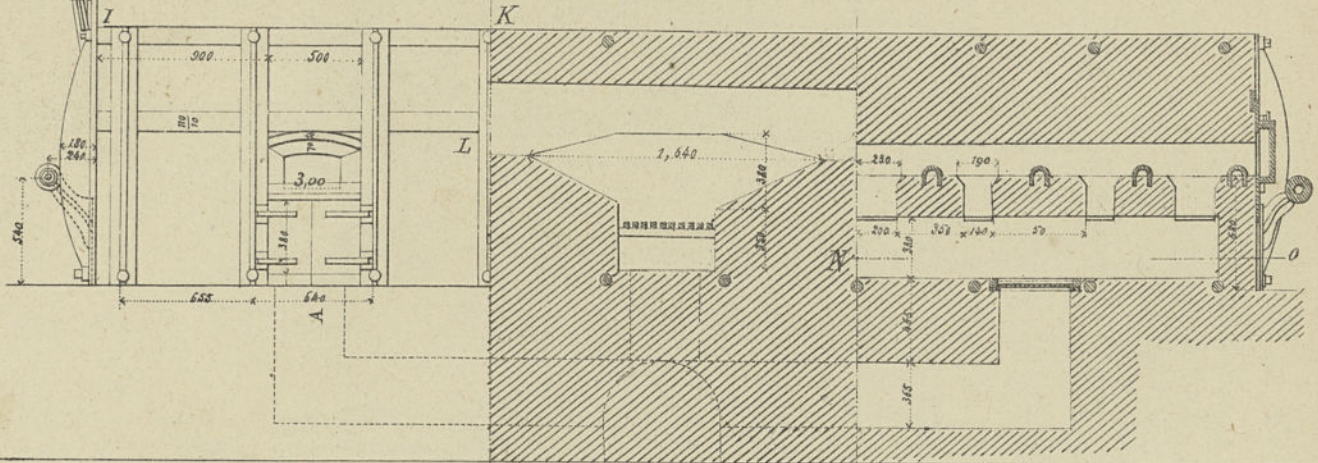


Fig. 149. Plans et coupes par IKLMNO

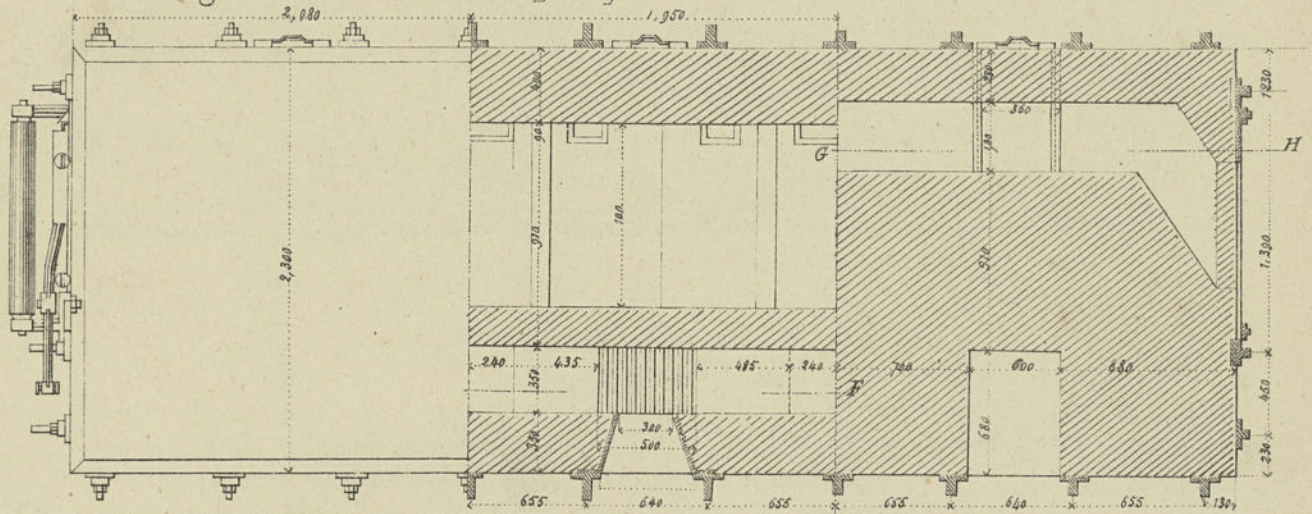


Fig. 151. Coupe transversale par AB

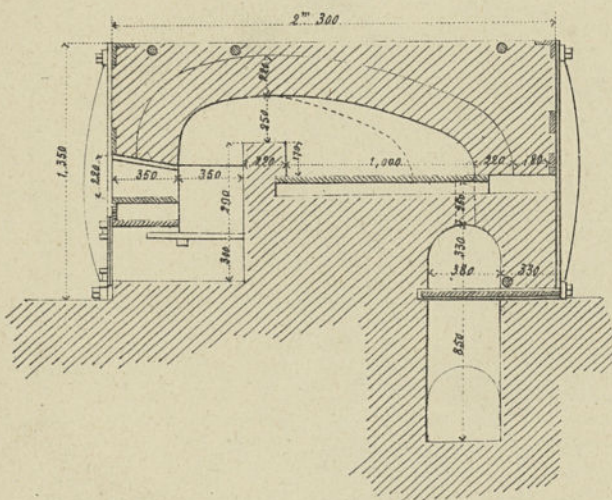
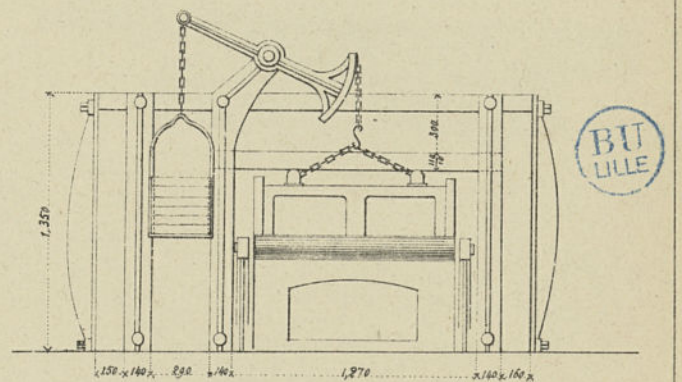


Fig. 152. Elevation transversale.



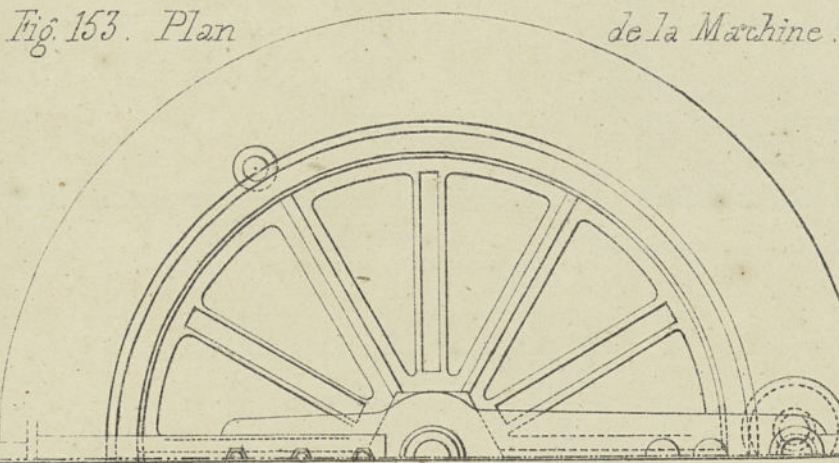
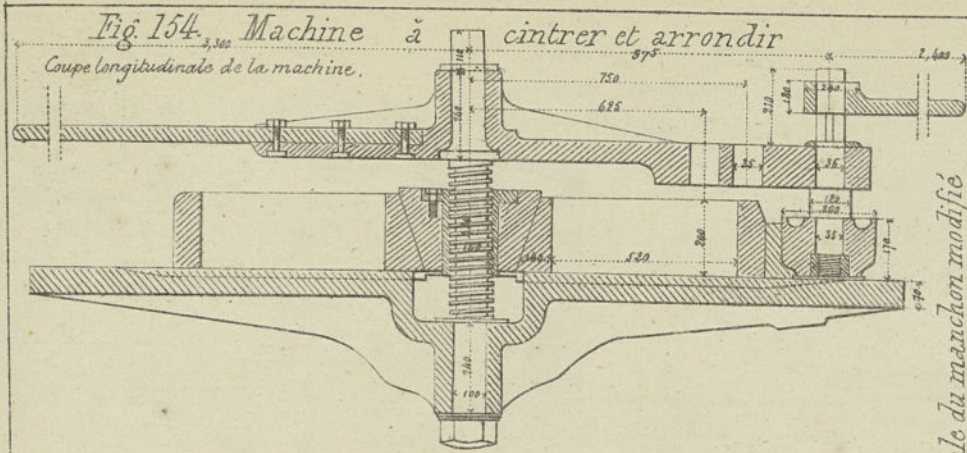


Fig. 155. Coupe longitudinale du manchon modifié.

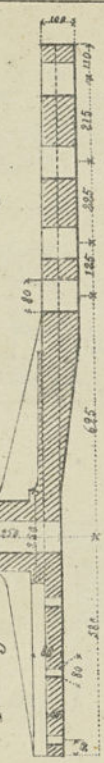
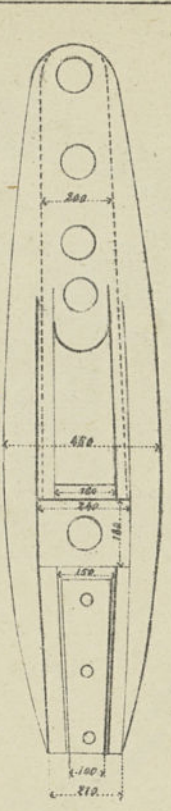


Fig. 156. Plan du manchon modifié.



Levier à arrondir

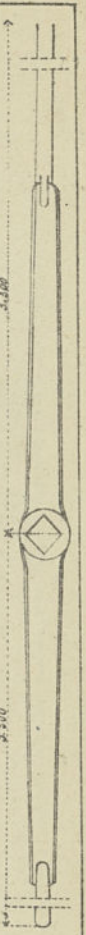


Fig. 160. Grue de travail (0.025). Elevation longitudinale.

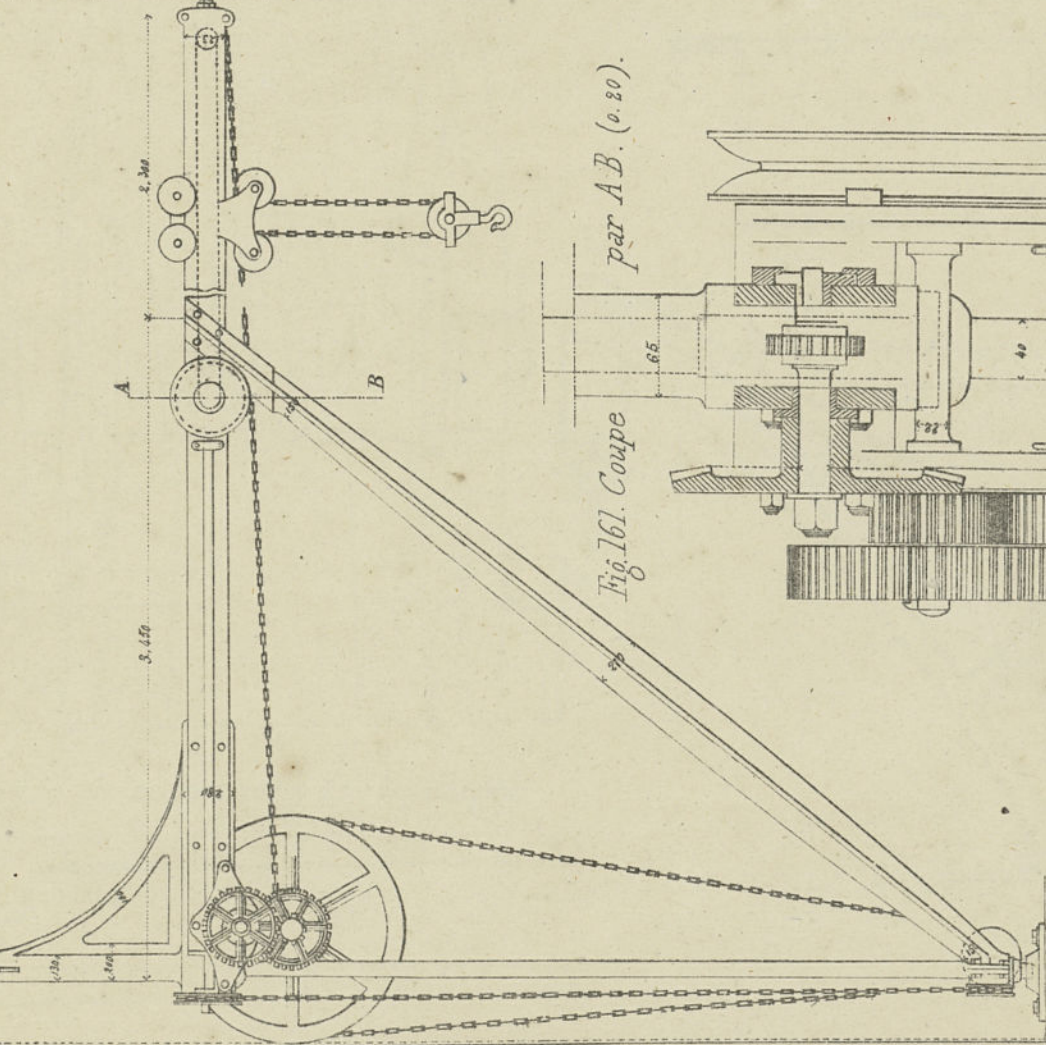
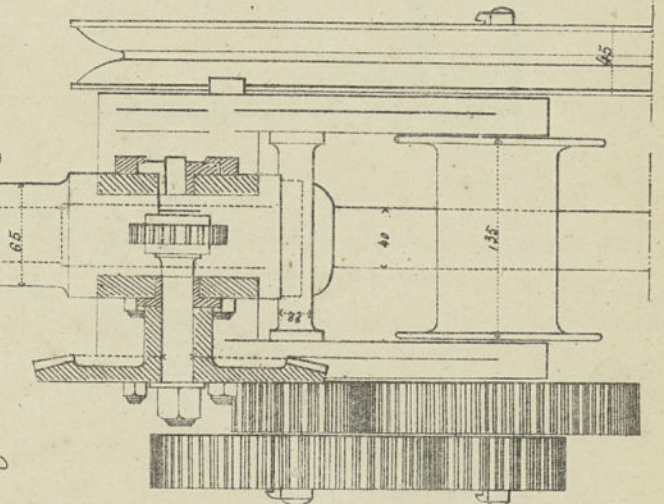
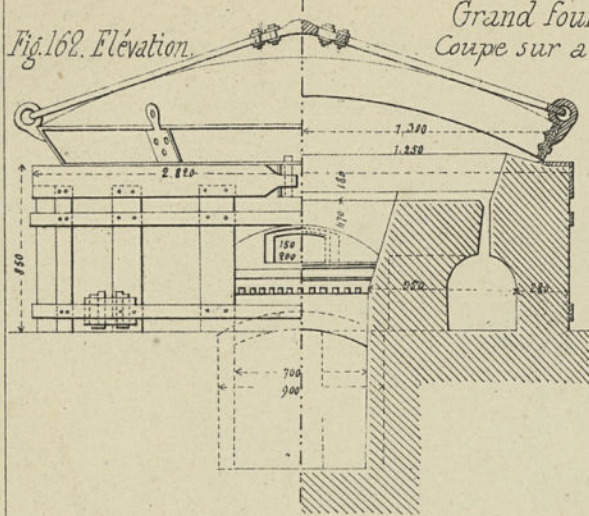


Fig. 161. Coupe par A.B. (0.20).



BU LILLE

M.V.



Grand four circulaire à calotte mobile (0,025)
Coupe sur a b.

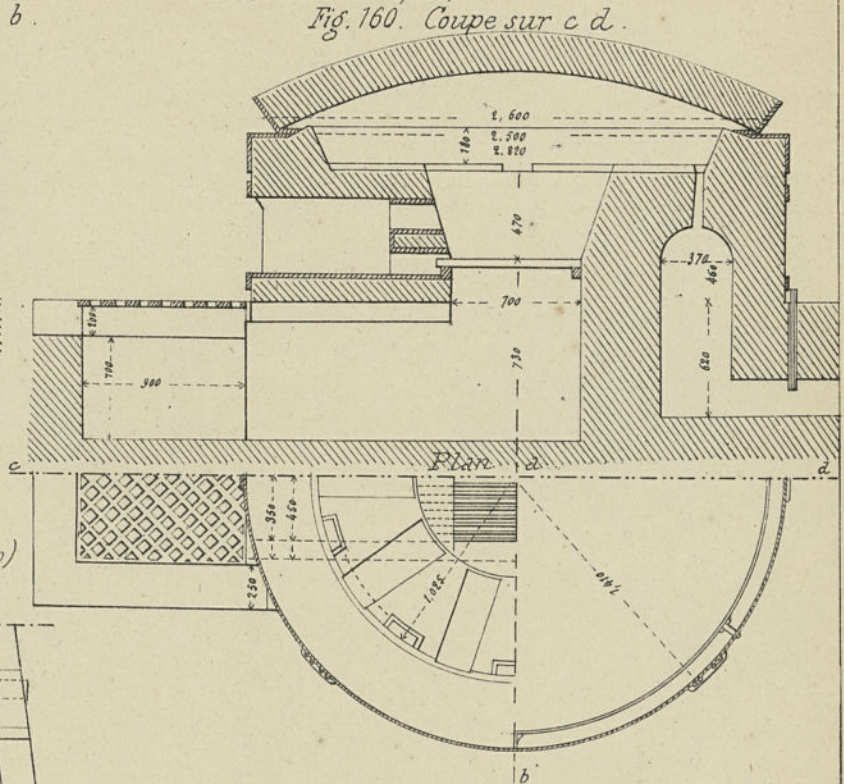
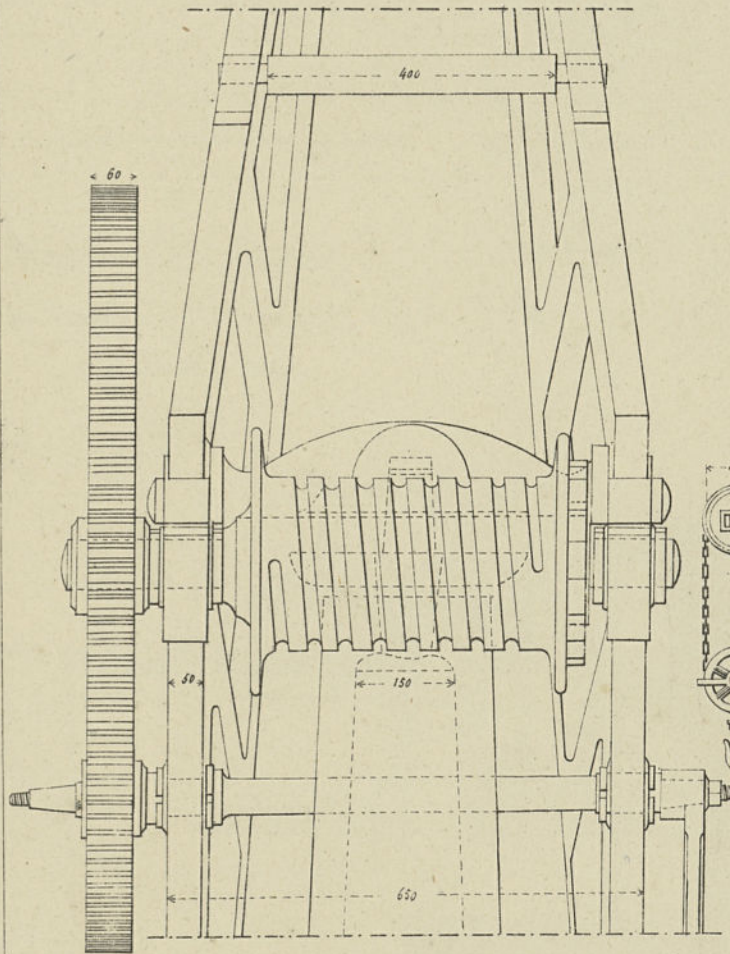


Fig. 163. Grue de service des calottes (0,10)
Elevation transversale.



Griffe de manoeuvre des bandages

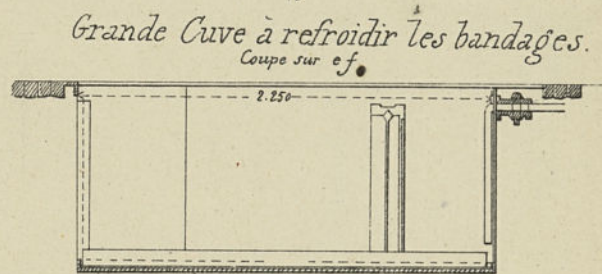
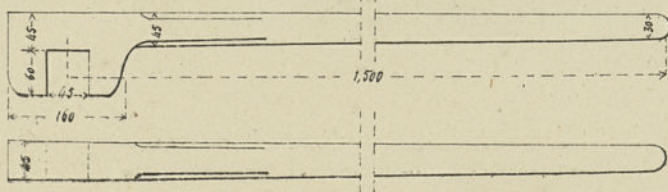


Fig. 164. Grue de service des calottes (0,025)
Elevation longitudinale.

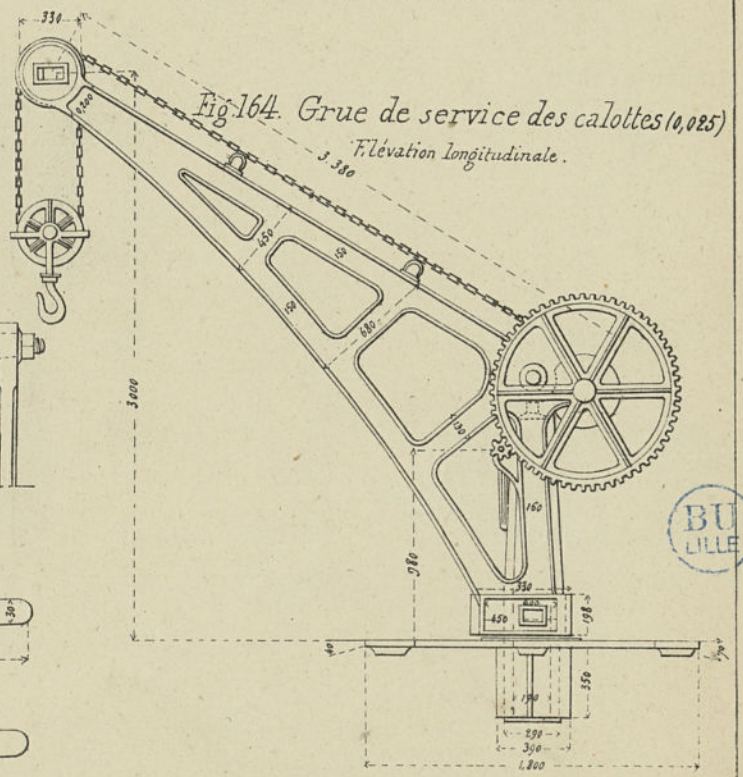


Fig. 171. Vue en bout.

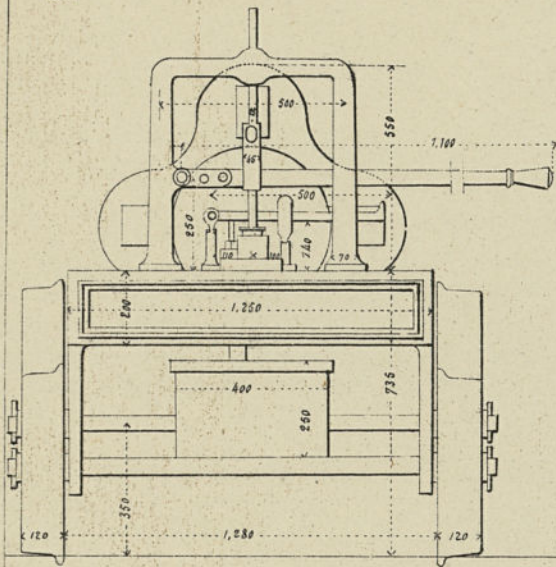


Fig. 169. Presse hydraulique pour le calage des roues
Elevation latérale.

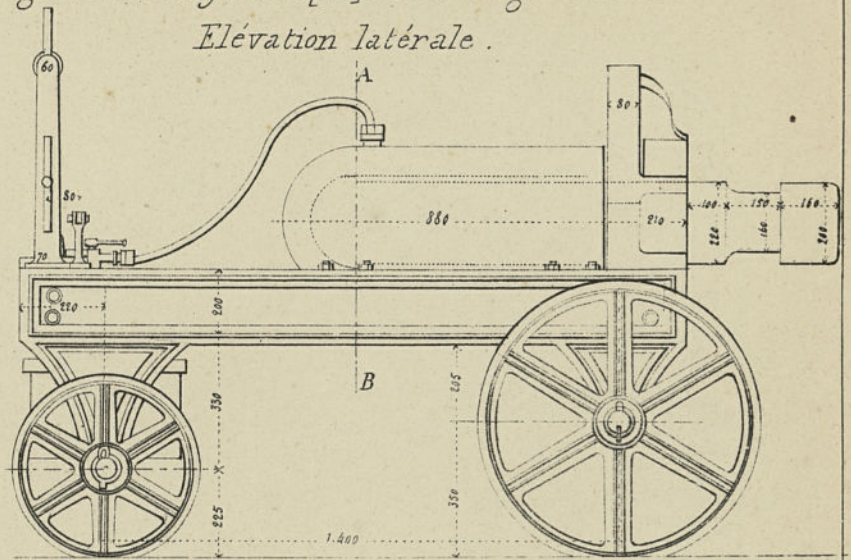
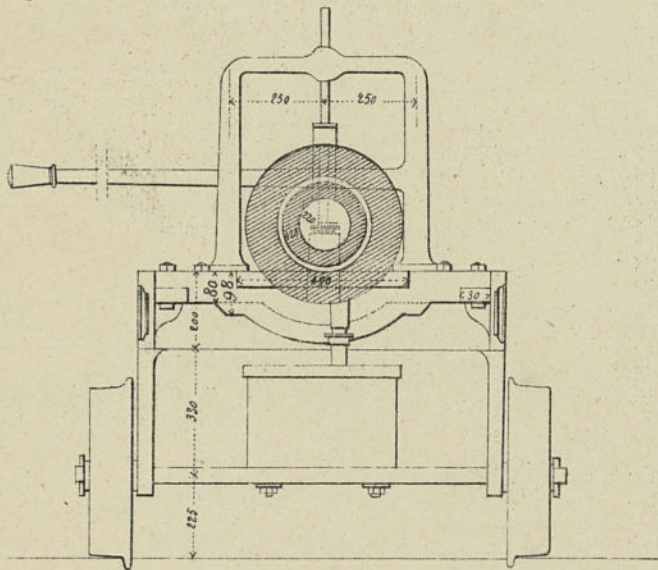


Fig. 170. Coupe suivant A. B.



Plateau à embattre les bandages

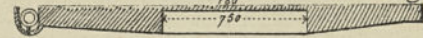


Fig. 167. Plan.

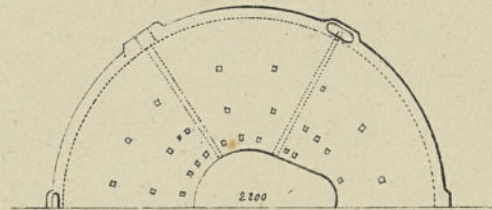


Fig. 168.

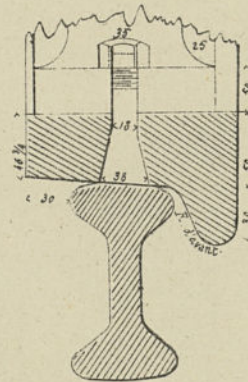


Fig. 176. Ancien profil.

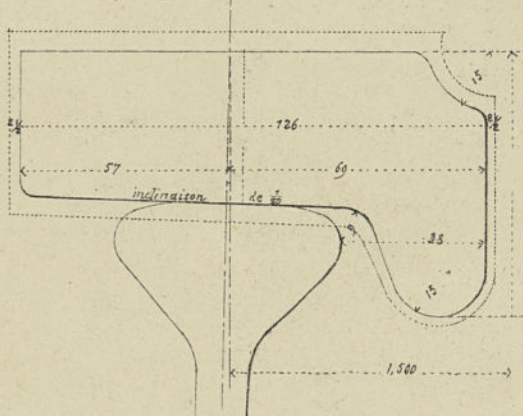
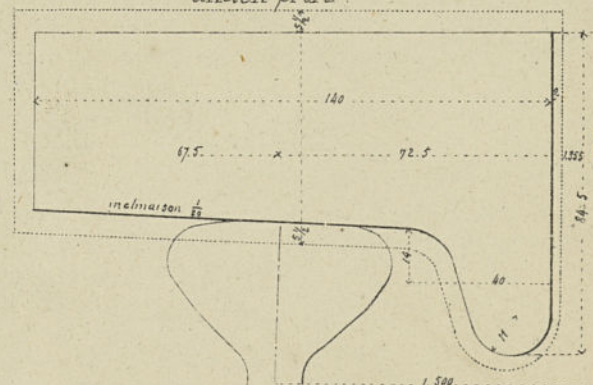


Fig. 175. Bandages de machines (pour roues du milieu)
ancien profil.



BU
LILLE

M.V.

Fig. 177. Bandages de machines (pour roues extrêmes) Ancien Profil

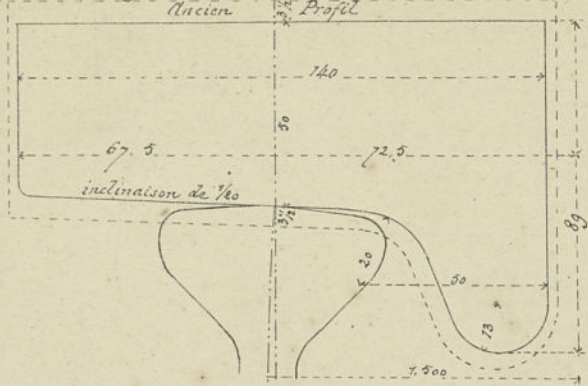


Fig. 178. Bandages de machines (pour roues de milieu). Ancien Profil

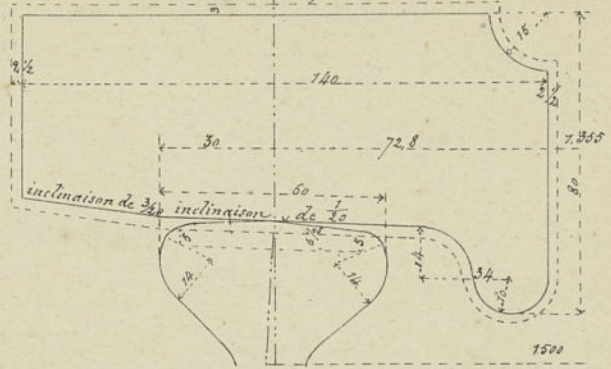


Fig. 179. Bandages de Voitures et Wagons Nouveau Profil

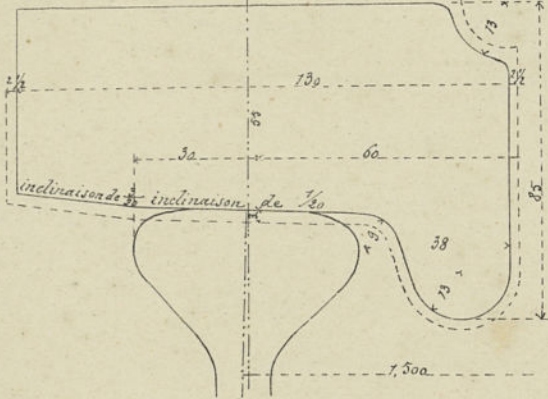


Fig. 180. Bandages de machines, (pour roues extrêmes) nouveau profil

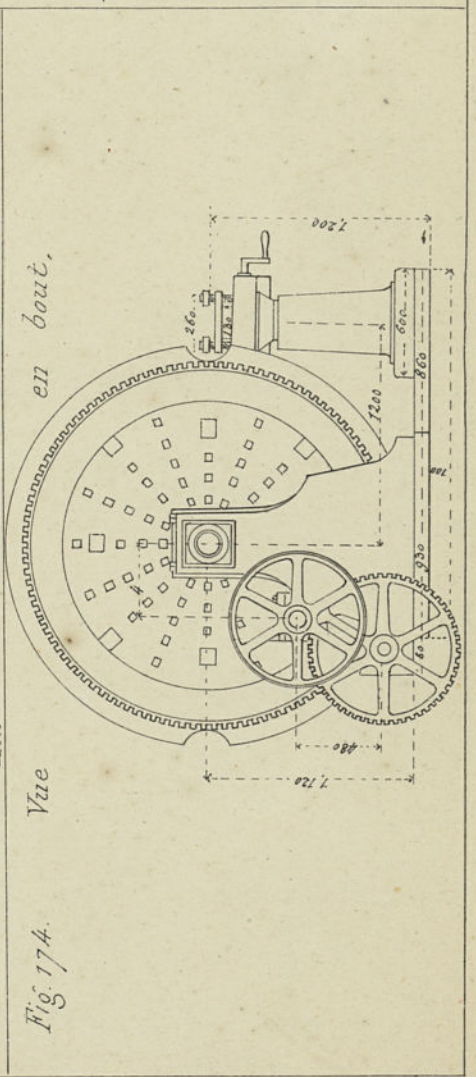
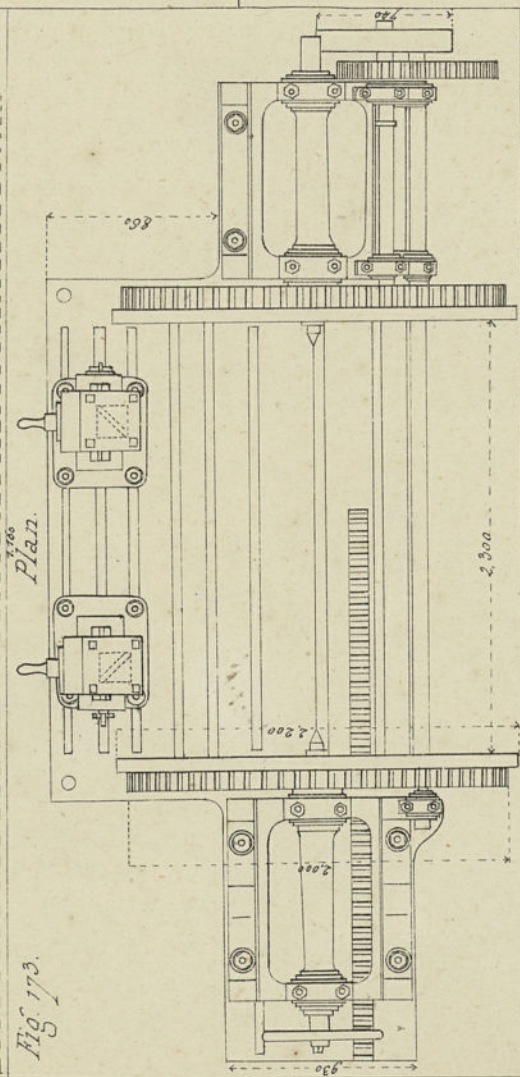
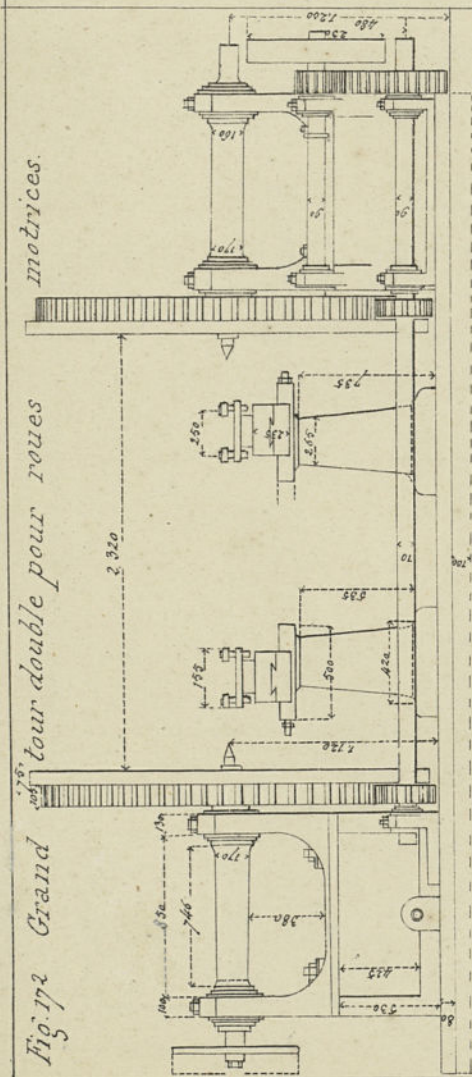
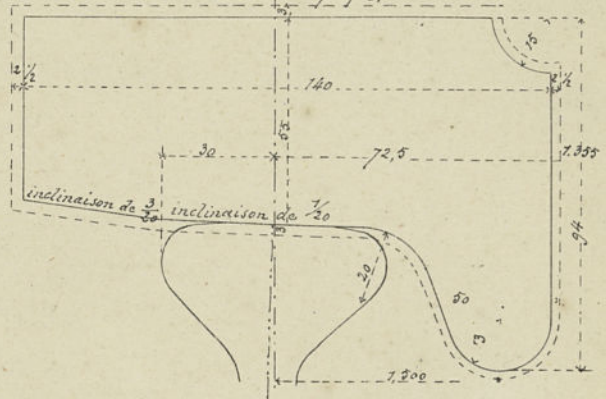


Fig. 181

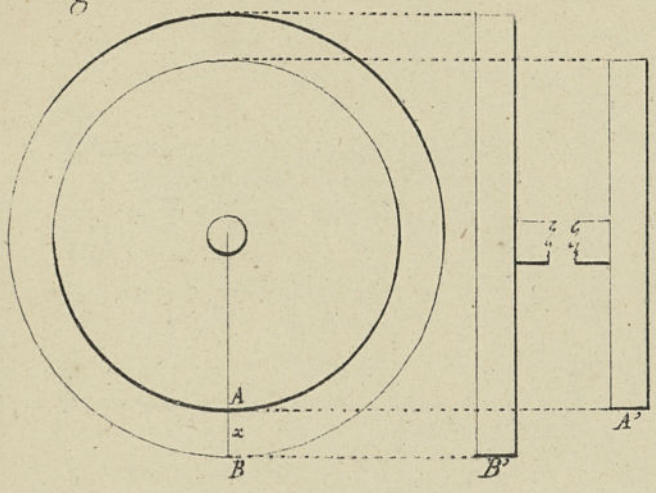


Fig. 182

Echelle de 0,10

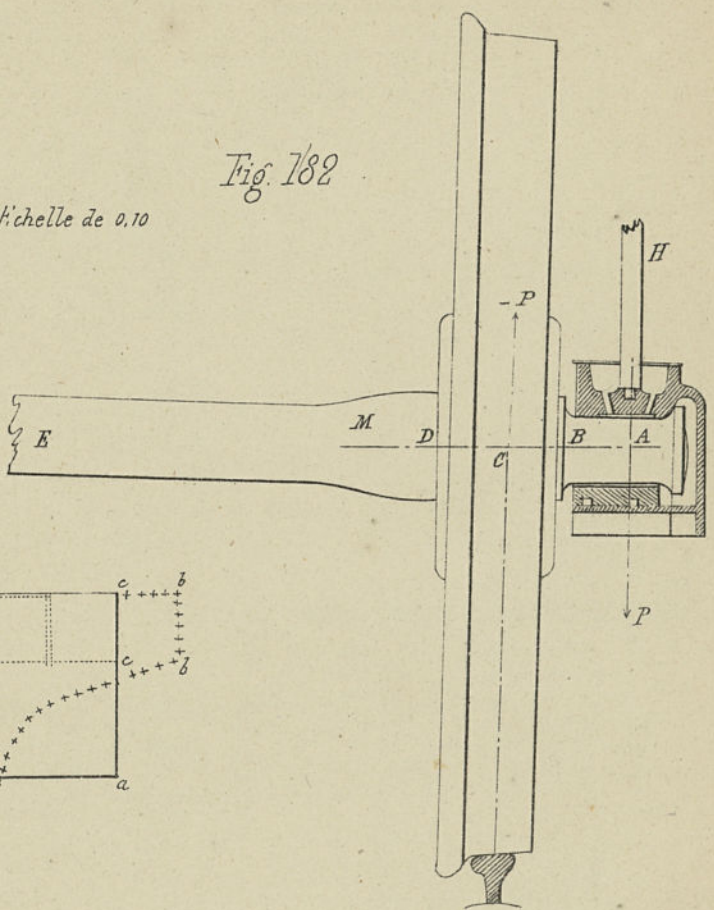


Fig. 185.

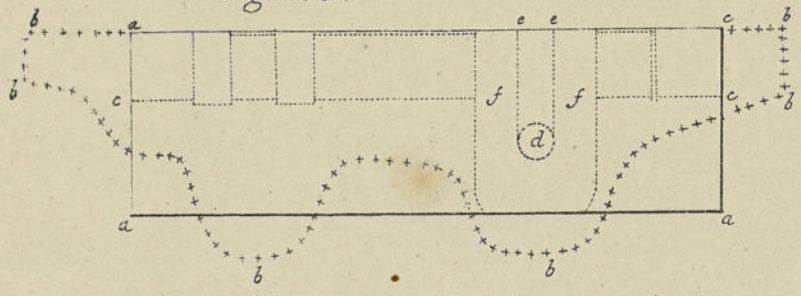


Fig. 183.

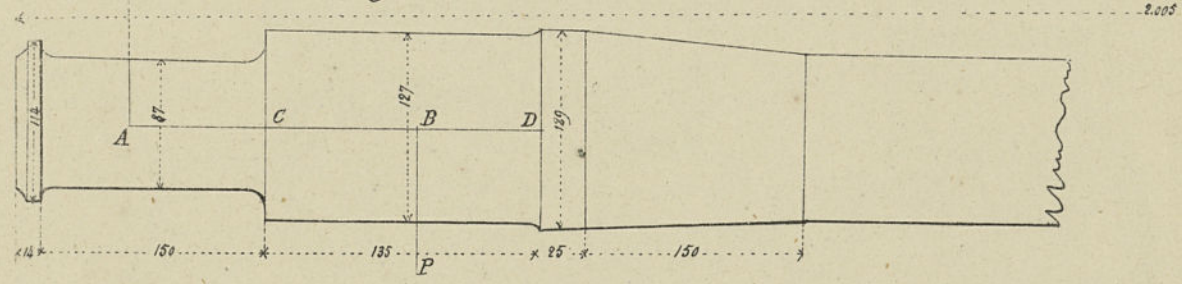


Fig. 184.

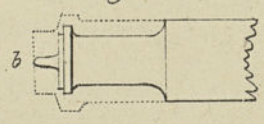


Fig. 186.

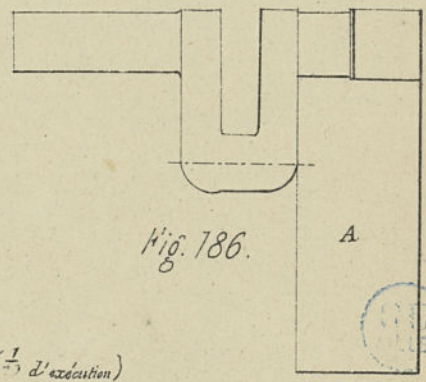
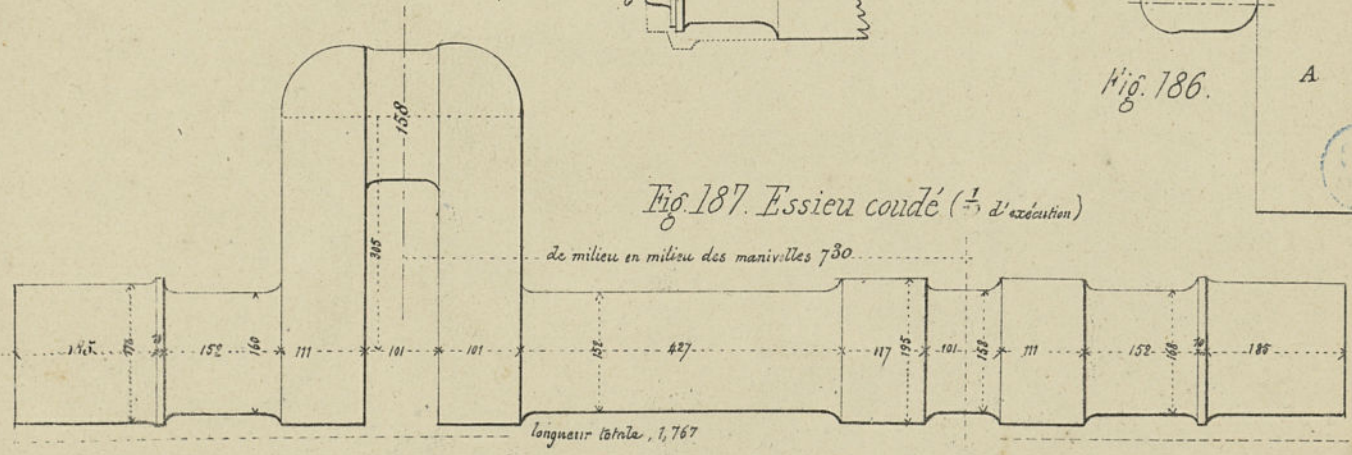


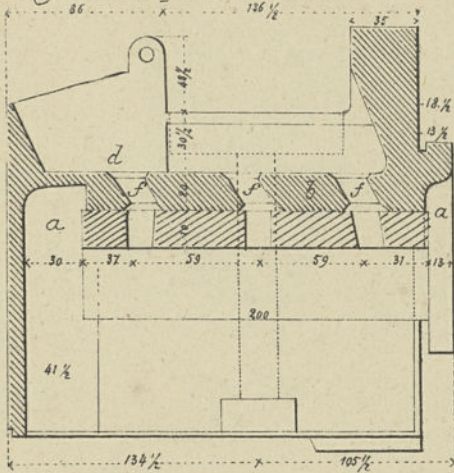
Fig. 187. Essieu courbé (1/2 d'exécution)

de milieu en milieu des manivelles 730

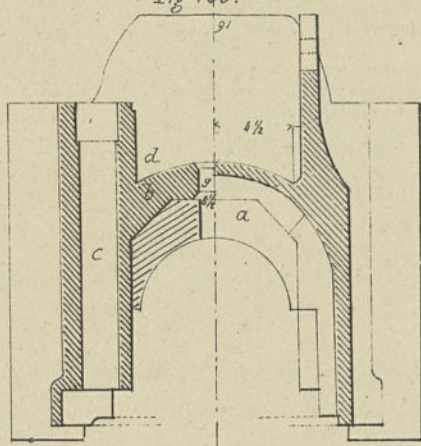


Boite à graisse pour fusée allongée (1/4 d'exécution).

Fig 188. Coupe suivant AB



1/2 Coupe sur EF. et son coussinet. Fig 189. 1/2 Coupe sur C.D.



demie vue par derrière.

demie elevat^{on} de face.

Fig 190

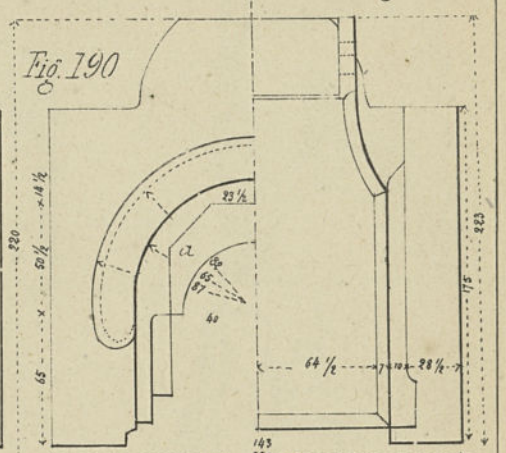
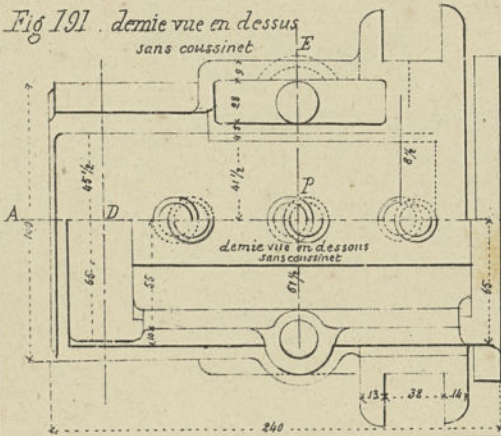


Fig 191. demie vue en dessus sans coussinet



dessous de la boite: demiplan en dessus

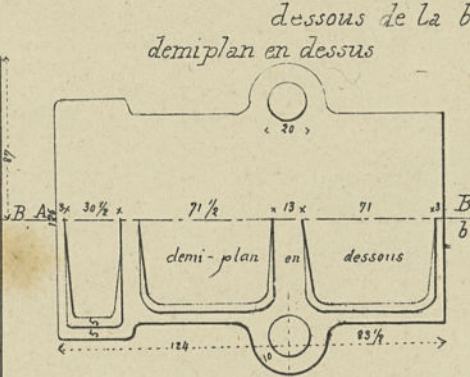
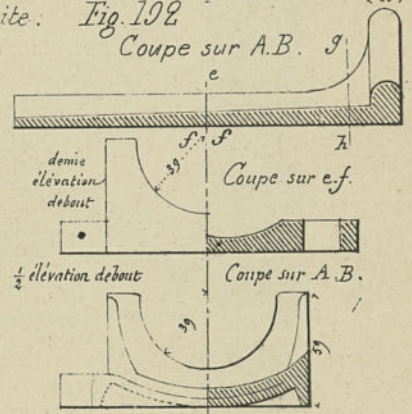
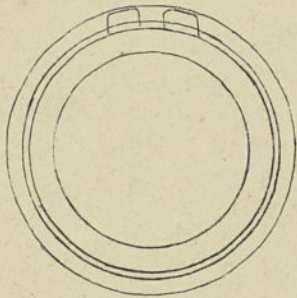


Fig 192

Coupe sur A.B.



Plan de la valve.



Coupe sur A.B.

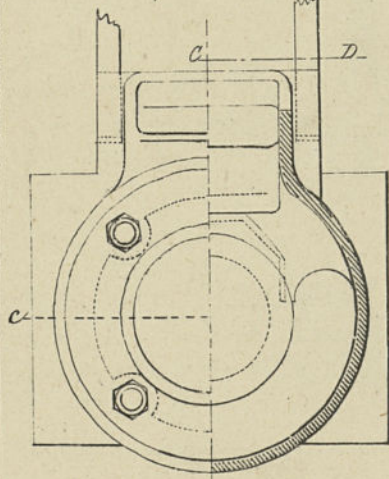
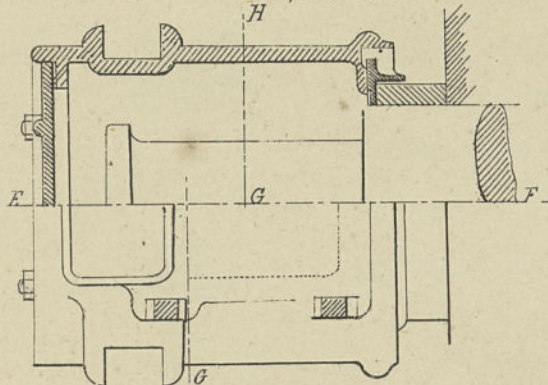
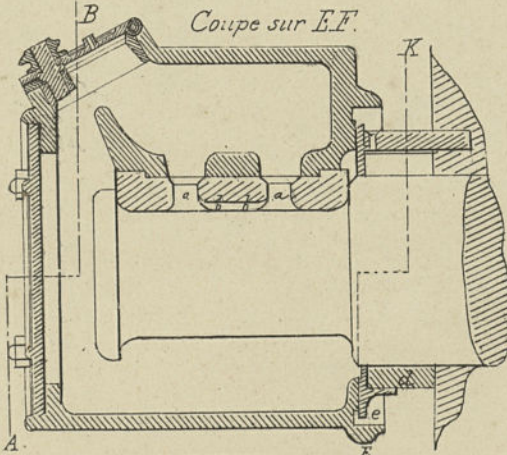


Fig 195. Boite à graisse Normanville (1/4 d'exécution)

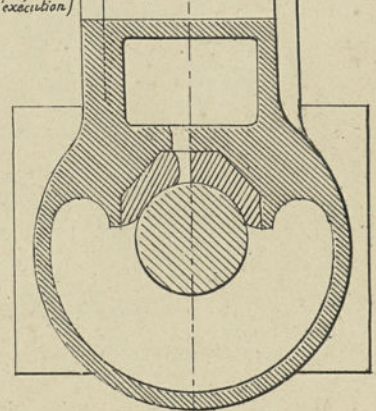
Coupe sur C.D.



Coupe sur E.F.



Coupe sur G.H.



Coupe sur I.K.

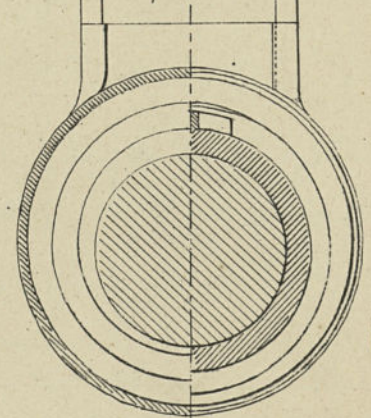


Fig. 193. Boîte à graisse à bouchons $\frac{1}{4}$ d'exécution.

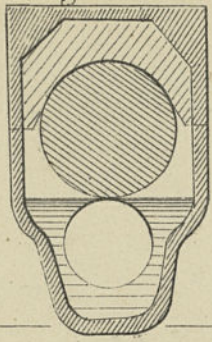


Fig. 194. Boîte à graisse à mèches de coton.

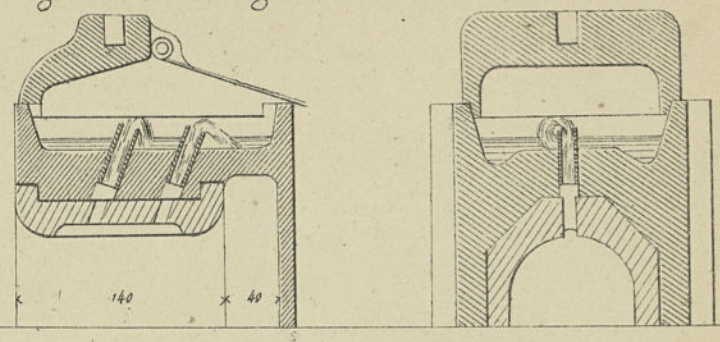


Fig. 196.

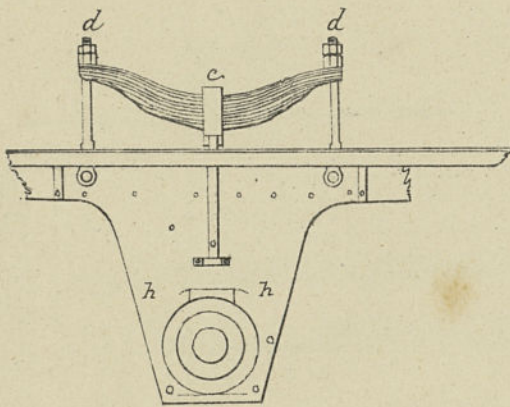


Fig. 195.

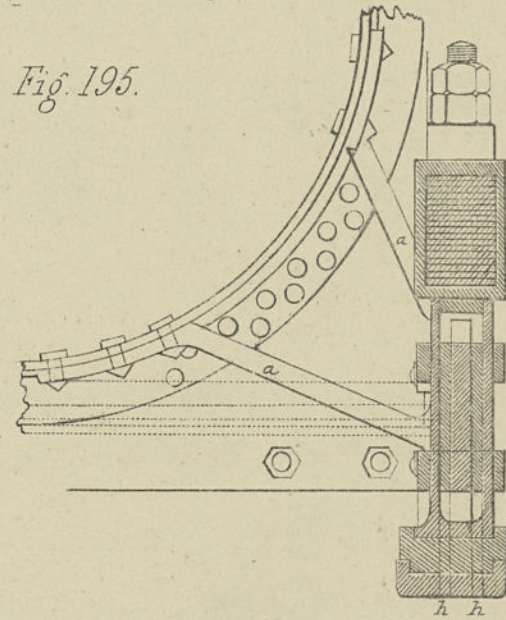


Fig. 198.

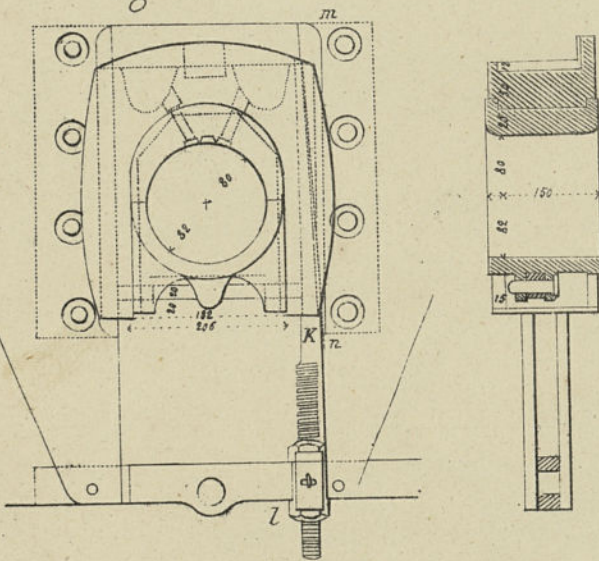


Fig. 200.

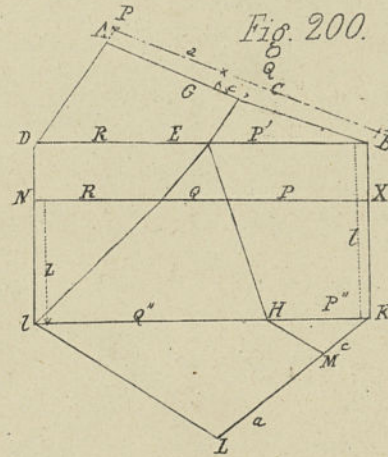


Fig. 199.

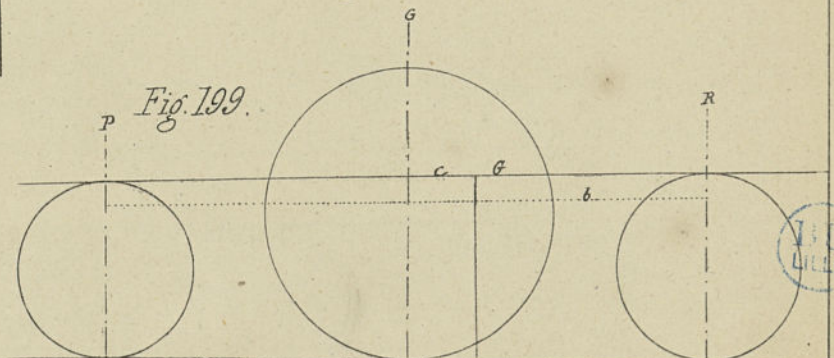
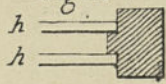
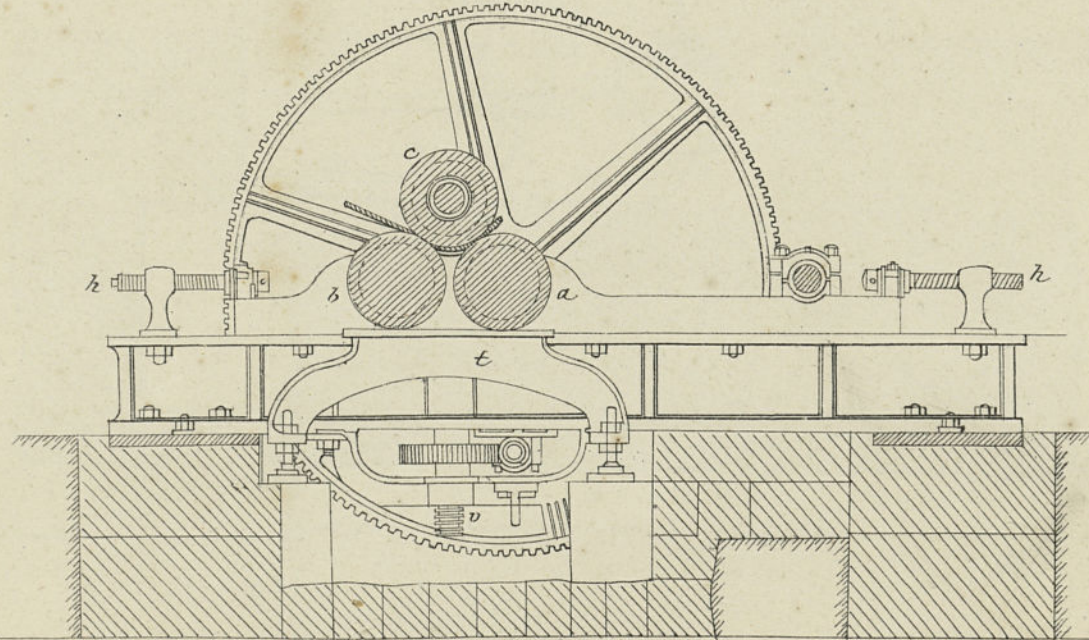
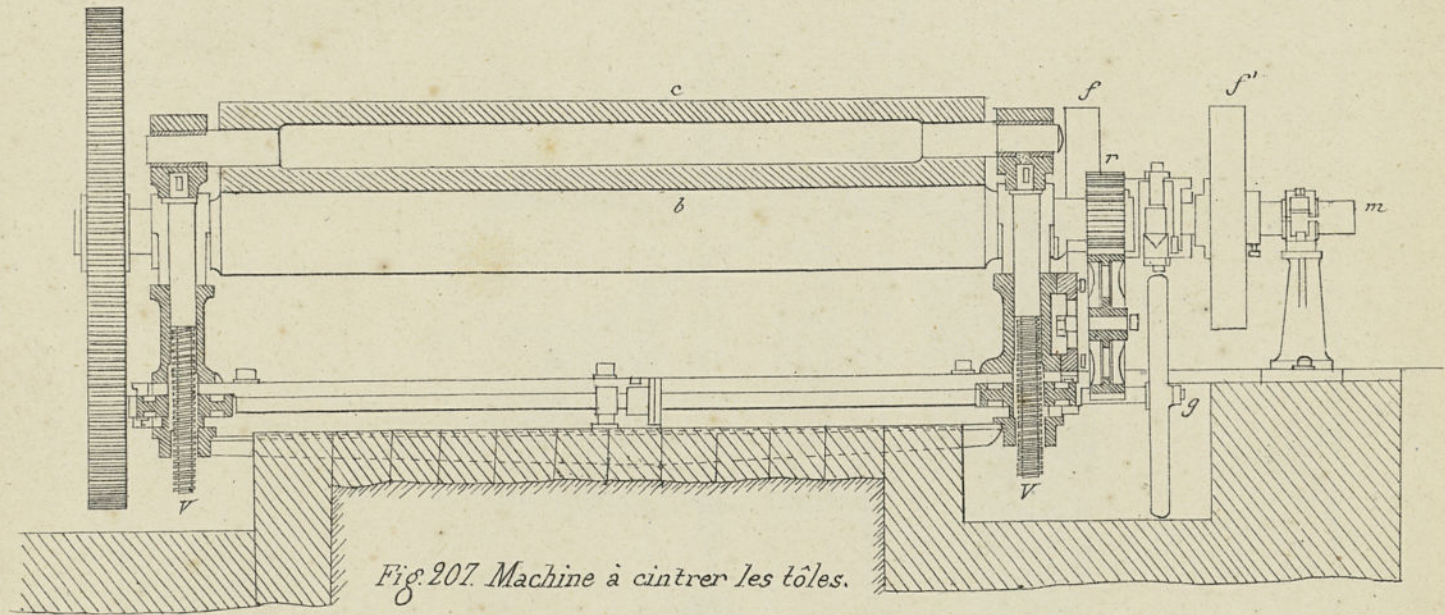
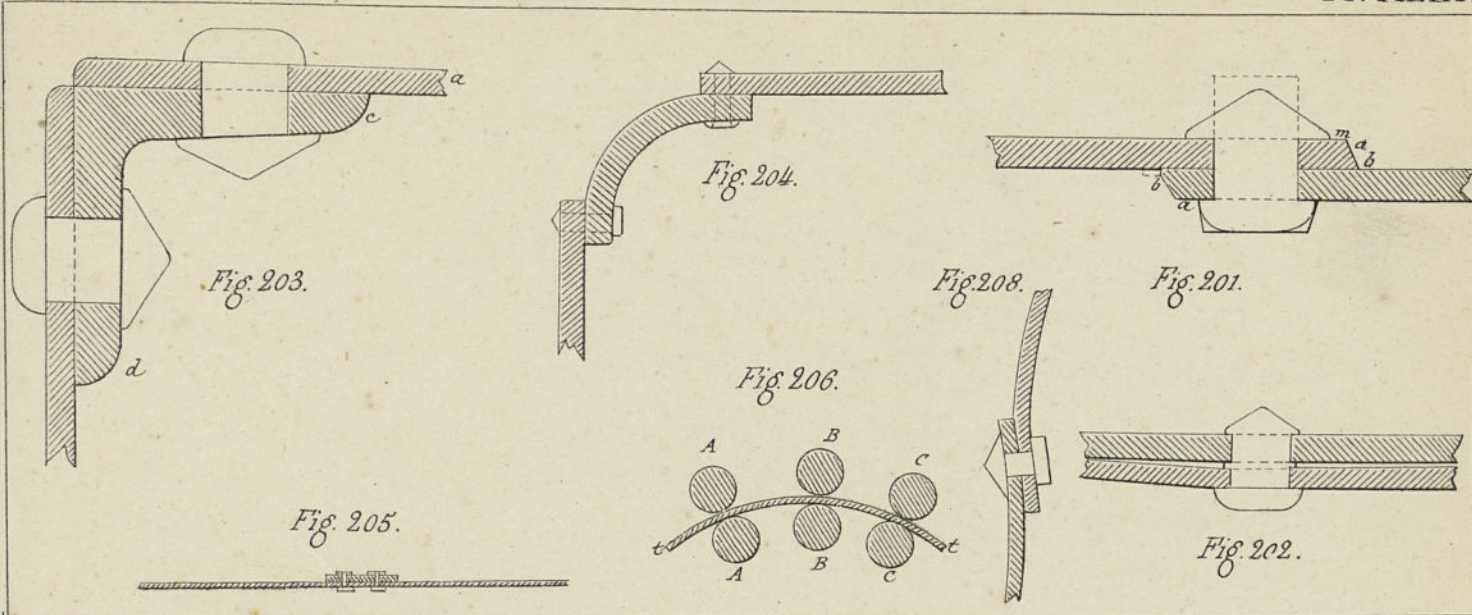


Fig. 197.

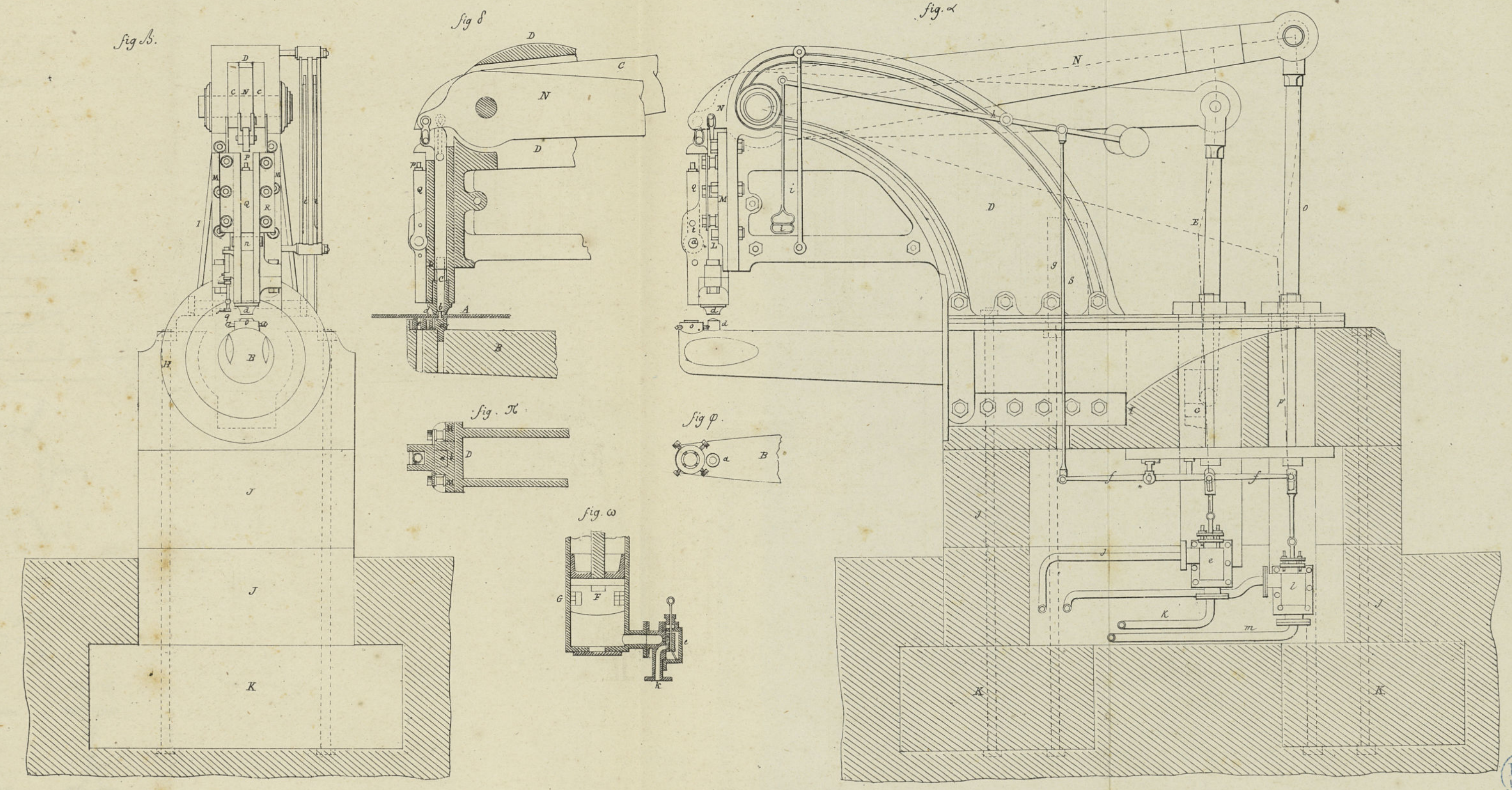


M. V.



BU
LIE

Fig. 209.



BU
LILLE

M.V.

Fig. 210.

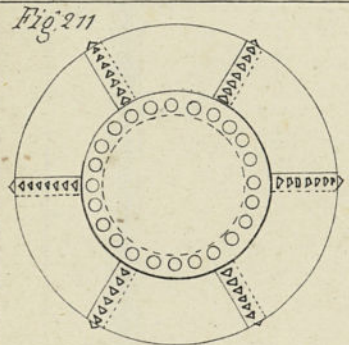
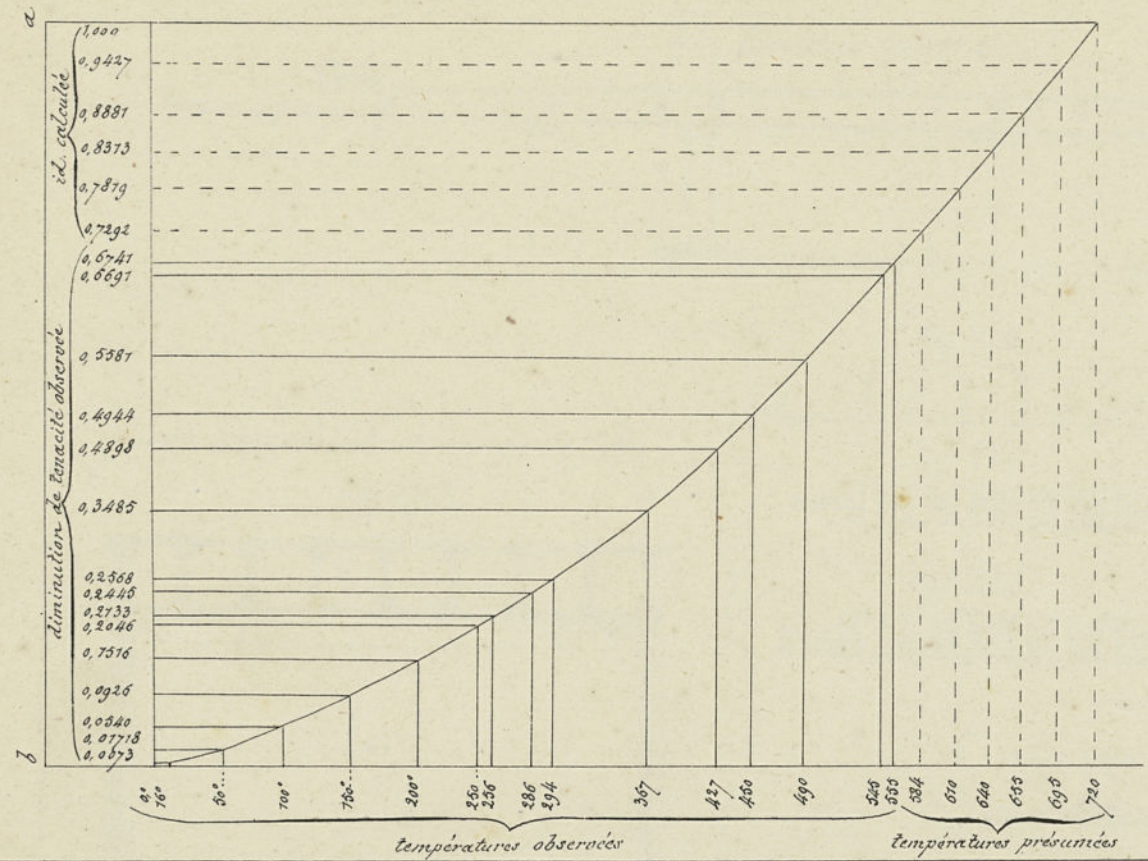


Fig. 212.

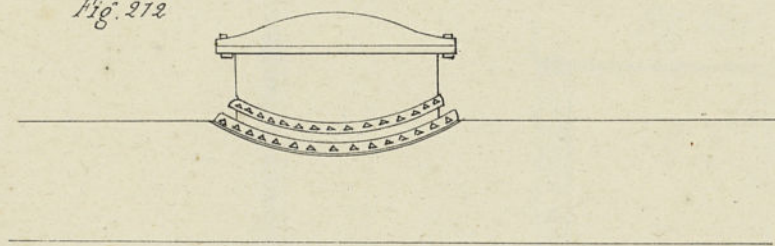


Fig. 213.

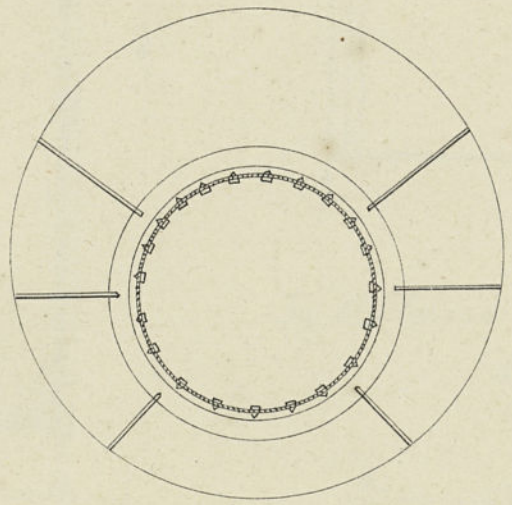


Fig. 215.

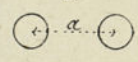


Fig. 217.

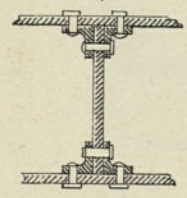


Fig. 218.

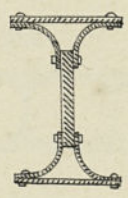


Fig. 214.

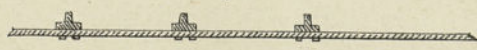
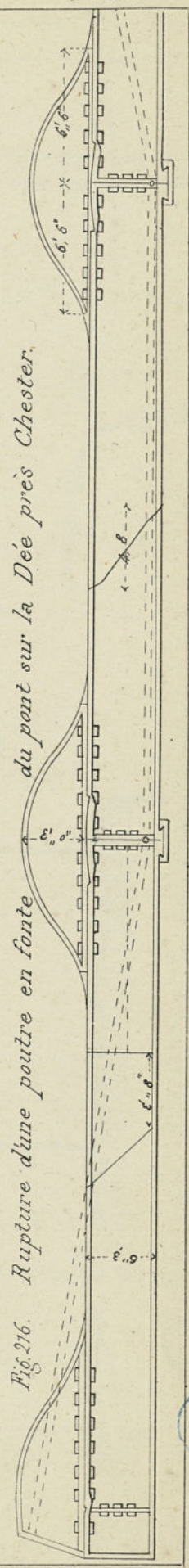


Fig. 216. Rupture d'une poutre en fonte du pont sur la Dée près Chester.



BU LILLE

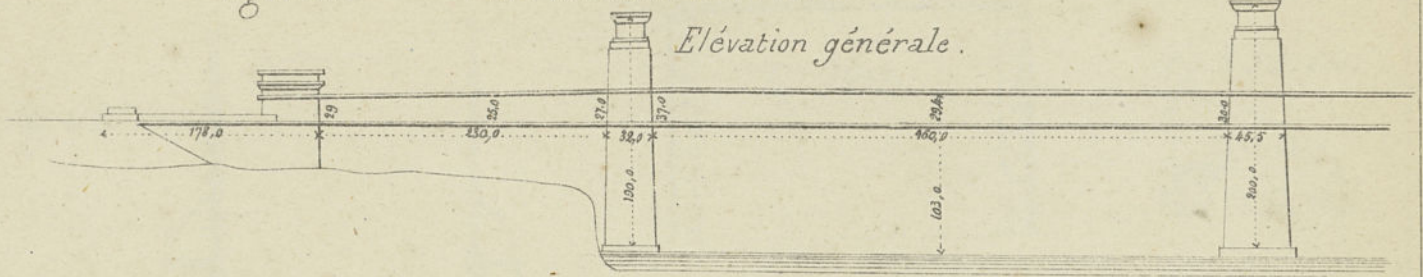
M. V.

Fig. 222.

Pont tubulaire en tôle.

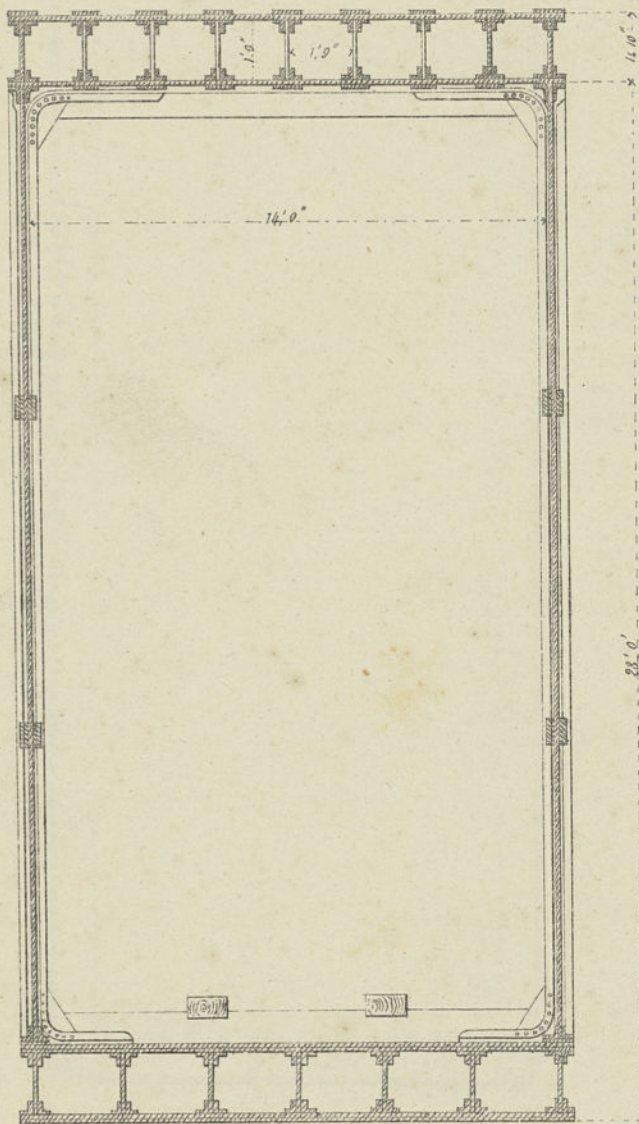
Cotes en pieds anglais.

Elévation générale.



Coupe transversale au milieu du tube.

Fig. 223.



Cotes en pieds anglais.

Fig. 219.

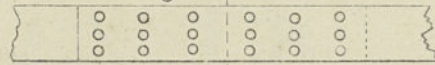


Fig. 220.



Fig. 221.



Fig. 224

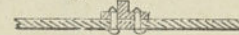


Fig. 226.

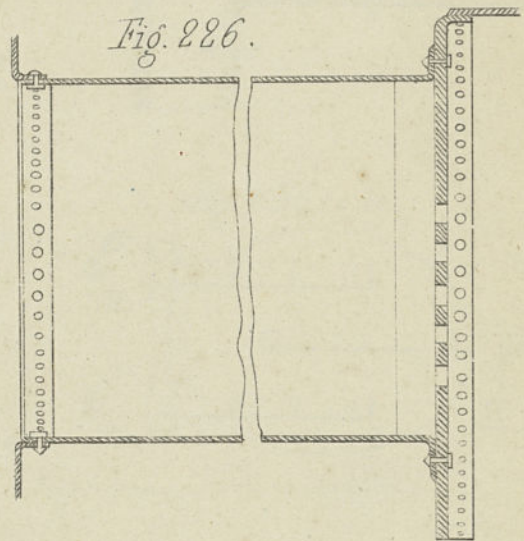


Fig. 225.

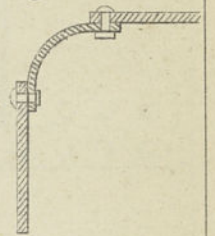
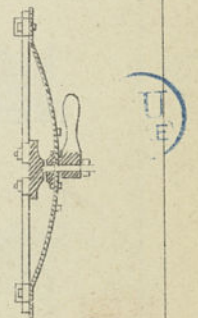
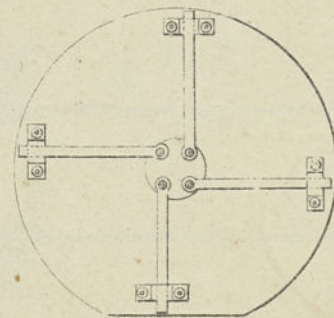


Fig. 228. Verrou de la porte de la boîte à fumée.



M.V.

Fig. 227 (0,10)

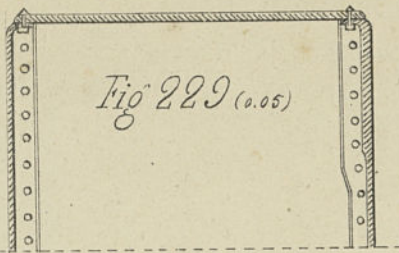
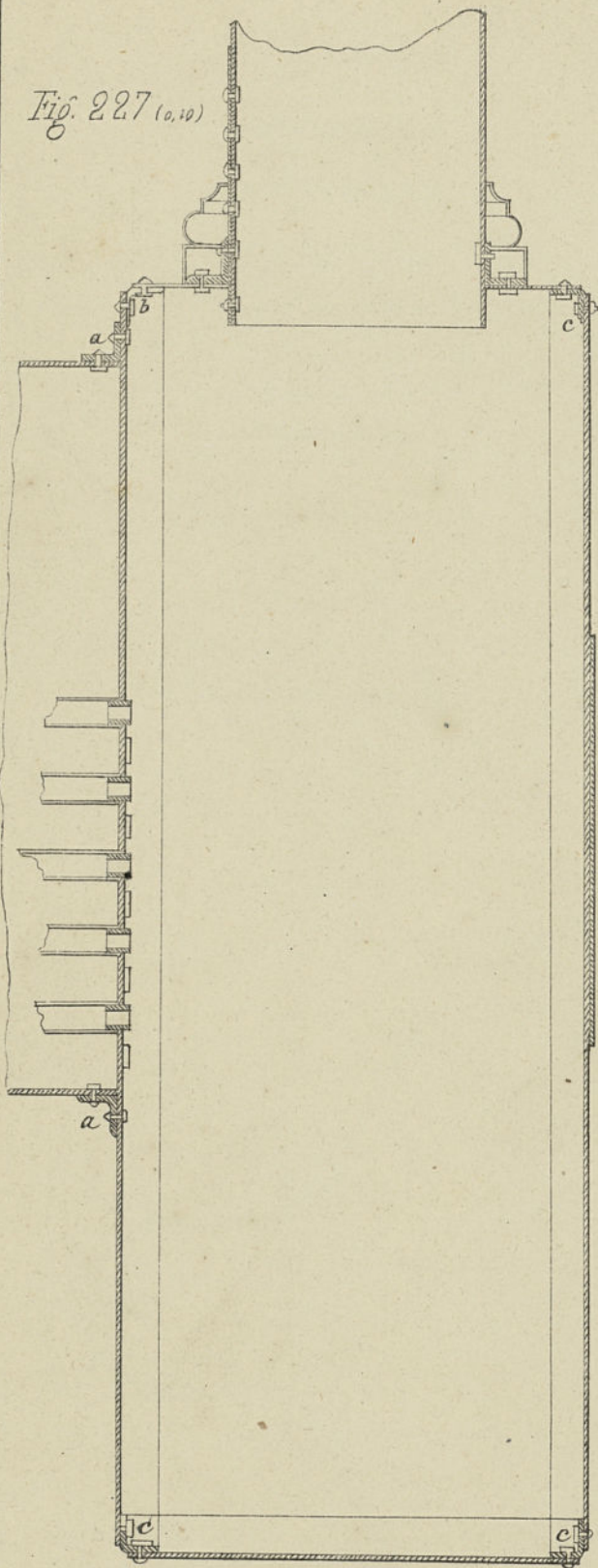


Fig. 230 (0,10)

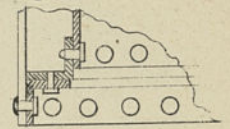


Fig. 231 (0,10)

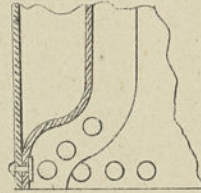


Fig. 232

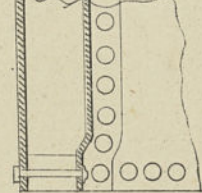


Fig. 233 (0,10)

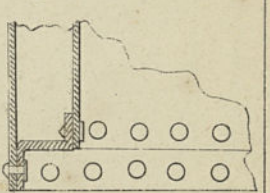
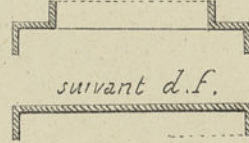


Fig. 234 bis. suivant b.c.



suivant d.f.

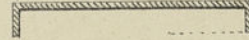


Fig. 234

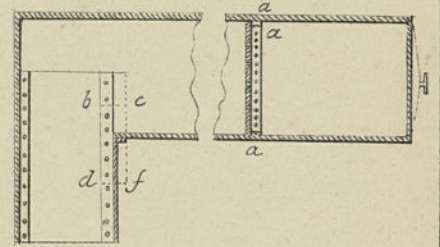


Fig. 231 (0,10)

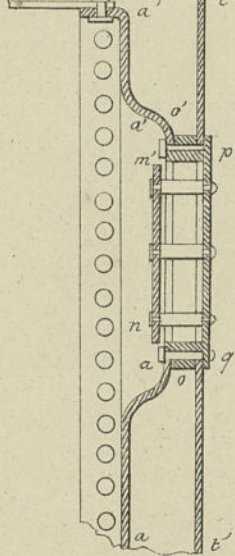


Fig. 236 (0,10)

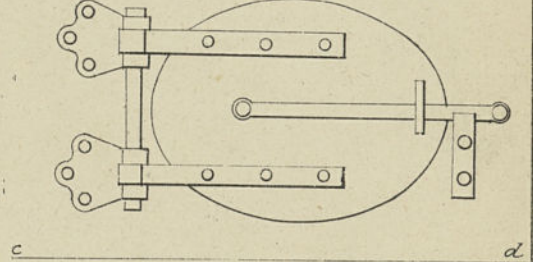
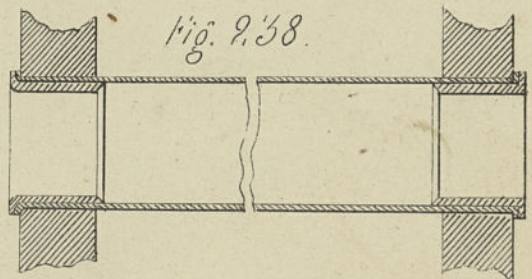


Fig. 238



M. V.

BU

Fig. 241 (0.05)

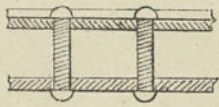
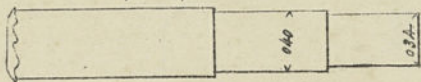
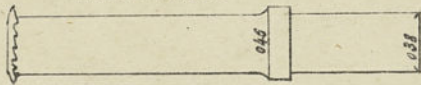


Fig. 237 (0.20)

Mandrin pour placer les viroles.



Chasse virole



(a) Chasse tube.

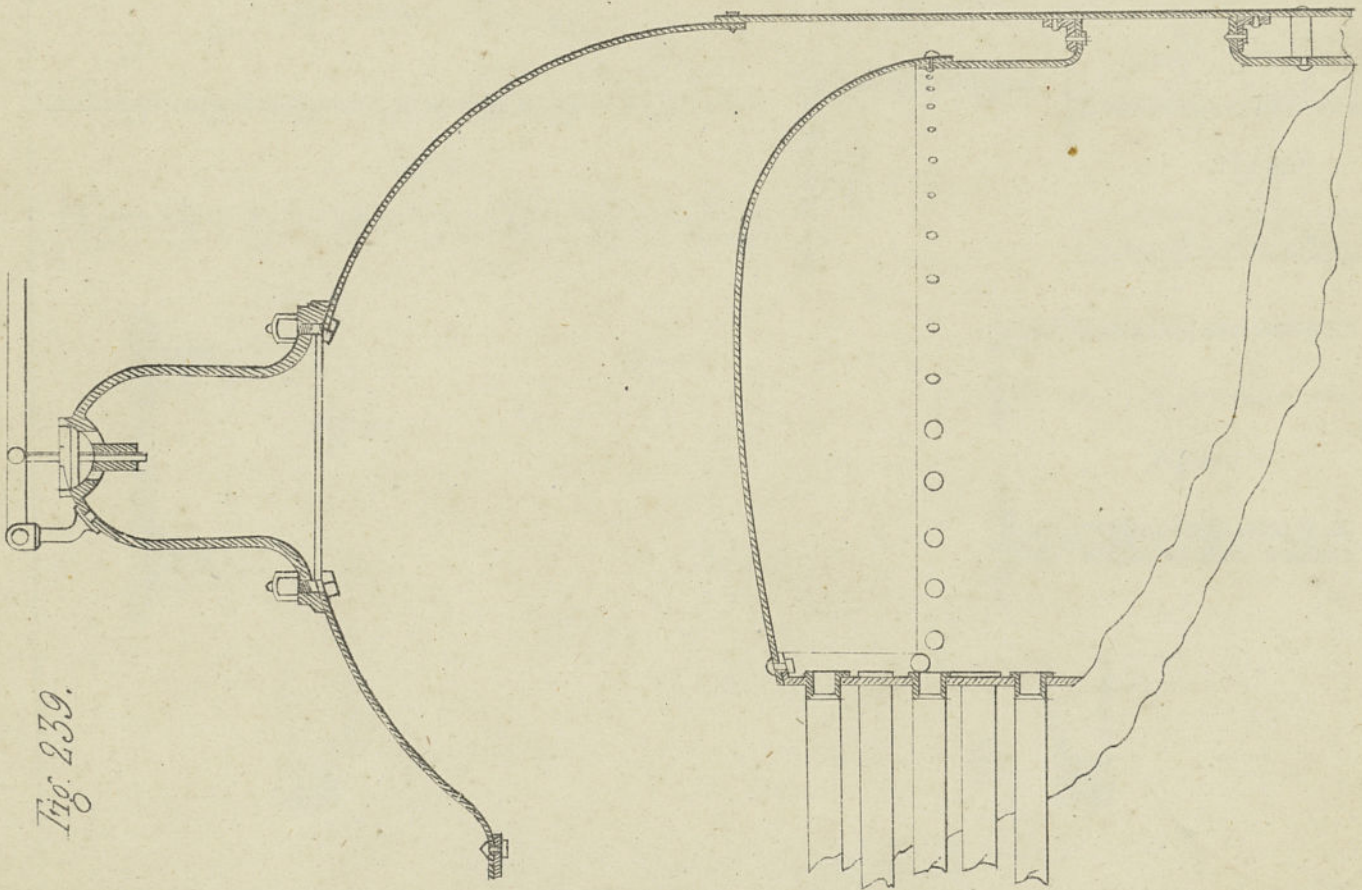
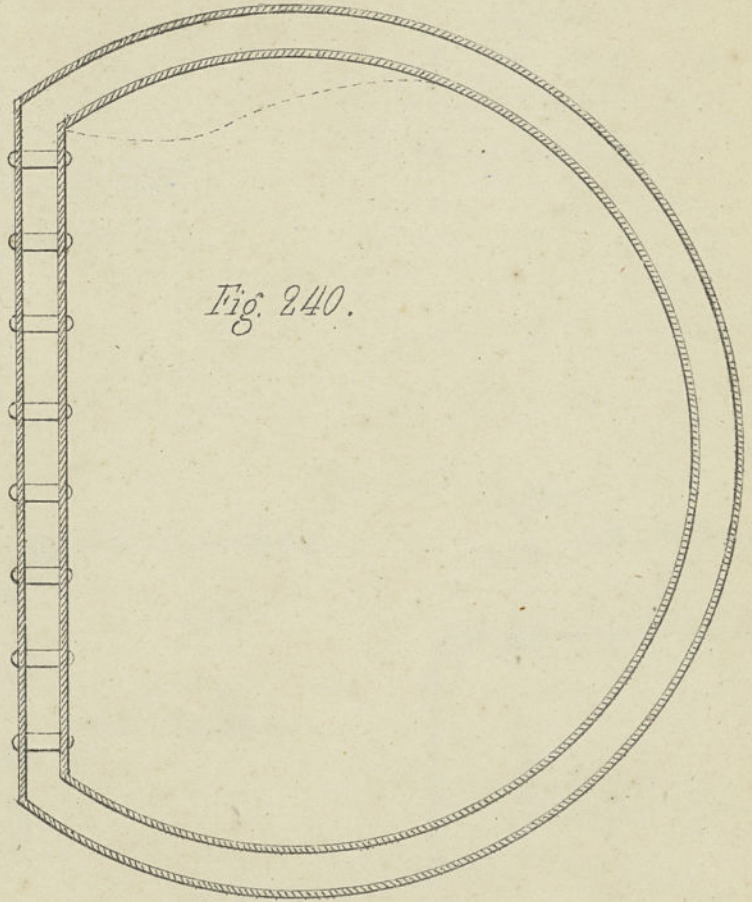
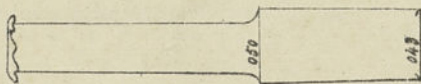


Fig. 239.

M. V.

131
LILLE

Fig. 243

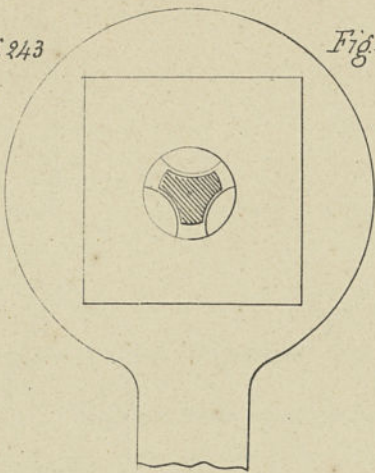


Fig. 242

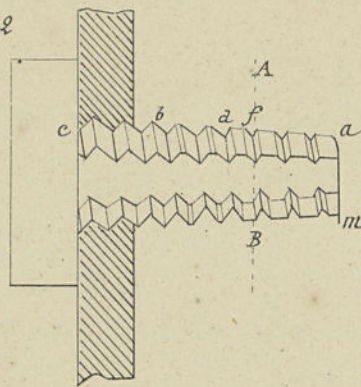


Fig. 244

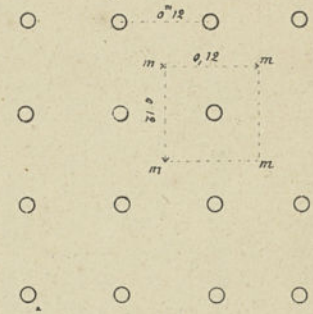


Fig. 245

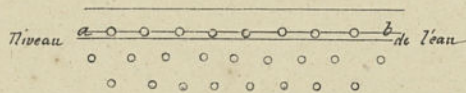


Fig. 246

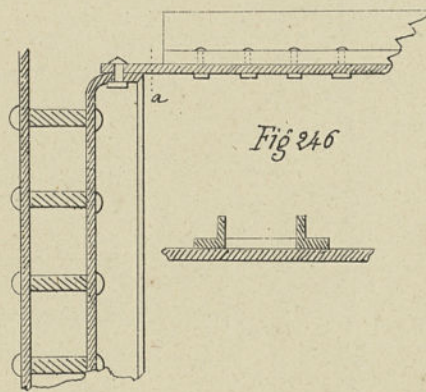


Fig. 247

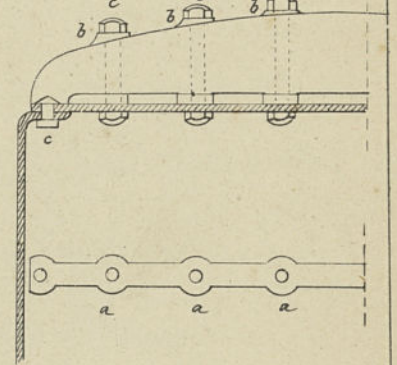


Fig. 249

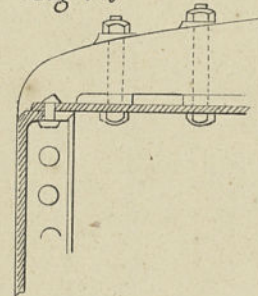


Fig. 248

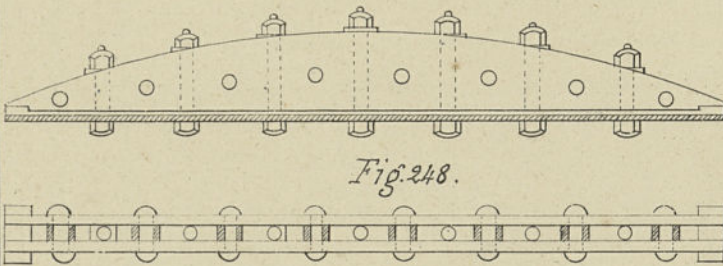


Fig. 250

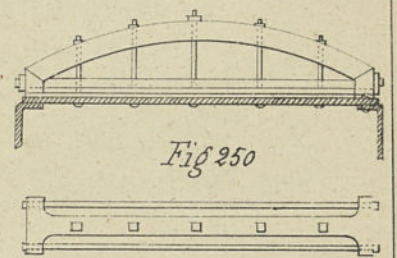


Fig. 251

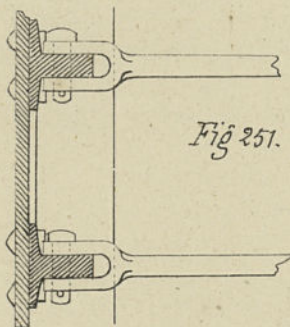


Fig. 252

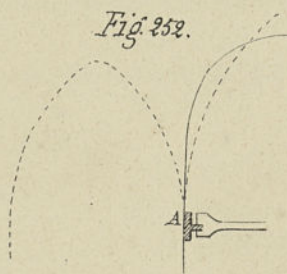


Fig. 253

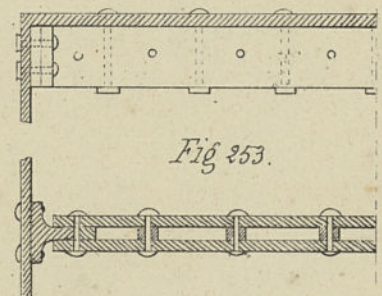
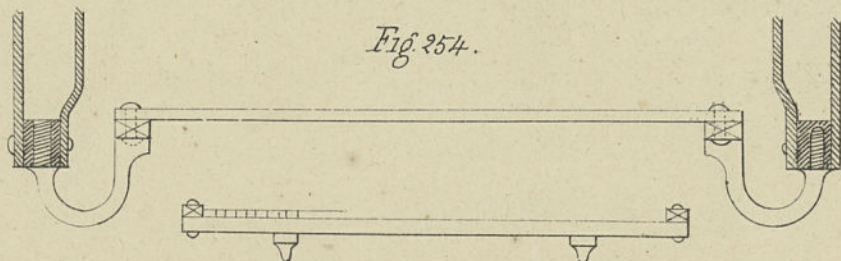
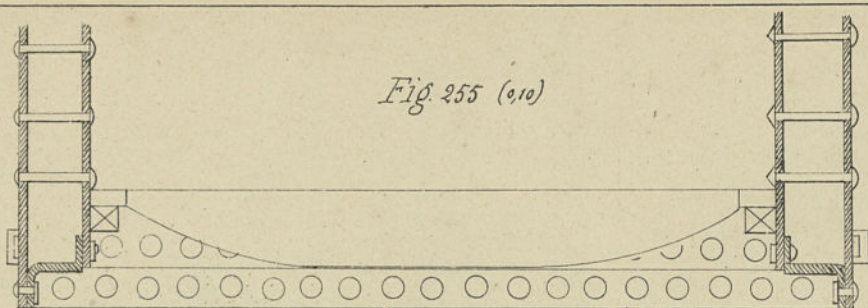


Fig. 254



BU

MV.



Plan de la Grille.

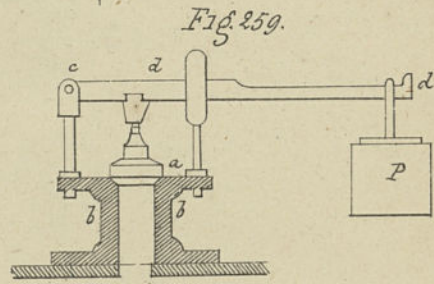
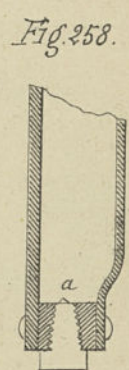
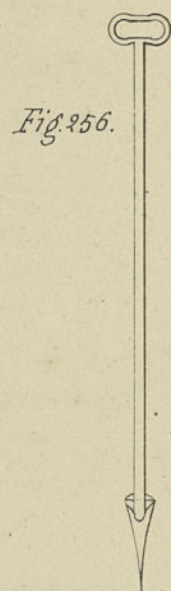
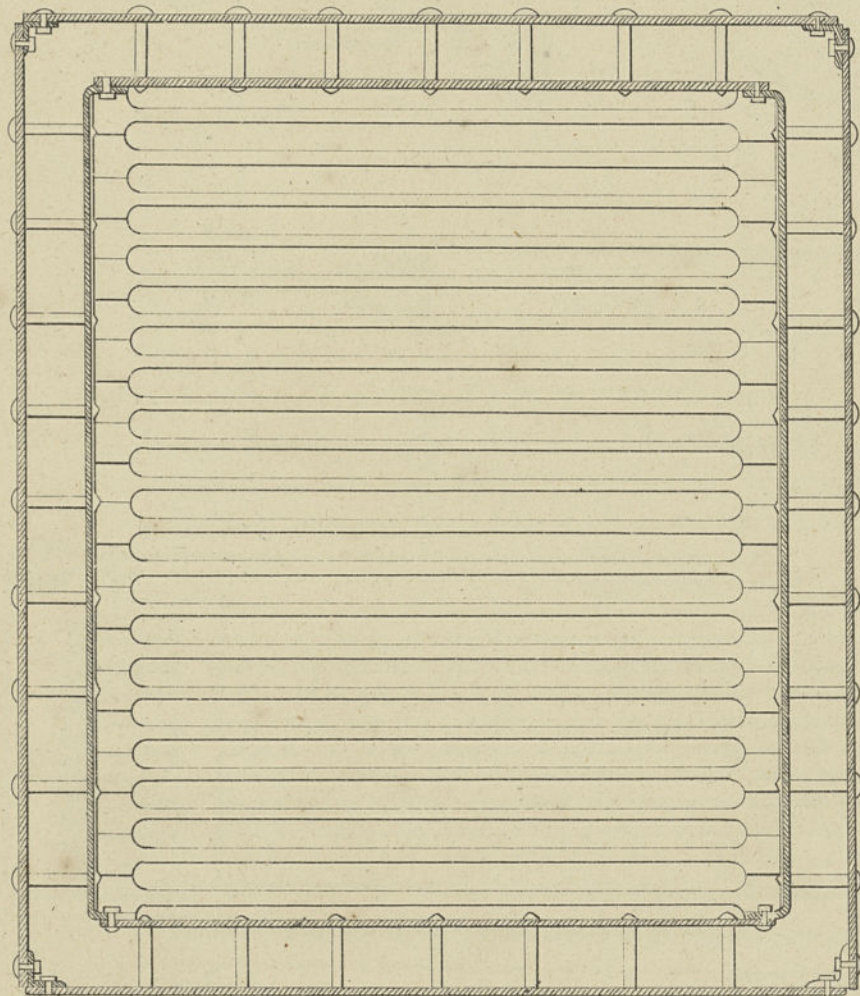


Fig. 262.



Fig. 263.

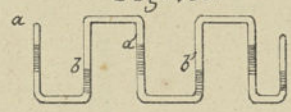


Fig. 264.

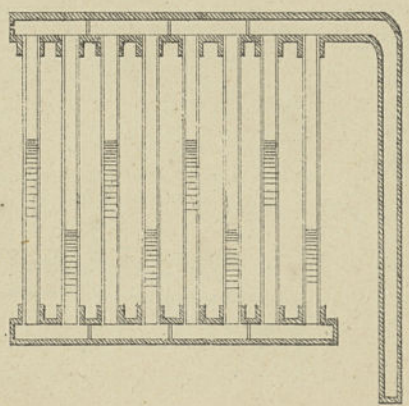
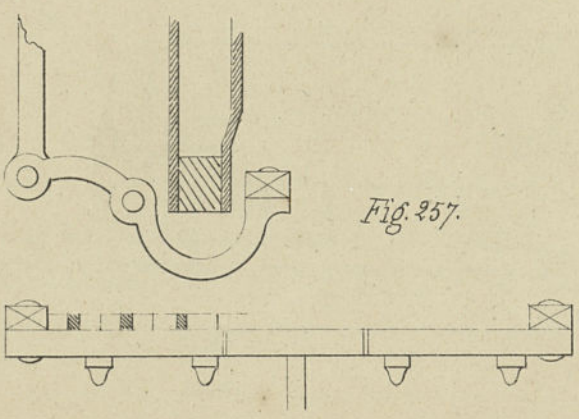
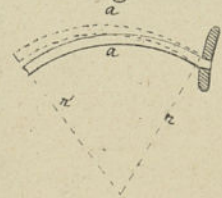


Fig. 265.



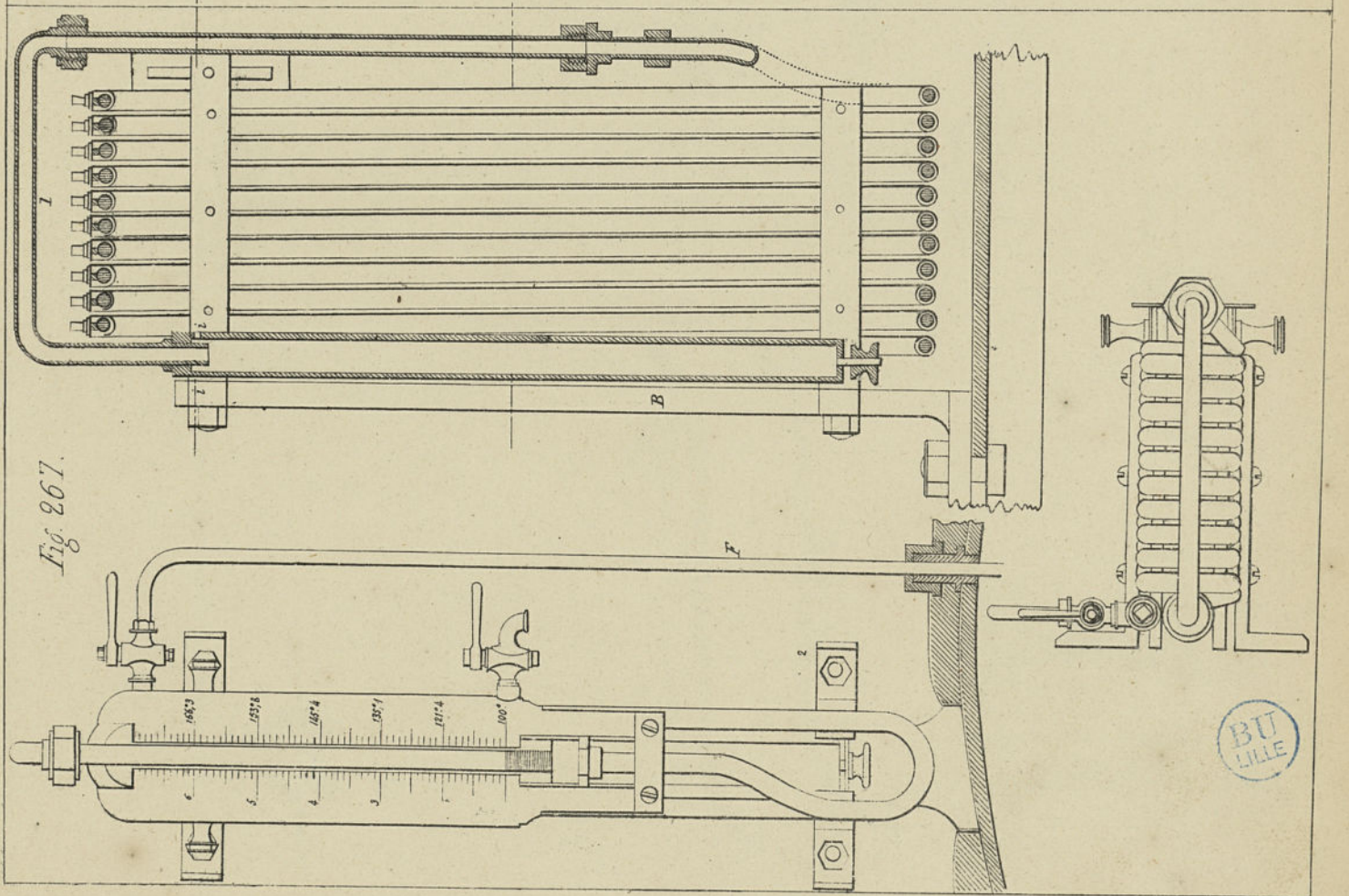
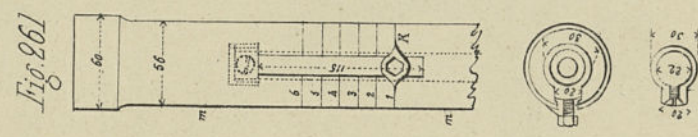
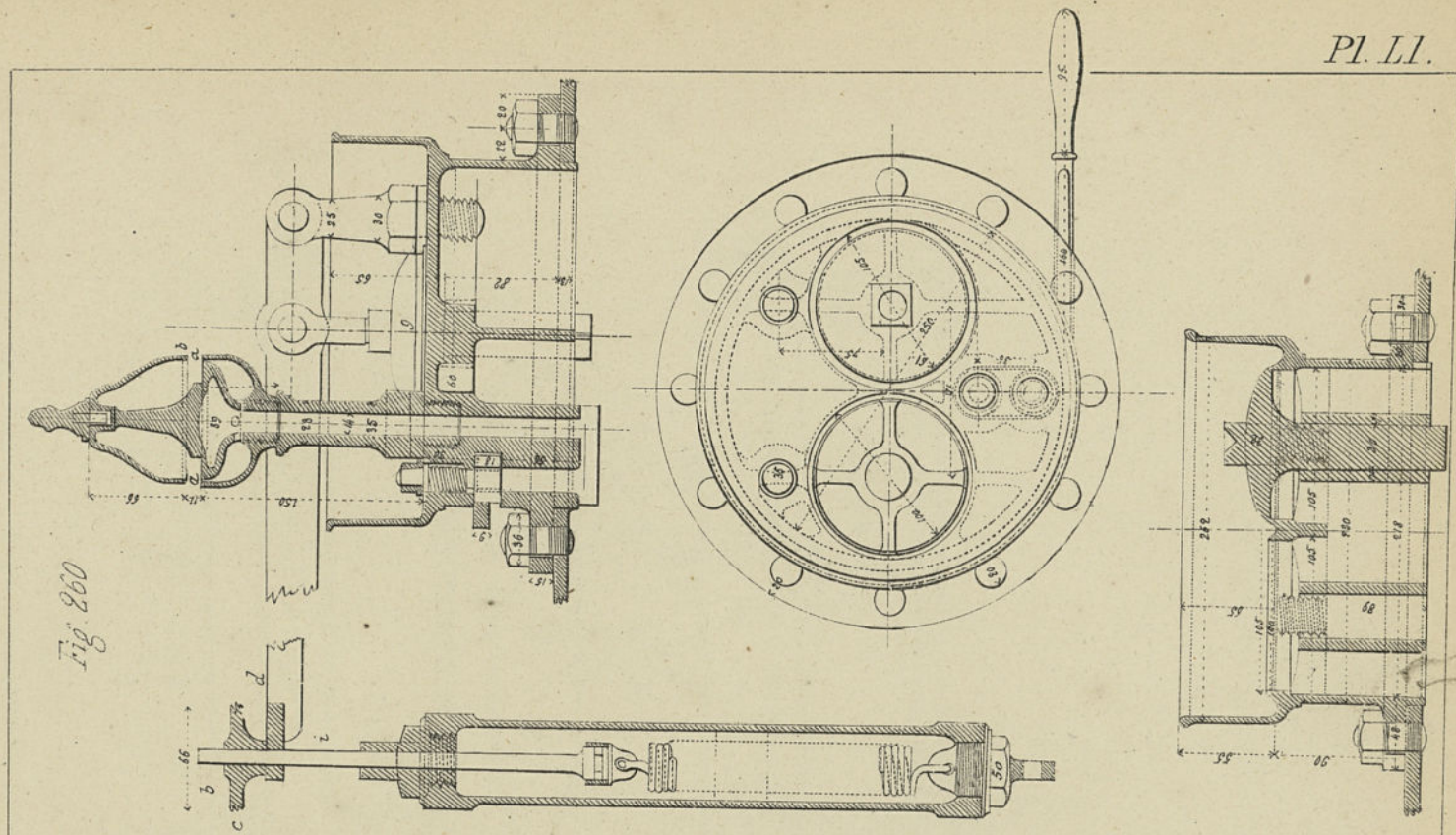
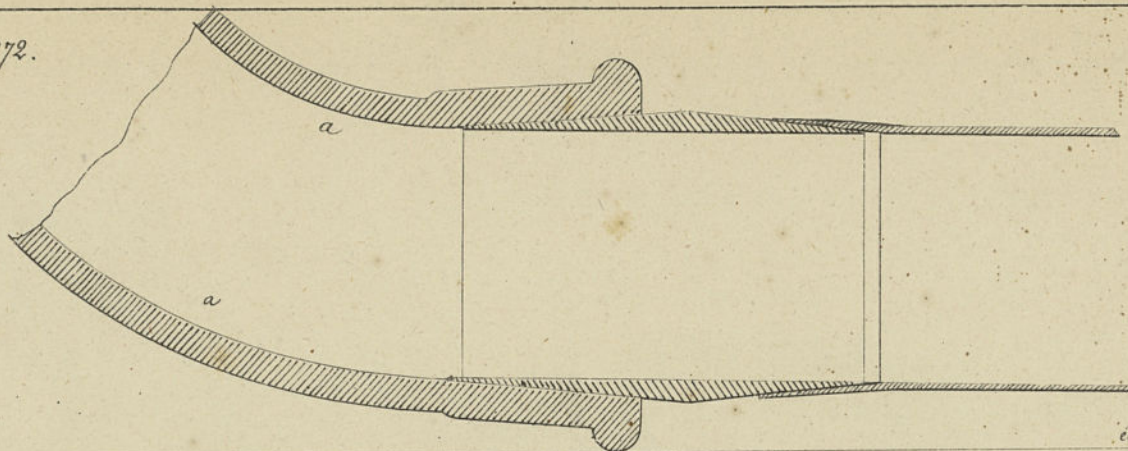


Fig. 272.



échelle de 0,25

Fig. 274

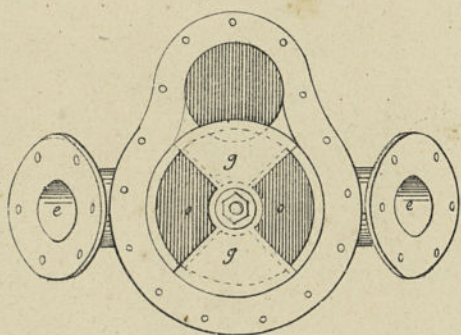
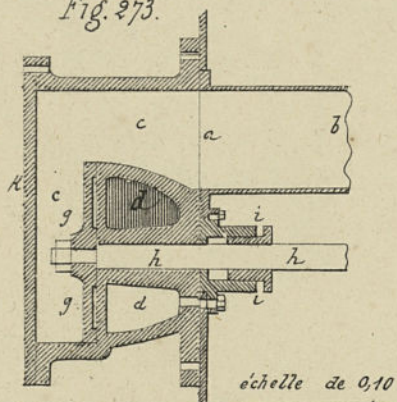


Fig. 273.



échelle de 0,10

Fig. 276.

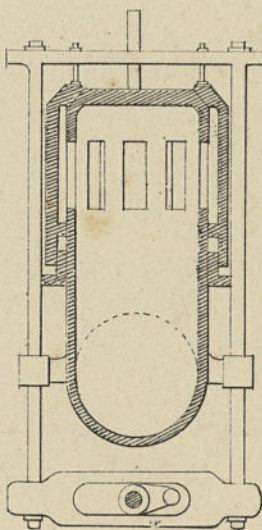


Fig. 275.

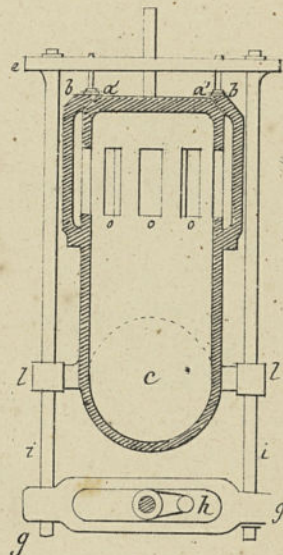
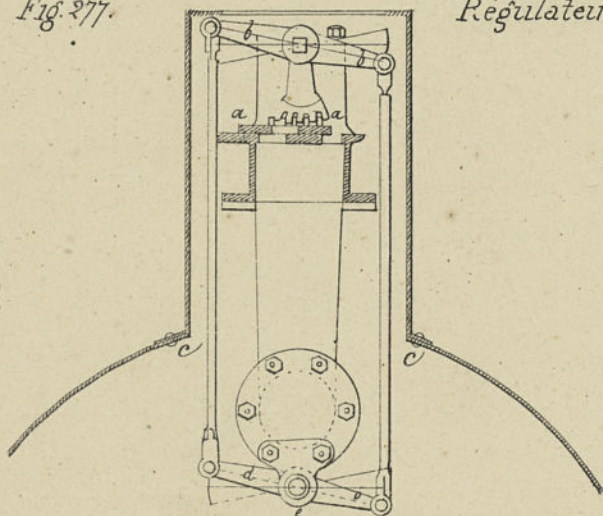
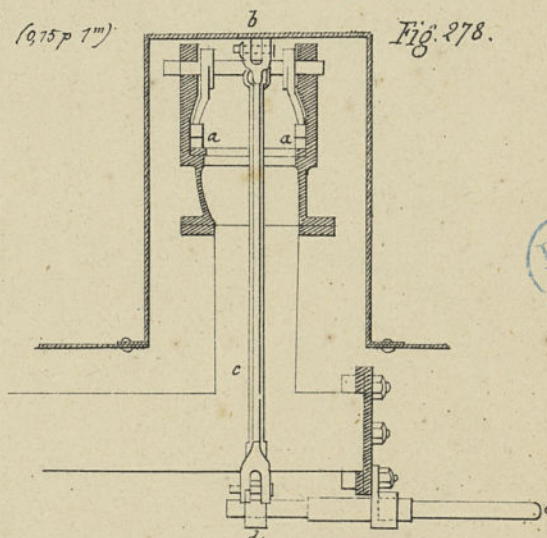


Fig. 277.



Régulateur Rothwell (0,15 p 1^m)

Fig. 278.



M.V.

Fig. 279. Pompe alimentaire de la machine Crampton.

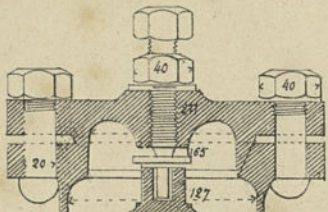


Fig. 280

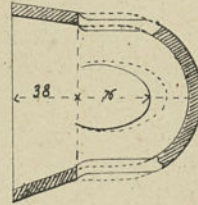
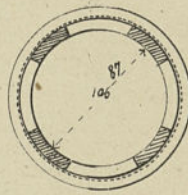
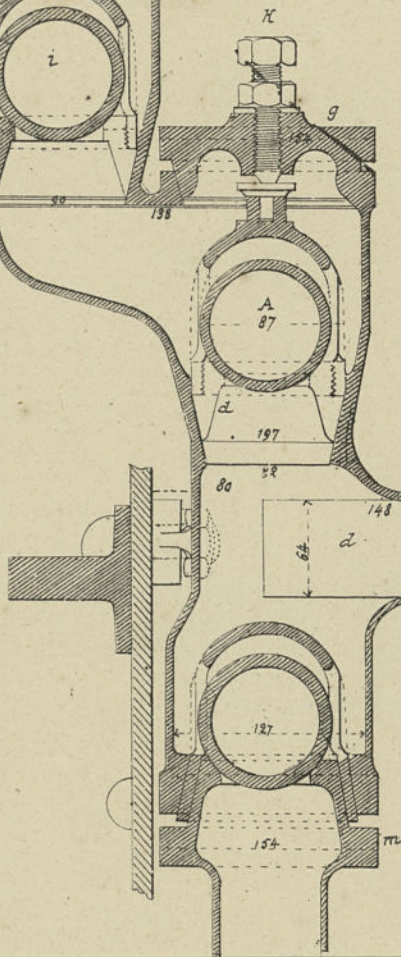
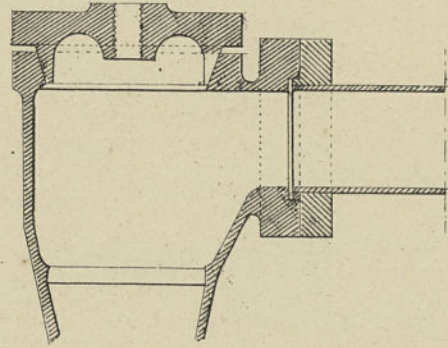
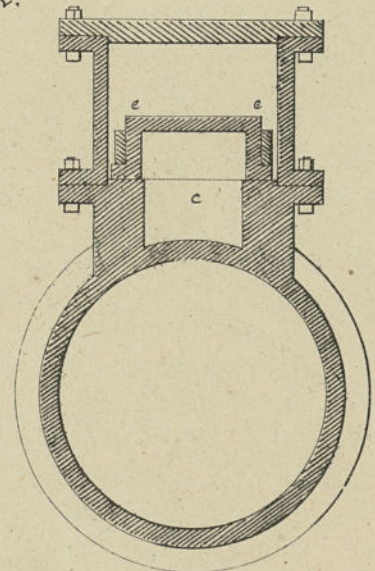
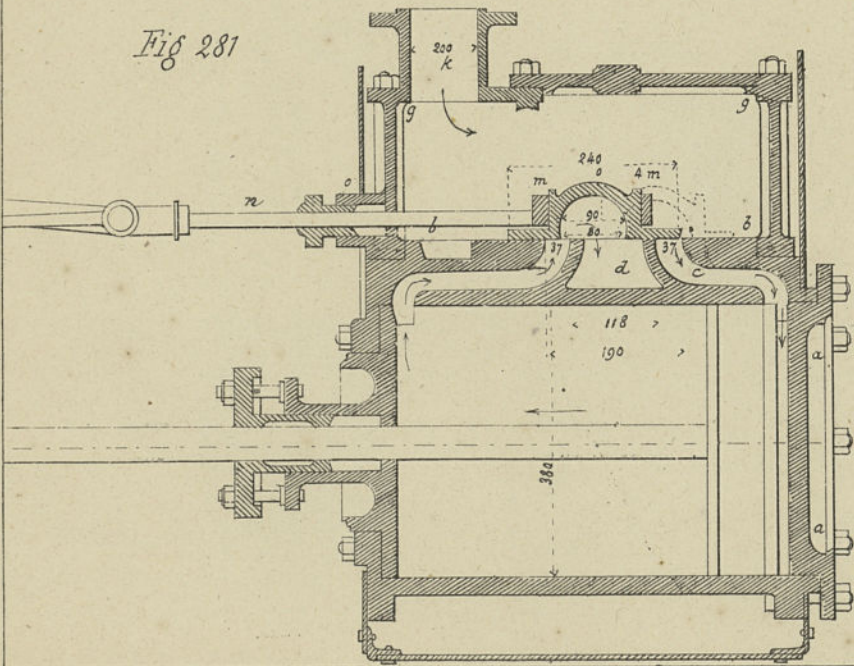


Fig 281

Fig. 282.



échelle de 0,10



M.V.

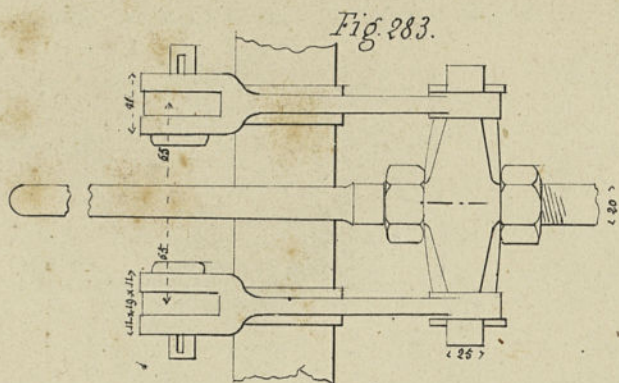


Fig. 283.

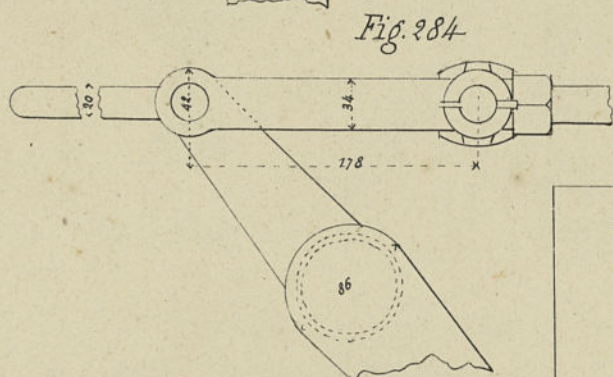
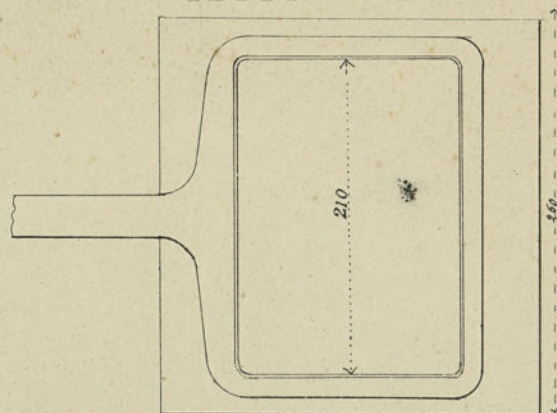


Fig. 284

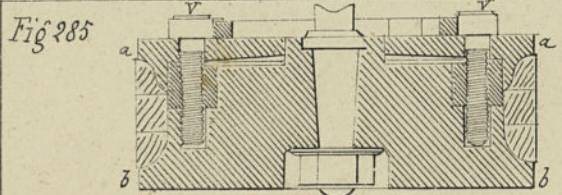
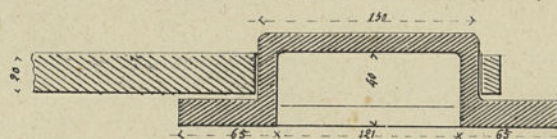


Fig. 285

Fig. 289.

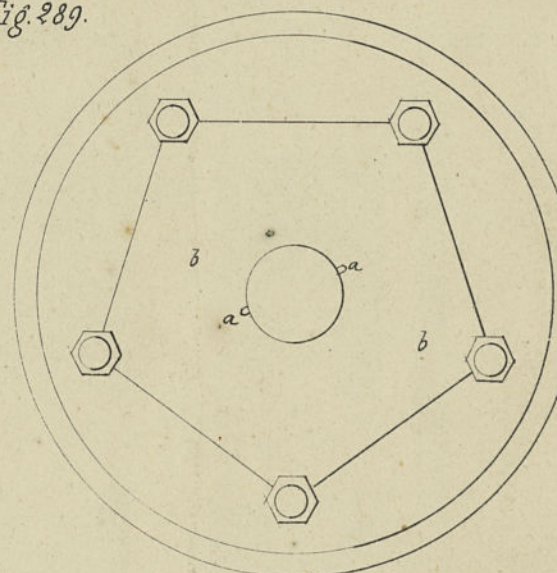


Fig. 288. Piston Stephenson.

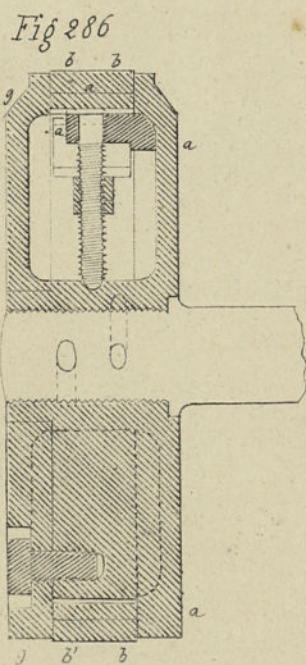
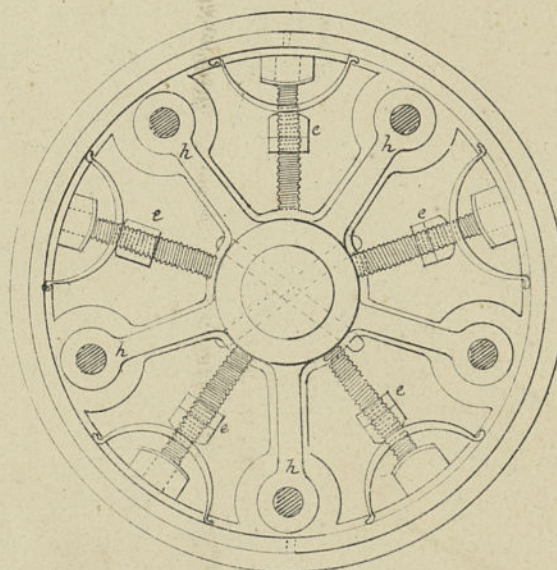
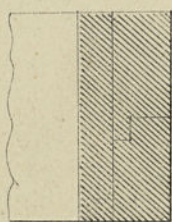


Fig. 286

Fig. 287.



BT LILLE

Fig. 290 Piston de la machine (l'Eclair) de Versailles

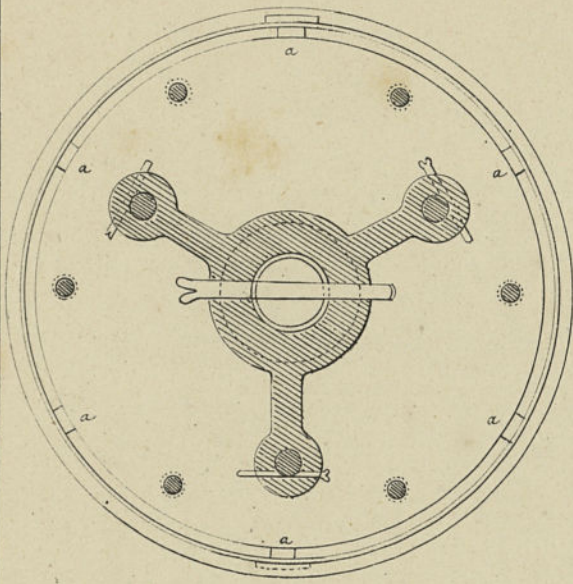


Fig. 292.

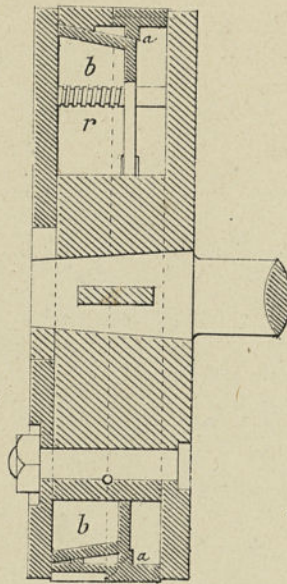


Fig. 296. Détails

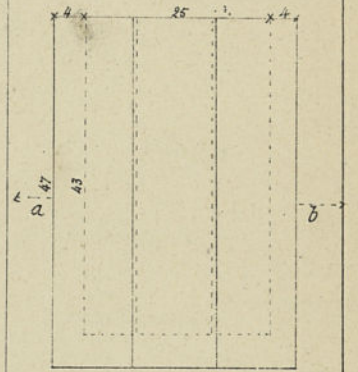


Fig. 291.



Coupe sur a b.

Piston pour machines à voyageurs.

Fig. 293.

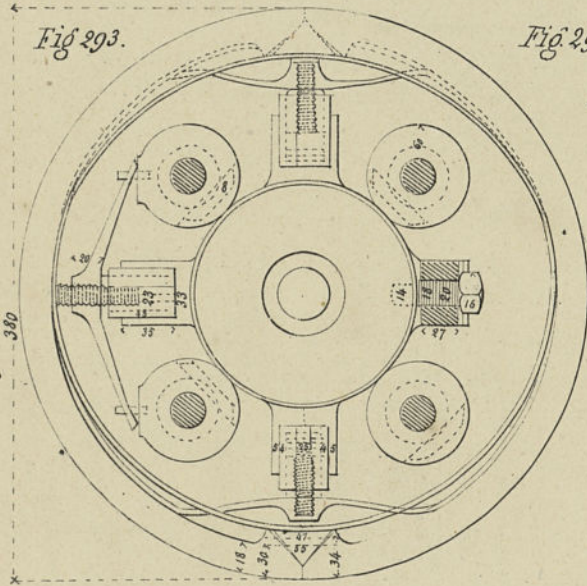


Fig. 294.

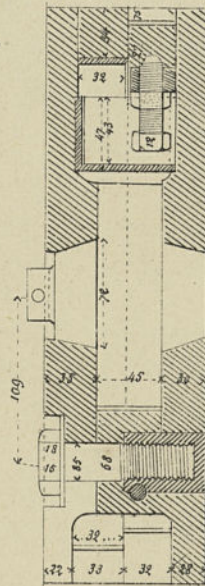


Fig. 295.

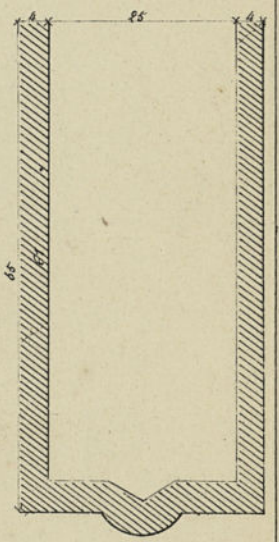
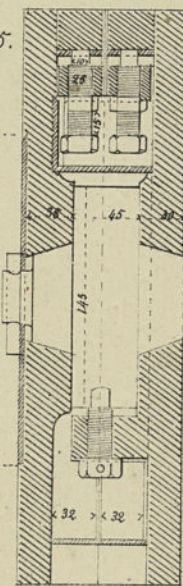
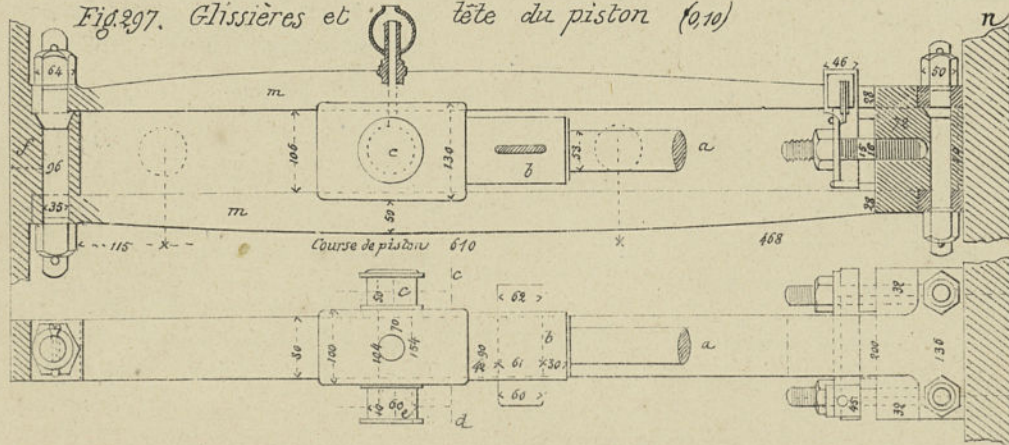
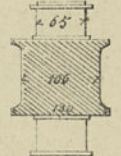


Fig. 297. Glissières et tête du piston (0,10)



Coupe sur c a.



BUT LILLE

Fig. 298.

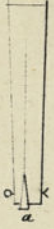


Fig. 299.



Fig. 300.

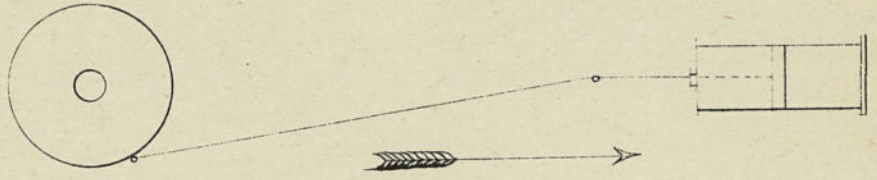


Fig. 301.

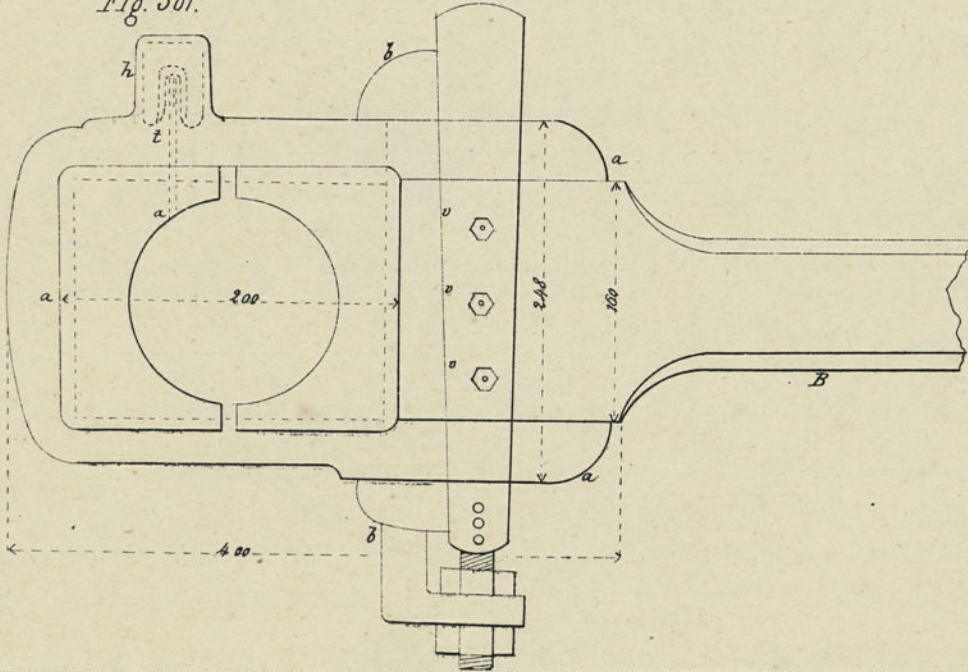


Fig. 302.

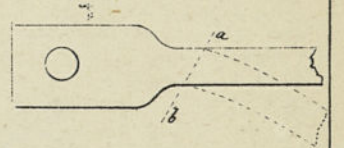


Fig. 305.

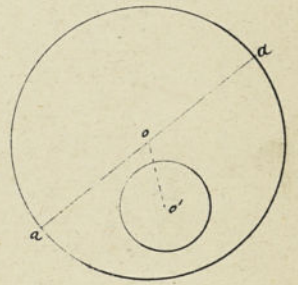


Fig. 303.

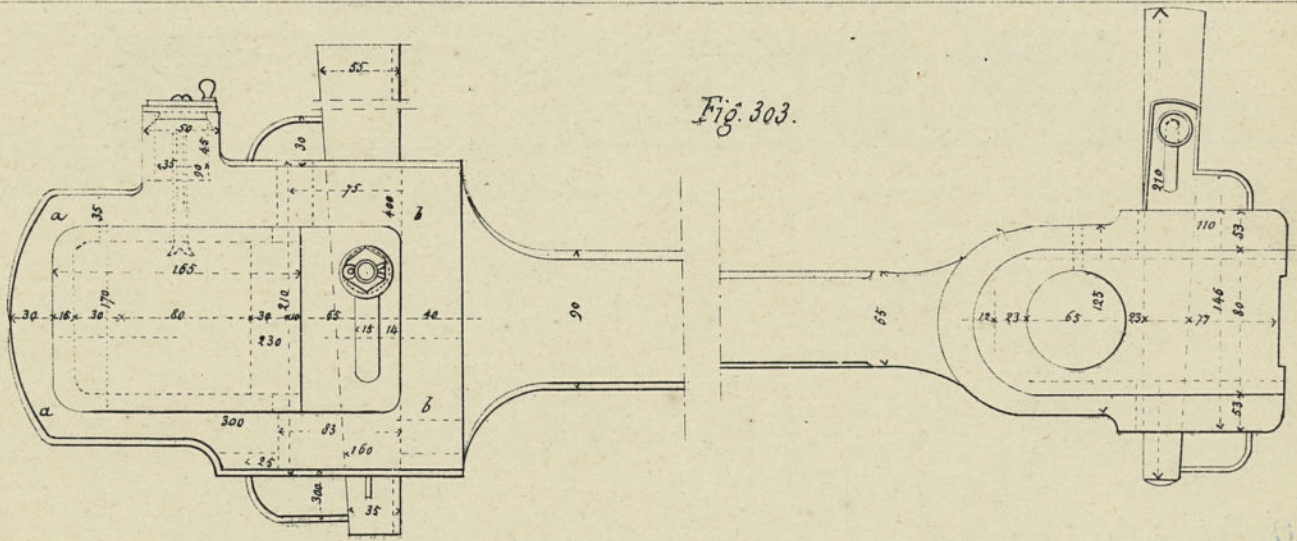
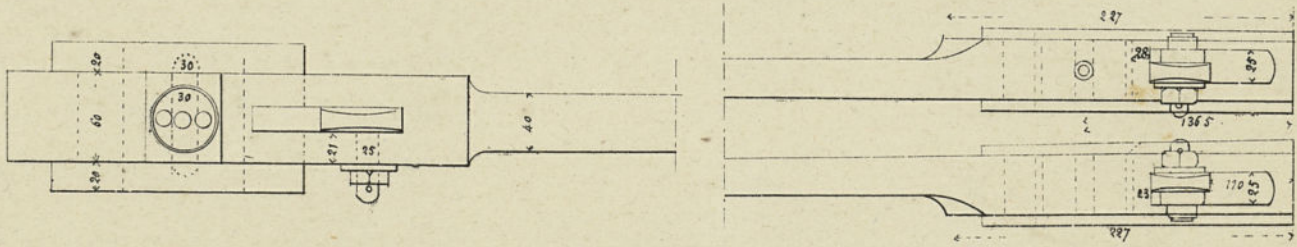


Fig. 304.



M.V.

Fig 306.

Fig 308

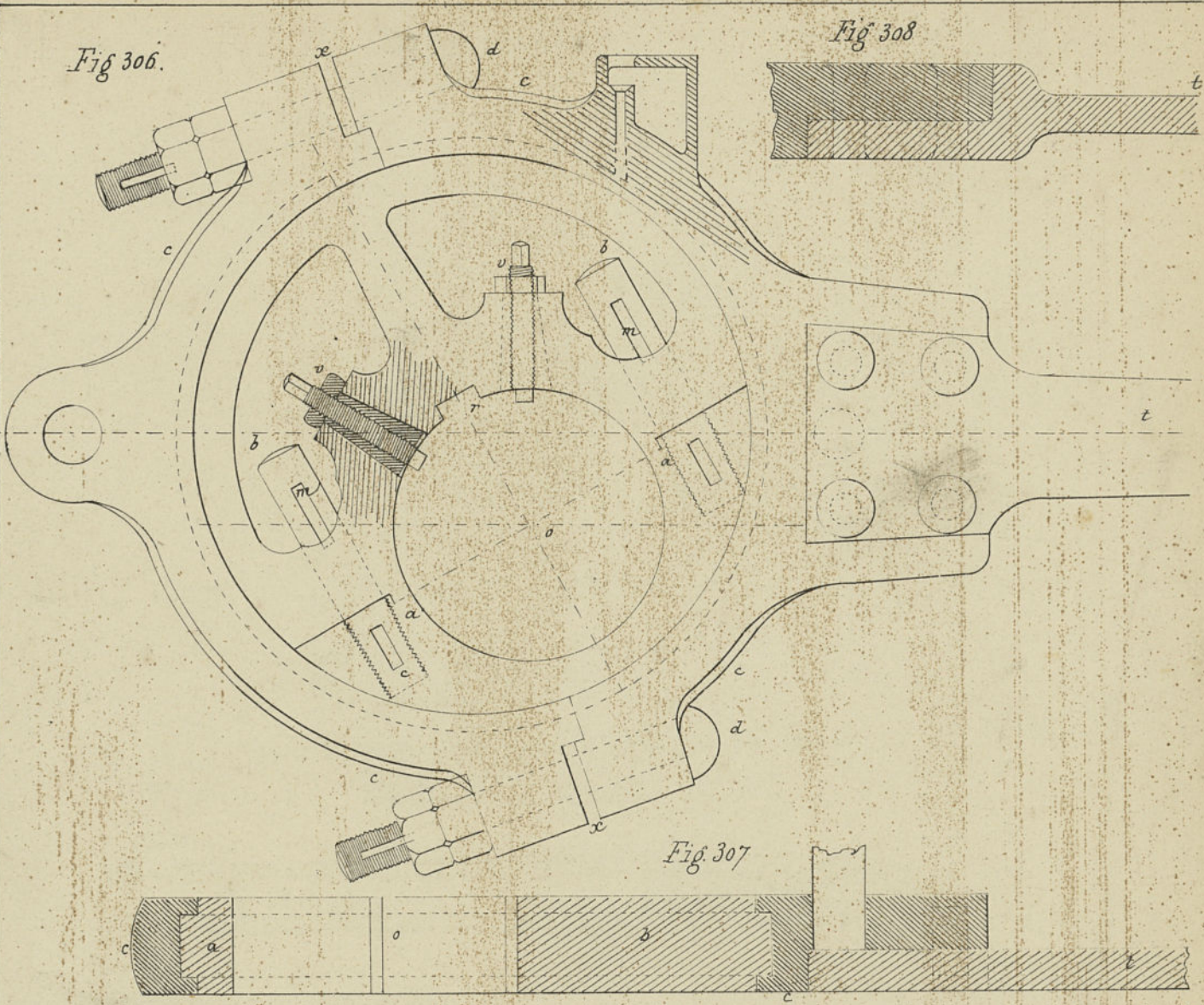
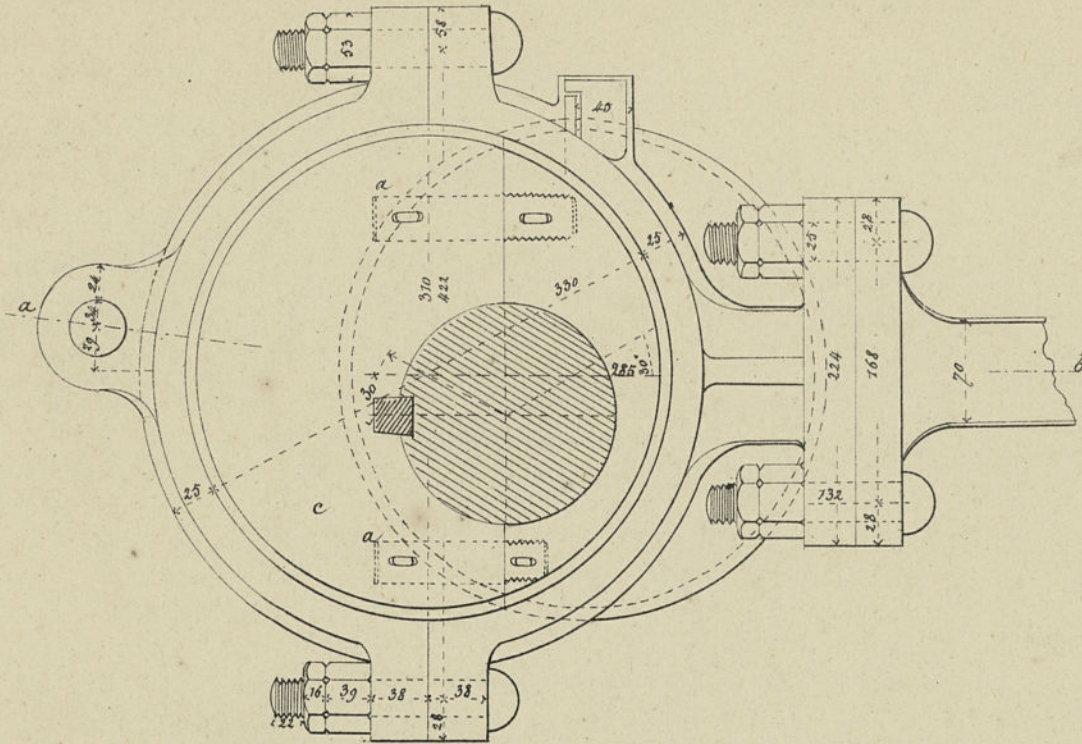


Fig 310.



M.V.

Fig. 309 Excentriques et un des colliers avec oreille pour la bielle des pompes.



Plan des excentriques et coupe du collier sur a b

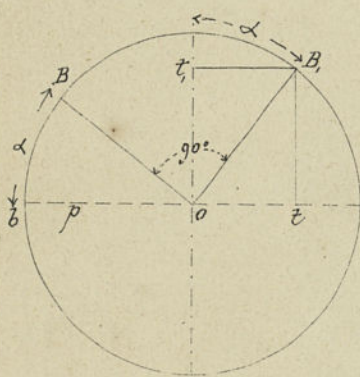
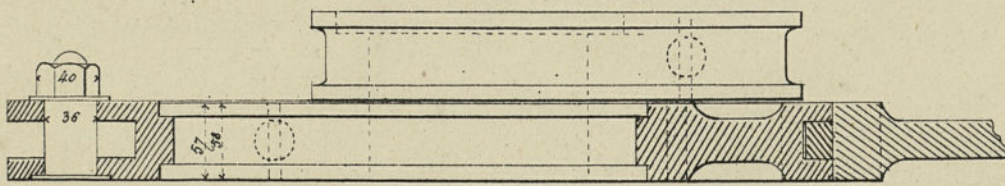


Fig. 311

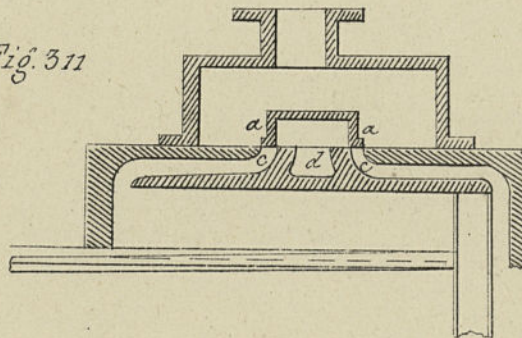


Fig. 312.

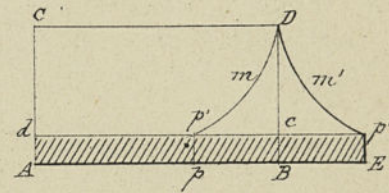
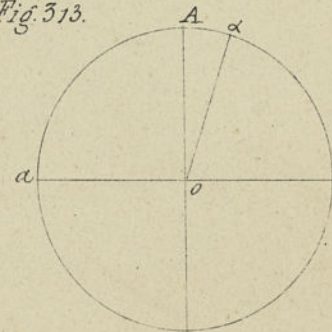


Fig. 313.



BU LILLE

MV.

Fig. 317.

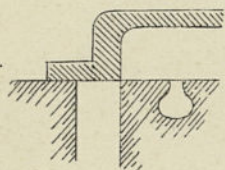


Fig. 318.

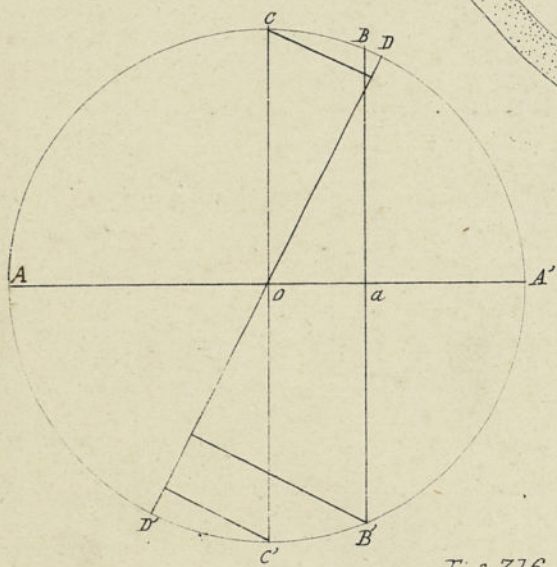


Fig. 316.

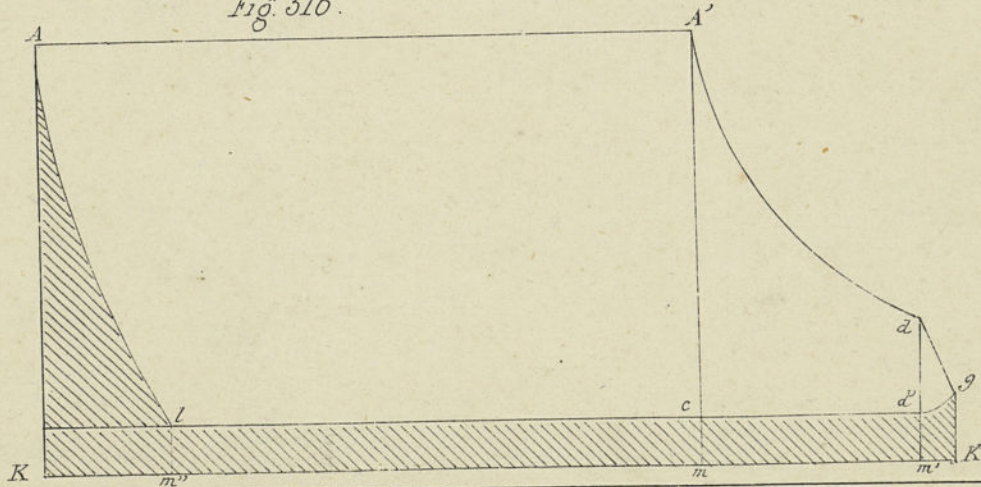


Fig. 314.

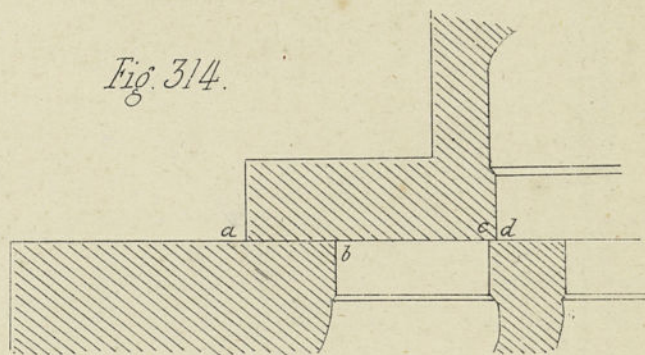
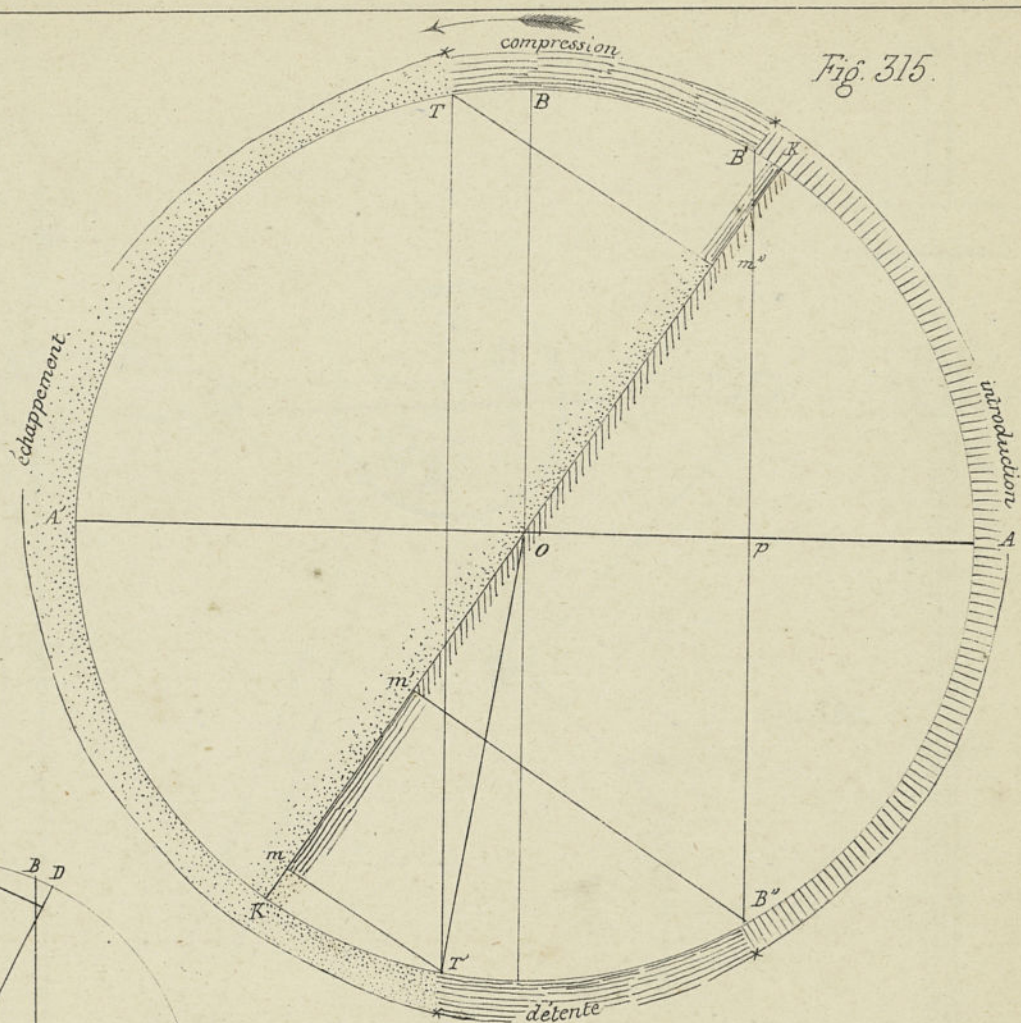
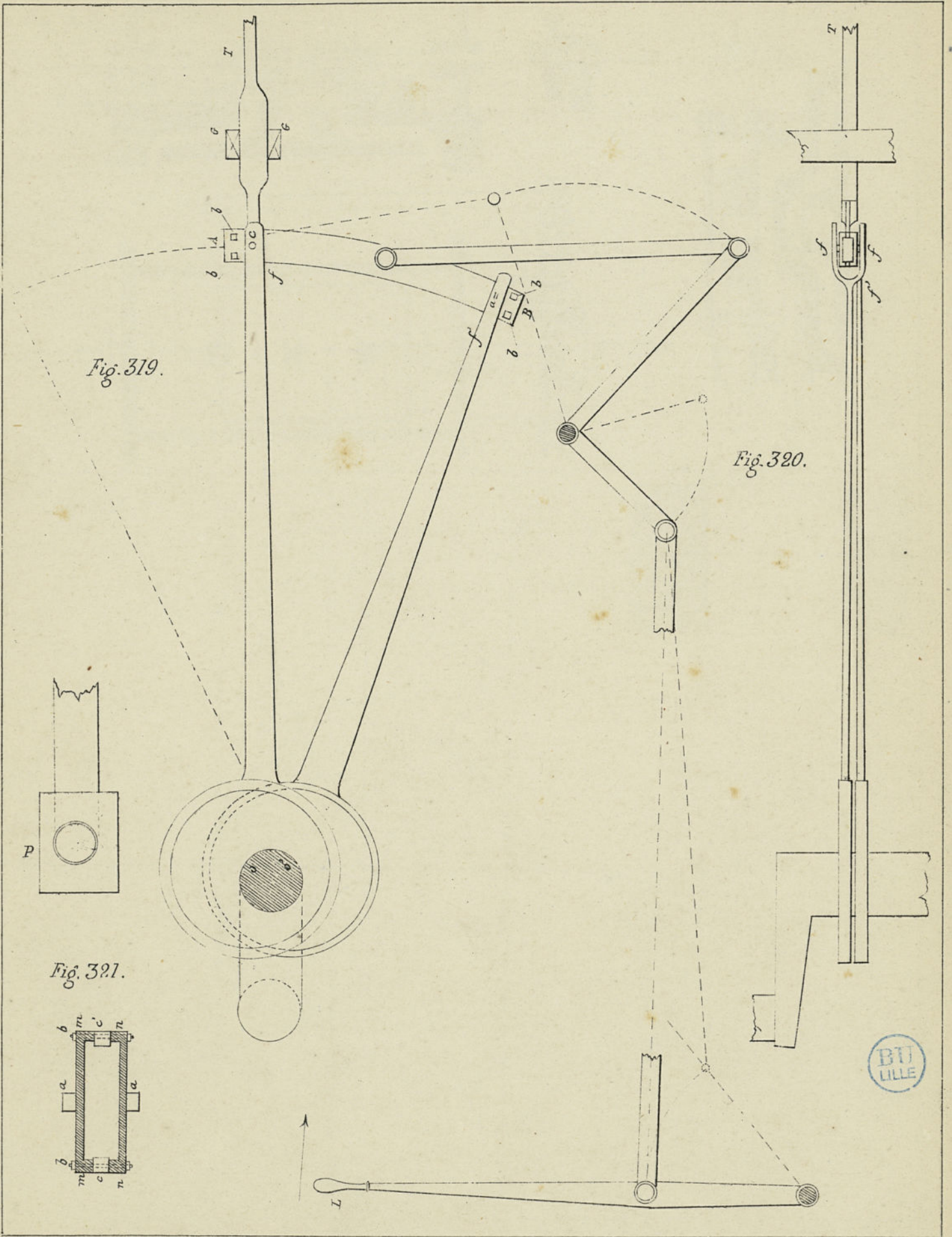


Fig. 315.





BU LILLE

M.V.

Fig. 324.

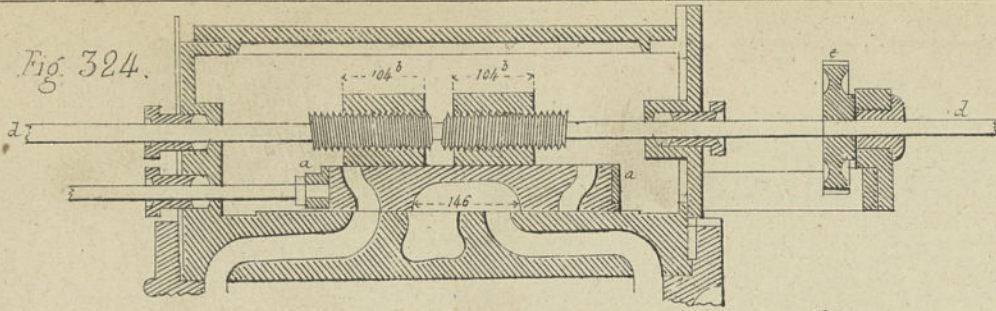


Fig. 322.

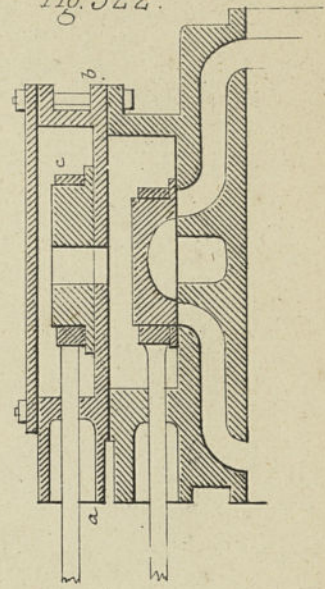


Fig. 325.

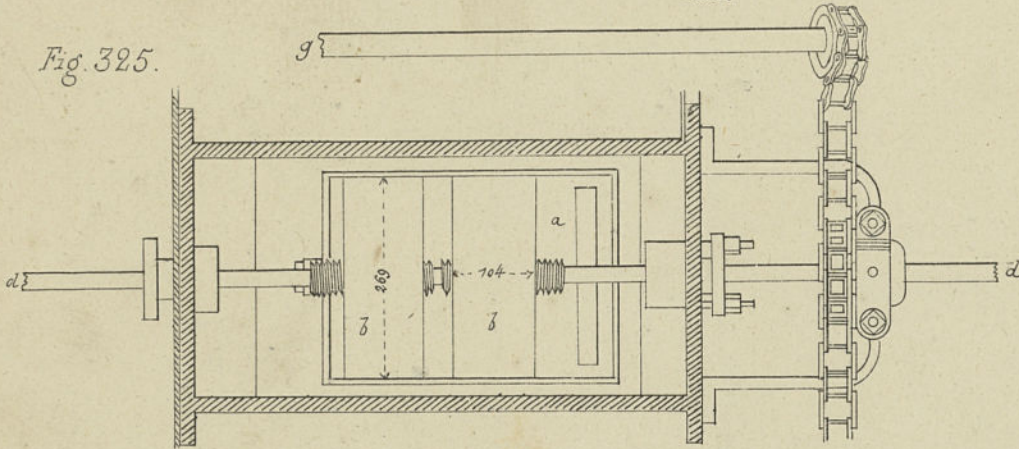
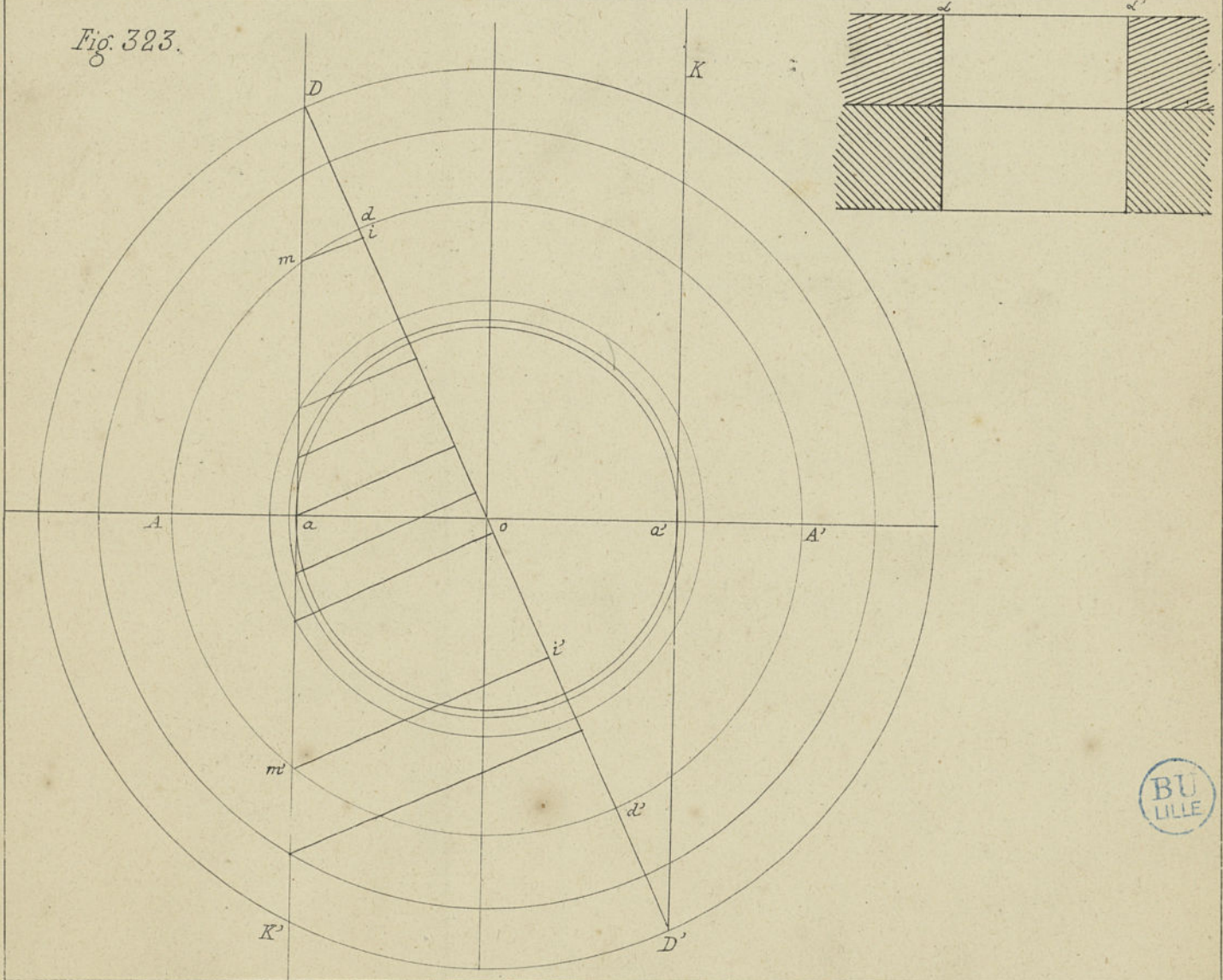


Fig. 323.



BU
LILLE

M.V.

Fig. 328.

Echelle de 0.333.

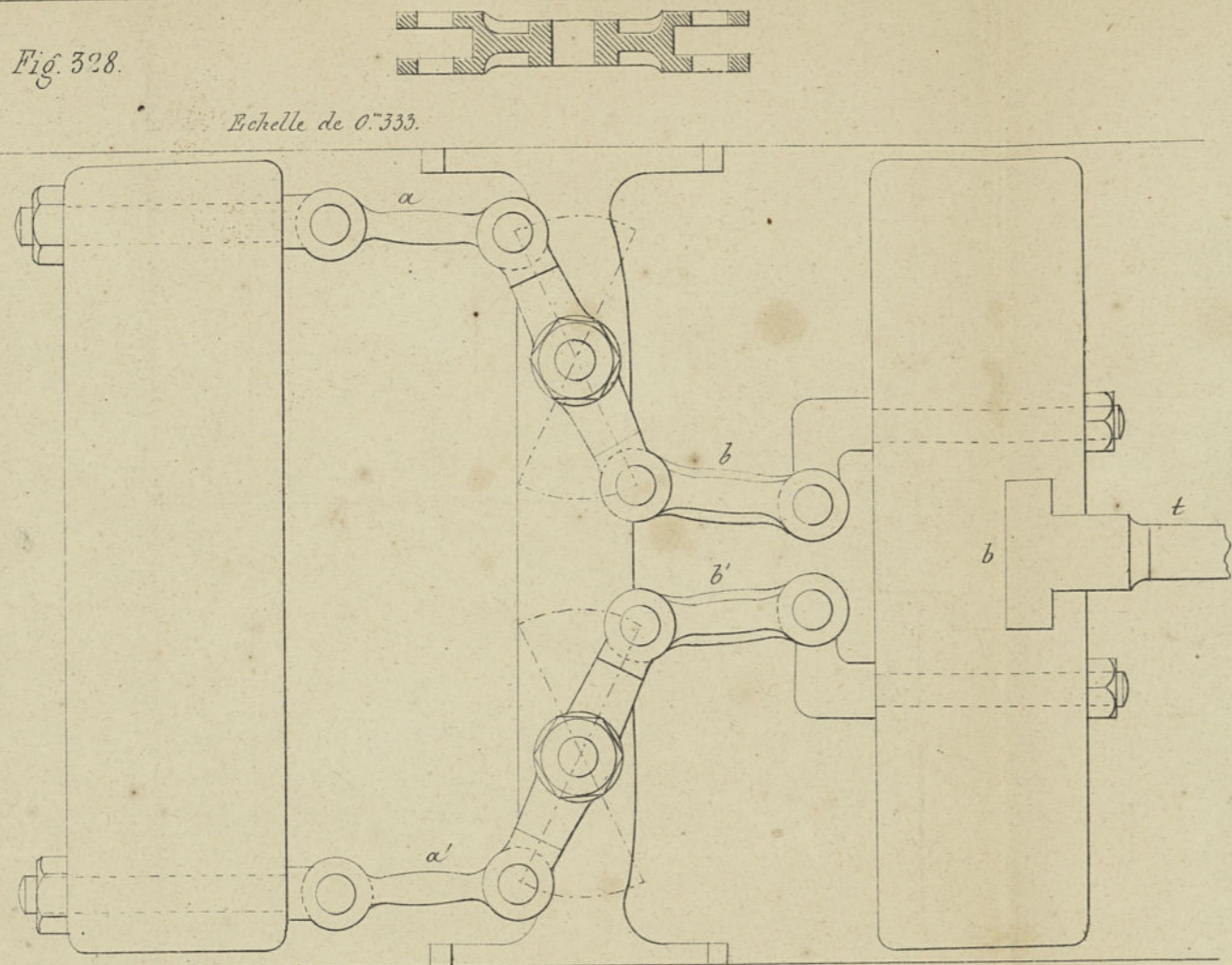


Fig. 326.

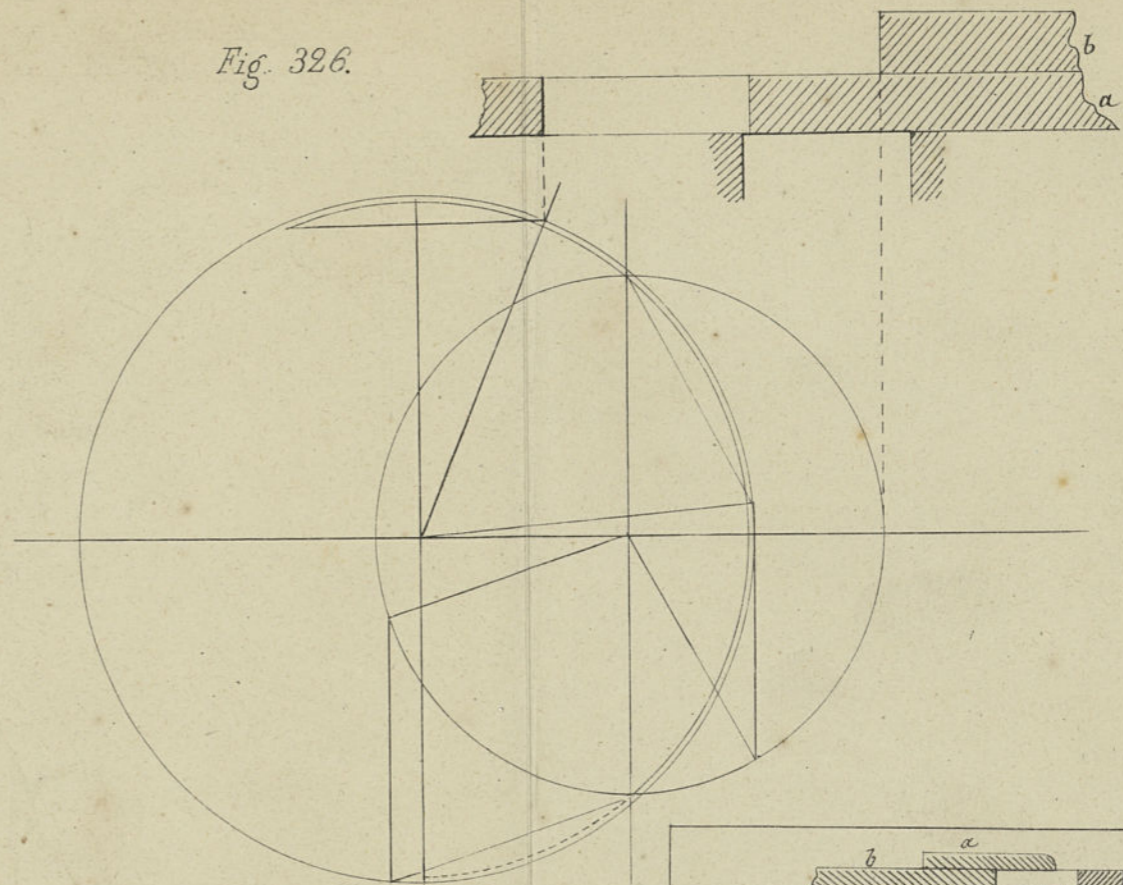
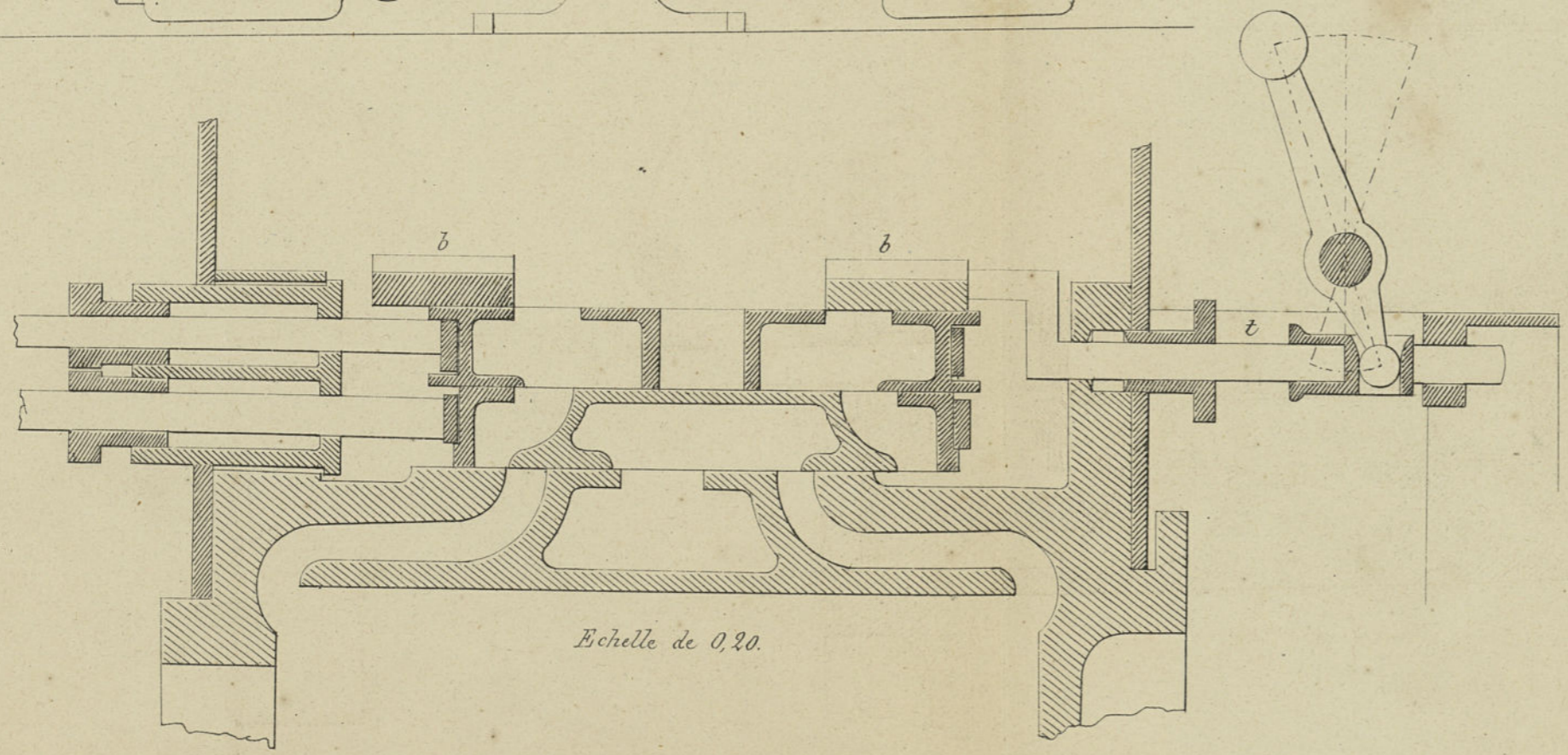
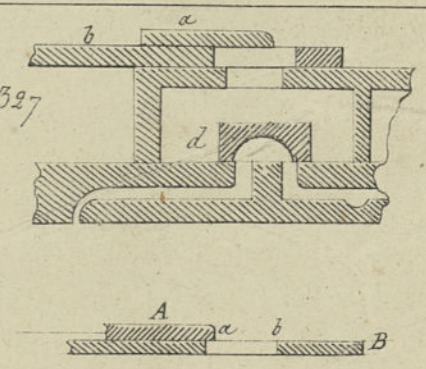
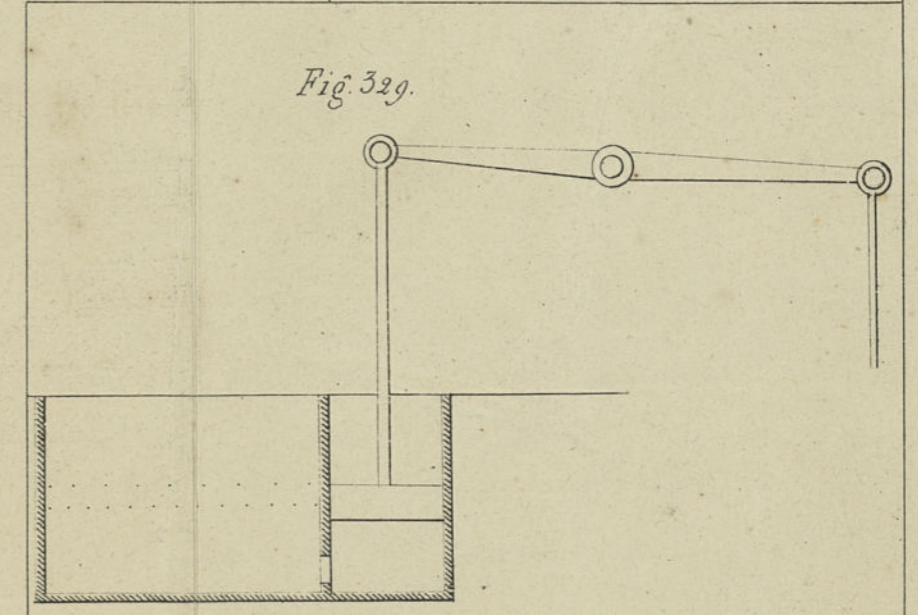


Fig. 327.



Echelle de 0.20.

Fig. 329.



M.V.