

TRAITÉ
DES
MACHINES A VAPEUR
ET DE LEUR APPLICATION
A LA NAVIGATION, AUX MINES, AUX MANUFACTURES,
AUX CHEMINS DE FER, ETC.

TRAITÉ

DES

MACHINES A VAPEUR

ET DE LEUR APPLICATION

A LA NAVIGATION, AUX MINES, AUX MANUFACTURES,
AUX CHEMINS DE FER, ETC.,

COMPRENANT

L'HISTOIRE DE L'INVENTION ET DES PERFECTIONNEMENTS SUCCESSIFS DE CES MACHINES,
L'EXPOSÉ DE LEUR THÉORIE ET DES PROPORTIONS LES PLUS CONVENABLES DE LEURS DIVERSES PARTIES,
ACCOMPAGNÉ D'UN GRAND NOMBRE DE TABLEAUX SYNOPTIQUES
CONTENANT LES RÉSULTATS LES PLUS UTILES POUR LA PRATIQUE;

Traduit de l'Anglais de Th. Tredgold,
INGÉNIEUR CIVIL, ETC.

AVEC DES NOTES ET ADDITIONS,

PAR F.-N. MELLET,

INGÉNIEUR, ANCIEN ÉLÈVE DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE.

TROISIÈME ÉDITION,

Revue, corrigée et augmentée d'une Section sur les Machines Locomotives.

BRUXELLES.

MELINE, CANS ET COMPAGNIE.

LIBRAIRIE, IMPRIMERIE ET FONDERIE.

1838

PRÉFACE

DU TRADUCTEUR.

Les moteurs que la science a découverts dans la nature, et que l'industrie a appliqués à ses travaux, sont les plus puissants moyens de production dont l'homme puisse disposer. Une société réduite à n'employer que les efforts individuels de ses membres pourrait bien subsister, et même s'élever à un certain degré de bien-être, mais ses moyens ne pouvant dépasser la somme des forces physiques de chacun, son industrie aurait les mêmes limites. Ajoutez à cette société de nouvelles forces, empruntées aux agents naturels, et la production deviendra plus abondante; elle ne se tiendra plus en rapport avec l'état numérique de la population, mais elle augmentera rapidement, et n'aura

d'autres bornes que la puissance même des moteurs nouveaux. Les peuples modernes seuls ont su mettre à contribution, sur une grande échelle, les forces de la nature ; et c'est principalement à cette cause qu'il faut attribuer le grand développement d'industrie et de prospérité qui caractérise cette époque. Avec leur secours, on a conçu et exécuté des travaux auparavant impraticables : l'exploitation des mines et des carrières les plus profondes s'est faite avec la plus grande facilité ; les grands travaux métallurgiques, fondements de tous les arts, ont pris une extension prodigieuse, et les manufactures ont versé dans le commerce tous les produits utiles en si grande abondance, et à des prix si modérés, qu'il en est résulté une aisance générale.

Mais c'est surtout aux machines à feu, et à leur puissance indéfinie, que l'industrie moderne doit cette heureuse impulsion. Se distinguant des autres moteurs naturels en ce qu'il n'a pas été, comme eux, simplement emprunté à la nature, mais composé pour ainsi dire de toutes pièces par l'homme même, ce moteur s'est présenté avec un tel caractère de généralité, qu'il a pu être employé en tous lieux, en toutes saisons, et en tous les degrés de force réclamés par une industrie infiniment variée.

Cependant les machines à feu, bien que connues des anciens, n'ont rendu alors et ne pouvaient rendre aucun service important. Il ne suffit pas en effet qu'une invention soit conçue à une époque donnée, il faut encore qu'elle se trouve en rapport avec les besoins et l'état social contemporains. C'est en vain qu'une plante exotique naîtrait sous

un climat peu congénial à sa nature : périr sans porter des fruits serait sa destinée. Aussi, quoique depuis trois mille ans on eût observé la force que le feu imprime aux fluides expansibles, cette force n'avait été appliquée à aucun travail industriel, mais seulement à des effets qui se trouvaient en rapport avec l'esprit et l'état politique des adeptes qui en faisaient usage.

Connues en effet des prêtres égyptiens à l'époque de la splendeur du régime théocratique, les machines à feu devinrent entre leurs mains des instruments merveilleux, propres à étendre et à consolider un empire fondé sur des croyances divines; c'est ainsi qu'on remarque parmi les machines qu'ils nous ont laissées, des moyens de faire ouvrir les portes d'un sanctuaire par l'inflammation des bûchers des autels; des lampes sacrées dans lesquelles la chaleur fait élever de l'eau ou de l'huile, ou force la mèche à s'avancer à mesure que la combustion s'opère; des appareils dans lesquels l'action du feu ou les rayons du soleil dilatent l'air, et font siffler ou parler des statues, ou produisent d'autres miracles de même nature. Aristote, Sénèque, Anthémius, ont proclamé la puissance du feu et des vapeurs aqueuses, mais cette connaissance est demeurée stérile dans leurs mains: le dernier seul en fit une application frivole (*).

Mais lorsqu'à la suite de l'importante révolution sociale

(*) Voyez le *Traité historique et pratique des machines à vapeur*, par M. de Montgéry, dans lequel on trouve les recherches les plus curieuses sur l'emploi des machines à feu par les anciens. (Il n'en a été publié que les premières parties, *Annales de l'Industrie nationale*, nos 57 et suivants; Paris, 1825 et 1824, chez Bachelier.)

accomplie aux *xvi^e* et *xvii^e* siècles, et qui eut pour effet l'affranchissement des classes laborieuses, l'industrie eût pris un nouvel essor, la prépondérance acquise par les travaux utiles réclama avec force un moteur puissant et universel. Ce besoin était tellement senti, et les idées tellement mûres à cet égard, que l'on vit les premiers esprits de la France, de l'Angleterre, de l'Italie et de l'Allemagne, s'occuper en même temps de cette recherche, et produire enfin, sinon ce moteur, du moins des essais d'un pouvoir mécanique que l'application devait ensuite perfectionner. Ainsi, dans le même siècle, on voit Salomon de Caus, Branca, van Drebbel, Kircher, Worcester, Hautefeuille, Huyghens, Moreland, Papin, Amontons, Leibnitz, Savery, proposer chacun de leur côté des machines dont le mobile était l'expansion des fluides par le feu. Ces découvertes, accueillies d'abord et réalisées chez le peuple le plus avancé en industrie, furent poursuivies dans le siècle suivant, et considérablement perfectionnées par Newcomen et Cawley, et surtout par Watt associé à Boulton. Depuis ce moment, et dans l'espace d'un demi-siècle, cette puissance a été appliquée à tous les genres de travaux, aux mines, à l'agriculture, aux manufactures, aux transports, à la navigation fluviale et maritime; elle a contribué à élever la nation qui a su l'employer la première, à un degré de prospérité, de richesses et de crédit auparavant inconnu.

La France, restée en arrière de ce grand mouvement industriel, parce que ses vœux et ses besoins étaient tournés vers une révolution sociale devenue indispensable, la

France ne connut les progrès de son émule qu'à l'époque du rétablissement des communications européennes, trop longtemps interrompues; mais aussi, l'impulsion fut rapide et générale. A partir de 1815, des entreprises se formèrent pour appliquer la vapeur à la navigation, aux travaux métallurgiques, aux manufactures; des ateliers de construction s'élevèrent à Paris, à Lyon, à Nantes, à Bordeaux et dans les plus importantes de nos villes industrielles.

Néanmoins, on est encore obligé d'importer d'Angleterre beaucoup de machines à vapeur, soit que nos constructeurs, en trop petit nombre, n'aient pu suffire aux demandes, soit que les difficultés d'un art aussi complexe et encore peu connu, éloignent les concurrents de cette carrière, soit enfin que les acquéreurs de machines craignent de faire à leurs dépens l'apprentissage de nouveaux mécaniciens. Dans cet état de choses, la publication d'un ouvrage qui, en popularisant la science des machines à vapeur, rappellerait, classerait et confirmerait pour les gens instruits ce qu'ils savent en partie, et mettrait les moins habiles au niveau des perfectionnements les plus récents, ainsi que des résultats de tout un siècle d'expériences, une telle publication ne pourrait être que d'un grand intérêt. Tel est le caractère de l'ouvrage dont nous donnons aujourd'hui la traduction, et dont l'auteur était déjà avantageusement connu en Angleterre et en France par ses écrits antérieurs sur les constructions, sur la force des métaux, sur les chemins de fer, et sur les principes du chauffage des habitations.

Supérieur de beaucoup aux écrits superficiels publiés

jusqu'à ce jour sur les machines à vapeur, plus instructif et plus complet que le livre tout aussi récent et plus volumineux de M. Farey, le *Traité* de Th. Tredgold a le mérite de réunir en un seul volume les notions les plus importantes sur le sujet ; on y trouve en outre de nouvelles observations et des essais de théorie des divers systèmes de machines à vapeur qui appartiennent en propre à l'auteur de l'ouvrage.

Toutefois ce *Traité* présentait quelques imperfections sur lesquelles il convenait d'appeler l'attention du lecteur. La première section, quoique contenant une histoire assez complète des machines à vapeur depuis le xvii^e siècle, ne remonte pas assez haut, et laisse apercevoir trop souvent que l'auteur est Anglais. La seconde section présente une exposition complète des expériences et des théories relatives à la vapeur ; mais plusieurs parties auraient peut-être mieux trouvé leur place dans un mémoire académique que dans un manuel pratique. Les sciences exactes étant peu encouragées en Angleterre, et par suite peu approfondies, on ne sera pas étonné de trouver dans ce *Traité* quelques démonstrations hasardées, et peut-être fausses ; telles nous semblent être les théories de l'auteur sur les machines à rotation immédiate (art. 312 à 317), sur les proportions des cylindres (art. 327 à 350), sur la vitesse donnant le maximum d'effet (art. 331 à 344), sur les bateaux à vapeur (sect. X), etc. Il devenait donc utile de ne pas se borner à une traduction pure et simple de l'ouvrage, mais d'ajouter quelques notes pour indiquer et rectifier les points defectueux. D'autres fois il a fallu expliquer ou développer des expres-

sions ou des calculs rendus d'une manière obscure. Enfin il était une autre partie jusqu'ici négligée par la plupart des traducteurs, quoiqu'elle soit d'une grande importance pour les ouvrages de la nature de celui-ci : je veux parler de la transformation des nombres, exemples ou règles numériques, mesures, formules, tableaux.

Jusqu'à présent on paraît n'avoir suivi que deux marches : les uns se sont dispensés de traduire les mesures étrangères, et ont cru avoir assez fait en donnant quelques tables de réduction : ils ont rendu par là leur travail presque inutile pour la plupart des praticiens. Les autres ont tout traduit scrupuleusement, et même avec tant de rigueur, que les nombres simples de l'original se sont trouvés représentés par des nombres effrayants de chiffres et de fractions, parmi lesquels il a été impossible de se reconnaître. Les exemples, les règles données par l'auteur se sont ainsi trouvés défigurés et difficiles à suivre. Les tableaux synoptiques, dont le principal mérite est d'être simples et d'être établis selon la série naturelle des nombres entiers, ont eu pour base des nombres très-complicés sous lesquels la maladresse du traducteur a caché les lois d'abord évidentes de leur développement, lois que l'auteur avait en pure perte tâché de faire ressortir dans la disposition primitive.

Il ne restait qu'une autre marche à suivre, plus laborieuse il est vrai, mais aussi bien plus satisfaisante. Il ne fallait pas plus traduire littéralement les calculs qu'on ne traduit les phrases mot à mot, mais bien refondre ou pour mieux dire recomposer les expressions numériques, comme on fait pour les phrases littérales. C'est là le seul moyen de les

approprié à la pratique ; c'est alors seulement que le lecteur peut facilement se servir des exemples, des règles, des formules ou des tableaux qu'on lui présente. Quel est celui, par exemple, qui pourrait se faire une idée nette de la force d'un cheval en entendant dire qu'elle équivaut à $246^{\text{ks}},065$ élevés à $0^{\text{m}},5048$ pendant $0',0167$? N'en aurait-on pas une idée plus claire en disant qu'elle est égale à 75^{ks} élevés à 1^{m} par seconde ; et quoique les deux expressions soient identiques aux yeux d'un mathématicien, l'une ne sera-t-elle pas préférable à l'autre pour tous les lecteurs(*) ?

En transformant les mesures anglaises, il restait encore à faire un choix entre les deux systèmes de mesures usités en France ; mais, indépendamment des motifs généraux qui doivent faire donner la préférence au système décimal, il se trouvait ici quelques circonstances particulières qui étaient encore toutes favorables à son adoption. L'art des machines à vapeur est tout nouveau en France, et ses diverses parties, loin d'être parfaitement fixées, se modifient fréquemment, de sorte qu'on n'a pas pris encore, dans l'usage des dimensions et autres valeurs en mesures anciennes, des habitudes trop difficiles à déraciner ; ou du moins, si les Anglais ont importé dans quelques-uns de nos ateliers l'usage de leurs mesures, ce n'est pas à dire que nous devons renoncer à jamais aux nôtres en faveur de leur

(*) Aussi est-ce d'après ces vues que nous avons refait tous les calculs, pour les approprier à la pratique ; seulement, dans les cas importants, et comme moyen de vérification, nous avons joint les formules numériques originales, afin qu'on pût s'assurer de la fidélité de la transformation.

ystème, qui vient d'ailleurs d'être notablement altéré. Les calculs de volume, de poids, de force, si fréquents en mécanique, se font avec une simplicité admirable, dans le système métrique, et l'on doit désirer de le voir bientôt compléter par l'adoption de trois nouvelles unités officielles : l'unité de force propre à remplacer ce qu'on appelle vaguement force de cheval ; l'unité pour les eaux courantes, en remplacement du pouce d'eau des fontainiers, et enfin l'unité pour la mesure des quantités de chaleur. En attendant, nous avons fait usage, pour la mesure des forces, des termes consacrés *force de cheval*, mais en les définissant par l'élévation de 75^{ks} à 1^m par seconde, ou de 270 mètres cubes d'eau à 1^m par heure. Cette expression diffère très-peu de la mesure adoptée par Watt, presque généralement employée en Angleterre. Elle est d'ailleurs recommandée par Th. Tredgold. Pour les mesures des quantités de chaleur, nous avons adopté l'unité de 1^{ks} d'eau dont la température serait élevée de 1° centésimal. Enfin, pour la fourniture des eaux, le volume a été exprimé en mètres cubes écoulés par heure.

Il ne reste plus qu'à ajouter que cette traduction a été soigneusement corrigée des erreurs d'impression et autres qui s'étaient glissées dans l'original, et qu'elle est de plus enrichie de plusieurs corrections et changements que l'auteur a bien voulu communiquer. Le lecteur s'apercevra aussi, sans qu'on le lui fasse remarquer, que l'atlas des planches a été exécuté avec une perfection et une richesse de dessin dont on n'était accoutumé à voir des exemples que dans les ouvrages anglais.

Les perfectionnements récents des machines locomotives et les résultats merveilleux de vitesse et de force qu'on en a obtenus sur les chemins de fer, ont jeté le plus vif intérêt sur la connaissance de ces machines ; une section spéciale et nouvelle leur a été consacrée dans cette seconde édition.

M.

PRÉFACE

DE L'AUTEUR.



Parmi les divers ouvrages publiés sur un sujet d'aussi grande importance nationale que les machines à vapeur, il n'en existe pas, soit dans notre langue, soit en langue étrangère, qui paraissent présenter une exposition pleinement satisfaisante des principes de ces machines. Le seul énoncé de ce fait me suffira pour rendre superflue toute apologie en faveur de l'ouvrage que j'offre maintenant au public. En ma qualité d'auteur, j'ai souvent, et peut-être avec succès, réclamé son attention; j'espère dans ce cas trouver le même accueil, et surtout montrer par les soins que j'ai donnés à ce travail important, combien je mets de prix au caractère, en quelque sorte public, que j'ai acquis, ainsi qu'aux nombreux encouragements que j'ai reçus.

Il a été trop commun dans ces derniers temps, d'entendre les mathématiciens se plaindre du manque de protection, et censurer l'autorité sur sa négligence à encourager les

sciences, oubliant que des recherches quelconques ne seront toujours estimées qu'en raison de leur utilité immédiate ; mais tant qu'ils continueront à borner leur étude à des connaissances abstraites, tant qu'ils ne consacreront pas une plus grande partie de leur temps à en faire l'application aux besoins et au bien-être de la société, ils devront se résigner à n'obtenir qu'une faible portion des avantages qui résultent de la combinaison de la capacité théorique avec l'habileté pratique. Qu'ils se rappellent que Watt n'eût acquis aucune réputation s'il eût vécu dans un siècle ou dans un pays qui eût méconnu l'importance de la puissance mécanique. En poursuivant les applications des sciences aux arts, je ne crois pas non plus avoir été sans ajouter quelque chose aux progrès de la science pure ; et, bien loin d'être insensible au mérite des recherches abstraites, je désire les voir suivre avec une nouvelle vigueur par ceux qui ont le courage de se faire jour à travers les préjugés des systèmes existants, et qui veulent n'étudier que d'après la nature. Mais on ne doit se livrer à la culture des sciences qu'avec le désir d'atteindre le grand objet de toutes les recherches humaines, c'est-à-dire le perfectionnement de la condition de l'homme ; autrement les rêveries fantastiques des philosophes de la Grèce auraient autant de droits à l'attention des hommes studieux.

J'espère que ces remarques tendront à encourager ceux qui cherchent à avancer nos connaissances, soit avec l'énergie de la jeunesse, soit avec l'enthousiasme encore plus durable de l'âge mûr. De même que la nature, l'art doit être toujours le résultat de ces proportions et de ces lois immuables qui régissent la matière, et l'on peut dire que leurs objets sont véritablement sans bornes. L'imperfection de l'esprit humain vient généralement de ce qu'il n'est pas en état de prévoir toutes les circonstances qui influent sur

les phénomènes ; mais à mesure que nous acquérons des connaissances , nous acquérons aussi une plus grande force de perception : ce qui était d'abord difficile devient aisé , et souvent l'intelligence est éveillée par les rayons brillants de la vérité , qui percent , pour ainsi dire , accidentellement , à travers un nuage d'idées obscures , et montrent tout à coup dans le plus grand jour la vraie solution des difficultés ; c'est alors , comme l'a remarqué mon savant compatriote Emerson , que s'évanouissent en un instant les fatigues de la recherche de la vérité.

Je dois maintenant donner une idée de cet ouvrage. Il paraîtra sans doute trop étendu pour son objet , mais quoiqu'il soit borné à l'étude d'un seul moteur , la puissance de cet agent est gigantesque , et elle embrasse un tel nombre de doctrines , aussi neuves qu'importantes dans la mécanique pure et appliquée , qu'il était impossible , à la rigueur , de resserrer ce *Traité* dans un moindre espace.

L'ouvrage est divisé en 10 sections (*).

La PREMIÈRE SECTION contient l'histoire des perfectionnements progressifs des machines à vapeur , depuis l'époque de la première proposition du marquis de Worcester jusqu'aux derniers degrés de perfectionnement obtenus de nos jours.

La DEUXIÈME SECTION présente l'analyse de la nature de la vapeur d'eau et des autres vapeurs ; les lois de leur combinaison avec la chaleur ; celles de leur force élastique , de leur densité et de leur puissance dynamique comparée ; les principes et les modes de calcul de leur vitesse , des pertes de force par le refroidissement , etc. On démontre , dans cette section , que l'eau est , de tous les fluides connus , le plus propre à la production de la vapeur.

(*) L'édition présente contient de plus une XI^e section consacrée aux machines locomotives.

La TROISIÈME SECTION traite des lois de la combustion et du pouvoir calorifique des diverses espèces de combustibles; des proportions des foyers et cheminées pour chaudières à vapeur, ainsi que des précautions propres à en garantir la sûreté et l'efficacité : on y trouvera une discussion complète sur la nature et l'emploi des appareils de sûreté, suivie de l'exposition des lois relatives à la condensation de la vapeur.

La QUATRIÈME SECTION est consacrée à l'évaluation de la puissance produite par une quantité donnée de vapeur, et aux divers modes de la réaliser. Cette exposition est présentée à la fois sous un point de vue élémentaire et sous la forme scientifique; un article traite spécialement des imperfections théoriques des machines rotatives. Viennent ensuite les différents modes d'appliquer la force de la vapeur, avec la classification des machines qui en résulte. La section se termine par la recherche de la vitesse et des proportions qui donnent le maximum d'effet dans les machines, et par l'exposition de la nature et du service des pompes à air, ainsi que de la perte de force qu'occasionne leur jeu.

La CINQUIÈME SECTION traite de la construction des diverses variétés de machines sans condenseur. Ces machines sont toutes à haute pression, et l'on a développé pour chacune d'elles les causes de pertes d'effet, les moyens d'employer la vapeur avec le plus d'avantage, et enfin les méthodes pour calculer leur puissance dynamique et les proportions de leurs parties.

Dans la SIXIÈME SECTION, on traite de la même manière de la construction, des proportions, de la puissance et des résultats économiques des machines à condenseur.

C'est pour la première fois que, dans ces deux sections, on a, non-seulement exposé, mais réduit à une mesure

précise toutes ces petites causes qui affectent l'action de la vapeur ; et cette évaluation me paraît faite de façon à devenir très-utile , tant à ceux qui veulent appliquer qu'à ceux qui veulent perfectionner les machines à vapeur.

La SEPTIÈME SECTION est destinée à l'examen des proportions et de la construction des parties des machines , telles que robinets , soupapes , tiroirs , pistons , boîtes à étoupes , etc. ; aux divers modes du jeu des soupapes et régulateurs , à la description des différents moyens pour maintenir dans une direction rectiligne la tige des pistons , et enfin à des recherches sur les mouvements de la manivelle. On a ajouté quelques règles pratiques pour établir la force de résistance qui convient aux diverses parties des machines , et particulièrement aux chaudières de différentes formes.

La HUITIÈME SECTION traite , premièrement , des modes de régulariser le jeu des machines à vapeur , soit par des volants , soit à l'aide de contrepoids ; secondement , des moyens de régler la force des machines par des soupapes , des régulateurs , ou des modérateurs ; troisièmement , des procédés pour déterminer l'état et l'intensité des forces des machines , ainsi que des méthodes pour mesurer leur effet dynamique ; quatrièmement , la manière de manœuvrer les machines à vapeur.

La NEUVIÈME SECTION expose les applications de la force de la vapeur à l'évaluation des eaux , à l'épuisement des mines et à l'extraction des minerais , aux usines métallurgiques , et enfin au mouvement des machines des manufactures et de l'agriculture.

La DIXIÈME SECTION est consacrée à la navigation par la vapeur ; elle contient des recherches sur la stabilité des navires , sur la résistance qu'ils éprouvent à se mouvoir dans les fluides , sur les moyens de les faire marcher , et sur

les proportions à établir entre la puissance motrice et les effets désirés. Ces recherches sont nécessairement neuves ; car la théorie de la résistance des fluides , jusqu'ici enseignée dans les écoles , est erronée et inapplicable. J'ai donc tâché d'exposer mes propres méthodes plutôt sous un point de vue élémentaire que sous une forme rigoureusement scientifique, me réservant de présenter dans un ouvrage séparé le développement de mes idées sur cette branche importante de la science.

La ONZIÈME SECTION contient la description des machines locomotives dans l'état actuel de leur perfectionnement ; la théorie de leur puissance et de leurs effets utiles ; leur application aux chemins de fer et aux routes ordinaires, et les conditions économiques de leur emploi.

Les tableaux qui terminent l'ouvrage ne seront pas sans utilité pour la pratique ; les planches sont accompagnées de légendes qui en rendent l'intelligence facile , et qui m'ont permis de renvoyer aux endroits de l'ouvrage qu'elles ont pour but d'éclaircir.

Je suis redevable à l'amitié et à la libéralité de quelques-uns de mes confrères , de plusieurs renseignements que je n'eusse pas obtenus sans eux ; en quelques cas cependant leurs communications sont arrivées trop tard , excepté pour ma propre satisfaction , lorsque j'ai vu qu'elles étaient conformes aux principes posés dans ce Traité. Je n'ai donné qu'une partie des expériences de M. Bevan , sur la résistance des bateaux , parce que les autres étaient évidemment affectées par la section bornée du canal où on les avait faites. Une des planches (pl. XVII) m'a été donnée par M. White , mécanicien , et quelques autres ont été choisies parmi les belles gravures exécutées par Clément , et publiées dans l'Esquisse historique des machines à vapeur de Partington ; les autres ont été gravées d'après mes propres dessins.

Mon principal but a été de conduire le lecteur dans l'étude

des principes des machines à vapeur, et de lui fournir, non-seulement les matériaux de cette étude, mais encore les méthodes de raisonnement, en les variant suffisamment pour le mettre en état de résoudre tous les cas nouveaux qui pourraient se présenter. Plus il apportera de soins et d'assiduité à cette étude, plus il sentira l'utilité des premiers pas que j'aurai faits en explorant un sujet aussi vaste qu'intéressant.

Je terminerai en empruntant les termes employés par Newton, dans une circonstance plus solennelle. « Je désire sincèrement qu'on lise mes écrits avec candeur, et qu'on cherche moins à me reprocher les défauts où je suis tombé qu'à suppléer à ces imperfections par de nouvelles recherches. »

TH. TREGOLD.

MESURES ET VALEURS

EMPLOYÉES DANS CETTE TRADUCTION.

Les mesures employées sont toujours des mesures métriques, à moins de désignation contraire.

Les anciennes mesures sont toujours des mesures anglaises exclusivement.

Voici les rapports des unes aux autres.

$$1 \text{ mètre} = 3 \text{ pieds}, 281 = 3 \text{ pieds } 3 \text{ pouces } 4 \text{ lignes } \frac{1}{2}.$$

$$1 \text{ id. carré} = 10 \text{ pieds carrés}, 764.$$

$$1 \text{ id. cube} = 35 \text{ pieds cubes}, 316.$$

$$1 \text{ décimètre} = 3 \text{ pouces}, 937.$$

$$1 \text{ id. carré} = 15 \text{ pouces carrés}, 488.$$

$$1 \text{ id. cube} = 63 \text{ pouces cubes}, 90.$$

$$1 \text{ centimètre} = 0 \text{ pouces}, 3937.$$

$$1 \text{ id. carré} = 0 \text{ pouces carrés}, 155.$$

$$1 \text{ id. cube} = 0 \text{ pouces cubes}, 064.$$

$$1 \text{ myriamètre} = 6 \text{ milles}, 211.$$

$$1 \text{ kilomètre} = 0 \text{ mille}, 621 = 1093 \text{ yards}, 7.$$

$$1 \text{ gramme} = 15,4 \text{ grains troy.}$$

$$1 \text{ hectogramme} = 3 \text{ onces}, 528 \text{ avoir-du-poids.}$$

$$1 \text{ kilogramme} = 2 \text{ lb.}, 205.$$

$$1 \text{ tonneau métr.} = 19 \text{ cwt}, 69 = 0 \text{ tonnes angl.}, 984.$$

$$1^{\circ} \text{ centésimal} = \frac{5}{9} \text{ de } 1^{\circ} \text{ Fahrenheit.}$$

$$\text{La températ. centésimale} = \frac{5}{9} \text{ de la température Fahrenheit diminuée de } 32^{\circ},$$

$$\text{ou } T = \frac{5}{9} (T' - 32).$$

Les autres unités adoptées dans cet ouvrage sont :

Unité de chaleur, 1 kilogramme d'eau élevé de 1°;

Elle équivaut à 31b.,97 d'eau élevées de 1° Fahr., ou près de 4 unités anglaises.

Unité dynamique, 1 mètre cube d'eau élevé à 1 mètre;

Elle équivaut à 115pieds cubes,9 d'eau élevés à 1 pied,

ou 7243 livres » 1 pied.

MESURES ET VALEURS.

Unité de puissance pour les machines à vapeur.

FORCE D'UN CHEVAL (Vapeur).	PAR SECONDE.	PAR MINUTE.	PAR HEURE.
En mesures métriq.	75 kil.	4500 kil.	270000 ^k , ou 270mè cub
En mesures anglais.	542 lb., 6	32556 lb.	1955360lb., ou 51254 pi cub
id. évaluat. de Watt	550 lb.	35000 lb.	1980000lb., ou 51680 pi cub

$\left. \begin{array}{l} \text{élevé.} \\ \text{à} \\ \text{1 mè} \end{array} \right\}$
 $\left. \begin{array}{l} \text{élevés} \\ \text{à} \\ \text{1 pied} \end{array} \right\}$

Valeurs comparatives des pressions.

PRESSIONS.	COLONNE d'eau équivalente.	COLONNE de mercure équivalente.	PRESSION par superficie car.	PRESSION par superf. circul.
Pression de 1 at- mosphère.	$\left\{ \begin{array}{l} 10^m \frac{2}{3} \\ 33\text{pieds}, 9 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 76 \text{ centimè.} \\ 29\text{pouces}, 92 \end{array} \right.$	Par centim. $1\frac{1}{30}$	Par centim., 0 ^k ,8116
			Par pouce, 14lb., 7	Par pouce, 11lb.,55
Pression de 1 kil. Par centimè. car.	$\left\{ \begin{array}{l} 10^m \\ 32\text{pieds}, 81 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 73,5 \text{ cent.} \\ 28\text{pouces}, 94 \end{array} \right.$	Par centim., 1 kil.	Par centim., 0 ^k ,735
			Par pouce, 14lb., 2	Par pouce, 11lb.,17
Pression de 1 kil. Par cent. circul.	$\left\{ \begin{array}{l} 12^m, 73 \\ 41\text{pieds}, 78 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 93,6 \text{ cent.} \\ 37\text{pouces}, 7 \end{array} \right.$	Par centim., 1 ^k ,273	Par centim., 1 kil.
			Par pouce, 18lb.,08	Par pouce, 14lb.,2

Il résulte de ce tableau que la pression d'une atmosphère équivaut à très-peu près à une colonne d'eau de 10 mètres, ou à une colonne de mercure de $\frac{3}{4}$ de mètre, ou à une pression de 1 kilogr. par centimètre carré, ou, enfin, à une pression de 8 hectogrammes par centimètre circulaire. Dans la plupart des cas, ces valeurs approchées seront suffisamment exactes pour la pratique, et leur emploi rendra les calculs beaucoup plus faciles.

M.

2*

DES

MACHINES A VAPEUR.

PREMIÈRE SECTION.

HISTOIRE DE L'INVENTION ET DES PERFECTIONNEMENTS SUCCESSIFS DES MACHINES A VAPEUR.

1. On appelle *machine à vapeur* la combinaison des vases et appareils qui servent à obtenir une force mécanique effective, soit par la production seule, soit par la production et la condensation réunies de la vapeur d'un liquide. Cette machine fut pendant longtemps connue sous le nom de *machine à feu*, et ce n'est pas sans raison, car l'agent réel est la chaleur ou le feu. L'eau est le liquide généralement employé pour produire la vapeur; mais on arrive au même résultat au moyen de l'alcool, de l'éther et d'autres fluides : toutefois, l'eau, qui est de tous les liquides le plus facile à obtenir, est d'un effet égal, sinon supérieur, à tous les autres, sous le rapport mécanique.

2. On a dû reconnaître, à une époque très-reculée, que l'eau échauffée se vaporise, et que la vapeur ainsi produite sort avec force d'une petite ouverture pratiquée dans le vase employé pour l'opération. L'éolipyle et plusieurs autres instruments de ce genre, qui servent à expliquer les phénomènes naturels, ont été bien connus des Égyptiens, des Grecs et des Romains. Vitruve¹, qui écrivait sous le règne d'Auguste, se sert de l'éolipyle pour

¹ Liv. I, chap. vi.

C'était ici le lieu de citer les écrits de Héron d'Alexandrie, qui vivait environ 120 ans avant l'ère chrétienne : on trouve en effet dans un traité de ce savant, intitulé *Spirititalia seu pneumatica*, des exemples curieux de l'emploi de la vapeur

expliquer l'effet de la chaleur dans la production des vents; mais il est évident qu'il n'avait aucune idée que la vapeur pût être utilisée comme puissance mécanique. Philibert de l'Orme proposa de placer un éolipyle au-dessus du feu, comme moyen de faire monter la fumée dans les cheminées ¹. On trouve encore plusieurs autres applications de cet instrument décrites dans les ouvrages de Salomon de Caus, de Branca, de van Drebbel et plusieurs autres écrivains, dont la plupart sont cités par M. de Montgéry, auteur qui a fait de nombreuses recherches pour montrer que la machine à vapeur n'est pas d'origine anglaise ².

Mais, à moins que l'on ne démontre qu'une machine à vapeur ait été réellement inventée, et qu'elle fut applicable aux mêmes usages qui ont rendu depuis son emploi si important, il semble bien futile de rechercher des autorités, et ces recherches ne sont nullement dignes d'occuper le temps et l'attention d'un véritable savant ³. Le souffle d'un éolipyle est bien loin de produire les

comme force motrice, fondés sur le principe de l'éolipyle, et combinés avec celui des machines à réaction. M.

¹ *Traité d'Architecture*, in-fol., Paris, 1567.

Cette idée vient de recevoir une application très-heureuse dans les machines locomotives, dont on a porté au plus haut degré l'énergie du tirage dans les cheminées, au moyen d'un puissant jet de vapeur lancé dans les tuyaux. *Voyez la section des machines locomotives.* M.

² *Notice historique sur l'invention des machines à vapeur*, par M. de Montgéry.

Le même auteur a publié, dès 1825, dans les *Annales de l'Industrie*, nos 57 et suiv., les premiers chapitres d'un traité historique et pratique des Machines à vapeur, qui présente la première tentative d'une histoire complète de l'art, et qui peut servir de complément et de rectification à plusieurs parties du récit de M. Tredgold. M.

³ Si cette opinion était fondée, il faudrait donc n'attacher aucun prix à toute idée ou découverte qui n'est pas immédiatement applicable, et refuser le titre de véritables savants à tous ceux qui se sont occupés de recherches purement historiques sur les arts et les sciences; à Plin, pour son histoire de la nature et de l'art; à Anderson, pour celle du commerce; à Lalande, à Montucla, pour celle des mathématiques; à Bailly, à Delambre, pour celle de l'astronomie, etc. S'il devait résulter de recherches semblables que la nation anglaise n'a fait que concourir avec d'autres peuples à l'invention et au perfectionnement des machines à vapeur, il serait aussi peu philosophique à un Anglais d'en prendre de l'humeur qu'à d'au-

effets nécessaires pour lesquels on emploie les machines à vapeur ; et une preuve de cette inefficacité, c'est que l'on ne s'est jamais servi du même principe d'action, c'est-à-dire de l'impulsion, pour produire, dans une machine de ce genre, des effets mécaniques applicables à des travaux utiles.

Je ne m'occuperai pas, en conséquence, de rechercher à quelle époque on a reconnu que la vapeur était une force, mais de tâcher de retracer, dans une forme pratique, l'histoire des propositions et des essais auxquels elle a donné lieu, et de ses applications aux arts et aux manufactures; de développer les différents changements et les améliorations qui ont été effectués; enfin, de distinguer, au milieu de la foule des faiseurs de projets, les personnes dont les lumières ont contribué à étendre nos connaissances, soit sous le rapport de la théorie et de la construction de ce puissant moteur, soit en ce qui concerne son emploi.

Il est aisé d'apercevoir que je me suis chargé d'une tâche bien difficile; mais il n'est pas moins vrai que, si je m'en acquitte avec jugement et sincérité, j'aurai contribué à ajouter un complément précieux à une branche intéressante de la science mécanique. C'est ce qui m'encourage à poursuivre mon entreprise; et je me flatte de laisser le lecteur dans la conviction que mes jugements sur les inventeurs de chaque partie des machines à vapeur ne sont fondés que sur l'équité.

1615. *Salomon de Caus.*

3. Salomon de Caus, ingénieur français, composa à Heidelberg, pendant qu'il était au service du prince électeur palatin, un traité intitulé : *Les raisons des forces mouvantes, avec diverses machines tant utiles que plaisantes*, etc. Cet ouvrage parut à Francfort en 1615, et à Paris en 1623. On y trouve très-

très d'en tirer vanité. C'est à l'esprit humain qu'appartiennent de telles découvertes, et le véritable savant s'occupe d'en tracer l'histoire dans le seul intérêt de la science, et en s'élevant au-dessus des préjugés et des amours-propres nationaux.

M.

nettement exposée l'idée d'élever l'eau au moyen de la force élastique de la vapeur.

« Théorème V. L'EAU MONTERA PAR AIDE DU FEU, PLUS HAUT QUE SON NIVEAU.

« Le troisième moyen de faire monter l'eau est par l'aide du feu, dont il se peut faire diverses machines.

« J'en donnerai ici la démonstration d'une.

« Soit une balle de cuivre marquée A (*v. Pl. 25, fig. 1*), bien soudée tout à l'entour, à laquelle il y aura un soupirail marqué D par où l'on mettra l'eau, et aussi un tuyau marqué BC qui sera soudé en haut de la balle, et le bout c approchera près du fond sans y toucher; après, faut emplir ladite balle d'eau par le soupirail, puis le bien reboucher et la mettre sur le feu; alors la chaleur, donnant contre ladite balle, fera monter toute l'eau par le tuyau BC. »

L'inventeur explique comment cet effet est dû à la pression de la vapeur de l'eau :

« La violence de la vapeur (produite par l'action du feu) qui cause l'eau de monter, est venue de ladite eau, laquelle vapeur sortira après que l'eau sera sortie par le robinet avec grande violence. »

Salomon de Caus connaissait aussi la force explosive de la vapeur; voici comment il en décrit les effets :

« La violence sera grande quand l'eau s'exhale en air par le moyen du feu et que ledit air est enclos; comme par exemple, soit une balle de cuivre d'un pied ou deux en diamètre et épaisse d'un pouce, laquelle sera remplie d'eau par un petit trou, lequel sera bouché bien fort avec un clou, en sorte que l'eau n'en puisse sortir; il est certain que si l'on met ladite balle sur un grand feu, en sorte qu'elle devienne fort chaude, qu'il se fera une compression si violente que la balle crevera en pièces avec bruit semblable à un pétard. » M.

1663. *Le marquis de Worcester, mort en 1667.*

4. Avant le marquis de Worcester, l'idée d'employer la force

impulsive de l'éolipyle semble être la seule qu'on ait eue pour appliquer la vapeur comme source de mouvement ¹. Cet écrivain, dans un opuscule intitulé *Centurie de titres et de descriptions d'inventions*, parle incontestablement d'une méthode pour employer la pression de la vapeur comme propre à l'élévation de l'eau à de grandes hauteurs ². Cet opuscule parut pour la première fois en 1663; et sous l'invention portant le n^o 68, nous trouvons le titre et la description qui suivent :

« LXVIII. POMPE A FEU. — Moyen admirable et puissant
 « pour élever l'eau par le feu, et non pour la tirer de bas en haut
 « par aspiration: car ce dernier moyen ne peut avoir lieu, comme
 « disent les physiciens, que *infra sphaeram activitatis*, c'est-à-
 « dire seulement à une certaine distance. Ma méthode n'a aucune
 « limite si les vases sont assez forts: car, ayant pris un canon
 « dont la volée avait été brisée, je le remplis d'eau aux trois
 « quarts, et après avoir fermé à vis la bouche ainsi que la lu-
 « mière, je le plaçai au-dessus d'un feu actif et bien entretenu:
 « au bout de 24 heures, il creva avec un grand fracas. Ayant un
 « moyen de faire mes vases assez forts pour résister à la pression
 « intérieure, et de les remplir l'un après l'autre, j'ai vu l'eau
 « s'élever à 40 pieds de hauteur, et jaillir en jet continu: un vase
 « d'eau raréfiée par le feu en élève 40 d'eau froide. La personne
 « qui dirige la machine n'a qu'à tourner deux robinets, afin
 « qu'un vase étant épuisé, un autre recommence à agir et à se
 « remplir de nouveau d'eau froide, et ainsi de suite, pourvu que
 « le feu soit toujours maintenu à un haut degré d'activité, tâche
 « que la même personne peut remplir pendant les intervalles de
 « son service pour tourner lesdits robinets. »

Cette description montre jusqu'à l'évidence que le marquis de

¹ Nous venons de voir que quarante-huit ans auparavant, Salomon de Caus avait décrit un appareil à élever l'eau, dans lequel la vapeur agissait par sa pression directe. L'invention de ce système de machine ne peut donc pas être attribué au marquis de Worcester. M.

² Une autre machine, que le marquis appela *machine à refouler l'eau*, semble avoir été celle pour laquelle un acte du parlement lui accorda la jouissance exclusive des bénéfices résultant de son emploi.

Worcester n'ignorait pas que la vapeur, chauffée dans un vase fermé, acquiert un immense degré de force, et que cette force peut être employée avec succès pour élever l'eau. L'effet de la condensation ne semble pas lui avoir été connu, et c'est pour cette raison que sa méthode d'opérer doit avoir été très-simple, et probablement telle que le démontre la figure 1^{re}, planche I^{re}, où B est la chaudière, C un des vases avec un tuyau *a* pour conduire l'eau à un réservoir élevé D.

Supposez maintenant que le vase C soit, au moyen d'un conduit, alimenté d'eau froide provenant d'un réservoir A, de telle sorte qu'il puisse se remplir en ouvrant le robinet E, et que ce robinet soit ensuite fermé : au moment où la vapeur qui se développe dans la chaudière est d'une force suffisante, le robinet F étant ouvert, la pression de la vapeur sur l'eau contenue dans le vase C, fait monter celle-ci de C, par le conduit *a*, dans le réservoir D. Le vase C étant vidé, et le robinet F fermé, il se remplit d'eau lorsqu'on ouvre le robinet E.

Il faut encore un autre vase C, muni de ses robinets et de tuyaux, pour compléter l'espèce de machine à vapeur indiquée par cette description, et ce deuxième appareil peut être placé de l'autre côté de la chaudière ¹.

Ce mode d'élever l'eau devait être très-dispendieux, par suite de la condensation considérable qui avait lieu lorsque la vapeur se trouvait en contact avec l'eau froide; mais il était bien susceptible de produire la quantité d'effet mentionnée, qui équivalait

¹ Le peu de succès qu'ont eu jusqu'ici tous les commentateurs qui ont entrepris de recomposer la machine de Worcester d'après sa description énigmatique, semblerait annoncer que cette machine n'a pu être exécutée, au moins telle qu'elle est décrite. M. Tredgold ne paraît pas plus heureux que ses devanciers; il introduit, en effet, dans sa composition deux chaudières et deux robinets de plus, dont le texte ne fait aucune mention. Une conjecture qu'on peut se permettre avec assez de fondement, c'est que Worcester, ayant résidé plusieurs années en France, a dû avoir connaissance des écrits de Salomon de Caus, et que son invention pourrait bien n'être, en conséquence, que la combinaison de deux des fontaines à vapeur de ce dernier, d'autant plus que l'appareil qui en résulte remplit mieux que tout autre les conditions indiquées si obscurément par Worcester (*Voyez*, à ce sujet, un commentaire étendu donné par R. Stuart, *A descriptive history of the Steam engine*, p. 10 à 20, Londres, 1824).

seulement à élever 20 pieds cubes d'eau , ou 1250 livres , à un pied de hauteur , moyennant une livre de charbon , ce qui revient à peu près à la 200^e partie de l'effet d'une bonne machine à vapeur ¹. On peut donc admettre que le marquis de Worcester a le premier inventé et essayé le mode pratique d'appliquer la vapeur comme moteur , et que le premier il l'a appliquée à un de ces grands travaux pour lesquels il a depuis lors rendu de si grands services à la société ².

1685. *Sir Samuel Morland, mort en 1695.*

5. D'après une partie d'un manuscrit qui se trouve dans la collection harléienne du Musée britannique, il paraîtrait qu'un mode d'élever l'eau par la vapeur , semblable à celui du marquis de Worcester , fut proposé à Louis XIV par sir Samuel Morland. On n'y trouve point de description du procédé que l'auteur se proposait d'employer ; mais on y voit assez qu'il ne manquait pas de connaissances sur ce sujet. La partie qui traite de la puissance de la vapeur est intitulée : *Principes d'une nouvelle force du feu, inventés par le chevalier Morland en 1682, et présentés à S. M. T.-C. en 1685.* Ces principes sont ainsi exposés : « L'eau étant convertie en vapeur par la force du feu , cette « vapeur exige bientôt un espace à peu près 2000 fois plus grand « que celui précédemment occupé par l'eau , et elle briserait un « canon plutôt que d'y rester renfermée : mais cette force étant « bien gouvernée suivant les lois de la statique , et réduite par « le calcul à une mesure , à un poids et à une balance , alors elle

¹ En refaisant ce calcul , on est loin d'arriver au même résultat. En effet , suivant Worcester , un vase plein d'eau , étant vaporisé , pourrait en élever 40 à 49 pieds de hauteur , ou 1600 à un pied ; ainsi 11b. aurait élevé 1600lb. à un pied. En admettant que , dans cet appareil , une quantité donnée de houille pût produire cinq fois son poids de vapeur , une livre de ce combustible eût suffi pour élever 8000lb. à un pied , ou pour donner un 50^e de l'effet d'une bonne machine. M.

² Ce mérite appartient bien plus incontestablement à Solomon de Caus , dont l'invention est , d'ailleurs , décrite et expliquée par lui-même avec toute la clarté désirable. M.

« entraîne la charge tranquillement comme un bon cheval , et
 « de la sorte elle devient très-utile à l'homme , surtout pour
 « élever l'eau conformément à la table suivante , qui montre ¹
 « le nombre de livres que l'on peut élever 1800 fois par heure
 « à la hauteur de 6 pouces , au moyen de cylindres à moitié
 « remplis d'eau , de même que les différents diamètres et les
 « hauteurs desdits cylindres. »

CYLINDRES.		POIDS de la CHARGE A ÉLEVER.
DIAMÈTRE EN PIEDS.	HAUTEUR EN PIEDS.	
1	2	15 livres.
2	4	120
3	6	405
4	8	960
5	10	1875
6	12	3240

Ces nombres sont évidemment proportionnels à la capacité des cylindres. Dans l'original, le tableau va jusqu'à montrer l'effet produit par un certain nombre de cylindres des dimensions les plus grandes ci-dessus mentionnées, dont chacun est capable d'élever 3240 livres.

Morland a donné l'augmentation de volume que l'eau prend, à l'état de vapeur, sous les pressions ordinaires, et cela d'une manière si approximative, que l'on peut bien supposer qu'elle est le résultat de l'expérience; tandis que ce qu'il dit de la force de la vapeur comme suffisante pour briser un canon, et la proposition qu'il fit de son procédé à un prince étranger, donnent tout lieu de présumer que l'ouvrage publié vingt ans auparavant par le marquis de Worcester ne lui était pas inconnu.

Les recherches de Morland ne semblent avoir eu qu'une

¹ En mesures françaises.

faible influence sur les progrès de l'emploi pratique de la vapeur.

1690. *Denis Papin, mort en 1710* ¹.

6. En cette année, le docteur Papin proposa d'employer l'expansion et la contraction de la vapeur, afin de former un vide partiel sous un piston pour élever l'eau, et de prendre pour moteur la pression de l'atmosphère sur la partie supérieure du piston ². Les véritables auteurs de la machine atmosphérique doivent très-probablement une grande partie de leur invention à cette idée; mais ni Papin lui-même, ni son rival Savery, ne découvrirent le moyen d'en tirer parti. En effet, la forme dans laquelle cette idée fut proposée n'était pas praticable. On devait alternativement appliquer le feu au cylindre et l'en retirer; et l'expansion de l'eau qu'il contenait devait, par la chaleur, élever le piston; sa contraction par le refroidissement, quand le feu était retiré, devait former le vide partiel, et par conséquent la descente du piston devait être produite par la pression de l'atmosphère. Si l'on a jamais essayé l'exécution de ce projet, le résultat doit avoir été de nature à décourager Papin, et à lui faire abandonner sa première idée pour en adopter une autre, parti qu'il prit après avoir vu une gravure de la machine de Savery ³.

¹ Denis Papin, né à Blois de parents protestants, et élevé à Paris, fut obligé de s'expatrier par la révocation de l'édit de Nantes; il se réfugia en Allemagne auprès du landgrave de Hesse, qui le nomma professeur à l'université de Marbourg. C'est là qu'il composa, entre autres écrits, son *Recueil de diverses pièces touchant quelques nouvelles machines*, imprimé à Cassel en 1695; mais il avait déjà exposé plusieurs de ses idées sur les machines à vapeur dans les *Acta Eruditorum*, Lipsiæ, anno 1688 et 1690. M.

² *Transact. philosoph., Abrégé*, vol. IV, p. 155 (1697).

³ Ce récit est inexact et incomplet; voici comment il doit être rectifié, d'après les écrits mêmes de Papin, insérés dans les *Acta Eruditorum* pour 1688, page 97; 1690, page 410, et reproduits en partie par M. Farey, qui rend plus de justice à cet inventeur, comme on le verra par l'extrait suivant (*).

Papin rapporte qu'ayant trouvé impossible de faire un vide complet dans le

(*) *A Treatise on the Steam engine*, p. 63, in-4°. London, 1827.

1689. *Thomas Savery.*

7. Ces projets de machine à vapeur pour élever l'eau ne restèrent pas longtemps sans application; on accorda, au mois de juillet 1698, des lettres patentes au capitaine Thomas Savery :

cylindre, par le moyen de la poudre à canon, il tâcha d'atteindre le même but au moyen de l'eau, qui, dit-il, étant vaporisée, a la propriété de faire ressort comme l'air, et de se condenser ensuite par le froid, de manière à ne laisser aucune trace de cette force ou de ce ressort. La machine qu'il proposa consiste en un cylindre formé de métal mince et garni d'un piston qui peut s'y mouvoir librement. On met une petite quantité d'eau au fond de ce cylindre, et le piston étant descendu au point de venir en contact avec l'eau, l'air est expulsé par une ouverture dans le piston, que l'on bouche par un obturateur; le feu, appliqué au fond du cylindre, met bientôt en ébullition l'eau qui y est contenue, et la vapeur qui en résulte exerce une forte pression contre le piston, et le soulève jusqu'au haut du cylindre, en surmontant la pression atmosphérique : en ce moment, un arrêt, qui entre dans une entaille de la tige, tient le piston suspendu. Le feu étant alors enlevé, la vapeur se condense par le refroidissement, et forme le vide dans le cylindre. Dans cet état, la machine peut produire un effet mécanique : car en lâchant l'arrêt, le piston descendra avec une force égale au poids de l'atmosphère, et pourra soulever une résistance donnée, au moyen d'une corde et de poulies de renvoi.

On reconnaît dans cette esquisse grossière, qui fut ensuite perfectionnée, le principe de la machine atmosphérique. L'auteur rapporte qu'il en fit l'essai avec un cylindre de 2 pouces $\frac{1}{2}$ de diamètre, et qu'il la trouva susceptible d'élever 60 lb. (c'est-à-dire 12 $\frac{1}{4}$ lb. par pouce carré), en produisant cet effet une fois par minute. Sur cette donnée, il calcula qu'un cylindre de 2 pieds de diamètre et de 4 pieds de haut aurait été suffisant pour élever 8000 lb. par minute à la hauteur de 4 pieds; ce qui est équivalent à 32000 lb. élevées à un pied, ou à près de la force d'un cheval, suivant l'évaluation moderne.

Papin annonce que son invention est applicable à l'épuisement de l'eau des mines, au jet des bombes et à la remorque des navires contre vent et marée. Pour ce dernier usage, il propose de placer, sur les côtés des bâtiments, des roues à aubes, auxquelles on imprimerait un mouvement rotatif continu au moyen de trois ou quatre de ses nouveaux cylindres. A cet effet, les tiges des pistons auraient été formées en crémaillère engrenant avec des roues dentées placées sur l'arbre des roues à aubes. Des encliquetages semblables à celui du barillet d'une montre auraient facilité le retour des roues dentées, lors de l'ascension du piston, et les auraient fait engrener lors de la descente. L'emploi de plusieurs cylindres avait pour objet de rendre l'action continue, malgré l'interruption alternative de chacun.

Dans la réimpression de ce projet, en 1695, l'auteur décrit un nouveau fourneau et des soufflets rotatifs, qu'il avait inventés à l'effet de vaporiser l'eau au moyen

ce fut le premier exemple de patente donnée pour une machine à vapeur. Le docteur Robinson rapporte que cela eut lieu après l'exécution de diverses machines dont Savery donna la description dans une brochure publiée en 1699¹, sous le titre de *l'Ami du Mineur*, et qui fut réimprimée avec des additions en 1702.

d'un foyer intérieur environné de tous côtés par le liquide ; il y expose comment cet appareil peut être appliqué au chauffage des cylindres de sa machine, au point d'en obtenir quatre coups par minute. La plupart de ces idées ingénieuses ont été réalisées dans les bateaux à vapeur modernes ; mais on obtient plus de vingt fois autant d'effet que Papin n'avait calculé pour un cylindre de la dimension ci-dessus.

On trouve une analyse du *Recueil de diverses pièces* de Papin dans les *Transactions philosophiques* pour 1697, n° 126, vol. XIX, p. 481. C'est ainsi qu'on y rend compte du Mémoire sur la machine à vapeur : « La quatrième lettre contient « un procédé pour élever l'eau des mines lorsqu'on n'a pas à proximité un cours « d'eau pour mouvoir la machine susdite (c'est-à-dire un système de pompes et de « cylindres agissant à distance par le moyen du vide fait dans les tuyaux de com- « munication). L'auteur ayant dit un mot sur la difficulté de faire le vide dans le « cylindre, avec la poudre, comme c'était son projet en 1687, propose de con- « vertir alternativement en vapeur une légère couche d'eau, au moyen du feu « appliqué sous le cylindre ; d'élever ainsi le piston à une hauteur considérable, « de laisser condenser la vapeur par le refroidissement, et de profiter de la des- « cente du piston, due à la pression atmosphérique, pour s'en servir à élever l'eau « des mines. »

Cette invention fait beaucoup d'honneur à Papin, et, quoiqu'elle laisse beaucoup à désirer sous le rapport des moyens d'exécution, elle présente néanmoins un développement complet du principe. Il ne paraît pas que Papin ait réussi à appliquer son invention à des travaux utiles ; il n'était pas un praticien, et à cette époque les ouvriers, ou même les constructeurs de machines, n'étaient pas en état de s'emparer d'une idée si étrangère à leurs travaux ordinaires et embrassant tant de considérations nouvelles. Notre savant parle de la difficulté de faire des cylindres comme d'un grand obstacle à l'adoption générale de son projet, et il recommande l'établissement d'une fabrique de ces cylindres.

Dans une publication postérieure, sous la date de 1709, Papin nous informe qu'il avait construit une machine en 1698 ; mais qu'avant qu'il eût pu faire un essai satisfaisant, elle fut détruite par une débâcle de la rivière sur laquelle elle était placée.

Il résulte de ces détails que, dès le xvii^e siècle, Papin avait conçu l'idée de la *machine atmosphérique*, des *armes à vapeur* et des *bateaux à vapeur*. M.

¹ D'après Robinson, cette publication eut lieu en 1696, mais cela paraît inexact. Switzen, dans son *Système d'Hydrostatique*, tom. II, p. 326, donne la date de 1699, indication véritable, selon toute apparence.

En juin 1699, le capitaine Savery présenta un modèle de sa machine à la Société royale, et les expériences qui en furent faites réussirent à la satisfaction de cette compagnie ¹. Cette machine (*voy.* pl. I^{re}, fig. 2) consistait en un fourneau et en une chaudière B; de la dernière partaient deux tuyaux auxquels étaient adaptés des robinets C, et qui se prolongeaient jusqu'à deux vases à vapeur S, en communication avec des conduits aboutissant à un grand tuyau D, lequel allait de haut en bas, et jusqu'à un autre tuyau A, allant de bas en haut. Chaque paire de conduits avait des soupapes *a*, *b*, pour empêcher que l'eau élevée par la condensation ou par la force de la vapeur ne descendît. On ne voit qu'un seul vase S; les autres se trouvent par derrière. Un des vases étant rempli de vapeur, la condensation se produisait au moyen d'une projection d'eau froide provenant d'un réservoir E placé au-dessus du vase; et le vide partiel étant formé par ce moyen, l'eau était refoulée dans le vase, le long du tuyau D, par la pression de l'atmosphère, qui l'élevait ainsi d'une profondeur d'environ 6 mètres. La vapeur étant de nouveau introduite dans les vases, on fermait la soupape *b*, qui empêchait l'eau de descendre; tandis que la vapeur ayant acquis de la force dans la chaudière, sa pression faisait que l'eau élevait la soupape *a*, et montait jusqu'à une hauteur proportionnelle à l'excédant de la force élastique de la vapeur sur la pression de l'atmosphère.

Le capitaine Savery a plus tard considérablement simplifié cette machine, en ne se servant que d'un vase à vapeur. Pour prévenir la rupture de la chaudière, il fit usage de la soupape à sûreté V ou soupape à romaine, que Papin avait inventée pour son digesteur. Les robinets se dirigeaient à la main, et afin de fournir de l'eau à la chaudière, il y avait une petite chaudière contiguë pour chauffer l'eau à l'usage de la grande, et prévenir ainsi la perte du temps, qui aurait eu lieu au moment de remplir celle-ci d'eau froide.

Le modèle de Savery semble avoir été souvent imité, et toujours

¹ *Transact. philosoph., Abrégé*, vol. IV, p. 198 (1699).

avec assez de succès, quand il ne fallait qu'une élévation d'eau de 12 mètres; mais cette hauteur ne suffisait point pour des mines qui avaient besoin d'une machine puissante et susceptible d'agir à toute profondeur.

Les nouveaux principes que Savery a introduits dans la machine à vapeur consistent à effectuer la condensation dans le vase à vapeur et au moyen de l'application extérieure du froid. Il employait encore un procédé pour alimenter la chaudière avec de l'eau chaude; il imagina un moyen de s'assurer de la quantité d'eau qui s'y trouvait, en adaptant le robinet *g*, nommé *robinet d'épreuve*, et il appliqua la soupape de sûreté pour prévenir les accidents ¹.

Les défauts de sa machine ne sont pas difficiles à reconnaître. Il arrivait que le froid du vase et de l'eau condensait à chaque opération, et par conséquent faisait perdre une grande quantité de vapeur. La hauteur à laquelle l'eau pouvait s'élever, à moins qu'on ne fit usage d'une vapeur assez forte au point de devenir dangereuse, était trop limitée pour que la machine fût applicable aux travaux des mines. Cependant l'effet de cette machine serait de beaucoup supérieur à celui de la machine du marquis de Worcester; et soit que le capitaine Savery eût ou non connaissance des projets antérieurs, il faut lui reconnaître des droits à l'invention originale, et c'est à sa hardiesse, ainsi qu'à son talent, que nous devons la première machine à vapeur qui ait produit un effet utile.

1698. *Le docteur Denis Papin.*

8. Le docteur Papin, professeur de mathématiques à Marbourg, dont nous avons déjà mentionné le premier projet (art. 6), fit, dit-on, d'après les ordres de Charles, landgrave de Hesse, en 1698, beaucoup d'expériences pour élever l'eau par la force

¹ C'est Désaguliers, et non Savery, qui réalisa, vers 1717, la première proposition de Papin à ce sujet (Farcy, p. 108).

du feu. En 1707, il publia un petit Traité sur ce sujet, dans lequel il attribue au landgrave tout le mérite de la première idée d'une machine à vapeur. Les essais que Papin fit en 1698, quels qu'ils aient été, ne produisirent rien d'utile, et tandis qu'il reconnaît franchement que le projet de Savery n'est calqué sur rien de semblable exécuté en Allemagne, il ne semble pas qu'il ait donné suite à ses expériences avant le mois de juin 1705, époque à laquelle il vit un plan de la machine de Savery. Cette preuve suffit pour établir que ses essais n'ont point eu de résultat satisfaisant, et il y a une bien grande différence entre des expériences sans succès et l'invention ¹.

Pour rendre justice à Papin, nous allons décrire sa machine dans son état le plus perfectionné, et telle qu'il l'a donnée lui-même après avoir eu connaissance de ce qu'avait fait Savery. Cette machine (fig. 3) consistait en une chaudière B pourvue d'une soupape de sûreté V, et en un cylindre GH, réuni à la chaudière par un tuyau S. Le cylindre était fermé par le haut, et contenait un piston flottant P; la base du cylindre se terminait en un tube recourbé T, qui montait dans un cylindre M: ce tube courbe portait un tuyau Y venant d'un réservoir d'eau, avec lequel il communiquait, et était pourvu d'une soupape en r. Supposons maintenant que le cylindre GH soit rempli d'eau froide par le tuyau Y du réservoir, et que la chaudière contienne de la vapeur à haute pression. En ouvrant le robinet E, la vapeur entrera, et, pressant le piston flottant P, fera élever l'eau dans le cylindre M; la soupape K empêche qu'elle ne redescende; le robinet E étant fermé, et le robinet R ouvert, pour laisser la vapeur condensée s'échapper par le tuyau R; l'eau du réservoir remplit le cylindre à vapeur par le tuyau Y, et la machine est

¹ Le peu de conformité de ce paragraphe avec les écrits originaux de Papin semble annoncer que M. Tredgold ne les avait pas sous les yeux lorsqu'il a rédigé cet article, et il est fâcheux qu'il soit sorti du rôle d'historien pour chercher à tirer, de faits mal présentés, des conséquences qui ne peuvent qu'être hasardées. (Voyez, sur les inventions de Papin, outre la note du § 6 ci-dessus, le *Traité des machines à vapeur*, par M. de Montgéry, nos 37 et suivants des *Annales de l'industrie; A descriptive history*, par Stuart, et *A Treatise on Steam engines*, par Farey.)

prête à recommencer l'opération. L'eau élevée est dirigée par le tube D pour recevoir une destination quelconque ¹.

En se rapportant au plan du marquis de Worcester, on verra que Papin ne fit que répéter ses expériences. Le projet d'ajouter à l'effet, par l'introduction de fers rouges dans le cylindre GH, est trop absurde pour être mentionné; mais cette absurdité est en quelque sorte rachetée par l'idée que l'eau élevée par la vapeur peut être employée pour tourner une roue hydraulique, ce qui donne l'idée de l'emploi d'une machine à vapeur comme moteur de machines.

9. En 1699, Amontons publia la description d'une machine destinée à être mise en mouvement par le ressort de l'air dilaté par la chaleur, et ensuite contracté par le contact de l'eau froide ². Le contact continu de l'air chauffé, avec l'eau, finirait par rendre l'air saturé de vapeur; mais même alors ce ne serait toujours qu'une machine à air, et même assez insignifiante, en raison de son excessive complication.

1705. *Thomas Newcomen.*

10. Les essais faits sur les machines de Savery firent connaître leurs défauts, mais ils confirmèrent dans l'opinion que la vapeur est un moyen efficace pour élever l'eau. Les dépenses énormes que nécessitait l'épuisement des eaux, dans les mines profondes, étaient tellement onéreuses pour les propriétaires, qu'il existait à cette époque les motifs les plus puissants pour engager à faire des recherches ultérieures sur ce sujet. C'est à cette cause que l'on doit une autre espèce de machine à vapeur, imaginée par Thomas Newcomen, forgeron de Dartmouth, qui, conjointement avec Jean Cawley, plombier de la même ville, et le capitaine Savery, obtint, en 1705, une patente pour cette invention ³. La nou-

¹ Béliidor, *Architect. hydraulique*, tom. II, p. 328.

² *Nouvelle architect. hydraulique* de Prony, tom. II, p. 89 (note); où l'on trouve la description de cette machine.

³ Switzen rapporte, sur d'autres autorités, que l'invention de Newcomen était aussi ancienne que celle de Savery (*Syst. d'Hydrost.*, tom. II, p. 312).

veauté de cette construction consiste uniquement dans la condensation de la vapeur au-dessous d'un piston bien juste, se mouvant dans un vase cylindrique ouvert par le haut. Il est probable que cette idée a été empruntée au projet de Papin, qui date de 1690 (*voyez* art. 6), d'autant plus que Newcomen a entretenu, à ce sujet, une correspondance avec le docteur Hook, auquel le procédé de Papin était bien connu. Quant au mode d'obtenir ce résultat, il n'avait aucun rapport avec celui de Papin. Il consistait à introduire de la vapeur au-dessous d'un piston; d'abord la vapeur se condensait au moyen de l'application de l'eau froide à l'extérieur du cylindre, mais bientôt on trouva qu'une injection d'eau froide dans l'intérieur produirait un plus grand effet; du reste, c'est une découverte qui n'a eu lieu qu'accidentellement¹. Ce qui suit est une description de la machine, au degré de perfection où l'a laissée Newcomen (*voy.* pl. I, fig. 4). B représente la chaudière et son fourneau pour produire la vapeur; un peu au-dessus de la chaudière est un cylindre en métal C, alésé régulièrement et fermé par le bas, mais ouvert par le haut. Il est établi une communication entre la chaudière et le fond du cylindre, au moyen d'un court tuyau S. L'ouverture inférieure de ce tube se ferme par le disque *p*, qui est rodé très-uniformément, afin de s'appliquer exactement à toute la circonférence de l'ouverture: on appelle ce disque *régulateur* ou *robinet à vapeur*; il tourne horizontalement sur un axe *a*, qui traverse le dessus de la chaudière par une ouverture très-juste; un manche *l* sert à l'ouvrir et à le fermer.

Un piston P entre juste dans le cylindre; les bords, pour empêcher l'introduction de l'air, sont garnis d'étoupe bien nourrie de suif, de manière à diminuer le frottement, et le dessus est couvert d'eau pour empêcher la vapeur de s'échapper. Le piston

¹ Désaguliers, *Physique expérimentale*, tom. II, p. 533. Le piston était tenu étanché par une couche d'eau placée au-dessus; et au moment où les inventeurs faisaient fonctionner la machine par la condensation extérieure, ils furent étonnés de la voir donner plusieurs coups très-rapidement, et ils remarquèrent que cela provenait d'un trou dans le piston, qui laissait descendre l'eau, et faisait condenser la vapeur: c'est ce qui donna l'idée de l'injection.

est lié à une tige PA suspendue par une chaîne à l'extrémité supérieure D de l'arc de cercle du balancier, qui tourne sur le tourillon G; ce balancier a un arc semblable à l'autre extrémité EF, qui porte la tige H de la pompe pour l'élévation de l'eau de la mine. Le bout du balancier qui porte la tige de la pompe est rendu plus lourd pour contre-balancer le poids et le frottement du piston dans le cylindre à vapeur; et lorsque l'eau est extraite d'une profondeur telle que le piston à vapeur est trop pesant pour ce but, il faut ajouter en I un contre-poids, jusqu'à ce que le piston s'élève dans le cylindre à vapeur avec la vitesse convenable. A quelque hauteur au-dessus du couvercle du cylindre est un réservoir L, appelé *réservoir à injection*, alimenté d'eau par la pompe foulante R. De ce dernier descend le tuyau d'injection M, qui entre dans le cylindre par son fond, et se termine en un ou plusieurs petits trous en N: ce tuyau a un robinet O, appelé *robinet d'injection*, garni d'un manche. Au côté opposé du cylindre, et un peu au-dessus du fond, se trouve un ajutage recourbé de bas en haut par son extrémité, et muni d'une soupape V, appelée *soupape reniflante*, laquelle est entourée d'un petit bassin qui contient de l'eau destinée à empêcher l'entrée de l'air.

Du fond du cylindre sort un tuyau Q, dont l'extrémité inférieure se recourbe et se trouve couverte d'une soupape *v*. Cette partie est plongée dans un réservoir, dit à *eau chaude*; le tuyau, lui-même, porte le nom de *tuyau de sortie*. Pour qu'on puisse régler la force de la vapeur dans la chaudière, celle-ci est munie d'une soupape de sûreté, construite et employée de la même manière que celle qui se trouve à la machine de Savery, mais chargée d'un demi ou d'un hectogramme seulement par centimètre carré.

Il nous reste maintenant à parler du mode d'opérer. Le piston étant arrivé au fond du cylindre à vapeur, fermez le régulateur ou soupape à vapeur P; le piston se trouvera alors arrêté au fond par la pression de l'atmosphère. Chauffez la chaudière jusqu'à ce que la vapeur s'échappe de la soupape de sûreté, ensuite, en ouvrant le régulateur, le piston se lèvera par l'effet de la force

de la vapeur, joint à l'action du contre-poids de l'autre côté du balancier. Quand le piston sera arrivé au haut du cylindre, fermez le régulateur P, et en tournant le robinet d'injection O, faites entrer un jet d'eau froide qui condensera la vapeur dans le cylindre, en formant un vide partiel : le piston descendra par la pression de l'atmosphère, élevant l'eau de la mine au moyen de la tige H, portant le piston de la pompe. L'air qui se trouve dans la vapeur et dans l'eau injectée est chassé à travers la soupape renflante V, par la force descensionnelle du piston, et l'eau d'injection s'écoule par le tuyau Q. C'est par la répétition de ces deux opérations alternatives, savoir, de l'introduction de la vapeur et de l'injection d'eau froide, que le travail utile de la machine est effectué.

Ces manœuvres se firent à la main jusqu'à une époque où un enfant, nommé Humphrey Potter, imagina d'attacher des cordes et des crochets au balancier pour faire ouvrir et fermer les tuyaux par la machine même, pendant qu'il allait se livrer aux divertissements de son âge¹; ensuite, pour atteindre le but proposé, on se servit d'appareils plus durables, et ce fut un pas de plus pour donner à la machine la propriété de fonctionner par elle-même.

Cette machine, dans l'état simple, mais efficace, que nous venons de décrire, reçut le nom de *machine atmosphérique*; elle fut portée à ce degré de perfection vers 1712, et l'on en établit de semblables en différents endroits. La nouveauté de cette machine consiste surtout dans son mécanisme; mais comme ce mécanisme fait toute la différence entre une machine efficace et une machine sans effet, je suis disposé à y attacher plus d'importance qu'à la découverte fortuite d'un nouveau principe. Il serait difficile d'établir ce que l'on doit réellement à Newcomen; et, à défaut de données certaines, nous devons nous contenter de l'examen de la machine même. L'admission de la vapeur au-dessous d'un piston fermant la communication avec l'atmosphère et attaché à un bras de balancier, avec contre-poids con-

¹ Désaguliers, *Physiq. expériment.*, tom. II, p. 553.

venable; la condensation rapide au moyen d'une injection d'eau, objet essentiel pour produire de l'effet, et enfin le mode d'évacuer le cylindre de l'air et de l'eau à chaque coup : tous ces procédés sont autant d'additions aux principes et au mécanisme déjà usités ; ils sont tous exclusivement dus à Newcomen ou à ses associés.

1718. *Henry Beighton, membre de la Société royale, mort en 1743*¹.

11. L'arrangement des parties qui composent la machine atmosphérique, la manière de les fixer, et le mécanisme pour ouvrir et fermer les soupapes, furent considérablement améliorés par Henry Beighton, mécanicien à Newcastle-sur-Tyne; il paraît aussi avoir le premier établi des règles raisonnées pour le calcul des forces des machines. Il publia en 1717 un tableau des dimensions et de la puissance des machines à vapeur, que l'on a trouvé d'accord avec la pratique², et il dirigea la construction de plusieurs grandes machines; il observa aussi le fait que la vapeur, par sa condensation, chauffait proportionnellement une très-grande quantité d'eau, et il communiqua au docteur Désaguliers quelques expériences sur le volume de vapeur formé par une quantité donnée de liquide. Le résultat de cette observation fut faussement établi, par suite d'une erreur singulière dans le calcul; et il est en outre évident que la simple quantité d'eau et le volume du cylindre ne pouvait point donner le résultat qu'il voulait obtenir, en supposant même que le cylindre fût

¹ Le docteur Hutton observe qu'il est probable que Beighton mourut en 1743 ou en 1744; car il paraît qu'il a rédigé le *Calendrier des Dames*, pour la compagnie des libraires, depuis 1714 jusqu'en 1744 inclus. Il remplit ces fonctions à l'entière satisfaction de la compagnie, au point même que celle-ci conserva à sa veuve la jouissance de ce petit ouvrage fort utile, en lui permettant d'employer un homme de lettres pour la remplacer. C'est dans cet almanach, année 1721, que Beighton a inséré un tableau curieux de calculs sur les machines à vapeur (*Abrégé des Transact. philosoph.*, tom. VII, p. 442).

² *Cours de physiq. expériment.* de Désaguliers, tom. II, p. 554.

maintenu à 100° pendant l'expérience¹. Avant de quitter les travaux de Beighton, je remarquerai que, bien qu'il ne se distinguât point par la nouveauté de ses vues, cependant les saines notions qu'il avait dans la science semblent avoir été, par le fait, d'un plus grand secours à ceux qui ont cherché à tirer parti de la machine à vapeur, que les tentatives aveugles de ses prédécesseurs.

1720. *Leupold.*

12. Vers cette époque, plusieurs écrivains s'occupèrent de faire connaître, par leurs écrits, les différentes machines qui avaient été construites; mais nous ne ferons pas mention de ceux qui n'ont rien ajouté, soit pour la théorie, soit pour l'expérience, soit pour la construction, parce que ces détails seraient aussi inutiles que fastidieux. Il faut bien se garder toutefois de ranger dans cette classe l'ingénieur Allemand Leupold, compilateur d'un recueil d'inventions mécaniques : c'est à lui qu'on doit la première esquisse d'une machine à haute pression et à piston, qui se fait surtout remarquer par son robinet à quatre ouvertures², pour l'entrée et la sortie de la vapeur.

¹ Dans l'expérience faite sur les machines à vapeur (*), pour connaître la quantité de vapeur produite par une quantité d'eau donnée, Beighton trouva, par plusieurs essais faits avec un poids à romaine placé sur la soupape de sûreté des chaudières de Griff et Wasington, que lorsque l'élasticité de la vapeur était exactement d'une livre par pouce carré, cela suffisait pour faire marcher la machine, et qu'environ 5 pintes d'eau par minute alimenteraient la chaudière, et fourniraient, dans ce temps, assez de vapeur pour que le piston donnât 16 coups par minute. Le cylindre de Griff consommait 113 gallons de vapeur par coup; en conséquence, $113 \times 16 = 1808$ gallons = 14464 pintes : donc 5 pintes d'eau produisaient 14464 pintes de vapeur. Ainsi une pinte produirait 2893 pintes de vapeur, à la densité et à la température où la vapeur se trouvait dans le cylindre à la fin de chaque coup; mais cette température et cette densité n'étant point déterminées, l'expérience ne donne pas le volume qui correspond à la pression atmosphérique; car la force élastique de la vapeur dans la chaudière diffère considérablement de la force de ce fluide dans le cylindre.

² Ce robinet ingénieux appartient à une machine à haute pression de Papin,

(*) *Physique expérimentale* de Désaguliers, tom. II, p. 533.

Le plan de Leupold est simple; il place au-dessus d'une chaudière B (fig. 5, pl. I) deux cylindres C, C, auxquels se trouvent adaptés deux pistons *p*, *p*. Un robinet à quatre ouvertures S est placé entre la chaudière et les cylindres de manière à faire entrer alternativement de la vapeur dans un cylindre, et à la laisser sortir de l'autre. Le piston s'élève par l'introduction de la vapeur à haute pression, provenant de la chaudière, et fait descendre l'extrémité opposée d'un balancier qui porte la tige d'une pompe; celle-ci fait monter l'eau par le tuyau, de sorte que, par l'action alternative de la vapeur dans les cylindres, la machine fait monter un courant d'eau continu. C'est ainsi que fut présentée la première idée du principe de l'emploi de la vapeur à haute pression, agissant sous un piston.

13. Il ne paraît pas que Désaguliers ait augmenté en rien les notions existantes sur les machines à vapeur, bien que la passion de ce savant pour la physique expérimentale eût pu faire espérer qu'il se fût acquitté du rôle important de ramener à des principes fixes les phénomènes qu'il avait journallement sous les yeux et qu'il a décrits dans son *Traité*. Mais il n'en fut pas ainsi; et quant à ce qui concerne les renseignements historiques, il était évidemment trop entiché de partialité en faveur de quelques individus, pour qu'on puisse admettre qu'il ait pu rapporter les faits avec candeur et fidélité: c'est pourquoi les matériaux recueillis dans sa *Physique expérimentale* n'ont d'autre mérite que de faire connaître l'état de la machine à cette époque, et d'exposer une partie des recherches de Beighton.

1756. *Jonathan Hulls.*

14. La machine à vapeur atmosphérique perfectionnée par Beighton commença à être généralement adoptée pour les houillères et les mines de cuivre. Il ne semble pas qu'il fallût un grand effort d'esprit pour approprier une puissance si efficace à d'autres usages qu'à l'élevation de l'eau.

que Leupold décrit avant la sienne, et dont il a emprunté la disposition générale (*Theatrum machinarum*, vol. II, tabula xxx). M.

Cependant la première idée dont on ait des traces fut d'appliquer la vapeur à la navigation, et elle fut présentée par Jonathan Hulls, qui, le 21 décembre 1736, obtint une patente pour une invention qui mérite rigoureusement le nom de *bateau à vapeur*¹.

Les lettres patentes et la description de ce bateau, accompagnées d'une planche, furent publiées dans une brochure par Hulls, en 1737, sous le titre suivant : *Description et plan d'une machine nouvellement inventée pour remorquer toute espèce de bâtiments au dedans ou au dehors des havres, ports ou rivières, malgré vent et marée, ou par un temps de calme.*

Comme l'invention des bateaux à vapeur a donné lieu à de grandes contestations, cet opuscule, qui est très-rare et très-difficile à trouver, a été apporté comme une preuve que Jonathan Hulls est le premier qui ait suggéré l'idée d'appliquer la force de la vapeur à faire mouvoir des roues à aubes. Son moyen de changer le mouvement alternatif de la machine en un mouvement rotatif, est moins simple que la manivelle; mais ce fut le premier essai : il fut présenté comme on le voit dans la fig. 6, planche I. Soient *a, b, c*, trois roues fixées sur un axe, et *d, e*, deux roues à frottement doux sur un autre axe AB portant des cliquets, de manière à ne faire tourner l'axe que lorsque les roues tournent dans un sens; *f, g, h* sont trois cordes, P est le piston de la machine. Quand le piston descend, les roues *a, b, c*, tournent de droite à gauche, et les cordes *g, h* mettent en mouvement les roues *e, d*, la première *e* de droite à gauche, et la roue *d* de gauche à droite; la dernière élève le poids G, qui ensuite fait mouvoir la roue *d* de droite à gauche, pendant que le piston monte : par conséquent, l'axe AB, et par suite les roues à aubes, seront entretenus dans un mouvement rotatif continu, et avec une impulsion continue. C'est certainement une belle invention pour rendre uniforme un moteur aussi irrégulier, et, eu égard à l'usage auquel il était destiné, on doit reconnaître

¹ Nous avons vu que, dès 1690, cette application, ainsi que beaucoup d'autres, avait été proposée par Papin (art. 6, note). M.

que la disposition n'est pas compliquée ; car , outre l'uniformité , il fournit le moyen d'augmenter ou de diminuer la vitesse , en raison des diamètres des roues. La brochure de Hulls montre un esprit éclairé et inventif , et nous regrettons que ses vues n'aient pas reçu l'encouragement qu'elles méritaient ¹.

1739. *Bernard Bélidor, né en 1698, mort en 1761.*

15. Bélidor , écrivain du premier ordre sur la théorie et la pratique du Génie civil et militaire , traita , en 1739 , des machines à vapeur , et présenta incontestablement les renseignements les plus exacts que l'on eût alors en France à ce sujet ². Il commence par donner une esquisse rapide de l'histoire de la machine , et conclut , d'après ses recherches , que les trois nations de l'Europe les plus avancées dans les sciences ont chacune produit un savant qui a participé à la gloire de cette importante découverte ; il dit que Papin ³ en Allemagne , Savery en Angleterre et Amontons en France , se sont occupés des moyens d'utiliser l'action du feu comme moteur de machines ; mais il reconnaît que la première idée , présentée dans une forme intelligible , en est due au marquis de Worcester. Bélidor observe encore , à la fin de sa notice historique , que toutes les machines à feu construites sur le continent ont été exécutées par des mécaniciens anglais ; ensuite il passe à la description de la machine atmosphérique établie à Fresnes , près de Condé , description faite avec cette exactitude et cette clarté qui donnent tant de prix à ses écrits ; mais cet auteur n'a rien ajouté à la théorie de l'action de la vapeur. Les formules qu'il a données pour calculer la charge

¹ On peut voir la brochure de Hulls au Musée britannique et à l'Institution de Londres , ou chez plusieurs ingénieurs civils , qui sont parvenus à en enrichir leurs bibliothèques.

² *Architect. hydraul.*, tom. II , p. 300 à 303.

³ Papin n'était pas Allemand : il était né à Blois ; il résida quelque temps en Angleterre , et ensuite à Marbourg , où il fut appelé par le prince de Hesse , qui le nomma professeur de l'université.

convenable d'une machine ne sont ni très-simples ni exactes : de même que celles de Beighton, elles ne s'appliquent qu'à l'équilibre statique de la machine.

1741. *John Payne.*

16. La première expérience directe pour déterminer la densité de la vapeur fut faite par John Payne ¹ : son procédé était bien imaginé, mais il y manquait l'emploi d'un thermomètre. Il prit un globe de cuivre de 12 pouces de diamètre, auquel étaient adaptés deux robinets et une petite soupape. Le vase, ainsi préparé, fut suspendu au-dessus d'un grand vase, dans lequel l'eau était transformée en vapeur. Un tube conduisait la vapeur à l'un des deux robinets, d'où elle passait dans le globe; et l'autre étant également ouvert, la vapeur qu'on laissait s'échapper au travers chassait l'air contenu dans le globe, et prenait sa place : alors les deux robinets étaient tout à coup fermés, et le globe détaché, pour être suspendu au-dessus d'un vase rempli d'eau froide, et le robinet inférieur plongé dans l'eau. On ouvrait le robinet sous l'eau, qui aussitôt entraît rapidement dans le globe, jusqu'à ce qu'elle eût rempli le vide; le robinet, pour lors, était de nouveau fermé, et le globe, rempli d'eau, était mis dans une balance; l'on trouva ainsi que le poids s'élevait à 713 onces. Si l'on soustrait maintenant ce poids de celui de 727 onces, qu'on avait avant l'opération, il ne reste plus qu'une différence de 14 onces. Payne conclut de là que la vapeur avait chassé presque tout l'air contenu dans le globe. Il fit de nouveau sortir l'air du globe, à l'aide de la vapeur; et les deux robinets étant fermés, il plaça le globe plein de vapeur dans la balance, et lui trouva un poids de 202^{onc},5 : ensuite, il ouvrit un des robinets pour faire entrer l'air, et en ajoutant un poids sur l'autre plateau de la balance, il trouva le poids total de 203 onces, résultat qui montrait que le poids de l'air contenu dans le globe égalait 0,5 onces ou 218,75 grains. Le globe fut, comme aupara-

¹ *Transact. philosoph.*, vol. II, p. 821, ou *Abrégé*, vol. VIII, p. 518.

vant, rempli de vapeur, que l'on condensa ensuite au moyen d'eau froide appliquée à l'extérieur; et lorsque le métal eut été desséché, et l'air introduit dans le globe, on trouva que l'eau provenant de la vapeur condensée pesait 96 grains. Il est digne de remarque que le rapport de la densité de la vapeur à 100° serait à celle de l'air à 15°, comme 96 : 218,75, ou comme 0,44 : 1. La véritable densité de la vapeur à 100° est dans le rapport de 0,48 : 1.

Lorsque le globe fut rempli de vapeur, comme auparavant, Payne, ignorant l'effet de la température, continua à laisser entrer la vapeur, ce qui donna un degré de chaleur plus élevé : il avait en effet trouvé, par ses expériences, que le plus petit degré de froid au-dessous de la température de la vapeur en condenserait de nouveau une partie, et qu'ainsi il lui serait impossible de s'assurer de la quantité qui chasserait l'air d'un espace donné, objet essentiel, cependant, de l'expérience. Il réussit à expulser l'air avec moins de vapeur; car ayant pesé le globe lorsque la vapeur était condensée, l'air étant introduit, et tout étant refroidi, il trouva que le poids de l'eau de condensation n'était que de 48 grains environ, et qu'étant vaporisée, l'eau occupe un espace de 925 pouces cubes, de manière à chasser presque tout l'air : d'où il conclut qu'un pouce cube d'eau forme 4000 pouces cubes de vapeur. Pour pouvoir établir une comparaison, il eut fallu observer la température; car j'ai quelque doute que la vapeur fût assez raréfiée par la chaleur pour donner ce résultat.

17. Payne essaya aussi de trouver un nouveau procédé pour produire la vapeur. Son appareil consiste en un vase de fonte de la forme d'un cône tronqué, dont le diamètre inférieur était de 4 pieds, et dont l'autre bout se terminait par un hémisphère en cuivre d'environ 5 pieds $\frac{1}{2}$ de diamètre. Dans l'intérieur, on plaça un petit vase, que Payne appelait *disperseur*, et qui portait des tuyaux sur sa périphérie. Le fond portait sur un pivot concentrique, sur lequel le petit vase tournait de manière à éparpiller l'eau qu'il recevait d'un réservoir supérieur par un tuyau; l'extrémité de ce tuyau passait à travers le couvercle hémisphérique dans un trou bien ajusté, qui lui permettait de

recevoir facilement un mouvement circulaire, de manière que l'eau pût être dispersée et tomber en pluie sur les parois du vase conique chauffé au rouge. D'après l'expérience, Payne rapporte qu'un appareil de la grandeur et de la forme décrites ci-dessus étant maintenu à une chaleur rouge obscure, et l'eau étant régulièrement éparpillée, pouvait convertir 6 pieds $\frac{1}{2}$ cubes (184 litres) d'eau en vapeur par heure. Il ajoute que, par des expériences faites à Wednesbury et à Newcastle-sur-Tyne, il avait trouvé que 112 livres (51 kilog.) de houille pouvaient vaporiser, par ce moyen, 12 pieds cubes (340 litres) d'eau. Ce résultat est à peu près exacte; mais ce procédé n'a point d'avantage, et l'appareil ne résiste pas longtemps. Cependant, il est du devoir d'un homme ingénieux de donner connaissance de ses tentatives pour établir des vérités utiles, lors même qu'il ne réussit pas dans ses recherches : on voit, de la sorte, quel est dans le temps l'état des connaissances sur la matière; et, du moins, il en résulte l'avantage de détourner d'autres personnes de répéter des expériences inutiles. Le mode de production de vapeur que nous venons de décrire, a été renouvelé de nos jours plus d'une fois.

18. La machine de Savery exigeait l'assistance d'un homme pour ouvrir et fermer les robinets. Un Français, nommé Gensanne, semble être le premier qui ait obvié à ce défaut, au moyen d'un appareil agissant par lui-même, qu'il inventa, à cet effet, en 1744. Plus tard, de Moura, Portugais, envoya à la Société royale un modèle d'un autre mécanisme, qui est parfaitement décrit par Smeaton, dans les *Transactions* pour l'année 1751¹. Une description sommaire suffira pour démontrer la manière dont l'action s'effectue.

La machine consiste en un récipient muni de robinets à vapeur et à injection; elle a un tuyau d'aspiration et un autre de refoulement, chacun pourvu d'une soupape, et une chaudière qui pouvait être de la forme sphérique alors en usage. Comme elle ne représente rien de particulier dans sa construction, il n'est point nécessaire d'en donner une description, non plus que des autres

¹ *Transact. philosoph.*, vol. XLVII, p. 456, ou *Abrégé*, vol. X, p. 252.

parties déjà mentionnées, et qui se retrouvent dans toutes les machines de cette espèce. Ce qui est particulier à cette machine, c'est qu'il y a dans le récipient un flotteur, consistant en une légère sphère de cuivre, qui se trouve fixée à l'extrémité d'un levier destiné à monter et à baisser par l'effet de ce flotteur, tandis que l'autre extrémité du levier est attachée à un axe; par conséquent, suivant que le flotteur monte ou descend, l'axe tourne, soit dans un sens, soit dans l'autre. L'axe a une figure conique, et traverse une boîte de même forme, qui est fixée sur la paroi du récipient. A l'une des extrémités de l'axe qui saille en dehors de la boîte se trouve un autre levier, que l'axe fait aussi mouvoir en arrière ou en avant, selon que le flotteur monte ou descend. Par ce moyen, l'élévation ou l'abaissement de la surface de l'eau dans le récipient communique un mouvement correspondant à l'extérieur, et donne les mouvements convenables au reste de l'appareil, qui règle l'ouverture et la fermeture des robinets à vapeur et à injection, en remplissant le même but que les poutrelles à chevilles dans la machine de Newcomen.

1751. *Francis Blake, membre de la Société royale.*

19. Francis Blake publia en 1751 un Mémoire sur les meilleures proportions des cylindres des machines à vapeur ¹. Cet écrit mérite l'attention, tant parce qu'il contient les premières traces des recherches théoriques concernant les proportions des machines, qu'à cause des résultats auxquels l'auteur arrive.

Il est évident, dit-il, d'après les principes de mécanique, que la capacité du cylindre restant la même, la quantité d'eau élevée à chaque coup du piston sera, dans tous les cas, la même; et cette égalité s'obtient en proportionnant la distance du centre du piston à l'axe du balancier. On accordera aussi que l'excédant de la colonne atmosphérique sur celle de l'eau est équivalente à un poids sur le piston, qui le fait descendre à une profondeur

¹ *Transact. philosoph.*, vol. XLVII, p. 197, ou *Abrégé*, vol. X, p. 187.

de 5 pieds environ dans le cylindre, avec un mouvement que la construction actuelle rend d'abord accéléré; mais ce mouvement se ralentit lorsque la force accélératrice vient à être compensée par le frottement et la résistance de la vapeur non condensée qui demeure dans le cylindre, même après l'injection, et qui augmente en élasticité par la diminution de son volume. Mais indépendamment du frottement, nous pouvons, malgré cette diminution de force occasionnée par la vapeur qui reste dans le bas du cylindre, établir que les rapports de vitesse et les temps de descente des pistons dans les cylindres de hauteurs inégales sont exactement les mêmes que s'il n'y avait aucune résistance. C'est ainsi que nous résoudrons sans difficulté la question qui nous occupe. Soient MN (fig. 1, pl. II) un cylindre à vapeur de la hauteur ordinaire, égal en diamètre à un cylindre plus court *mn*. La raréfaction, dans tous les deux, étant supposée la même, AQ = *aq*, RQ = *rq*, AR = *ar*, représentent respectivement l'excès du poids de l'atmosphère au-dessus de la colonne d'eau, la résistance que fait éprouver aux pistons le reste de la vapeur, et enfin la force effective. Prenons

$$ak : AK :: an : AN.$$

Dans toutes les positions semblables, la résistance *bc* de *mn* et la pression *kc* sur son piston seront égales à la résistance BC de MN et à la force KC sur son piston; et (par la proposition 59 des *Principes de Philosophie* de Newton sur la descente des corps) nous avons

$$\sqrt{aker} : \sqrt{AKCR} :: \text{vitesse en } k : \text{vitesse en } K.$$

Mais ces aires étant évidemment comme les parallélogrammes correspondants *kq* à KQ, et ceux-ci comme leurs hauteurs, les vitesses produites sont en raison sous-double de *ak* à AK, comme si la résistance eût été invariable.

Appliquons cela aux machines à vapeur. Si TW est un cylindre de la même capacité que le cylindre MN, la quantité d'eau fournie par l'un et l'autre sera, comme il a été observé, la

même à chaque coup de piston; mais le cylindre TW n'est pas plus haut que *mn*; et la raréfaction de la vapeur étant supposée égale, il résulte de ce qui a été prouvé, par rapport au temps, que la durée de la descente du piston en TW sera à celle de la descente du piston en *mn*

$$:: \sqrt{EW} : \sqrt{AN};$$

donc, dans un temps donné, le court cylindre TW produira plus d'effet que le long cylindre MW d'une capacité égale, et cela en raison de leurs diamètres; car puisque

$$\overline{TE}^2 \times EW = \overline{MA}^2 \times AN,$$

et

$$EW : AN :: \overline{MA}^2 : \overline{TE}^2;$$

donc

$$\sqrt{EW} : \sqrt{AN} :: MA : TE.$$

À cela, Blake ajoute encore que le frottement diminue avec la lenteur du mouvement, parce que la circonférence du piston augmente dans un moindre rapport que son aire.

La conséquence de tout ce raisonnement est en faveur de l'emploi d'un court cylindre, et il faut avouer qu'il ne laisse pas d'être ingénieux. Mais la vraie question est de savoir quelle forme de cylindre produira le plus grand effet avec le moins de vapeur, et non le plus grand effet dans le moins de temps, avec un cylindre d'une capacité donnée (*Voyez* sect. IV).

Blake a aussi recherché le rapport entre la puissance et la résistance, qui, dans un temps donné, produit le plus grand effet quand le mouvement s'accélère depuis le moment du repos, soit lorsque la force est uniforme, soit quand elle est variable, et augmente comme la distance ¹ (*Voyez* sect. IV).

¹ *Transact. philosoph.*, vol. LI, p. 1, ou *Abrégé*, vol. XI, p. 317.

1757. *Keane Fitzgerald, membre de la Société royale.*

20. Il était naturel que les machines à vapeur étant alors en grand usage, on pensât à économiser le combustible, surtout dans les endroits où il était coûteux. K. Fitzgerald proposa, à cet effet, en 1757¹, d'agiter l'eau dans la chaudière par un courant d'air, suivant le plan du docteur Hale pour l'évaporation (méconnaissant ainsi la différence entre les procédés pour produire de la vapeur ou pour accélérer l'évaporisation de l'eau) : par suite, le docteur Hale s'adressa à lui pour des ventilateurs de mines, destinés à être mus par des machines à vapeur, et comme il fallait pour cela un mouvement rotatif, Fitzgerald imagina un mécanisme pour rendre la machine à vapeur applicable à cet emploi. Le moyen qu'il adopta ressemble beaucoup, pour le principe, à celui inventé par Hulls pour son bateau à vapeur (art. 14) ; mais au lieu de régler son mécanisme par un poids, Fitzgerald proposa d'employer un volant, et il fait observer que, par ce moyen, la machine à vapeur pouvait être appliquée aux moulins à blé, à l'extraction de la houille, etc. Fitzgerald fit aussi voir l'impropriété du mode, alors en usage, de suspension du balancier, lequel avait son axe au-dessous de son centre de gravité ; il changea la position de l'axe du balancier de la machine hydraulique de York, et obtint ainsi une amélioration dans les effets.

1758. *William Emerson, né en 1701, mort en 1782.*

21. Emerson publia, dans sa *Mécanique*, une description courte, mais claire, de la machine atmosphérique, et indiqua une méthode pour calculer sa force, en tant qu'on ne considère que l'équilibre statique entre la puissance et la résistance.

Il donna encore, dans ses *Mélanges*, la solution d'un problème qui a pour objet de déterminer le rapport entre la force

¹ *Transact. philosoph.*, vol. L, p. 55 et 157.

et la résistance pour le plus grand effet ; ce qu'on peut énoncer ainsi : dans une machine à vapeur, étant données la pression effective de l'atmosphère sur le piston et la longueur de la course, déterminer la quantité d'eau élevée à chaque coup, de sorte que la plus grande quantité possible soit élevée dans un temps donné, en supposant la force constante et les bras du balancier d'égale longueur. La solution d'Emerson diffère de celle de Blake (art. 19) en ce qu'il tient compte de toute la durée de la montée et de la descente du piston, et en ce qu'il n'assimile pas la force motrice à la gravitation d'une masse pesante. Cette méthode est en effet plus applicable à la question, quoiqu'elle laisse encore à désirer, puisque c'est l'espace, et non le temps, qui doit être donné (*Voyez* sect. IV).

22. Le célèbre ingénieur Brindley essaya de perfectionner les chaudières des machines à vapeur, en les construisant en bois et en pierre, et en plaçant dans leur intérieur un foyer et une cheminée de fonte, de manière à environner ces derniers de liquide autant que possible. Il espérait, par ce moyen, utiliser une plus grande partie de la chaleur ; et, en conséquence, il prit une patente pour cet objet en 1759. Mais il serait aisé de prouver que cette nouvelle disposition était fondée sur de faux principes, quant à la nature de la combustion et à la quantité de chaleur perdue (*voy.* art. 190) : pour cette raison, elle ne devint jamais d'un usage étendu.

1762. *Le docteur Joseph Black.*

23. A cette époque, le rapport entre la quantité de combustible et l'effet de la vapeur dans une machine devint un sujet important ; mais les différentes quantités de chaleur, combinées avec le même corps, suivant qu'il était à l'état solide, liquide ou gazeux, ou, avec différents corps, aux mêmes températures, n'avaient pas encore été déterminées, ou plutôt, ce fait n'avait pas encore été distinctement aperçu. Par conséquent, c'étaient de grossiers aperçus qui dirigeaient les plus savants de l'époque, de même que cela se voit à présent pour les ignorants qui essayent

de perfectionner les machines à vapeur. C'est au docteur Black que nous devons les premières recherches sur la combinaison de la chaleur avec les corps à l'état solide, liquide ou gazeux. Il professa publiquement sa doctrine en 1762, et montra que le calorique combiné avec ces corps était insensible au thermomètre; pour cette raison, il l'appela *chaleur latente*. Il trouva également que la quantité de chaleur nécessaire pour convertir l'eau bouillante en vapeur excédait cinq fois la quantité nécessaire pour amener l'eau à l'ébullition. Le docteur Black démontra aussi que les différents corps exigent différentes quantités de chaleur pour produire le même changement de température. Black appela cette propriété *capacité pour la chaleur*; maintenant, on se sert habituellement du terme de *chaleur spécifique* (*Voyez* sect. II, art. 70).

Nous devons à ce professeur les principes de la conduite des fourneaux, et des notions sur la nature et l'effet du combustible.

Ses recherches sur la chaleur furent continuées par le docteur Irving et le docteur Crawford, qui firent des expériences pour déterminer la chaleur spécifique et la chaleur latente de différentes substances.

1756. *John Smeaton, membre de la Société royale, né en 1724, mort en 1792.*

24. Smeaton n'était pas doué d'une trempe d'esprit à saisir les vues exposées par le docteur Black, ni fait pour en tirer parti dans l'emploi de l'action de la vapeur; son talent le porta à perfectionner la construction et les proportions des machines existantes, en choisissant les meilleures méthodes connues et en faisant des essais. Nous trouvons qu'il projeta en 1765 une machine atmosphérique portative, destinée à des expériences, qu'il entreprit en 1769 ¹.

¹ Smeaton's *Reports*, vol. I, p. 223, et vol. II, p. 338.

Plus tard, Smeaton dirigea l'établissement de plusieurs grandes machines atmosphériques, et il les porta à un degré de perfection qui n'a pas été dépassé après lui.

Je me propose de passer rapidement en revue les plus intéressantes de ses recherches, en commençant par sa machine portative. C'est le premier essai qui eût été fait pour rendre une machine susceptible d'être transportée d'un lieu à un autre. Le foyer fut placé à l'intérieur de la chaudière; et au lieu d'un balancier ordinaire, une roue, d'un diamètre de 2 mètres environ, servit, à l'aide d'une chaîne, à communiquer le mouvement du piston à la tige des pompes.

Le diamètre du cylindre était de 45 centimètres, son aire de 2025 centimètres circulaires; en comptant 5 hectogram. par centimètre carré, charge qu'un tel cylindre, comme le remarque l'auteur, pourrait bien supporter, nous avons 1012,5 kilog. Le nombre de courses du piston par minute est établi à dix, de 1^m,8 chacune; par conséquent, l'effet sera

$$1012,5 \times 10 \times 1^m,8 = 18225 \text{ kilog.}$$

élevés à un mètre, ce qui équivaut à la force de quatre chevaux. Cela parut à Smeaton remplacer six chevaux; et, en conséquence, son estimation de la force d'un cheval revient à 5038 kilog. élevés à un mètre par minute, au lieu de la valeur ordinaire de 4500 kilog.

Quant au combustible, notre auteur dit que l'expérience a démontré qu'un cylindre de 6 décimètres exige 80 kilogr. de charbon de Newcastle par heure; ce qui, réduit en raison de la capacité, donne 45 kilog. par heure pour le cylindre de 45 centim., ou pour une machine de quatre chevaux, suivant l'emploi ordinaire du feu. Il pense, avec raison, qu'une machine construite à sa manière n'exigerait pas au delà de 50 kil. par heure pour une force de quatre chevaux.

Le foyer en fonte était de forme sphérique et il était placé tout à fait dans l'intérieur de la chaudière; le charbon y était introduit par un gros tuyau adapté à l'extérieur de la chaudière; la fumée sortait par un tube courbe surmonté d'une cheminée

de fer, pour que le tirage fût suffisant. Les cendres tombaient à travers une grille d'un diamètre de 45 centimètres. Le foyer était assemblé, avec la chaudière, par des rebords convenables, et continuellement couvert d'eau. Dans un conduit si court, il était impossible que la chaleur de la flamme fût pleinement absorbée dans les limites de la chaudière: pour cette raison, on entourait le tuyau courbe d'un vase de cuivre adapté à la forme de celui-ci, et dans lequel on versait l'eau alimentaire, afin qu'elle fût élevée à un plus haut degré de chaleur que si elle fût entrée immédiatement du réservoir ou de la bêche dans la chaudière. Il résultait aussi de cette disposition, que la partie la plus froide de l'eau venait en contact avec le conduit, pour profiter du reste de la chaleur de la fumée, avant que celle-ci s'échappât dans la cheminée. Les barres de la grille étaient coulées dans une couronne mobile, susceptible d'être enlevée, ou remplacée, suivant le besoin. Les chaudières de Smeaton étaient admirablement bien disposées pour produire de la vapeur: sous ce rapport, elles sont même presque égales à celles qui ont été inventées depuis.

Dans un rapport fait, en 1771, sur les machines hydrauliques du pont de Londres, Smeaton propose de régler la puissance de la machine par l'injection elle-même, au moyen de quoi le gardien serait en état, tandis que la machine est en mouvement, de faire varier la force en proportion de la colonne d'eau à élever; ce qui éviterait les mauvais effets résultant des variations de la colonne d'eau ou de la résistance, et économiserait en outre le combustible.

Il semble que c'est au commencement de l'année 1774 que Smeaton fit la première application effective des perfectionnements résultant de ses expériences¹; et, par leur adoption, il paraît avoir réduit d'environ un tiers la dépense du combustible. En 1775, il fit le plan des machines de Chasewater, dont le cylindre avait un diamètre de 1^m,8, et dont la course du piston était de 2^m,7. La force de la machine était équivalente à celle de

¹ *Reports*, vol. II, p. 337.

cent huit chevaux, et la consommation de combustible par heure fut estimée à 510 kilog. de charbon de Newcastle. Agissant dans toute sa force, cette machine pouvait donner neuf coups par minute; mais elle devait être réglée, par la *cataracte* ¹, à quatre coups et demi dans le même temps. La construction du balancier et d'autres parties de la machine présentent assez de particularités curieuses pour mériter l'attention des constructeurs ².

Smeaton, dans ses recherches sur la machine atmosphérique, n'a laissé échapper que bien peu de circonstances pratiques; il dressa, pour son usage, un tableau des proportions des parties pour les machines de différentes grandeurs, lequel existe encore dans le recueil de ses papiers, acquis par sir Joseph Banks. Mais la plus importante de ses recherches est celle qui se rapporte à la charge du piston. Il remarque, à ce sujet, qu'il avait trouvé des machines disposées pour porter un poids variant de 3 à 6 hectogram. par centimètre carré; que les machines légèrement chargées paraissaient devoir marcher avec la plus grande vitesse; de sorte qu'une machine portant 3 hectogrammes par centimètre carré prendrait une vitesse double de celles chargées de 6 hectogrammes, les cylindres ayant la même aire, pour que les effets de la force soient égaux dans les deux cas. Il ajoute cependant que, dans ces machines comme dans les autres, il y a un *maximum* qui, saupla la découverte de nouveaux principes de force, ne peut être outrepassé. De mauvaises proportions et une construction vicieuse peuvent réduire l'effet d'une machine au-dessous de ce qu'il devrait être; mais son effet *maximum* ne peut être dépassé, même par les constructeurs les plus habiles. L'expérience, cependant, a conseillé, en quelque sorte, de n'employer qu'une charge moyenne. Les premiers brevetés (Newcomen et compagnie), se fondant sur les effets de leurs premières machines, posèrent en principe de ne charger le piston que de 5 hecto-

¹ La *cataracte* est une sorte de pendule hydraulique qu'on a adapté au régulateur de quelques machines atmosphériques pour faire varier, suivant le besoin, les intervalles de leurs pulsations. M.

² *Rapports* de Smeaton (*Reports*, vol. II, p. 350).

grammes $\frac{1}{2}$ par centimètre carré : mais une expérience plus prolongée les porta à diminuer cette charge ; et, dans les meilleures machines construites avant Smeaton, la charge ne fut que de 4 hectogrammes $\frac{1}{2}$ par centimètre carré. Smeaton assure encore qu'un rapport quelconque pourra convenir si les parties sont bien proportionnées ; mais, d'après une longue série d'expériences laborieuses, il avait adopté pour base 5 hectogram. par centimètre carré, y compris la résistance due à l'élévation de l'eau d'injection.

Les travaux de Smeaton montrent avec évidence l'état d'imperfection où était la science mécanique appliquée aux travaux usuels. Il fit le plan d'une machine destinée à être établie à Long-Benton, pour élever l'eau qui devait faire tourner une roue hydraulique, et faire extraire à celle-ci les charbons de la mine ¹. En 1781, il proposa une des machines de Watt pour élever l'eau qui aurait mis en mouvement un moulin à blé ², employant à l'appui de son opinion des arguments tels que les suivants : « Il est à craindre qu'aucun mouvement, résultant de celui du balancier d'une machine, ne puisse jamais agir avec une impulsion et une vitesse assez uniformes pour produire un mouvement circulaire semblable à celui que donne l'écoulement régulier de l'eau sur une roue hydraulique. On sait que le bon effet d'un moulin dont l'eau est le moteur provient principalement de ce que le mouvement communiqué aux meules est parfaitement uniforme et régulier ; la moindre secousse ou agitation nuit à la bonté du travail. En outre, toutes les machines que Smeaton avait vues étaient sujettes à des interruptions, et quelquefois d'autant plus brusques que, dans une seule course du piston, la machine passe de son plus grand degré de force et de mouvement au repos absolu ; de plus, lorsque la vapeur baisse de température au-dessous d'un certain degré, par manque de feu ou autrement, la machine ne peut plus fonctionner ; mais dans l'élévation de l'eau, objet auquel la machine semble par-

¹ *Rapports* de Smeaton, vol. II, p. 435.

² *Idem*, vol. II, p. 478.

ticulièrement destinée, l'interruption du mouvement ne cause d'autre dommage que la perte du temps, tandis que, dans le mouvement des meules pour moudre les grains, un tel arrêt pourrait produire l'effet le plus fâcheux. »

Il doit avoir été bien désagréable pour Smeaton de s'apercevoir que toutes ses recherches laborieuses étaient rendues presque superflues par l'invention d'une disposition plus savante, et que son système timide d'analyse n'était pas toujours le moyen le plus sûr pour rendre les forces de la nature utiles à la société. Néanmoins, quand même cet ingénieur ne se serait fait connaître que par ses travaux sur la machine à vapeur, il aurait encore des droits étendus à notre estime et à notre respect. Les autres perfectionnements de cette machine, tels que le cylindre fermé, le double effet, etc., doivent, sans contredit, beaucoup de leur perfection à l'usage des mêmes systèmes de mécanisme que Smeaton avait déjà appliqués à la machine pneumatique.

1766. *John Blakey.*

25. Quoique le mode d'action des machines de Savery offre une foule de circonstances qui en réduisent l'effet, ces imperfections ne semblent qu'appeler davantage les recherches des hommes spéculatifs qui veulent les faire disparaître, et Blakey fut un des plus zélés dans cette étude. Il obtint, en 1766, une patente pour un nouveau système de construction de la machine de Savery, en se servant de deux récipients placés l'un au-dessus de l'autre, et communiquant par un tuyau. Le contact de la vapeur et de l'eau devait être empêché par une couche d'huile formant une espèce de piston ou de flotteur liquide. Il proposa d'introduire l'air pour former une couche entre la vapeur et l'eau, et empêcher ainsi la condensation pendant le refoulement de l'eau par la vapeur. Ces deux procédés sont inférieurs au piston flottant de Papin.

Blakey fut cependant assez habile pour persuader au public qu'il avait fait une grande découverte, et pour obtenir que le professeur Ferguson en exposât, dans ses cours, les avantages au

moyen d'une fontaine à vapeur ou de compression ¹. La pratique montra bientôt le vice de ce système.

Quant à la production de la vapeur, Blakey semble avoir été le premier qui ait proposé des tubes cylindriques au lieu de chaudières. Sa description parut en 1774. On lui doit encore l'opuscule suivant : *Précis historique de l'invention, de la théorie et de la pratique des machines à feu*, imprimé à Londres, en 1793, et contenant principalement un sommaire de ses travaux, mais ne présentant aujourd'hui aucun intérêt.

1769. *James Watt, membre de la Société royale, né en 1739, mort en 1819.*

26. Les premières recherches de Watt semblent remonter à 1764, deux ans après l'époque où Black professa ses doctrines sur la chaleur. Watt fit d'abord des expériences sur la force élastique et sur le volume de la vapeur, et développa graduellement les principes qui forment la base de ses importants perfectionnements sur les machines mues par ce fluide. Mais ce ne fut qu'en 1768 que ses plans lui parurent assez mûris pour solliciter une patente, qu'on lui accorda en 1769. La spécification en est courte et sans figures; en conséquence, je la donnerai textuellement, et je signalerai plus tard les principes et les méthodes de construction qui n'avaient pas encore été mentionnés.

La patente de Watt, en 1769, lui fut accordée pour sa « méthode de diminuer la consommation de la vapeur, et par suite la dépense du combustible dans les machines à feu. » Voici la spécification de son procédé :

« *Premièrement.* Le vase dans lequel la force de la vapeur doit être employée pour faire marcher la machine, vase appelé *cylindre* dans les machines à feu ordinaires, et auquel je donne le nom de *vase à vapeur*, doit, pendant tout le temps que la machine est en mouvement, être maintenu au même degré de

¹ *Leçons de Ferguson*, t. I, p. 312.

chaleur que la vapeur qui s'y introduit. A cet effet, je l'enferme d'abord dans une enveloppe en bois, ou dans toute autre matière qui ne transmet que lentement la chaleur, puis je l'entoure de vapeur ou d'un autre corps chaud; enfin, je ne laisse pas entrer ni même approcher, pendant ce temps, soit de l'eau, soit toute autre substance plus froide que la vapeur.

« *Secondement.* Dans les machines qui doivent être mues, soit en totalité, soit en partie, par la condensation de la vapeur, ce fluide doit être condensé dans des vases séparés des cylindres à vapeur, mais qui, au besoin, puissent communiquer ensemble. J'appelle ces vases *condenseurs*. Pendant que les machines fonctionnent, il faut tâcher de tenir ces condenseurs aussi froids au moins que l'air ambiant, et cela, au moyen d'eau ou d'autres corps froids.

« *Troisièmement.* La portion d'air, ou tout autre gaz qui n'est pas condensé par l'action du condenseur, et qui peut être un obstacle au mouvement de la machine, doit être expulsé des vases ou condenseurs, à l'aide de pompes mues par les machines mêmes ou par un autre moyen.

« *Quatrièmement.* Je me propose d'employer dans plusieurs cas la force expansive (la pression) de la vapeur pour agir sur les pistons ou sur ce qui peut être employé à leur place, de la même manière que l'on se sert aujourd'hui de la pression atmosphérique pour les machines à feu ordinaires. Dans les cas où l'on ne peut se procurer toute l'eau nécessaire, les machines peuvent être mises en mouvement par la force de la vapeur seule, en faisant échapper la vapeur dans l'air après qu'elle a fonctionné.

« *Cinquièmement.* Lorsqu'on a besoin de mouvements rotatifs autour d'un axe, je donne aux vases à vapeur la forme d'anneaux creux ou de canaux circulaires, pourvus d'entrées et de sorties pour la vapeur, et montés sur des axes horizontaux comme les roues hydrauliques; en dedans de ces anneaux ou canaux, se trouve un certain nombre de soupapes, qui ne laissent de passage le long du conduit que dans une seule direction. A ces vases à vapeur sont adaptés des poids disposés de manière à rem-

plir une partie de leurs canaux, mais en leur laissant la faculté de s'y mouvoir librement à l'aide de moyens qui sont décrits plus bas. Quand la vapeur est introduite dans ces machines, entre les poids et les soupapes, elle agit également sur tous les deux, de sorte que, d'un côté de la roue, elle fait élever les poids, et que, par la réaction successive sur les soupapes, elle donne un mouvement circulaire à la roue, les soupapes s'ouvrant dans la direction dans laquelle les poids sont poussés, mais non pas dans le sens opposé. A mesure que le vase à vapeur tourne, il reçoit de la vapeur de la chaudière, et celle qui a fait son office peut être évacuée dans le condenseur ou dans l'atmosphère.

« *Sixièmement.* Dans quelques cas, je me propose d'appliquer un certain degré de froid, insuffisant pour convertir la vapeur en eau, mais susceptible de la contracter considérablement, de sorte que la machine soit mise en jeu par l'expansion et la contraction alternative de la vapeur.

« Enfin, au lieu d'employer l'eau pour empêcher l'air et la vapeur de passer par les joints du piston ou des autres parties de la machine, je me sers d'huile, de cire, de corps résineux, de graisse d'animaux, de vif-argent et d'autres métaux à l'état liquide.

« Bien entendu que je n'ai pas l'intention d'appliquer ce qui est compris sous l'article 4 aux machines où l'eau que l'on veut élever entre, soit dans le vase à vapeur même, soit dans un autre vase avec lequel il est en communication ¹. »

Le perfectionnement important décrit dans la spécification consiste à condenser la vapeur dans un vase séparé, et à ce perfectionnement était nécessairement attaché un nouveau moyen pour évacuer l'eau et l'air du condenseur. L'application de ce principe ne pouvait être rendue parfaite qu'en maintenant le cylindre à la même température que la vapeur, et tenant le condenseur aussi froid que possible, sans trop de dépense. Les

¹ Robison, *Physiq. mécan.*, tom. II, p. 119. — *Repertory of Arts*, tom. I, p. 217 (1764).

procédés proposés par Watt pour arriver à cette fin sont à la fois nouveaux et efficaces.

On avait, il est vrai, déjà pensé à employer la pression de la vapeur, et même à en faire usage sur le piston (art. 12); mais son application dans un cylindre fermé au moyen d'une boîte à étoupe semblable à celle dont s'était servi Smeaton pour la machine pneumatique, était un mode nouveau de construction, dont on peut supposer que Watt eut l'idée de faire usage dans sa machine, bien qu'il n'en ait pas fait mention. Dans cette patente fut aussi publié, pour la première fois, quoique très-imparfaitement, le projet d'une machine à vapeur rotative ou roue à vapeur.

27. L'essai fait avec cette roue à vapeur n'ayant pas réussi, la première pensée de Watt semble avoir été de convertir le mouvement alternatif de la tige du piston en un mouvement rotatif. Hulls et Fitzgerald¹ avaient déjà inventé des moyens mécaniques pour atteindre ce but. Stewart, en 1769, ainsi que Washborough, en 1778, avaient pris chacun une patente pour des procédés semblables, et Steed en avait pris une en 1781 pour le mouvement à simple manivelle.

Malgré l'existence de ces moyens, Watt fut, en 1781, patenté pour cinq autres procédés, dont l'un était le mouvement à roue planétaire, qu'il employa pendant quelque temps, à cause du privilège exclusif de la manivelle obtenu par Steed.

En 1782, Watt obtint une autre patente comprenant plusieurs moyens d'appliquer la vapeur : 1° pour une machine à vapeur à expansion, avec six différents mécanismes ayant pour objet de rendre la puissance uniforme; 2° la machine à vapeur à double effet, dans laquelle la vapeur est employée alternativement de chaque côté du piston, tandis qu'on fait le vide de l'autre côté; 3° une nouvelle machine composée, ou moyen de lier ensemble les cylindres et les condenseurs de deux ou de plusieurs machines distinctes, de sorte que la vapeur qui a servi pour mouvoir le piston de la première, agisse par expansion sur le piston de la

¹ Et Papin avant eux (art. 6, note).

seconde, etc.; et produise ainsi un surcroît de force pour agir, soit alternativement, soit conjointement avec celle du premier cylindre; 4° l'application (au lieu de chaîne), de crémaillères et de secteurs dentés à l'extrémité des tiges ou des pistons de la pompe et des balanciers; 5° une nouvelle machine à mouvement circulaire alternatif, et une nouvelle machine rotative continue, ou roue à vapeur.

Au moyen de la machine à double effet, le même cylindre peut faire deux fois autant d'ouvrage dans le même temps, la pression de la vapeur et la condensation ayant lieu pendant la durée de la montée et de la descente du piston. Ce changement, quelque simple qu'il paraisse aujourd'hui, présente d'importants avantages; il rend la force presque uniforme, diminue la proportion des surfaces refroidissantes, et permet de réduire le volume et le poids de la chaudière, ainsi que de la machine.

Les moyens les plus propres à régler la force des machines à vapeur consistaient : 1° à limiter l'ouverture des soupapes régulatrices qui permettent à la vapeur d'agir sur le piston, et à les laisser ouvertes au même degré durant toute la course; 2° à n'ouvrir ces soupapes qu'au commencement, et à les fermer ensuite lorsque le piston n'a encore fait qu'une partie de sa course; 3° ou enfin à faire usage d'une soupape à gorge adaptée au tuyau à vapeur, laquelle, agissant comme la vanne d'un moulin, ne laisse entrer que la vapeur nécessaire pour produire l'effet qu'on désire.

La seconde de ces méthodes, pour régler la force de la machine, est la meilleure, et c'est elle qui fait la base de la machine appelée *machine à expansion de Watt*. Par cette méthode on utilise mieux la force de la vapeur que si le piston recevait son impulsion entière durant toute la course. Ce moyen a, dit-on, été employé dans une machine à la manufacture de Soho et dans quelques autres, vers 1776, et aux machines hydrauliques de Shadwell, en 1778; mais il ne fut rendu public qu'en 1782, date de la patente mentionnée plus haut. La connaissance du même principe avait été répandue un an avant par Hornblower,

mais avait reçu une application différente... Lorsqu'il se rencontre deux inventeurs d'un procédé susceptible d'applications différentes, le mérite en est à celui qui, le premier, le fait connaître au public, car rarement on tient les inventions cachées, si ce n'est par un motif intéressé; et, lorsqu'un individu n'est mû que par un sentiment de cette nature, il perd, par cela seul, tout droit à la priorité de l'invention.

28. Il restait encore un pas à faire pour compléter le mécanisme de la machine à double effet; il fallait trouver un moyen pour guider la tige du piston, et c'est ce qui paraît avoir été effectué, pour la première fois, en 1784, au moyen de l'invention du parallélogramme articulé. Ce procédé consiste dans une ingénieuse combinaison de leviers, dont un point décrit une ligne sensiblement droite; c'est à ce point qu'est attachée la tige du piston, de sorte que son mouvement, maintenu rectiligne, fait néanmoins osciller le balancier circulairement. Watt, pour s'assurer la propriété de cette nouvelle découverte, prit, en 1784, une patente qui faisait en outre mention, 1° d'une nouvelle machine rotative, dans laquelle le vase à vapeur devait tourner sur un pivot, et être placé dans un fluide dense, dont la résistance à l'action de la vapeur devait produire le mouvement rotatif; 2° d'un système perfectionné pour appliquer la machine à vapeur au mouvement des pompes et à d'autres mécanismes alternatifs, en faisant contre-balancer les tiges l'une par l'autre; 3° d'une nouvelle méthode pour l'application de la force des machines à vapeur comme auteur des moulins avec système de meules tournant ensemble; 4° d'un mode simplifié pour appliquer cette force des machines à vapeur au mouvement des marteaux de forges ou des moulins à pilons; 5° d'une nouvelle manière de construire et d'ouvrir les soupapes avec un encliquetage perfectionné; 6° enfin, d'une machine à vapeur portative et d'un mécanisme pour les voitures à vapeur.

En 1785, Watt obtint une patente pour une nouvelle construction de fourneaux, où il appliqua les meilleurs principes de la physique du temps, pour développer la chaleur et pour consommer la fumée du combustible. Il appliqua aussi aux ma-

chines à vapeur le pendule conique comme régulateur, le manomètre pour la chaudière et pour le condenseur, ainsi qu'un instrument précieux servant à constater l'état de la vapeur dans le cylindre, et désigné sous le nom d'*indicateur*.

29. Le seul point de la théorie de l'action de la vapeur que Watt essaya de déterminer, en partant des premiers principes, est la puissance qu'elle donne par l'expansion, et c'est ce qu'il fit d'une manière imparfaite. Les proportions et le mode de construction qu'il adopta ne paraissent être que le résultat d'essais, et il s'ensuivit naturellement qu'il s'écoula beaucoup de temps avant que ses machines fussent mises en usage; car, quoiqu'il fût doué d'un rare talent d'invention, il ne possédait pas de grands moyens pour juger du mérite de ses combinaisons. En effet, il paraît n'avoir eu d'autre manière de s'assurer de leur bonté que de faire des modèles et des machines d'expérience, moyen aussi lent que coûteux. Comme il n'avait reçu aucun dédommagement des sacrifices considérables que lui avaient occasionnés ces différents essais, on prolongea la durée de sa patente jusqu'à 1800, et cette concession lui valut, ainsi qu'à ses associés, une fortune rapide. Watt consacra ensuite une très-grande partie de sa vie à la chimie, et particulièrement à son application aux arts. Comme auteur, on lui doit, sur les machines à vapeur, quelques notices historiques de ses propres inventions, quelques corrections à l'article inséré par le docteur Robison dans sa *Physique mécanique*, et des notes qu'il y a jointes, concernant ses expériences sur la chaleur latente et sur la force élastique de la vapeur, dont les détails ne furent publiés que lorsqu'ils furent rendus inutiles par les recherches plus récentes.

30. Il ne faut pas oublier la part que Boulton eut au perfectionnement et à l'introduction de la machine à vapeur; car, ainsi que l'a remarqué le baron Dupin, « la machine de Watt, « à l'époque de son invention, n'était qu'une idée ingénieuse, « lorsque Boulton, avec autant de courage que de sagacité, « employa toute sa fortune à la faire réussir. » Il n'hésita pas dans ce dessein, même après que Smeaton eût déclaré que

jamais cette machine ne serait susceptible d'une application générale comme agent utile. En outre, Boulton rendit un grand service à Watt et à la Grande-Bretagne lorsque, par ses talents extraordinaires en industrie, il délivra son associé de tous soins domestiques, de toute spéculation commerciale et de tous les tracas qui sont la suite inévitable des grandes entreprises de cette nature.

Boulton fit plus encore; il triompha de tous les obstacles que les intérêts et les préjugés durent élever dans le principe pour retarder le succès et l'application des nouvelles machines à vapeur. « Les hommes, ajoute M. Dupin, qui se dévouent entièrement au perfectionnement de l'industrie, apprécieront, dans toute leur étendue, les services que Boulton a rendus aux arts et aux sciences mécaniques, en affranchissant le génie de Watt d'une foule de difficultés étrangères, qui eussent consumé des jours auxquels était réservée une tâche bien plus digne de lui, celle de perfectionner les arts utiles. »

31. T. H. Zeigler inventa un procédé curieux pour essayer la force élastique de différentes vapeurs; la description en est consignée dans un Mémoire publié à Bâle en 1769, avec des tableaux présentant les résultats de ses expériences; mais il paraît qu'il n'avait pas eu soin d'évacuer l'air de son appareil avant les essais; aussi ses recherches sont-elles sans intérêt.

1781. *Jonathan Hornblower.*

32. En 1781, Hornblower obtint une patente pour un mode nouveau d'appliquer la force expansive de la vapeur. Lorsque la vapeur est limitée d'un côté du piston, et qu'un vide partiel est formé de l'autre côté, elle fait mouvoir le piston jusqu'à ce que son action soit en équilibre avec le frottement et la vapeur non condensée; et toute la force communiquée durant ce mouvement est autant de gagné sur l'effet ordinaire de la pression de la vapeur. Pour réaliser cet avantage, Hornblower employa deux cylindres, dans lesquels devait agir la vapeur, se servant de ce fluide après qu'il avait agi dans le premier vase, pour opérer

encore dans le second, en le laissant se dilater; résultat qu'il obtint en unissant les deux cylindres, et en pratiquant des passages et des ouvertures par lesquels la vapeur pût, à des intervalles fixes, y entrer et en sortir ¹.

L'effet serait à peu près le même que celui qu'on obtiendrait en interceptant la vapeur avant que le piston arrive à la fin de la course, comme Watt le fit plus tard (art. 28); mais ce système a l'avantage incontestable d'offrir un mode plus uniforme d'employer la force de la vapeur; et dans les grandes machines, il est encore supérieur, en ce que l'on peut, avec moins de risque, l'employer dans un petit cylindre à haute pression: Hornblower ne paraît pas cependant avoir pensé à se servir de vapeur très-puissante, et il ne put faire usage de son invention, parce que le mode perfectionné de condensation était le privilège de Boulton et Watt.

De même que Watt, plusieurs autres mécaniciens pensèrent qu'il serait avantageux d'appliquer l'action directe de la vapeur à la production d'un mouvement rotatif. Hornblower essaya, dans ce but, deux mécanismes différents. Le premier est une machine ingénieuse, mais compliquée, pour laquelle il obtint une patente en 1798 ². Le second est plus simple, et la propriété lui en fut garantie, en 1805, par une patente; il consiste en quatre ailes, tournant dans un cylindre autour d'un axe. Les ailes sont comme celles d'un tourne-broche à fumée, mais assez épaisses pour avoir sur leur champ une rainure qui reçoit la garniture d'étoupe destinée à fermer les joints; elles sont montées sur un arbre qui porte un moyeu vers le milieu. C'est dans ce moyeu que les ailes sont fixées et réunies solidement deux à deux, de manière que les ailes opposées se meuvent ensemble: il en résulte que, si l'angle d'une aile avec l'arbre vient à varier, celui de l'aile opposée éprouve le même changement. Les ailes opposées sont placées à angles droits l'une avec l'autre; de sorte que si l'une d'elles se présente de face à la vapeur, l'aile opposée

¹ *Repertory of Arts*, vol. IV, p. 361 (1796).

² *Ibid.*, vol. IX, p. 289. ancienne série.

ne se présente que de champ, ce qu'elles continuent à faire pendant leur mouvement de rotation autour de l'axe commun. La vapeur agit sur la face d'une aile dans l'étendue d'un quart de cercle ou de 90°; et aussitôt que l'aile a parcouru ce quart de cercle, par une évolution subite, elle se présente de champ à la vapeur; tandis qu'au même instant l'autre aile, par une évolution opposée, vient recevoir l'action de la vapeur, qui produit aussi un mouvement rotatif non interrompu. Cette machine devait avoir le condenseur et la pompe de décharge de Watt; mais Hornblower y ajouta ce qu'il considérait comme un moyen plus parfait d'évacuer l'air du condenseur.

Il est facile de prouver que le frottement et les autres sources de déperdition de force sont beaucoup plus grandes dans l'action rotative de la vapeur que dans l'action rectiligne, tandis qu'on perd peu de chose par la transformation du mouvement alternatif en mouvement rotatif (*voy. sect. IV et VII*); mais j'indique cette combinaison comme l'une des plus simples qui aient été proposées pour une machine rotative.

33. Une série d'expériences sur la force élastique de la vapeur, depuis 0 jusqu'à 100 degrés, fut publiée en 1782 par M. Achard, qui étudia en outre la force élastique de la vapeur de l'alcool, et observa que dans les circonstances où la vapeur de l'eau et où celle de l'alcool étaient d'une égale force élastique, la température de la dernière était de 20 degrés environ, pas constante : cette différence semblait plus ou moins grande, suivant le degré plus ou moins élevé de la force élastique.

1782. *Le marquis de Jouffroy.*

34. L'idée d'employer les machines à vapeur pour faire marcher les bâtiments, idée qui avait été suggérée par Hulls (art. 14) ¹, fut, pour la première fois, mise en pratique par le marquis de Jouffroy, qui, en 1782, construisit un bateau

¹ Et auparavant par Papin (art. 6, note).

à vapeur destiné au service de la Saône à Lyon ; ce bateau avait 41 mètres de long sur 5 mètres de large, et son tirant d'eau était de 1 mètre. Le marquis fit diverses expériences avec ce bateau, qui fut pendant quinze mois en usage sur la Saône ¹.

35. En 1785, Perronnet donna, dans l'*Encyclopédie française*, une description très-détaillée d'une machine atmosphérique établie près de Saint-Guislain, dans le Hainaut. Cette description est remarquable autant par sa clarté et par les renseignements pratiques qu'elle contient, qu'en ce qu'elle commence par établir, d'une manière très-inconvenante, que Papin est l'inventeur de la machine à vapeur ², tout en admettant que la première qui ait été construite l'a été en Angleterre.

1788. *Patrick Miller.*

36. Vers cette époque, de 1785 à 1788, on vit paraître divers concurrents pour l'application de la vapeur à la navigation. En Amérique, James Rumsey, de Virginie, et John Fitch, de Philadelphie, furent en rivalité. En Italie, l'emploi de la vapeur comme force motrice à bord des bâtiments fut proposé par D.-S. Serratti, et en Écosse, par M. Miller, de Dalswinton, qui plus tard, à la vue du modèle d'une machine à vapeur inventée par M. William Symington, de Falkirk, en fut tellement satisfait, qu'il pria M. Symington de lui établir une petite machine destinée à faire marcher un bac ou bateau à double carène sur le lac de Dalswinton. La machine ayant été exécutée conformément aux désirs de M. Miller, et mise à bord, l'expérience fut faite à Dalswinton, dans l'automne de 1788, et réussit tellement à son gré, qu'il chargea M. Symington de lui acheter, à Carron, une grande chaloupe, et d'y installer une machine à vapeur, afin de faire un essai plus en grand. Tout

¹ *Dictionnaire de Physique*, art. Chaloupe à vapeur.

² Voyez la même note, art. 6, sur les droits de Papin, à l'invention de la machine à vapeur et à ses principales applications. M.

étant terminé et bien disposé, l'essai eut lieu sur le canal de Forth et Clyde, pendant l'année 1789, MM. Miller, Stainton, Taylor, etc., étant à bord, et le résultat fut des plus satisfaisants; mais ce que l'on ne peut expliquer, c'est qu'après avoir ainsi établi, à grands frais, la possibilité d'appliquer la vapeur à la navigation, M. Miller paraît avoir entièrement abandonné une entreprise d'un si haut intérêt¹.

57. La théorie des machines à vapeur fit encore quelques progrès, mais de peu d'importance, bien qu'elle excitât un certain degré d'attention.

Bossut a décrit, en 1771, une machine atmosphérique dans la première édition de son *Hydrodynamique*, en donnant quelques formules sur son équilibre statique; dans l'édition de 1786, il rechercha la proportion du contre-poids, mais pour un cas particulier seulement, et sans comprendre les circonstances actuelles des forces mouvantes.

58. Une machine rotative fut proposée en 1789 par Cooke². Deux patentes furent accordées pour des machines de cette nature, l'une à Bramah et Dickinson³, en 1790, et l'autre à Sadler, en 1791⁴. La construction particulière de ces machines me semble inutile à décrire, parce que le principe d'une machine rotative, ainsi qu'il sera démontré, est accompagné d'une déperdition d'effet, que des combinaisons mécaniques ne peuvent prévenir (*Voyez* sect. IV)⁵.

59. La patente de Bramah et Dickinson comprenait trois procédés différents, dont le plus simple est composé de pistons qui se meuvent à coulisse dans une roue excentrique. La vapeur entre en *s* (fig. 2, pl. II), et l'ouverture du condenseur étant en *c*, la pression fait tourner la petite roue et y fait glisser les pistons. Cette variété de procédés est un échantillon de ce talent d'exécu-

¹ Courte narration des faits relatifs à la navigation par la vapeur (*Edinburgh philosophical Journal*).

² *Repertory of Arts*, vol. III, p. 401 (1795).

³ *Ibid.*, vol. II, p. 73.

⁴ *Ibid.*, vol. VII, p. 170.

⁵ *Voyez* aussi la note rectificative de cette opinion (art. 316),

tion de machines que Bramah contribua si puissamment à introduire dans la Grande-Bretagne, et que son élève, le célèbre Maudslay, a porté depuis à un si haut degré de perfection.

1790. *Bétancourt.*

40. Le chevalier Bétancourt, qui fut chargé par le gouvernement espagnol de recueillir des modèles de machines hydrauliques, fit une série d'expériences sur la force de la vapeur de l'eau et de la vapeur de l'alcool à différentes températures. Ces recherches furent faites avec plus de soin que celles qui, à cette époque, étaient connues du public; mais elles n'avaient pas encore cette précision qui est nécessaire pour développer les lois de la force de la vapeur. Il fit le modèle d'une machine à double effet, munie d'une nouvelle disposition de soupape, et, suivant M. de Prony, il l'exécuta après avoir vu fonctionner l'extérieur seulement d'une machine de cette nature¹.

1790. *M. R. de Prony.*

41. M. de Prony est auteur d'un des ouvrages français qui traitent avec le plus d'étendue des machines à vapeur. Ce sujet forme une partie de son *Architecture hydraulique*, commence au premier volume et occupe presque la totalité du second.

M. de Prony commence par exposer les propriétés du calorique et donne les tables de Bétancourt sur la force de la vapeur; d'après ces dernières, il établit des formules empiriques pour calculer la force de la vapeur à différentes températures. Ces formules sont assez compliquées, eu égard à leur peu de conformité avec l'expérience. Il passe ensuite à la description des machines et de leurs diverses parties, d'après la construction alors en usage, et cette description est accompagnée de planches dessinées sur une grande échelle. Arrivé au parallélogramme, il recher-

¹ *Architect. hydraul.*, vol. I, p. 574.

che avec le plus grand soin la nature de la courbe décrite par l'extrémité de la tige du piston, et montre, au moyen de tables, l'écartement que la courbe prend, par rapport à une ligne droite, sur une amplitude donnée. Ensuite, il propose une méthode propre à déterminer le diamètre du cylindre; mais c'est plutôt une invitation aux artistes à deviner une énigme, et à rectifier ce qu'ils auraient deviné à l'aide de formules compliquées. La partie relative aux machines à vapeur se termine par un calcul de l'effet que produit une quantité donnée de combustible, calcul où certainement la durée de la combustion est introduite mal à propos.

Le reste du volume est consacré à une recherche analytique de formules empiriques ayant pour objet de déterminer les forces expansives des fluides élastiques et des vapeurs à différentes températures; mais ce travail est devenu tout à fait inutile, par suite de recherches plus récentes qui ont montré l'inexactitude des expériences.

Il est à remarquer que M. de Prouy ne connaissait pas l'avantage de la vapeur agissant par expansion, quoique depuis 15 ans, à l'époque où parut le deuxième volume, cette découverte fût l'objet de contestations en Angleterre. On peut dire, au reste, que ces travaux fournissent la preuve la plus évidente que le talent mathématique seul ne suffit pas pour les progrès de la science mécanique; sans cela, les principes des machines à vapeur n'auraient pas exigé de nouvelles recherches après celles de ce savant.

1795. *John Banks.*

42. M. Banks, dans un ouvrage sur les moulins, publié en 1795, a traité du *maximum* d'effet utile dans les machines atmosphériques. Il considère l'espace, ou la longueur de la course, comme la quantité donnée, en quoi ses recherches diffèrent de celles de Blake et d'Emerson. Cependant, en assimilant la pression atmosphérique à l'action d'un corps grave, il ne pouvait parvenir à donner une solution exacte.

Dans l'un de ses problèmes, il a égard au poids des parties mobiles de la machine ; il développe, avec des exemples, quelques formules pratiques pour l'équilibre statique des machines à élever l'eau.

En 1803, M. Banks donna quelques règles pour déterminer la force des balanciers, soit en bois, soit en fonte ; il y ajouta la description d'un manomètre propre à indiquer l'état de la raréfaction dans les cylindres, ainsi que dans les condenseurs des machines à vapeur, et qui, en principe, est le même que le baromètre ordinaire, et diffère du manomètre usité, en ce qu'il a une cuvette pour le mercure, au lieu d'un siphon. Ses règles pour la force des balanciers consistent à trouver le rapport entre la pression et le poids de rupture, et à établir ce poids de manière qu'il excède six, huit ou dix fois la pression habituelle [†].

1797. *Le docteur Edmond Cartwright, né en 1742, mort en 1823.*

43. La combinaison simple et élégante de Cartwright mérite, sous plus d'un rapport, d'attirer notre attention. Ce docteur essaya, comme moyen de condensation, l'application extérieure du froid au condenseur ; son appareil consistait en deux cylindres métalliques placés l'un dans l'autre ; de l'eau froide coulait en dedans du cylindre intérieur, et environnait l'autre cylindre. Par cette disposition, une couche très-mince de vapeur était exposée à une grande étendue de surface refroidissante ; de plus, en plaçant la soupape de manière à faire passer la vapeur à travers le piston, Cartwright établissait une communication continuelle entre le condenseur et le cylindre ; de la sorte, la condensation avait toujours lieu, soit que le piston montât, soit qu'il descendît.

Un des principaux objets de cette disposition était l'avantage qui en résultait, de pouvoir remplacer l'eau, en totalité ou en partie, par l'esprit-de-vin ou l'alcool, dont la vapeur aurait fait fonctionner la machine. En effet, comme le fluide qui sert à la

[†] *Puissance des Machines*, page 105.

mettre en mouvement est destiné à y circuler sans mélange et avec très-peu de perte, on espérait que l'emploi de l'alcool une fois fourni, n'entraînerait que peu ou point de dépense. La force obtenue par l'alcool, ainsi qu'on le supposait alors, ne devait exiger que la moitié du combustible qui était nécessaire pour obtenir la même force par l'emploi de l'eau (*voyez* sect. IV). Cartwright proposa, dans quelques cas, l'application de cette machine à un alambic, pour obtenir un effet dynamique par la distillation de l'alcool, de manière à économiser la totalité du combustible¹. Quant à la manière d'entretenir la machine en état de fonctionner, et d'obtenir en outre de l'alcool pur, c'est ce dont ni lui ni ses amis ne semblent s'être occupés.

Afin de réduire le frottement du piston, qui occasionne une grande résistance à la machine, surtout lorsqu'il est nouvellement garni, Cartwright imagina un piston entièrement en métal, et le rendit élastique au moyen de ressorts. Par cette disposition, il voulait, en outre, éviter les délais et les frais qu'occasionne le changement de la garniture de chanvre, en même temps qu'arriver à un ajustement de plus en plus parfait du piston dans le cylindre, par le jeu même du mécanisme (*voyez* sect. VII). Cartwright désirait vivement simplifier toutes les autres parties de sa machine, en ne lui donnant que deux soupapes, et en les faisant agir aussi spontanément que possible. La machine de Cartwright est représentée dans la planche II, fig. 3; elle est à simple effet. A est le cylindre, B le piston, I le tuyau qui conduit la vapeur en C, où est le condenseur, composé d'un double cylindre; la vapeur passe entre le cylindre intérieur et le cylindre extérieur, pour se rendre dans la pompe D, d'où le fluide condensé est refoulé dans la chaudière en traversant un récipient ou boîte à air P, dont *e* représente la soupape.

De ce que le tube de communication avec la pompe, par lequel le fluide condensé revient dans la chaudière, traverse le récipient ou boîte à air, il résulte que l'air ou la vapeur élastique mêlés accidentellement au liquide s'élève dans le récipient jusqu'à ce

¹ *Philosophical Magazine*, vol. I, p. 3.

que la boule ou flotteur qui tient la soupape *e* fermée s'abaisse et lui ouvre un passage pour s'échapper.

F est la soupape à vapeur; *a*, la soupape du piston; III, deux manivelles sur l'axe desquelles deux roues égales s'engrènent l'une dans l'autre pour donner une direction rectiligne à la tige du piston; M est le réservoir qui contient l'eau pour la condensation.

Cartwright garnit ses pistons métalliques d'anneaux en métal, ainsi qu'on le voit par la coupe du piston; ils étaient poussés, au moyen de ressorts, contre la surface du cylindre, de telle sorte que le piston pût s'ajuster aux inégalités des parois. La tige du piston est disposée de manière à éviter toute fuite de vapeur; à cet effet, Cartwright se servait d'une boîte métallique construite ainsi qu'on le voit en N); O est le volant destiné à régulariser le mouvement de la machine.

Le piston métallique est la seule partie de la machine dont le principe fût réellement nouveau, et l'invention en est, sans contredit, due à Cartwright; mais bien que nous ne trouvions dans tout le reste rien de nouveau, sauf la disposition générale, nous ne pouvons qu'admirer l'apparence de simplicité et d'originalité qui distingue son projet, en reconnaissant que ni la théorie ni la pratique ne justifieraient l'emploi des moyens proposés.

Cartwright comprit dans sa patente une machine à mouvement rotatif, simple en apparence, mais qui, dans le fait, présente une foule de difficultés sous le rapport de la construction, indépendamment de la perte d'effet inhérente au mode d'action de la vapeur sur un piston rotatif ¹.

1797. *John Curr.*

44. John Curr publia à Sheffield ² un ouvrage donnant les proportions des diverses parties de machines atmosphériques, telles qu'elles étaient exécutées en 1797, avec quelques courtes

¹ Voyez l'art. 316 et la note.

² *The Coal Viewer and Engine Builder's practical Companion.*

instructions techniques pour les construire, et avec des gravures représentant ces détails sur une grande échelle. Du reste, cet ouvrage ne contient pas de description générale de la machine, et l'auteur ne donne aucun motif à l'appui des proportions qu'il a fixées, si ce n'est lorsqu'en parlant de la pression sur le piston, il dit que, dans le cas où cette pression était portée de 0,5 à 0,6 kilogr. par centimètre carré, la machine produisait moins d'effet, et qu'une petite diminution avait également lieu lorsqu'on réduisait cette pression à 0,4 kilogramme; et il recommande, en conséquence, de ne pas charger la machine d'un poids de plus de 0,45 kilogramme. La machine avait un cylindre de 1^m,55, et donnait, par minute, douze coups; la longueur de la course étant de 2^m,60. La consommation de combustible, par heure, était de 500 kilogrammes de menu charbon; la machine était presque de la force de cinquante-quatre chevaux, et l'effet de la bonne houille par rapport au charbon menu étant à peu près d'un tiers en sus, la consommation de celle-ci n'eût été que de 375 kilogrammes. D'après cette proportion, 1 kilogramme de charbon menu élevait 29,160 kilogr. d'eau à 1 mètre de hauteur, et 1 kilogramme de houille eût élevé à la même hauteur 38,880 kilogrammes.

45. En 1797, William Nicholson, dans son *Journal philosophique*, décrivit une machine construite par Kier en 1793, sur le système de Savery. Cette machine agissait entièrement par condensation, le récipient à vapeur étant placé un peu au-dessous du niveau auquel l'eau devait être portée. Il y avait une disposition qui permettait d'introduire une mince couche d'air entre la vapeur et l'eau, et la construction de la machine était extrêmement simple et judicieuse. La chaudière avait 2^m,14 de long, 1^m,5 de haut et autant de large, et consommait 6 boisseaux ou 237 kilogrammes de bon charbon en 12 heures, lorsqu'elle était en bon état, et $\frac{1}{6}$ en sus dans le cas contraire. Dans ces circonstances, elle donnait 10 coups par minute, et élevait dans le même temps 2 mètres cubes d'eau à 6 mètres.

D'après ces données, la machine, dans son état le plus

parfait, consommait 39 kilogr. $\frac{1}{2}$ de charbon en 2 heures ou 120 minutes, et élevait 12 mètres cubes d'eau à 1 mètre de hauteur par minute; ou bien $12^{\text{m}} \times 120' = 1440$ mètres cubes en 2 heures, ou, enfin, 1440000 kil.; divisant ce résultat par 39 kil. $\frac{1}{2}$, poids du charbon consommé dans le même temps, on trouve 36500 kilogrammes pour le poids qu'un kilogramme de charbon élevait à 1 mètre; ce qui est à peu près la moitié de l'effet produit par une machine à piston et condenseur de Watt, et moins que l'effet de la machine atmosphérique ordinaire, telle qu'elle est employée dans les mines de charbon.

John Nancarrow fit aussi une tentative pour perfectionner la machine de Savery, en opérant la condensation dans un vase séparé, mais la nature de la machine ne permet guère d'utiliser ce perfectionnement.

1799. *Matthew Murray, mort en 1826.*

46. Nous devons beaucoup à Murray (de la compagnie Fenton, Murray et Wood, de Leeds), pour la construction et le perfectionnement de quelques parties des machines à vapeur. Ces perfectionnements furent l'objet de patentes, et quoique plusieurs d'entre eux paraissent avoir été précédemment mis en usage par Boulton et Watt, ils ne devinrent d'une connaissance générale qu'à l'époque où Murray obtint des privilèges à leur sujet.

Dans sa patente de 1799, Murray, pour économiser le combustible, proposa de placer un petit cylindre avec un piston au-dessus de la chaudière. Ce piston portait une crémaillère, ou tige dentée, au moyen de laquelle la force de la vapeur dans la chaudière ouvrait ou fermait le *régulateur du feu*, ce qui n'était autre chose qu'une soupape ou clapet placé dans la cheminée, pour en faire varier l'ouverture, ce qui augmentait ou diminuait le tirage du foyer, de manière à maintenir un degré uniforme de force élastique dans la vapeur. Murray pensa en outre qu'il ne serait pas sans avantage de placer le cylindre à vapeur hori-

zontalement, au lieu de lui donner la position verticale, et il avait en vue de réduire ainsi le volume de la machine au-dessous des dimensions usitées; il adopta aussi un nouveau moyen de convertir le mouvement alternatif de la tige du piston en un mouvement rotatif d'égale force, en faisant usage de la propriété de l'épicycloïde intérieure, et il montra la manière d'établir les roues pour produire le mouvement dans une direction tantôt verticale, tantôt horizontale ¹.

47. La patente de Murray, sous la date de 1802, comprenait six objets différents : 1° un mode de construction de pompe à air; 2° un procédé de garniture des boîtes à étoupes, qui permettait d'amener leurs parties mobiles en contact immédiat, et d'éviter sur la tige du piston toute pression oblique résultant de la compression inégale du couvercle de la boîte; 3° et 4° des procédés relatifs à la construction et au mouvement des soupapes; 5° un moyen pour unir la tige du piston au parallélogramme; et 6° enfin, un mode de construction de foyers fumivores, procédé dans lequel il avait été devancé par plusieurs inventions ².

48. Une autre patente fut obtenue par Murray, en 1802, pour une machine portable; mais comme elle renfermait quelques-uns des moyens pour lesquels Boulton et Watt avaient pris patente auparavant, la déchéance en fut prononcée l'année suivante, sur la poursuite de ces derniers.

1799. *William Murdoch.*

49. M. Murdoch, l'un des associés sous la raison Boulton, Watt et compagnie, obtint, en 1799, une patente pour de nouveaux procédés de construction, consistant en des moyens d'alésér les cylindres et les pompes métalliques d'une manière

¹ Cette propriété consiste en ce qu'un cercle roulant dans un autre d'un diamètre double, fait décrire à chaque point de sa circonférence une ligne droite ou un diamètre du grand cercle. M.

² *Repertory of Arts*, vol. XI, p. 511, ancienne série.

plus égale et plus parfaite, à l'aide d'une vis sans fin mue par une roue dentée. Sa patente comprenait aussi un mode de simplifier la construction du cylindre à vapeur et de son enveloppe dans les machines du système de Watt, en coulant l'enveloppe d'une seule pièce, et en la réunissant ensuite avec le fond et le couvercle du cylindre. Il proposa aussi de fondre le cylindre et l'enveloppe en une seule pièce d'une épaisseur considérable, et de forer un interstice annulaire entre les deux, en laissant les deux cylindres attachés à l'une des extrémités, et en fermant l'autre au moyen d'un anneau de métal. Un autre perfectionnement compris dans la patente avait pour objet de simplifier la construction des soupapes à vapeur, ou régulateurs des machines à double effet, en joignant ensemble les soupapes d'en haut et celles d'en bas, de manière à les faire fonctionner avec une seule tige. Le tube qui les unit, étant creux, sert de tuyau de sortie pour la vapeur à l'extrémité supérieure du cylindre, et l'on économise ainsi deux soupapes ; enfin, M. Murdoch donne le projet d'une machine rotative, consistant en deux roues dentées qui tournent dans un vase bien clos, et qu'il suppose devoir posséder une force considérable. Les moyens proposés par M. Murdoch pour mouvoir les soupapes ont beaucoup ajouté à la simplicité et à l'élégance de la machine à double effet, et nous devons à son talent et à ses soins plusieurs des perfectionnements apportés aux machines à vapeur. Le succès qu'elles eurent dans le pays de Cornouailles fut en grande partie le résultat de son caractère actif et intègre, et des ressources qu'il déploya pour triompher des difficultés attachées à l'épuisement des mines.

1801. *Le docteur John Robison, né en 1739, mort en 1805.*

50. Le docteur Robison, qui a si grandement contribué aux progrès de la mécanique industrielle, par une combinaison judicieuse de la théorie avec la pratique, et par ses traités en style clair et populaire ; le docteur Robison semble avoir donné une attention particulière aux principes et à la construction des machines à vapeur. Il possédait, pour cet objet, de grandes con-

naissances analytiques, et, en raison de ses liaisons avec Watt, il dut acquérir d'autant plus facilement ses données pratiques, que Watt était un ami libéral de la science. C'est pourquoi nous pouvons compter sur une masse d'instructions en prenant le volume qui contient le travail du docteur Robison sur les machines à vapeur.

Le premier article est une exposition un peu diffuse des propriétés physiques de la vapeur ; on y trouve le détail complet des phénomènes de la vaporisation, de l'influence d'une pression plus ou moins forte sur le degré de température nécessaire à l'ébullition, et enfin des principes connus de la chaleur latente. Il renferme en outre une série d'expériences sur la force élastique de la vapeur d'eau et d'alcool (*voyez* art. 95 et 104); mais la seule observation dont elles nous semblent susceptibles, c'est qu'elles n'ont pas été faites avec assez de soin, même pour établir la justesse de quelques-unes des vues de l'auteur à ce sujet. En outre, la règle pour la force élastique de la vapeur, déduite de ces expériences, et qu'il suppose d'une exactitude suffisante pour la pratique, est bien loin d'avoir ce degré d'exactitude, et n'a pas laissé de contribuer à entraîner dans une fausse direction quelques-uns des mécaniciens qui se sont aventurés dans le perfectionnement des machines à vapeur. Mais, en définitive, l'article du docteur Robison est le meilleur que je connaisse sur la vapeur.

La suite de son écrit comprend l'histoire des machines de Savery, de Newcomen, de Watt, etc., accompagnées de descriptions détaillées, ainsi que de discussions théoriques établies par Robison même. Dans la partie historique, la mémoire de Papin n'est pas traitée avec tous les égards qu'on eût pu désirer. On doit peut-être attribuer ce manque d'impartialité à un peu de prévention en faveur de Watt, son ami et son compatriote. Sous d'autres rapports, Robison n'est pas tombé dans le même défaut. Quoique ses descriptions manquent de système, elles sont complètes et précises, et l'on ne saurait trop apprécier l'utilité des renseignements qu'il a donnés aux concurrents de Boulton et Watt, ainsi que des matériaux qu'il a fournis aux écrivains du

second ordre. Dans la théorie, il a reproduit, avec quelques additions, les essais de Bossut, concernant la plus grande vitesse à donner aux machines atmosphériques, ainsi que le mode employé par Watt pour calculer la pression sur le piston de la machine à expansion; mais aucune de ces recherches n'est dirigée de façon à être utile aux constructeurs.

La réputation du docteur Robison a beaucoup ajouté au prix de ses articles sur les machines à vapeur; aussi ont-ils produit un effet extraordinaire: et si dans ses travaux nous ne trouvons presque rien de neuf, il n'en est pas moins très-avantageux que des connaissances jusqu'alors restées éparses aient été réunies avec autant d'habileté et traitées avec autant de clarté et de goût.

51. MM. Robertson, de Glasgow, imaginèrent, en 1800, une modification du procédé employé par Watt pour la construction du foyer de la chaudière; modification qui rend la pratique plus commode, mais ne change pourtant rien au principe (*Voyez* sect. 3). Ils essayèrent en outre d'utiliser la vapeur qui s'échappe par la garniture du piston, et de la faire servir pour augmenter l'effet utile des machines; mais la complication et la dépense de l'appareil nécessaire pour obtenir une augmentation aussi peu sensible de force rendent de nul effet, ou à peu près, ce procédé, ainsi que plusieurs autres imaginés à cette époque.

1801. *Joseph Bramah, né en 1749, mort en 1814.*

52. Nous avons déjà parlé, art. 39, de la machine rotative inventée par MM. Bramah et Dickinson. En 1801, Bramah obtint une patente pour une nouvelle manière d'appliquer un robinet à quatre ouvertures aux machines à vapeur, et pour quelques autres changements dans leur construction.

Son robinet à quatre ouvertures tourne continuellement dans la même direction, et produit cependant le même effet que s'il avait un mouvement alternatif; mais le mouvement continu rend l'usure plus égale et le mécanisme plus durable.

Il régla aussi les mouvements de façon à ouvrir instantanément et au moment convenable les communications de la chaudière

au cylindre et au condenseur, et il forma des ouvertures, de telle sorte que le cône ou boisseau du robinet fût également pressé dans son siège par la force de la vapeur.

La prospérité des mines et des manufactures de la Grande-Bretagne se ressentit cruellement de l'effet nuisible des privilèges exclusifs qui avaient été accordés à Boulton et Watt, sans qu'on y eût mis ces restrictions qui doivent protéger les droits du public lorsqu'il s'agit de la prolongation d'un monopole. Bramah, dans une brochure publiée en 1797, contesta fortement à ces mécaniciens leurs prétentions à ces privilèges, et exposa avec une grande chaleur les imperfections de leur patente. En effet, l'heureuse idée d'opérer la condensation dans un vase séparé, qui, dans la machine à simple effet de Watt, est la seule partie essentielle d'où soit résultée une économie de combustible au delà de ce qu'avait obtenu Smeaton; cette idée se serait bientôt présentée à quelque autre personne, et les mines auraient pu être exploitées à bien moins de frais, dès longtemps avant l'expiration du privilège. L'avancement de la prospérité publique ne devrait jamais être sacrifié à un intérêt particulier, et, par suite, on ne devrait jamais accorder la prolongation d'un privilège, à moins qu'il ne fût loisible à toute personne d'exploiter l'invention, en payant à l'inventeur un droit convenable et déterminé.

53. M. Thomas Fenwick publia, en 1801, une série de tables pour les proportions des cylindres des machines atmosphériques propres à produire un effet donné. Comme il était chargé de la direction des mines de houille de Newcastle, il fut à même de reconnaître, par expérience, ce qui convenait le mieux dans la pratique.

Il conclut, de quelques expériences, que tout le frottement de la machine atmosphérique est d'environ $0^k,3$ per centimètre carré de l'aire du piston; et attendu les mauvais effets qui résultent fréquemment de ce qu'on donne aux machines trop peu de force excédant leur charge ordinaire, il établit ses calculs sur $0^k,4$, et la force effective à la moitié de la pression, par centimètre carré du piston.

Dans une édition postérieure de son ouvrage, il donne des tables pour une machine atmosphérique perfectionnée ayant un condenseur séparé, et dans laquelle la proportion de l'effet est comme 17 : 10, pour la même dimension de cylindre. Il ne fait pas mention de la consommation de combustible, parce que ce point n'est pas d'une grande importance dans les houillères ; car une machine dont le premier établissement est peu coûteux, dont le jeu est simple et efficace, a pour un exploitant beaucoup plus de valeur qu'une pièce de mécanique plus belle.

1801. *John Dalton.*

54. A cette époque, la connaissance de la nature et des propriétés de la vapeur commença à devenir un objet important pour la chimie, la météorologie et pour d'autres branches de la philosophie naturelle. En conséquence, une classe tout à fait différente d'écrivains s'engagea dans des recherches qui avaient fait si peu de progrès entre les mains des simples mécaniciens. Le premier chimiste qui se distingua par des recherches complètes sur la théorie de la vapeur fut John Dalton. Il se livra avec soin à une série d'expériences sur la force expansive de la vapeur à diverses températures au-dessous de 100° ; il en fit d'autres pour déterminer différents phénomènes relatifs à l'expansion des gaz, ainsi qu'au mélange de l'air et de la vapeur, et à la nature de l'évaporation et de la combustion. Bien qu'il ait échoué dans ses essais pour réduire quelques-uns de ces phénomènes à des lois générales, cependant il donna une impulsion suffisante aux recherches sur cette matière pour en faire l'objet d'une étude générale parmi les chimistes. L'importance des travaux de Dalton, et même leur liaison avec la théorie des machines à vapeur, ne parut pas, dans le principe, avoir beaucoup éveillé l'attention. L'idée que Watt avait fait tout ce qu'il était possible de faire concernant la force de la vapeur avait arrêté les recherches des savants, et avait été cause que les manufacturiers et les capitalistes, disposés à encourager les améliorations, se laissaient

guider par de vains et ignorants faiseurs de projets, ou ruiner par d'audacieux fripons.

1802. *William Symington.*

55. En 1801, M. Symington fut encouragé à appliquer la vapeur comme moteur des bateaux, par Thomas lord Dundas, de Kerse, qui désirait qu'on en fit usage, au lieu de chevaux, pour remorquer les bâtiments sur le canal de Forth et de Clyde. En conséquence, on entreprit, dans l'année 1801, une série d'expériences en grand, qui coûtèrent environ 3000 liv. sterl. ou 75000 fr., et qui furent terminées en 1802. Le bateau remorqueur de Symington portait un cylindre à vapeur de 0^m,55 de diamètre et de 1^m,20 de course de piston. On voit, dans les salles de l'Institution royale de Londres, un modèle complet de ce bateau, armé de pilons pour briser la glace. Ce remorqueur fut reconnu très-propre à l'usage auquel il était destiné, mais il n'en résulta, pour la pratique, aucune application directe de la force de la vapeur à la navigation.

1802. *Trevithick et Vivian.*

56. L'idée des machines à haute pression s'était présentée ¹ à Leupold (art. 12) et à Watt (art. 26); mais aucun d'eux n'avait réalisé ses idées dans la pratique, et ce ne fut qu'en 1802 que ce mode bien simple d'appliquer la vapeur fut mis en usage par MM. Trevithick et Vivian ². Leur but semble avoir été de faire une machine portative à simple effet, pour les cas où l'eau était rare et où il importait moins d'utiliser totalement l'effet du combustible que de mouvoir une charge considérable.

Leurs machines à haute pression étaient surtout destinées à faire marcher les voitures sur les chemins de fer; et lorsqu'on s'en servait pour cet usage, la chaudière était en fonte et avait

¹ A Papin (art. 12, note).

² *Repertory of Arts*, vol. IV, p. 241, nouvelle série.

une forme cylindrique. Ces machines étaient montées sur un chariot à quatre roues, et le cylindre se trouvait placé verticalement dans la chaudière, près d'une extrémité. La tige du piston faisant mouvoir une traverse entre deux guides, et au moyen d'une bielle qui descendait de chaque extrémité de la traverse jusqu'à deux manivelles, le mouvement se communiquait aux roues du chariot : dans ce cas, un volant n'est pas nécessaire, parce qu'il est suppléé par le mouvement acquis de la voiture.

Le premier essai de cette force motrice pour les voitures eut lieu sur un chemin de fer, à Merthyr-Tidvil, en 1805. A cette époque, on ne donna pas suite à cette application ; mais aujourd'hui elle est devenue, par suite de grandes modifications, d'un usage très-étendu sur les routes en fer.

Vers le même temps, on vit paraître divers projets pour des changements insignifiants dans la construction des machines, et pour des méthodes différentes de l'application du combustible ; aucun d'eux n'est ni assez nouveau ni assez important pour mériter une attention particulière.

La nature et l'application de la chaleur avaient été si bien déterminées par Rumford, et plusieurs de ses propriétés les plus cachées avaient été développées avec tant d'habileté par Leslie, qu'il paraissait peu vraisemblable qu'on pût attendre aucun perfectionnement important au delà du meilleur mode qui fût alors en pratique. Les chaudières cylindriques ou à tubes, imaginées par Blakey, et essayées un moment par Rumford, furent de nouveau proposées par Woolf ; mais nous trouvons que, dans la pratique, celui-ci est revenu à des méthodes presque semblables aux dernières qu'avait adoptées Rumford, au lieu de suivre celles qu'il avait conçues lui-même. La machine à vapeur avait aussi obtenu, en apparence, sa forme la plus simple et la plus efficace, excepté aux yeux des personnes qui comptaient faire usage de son action rotative directe ; mais il en fut autrement : car, par suite d'un changement très-simple dans la combinaison antérieure, elle dut éprouver une amélioration essentielle.

1804. *Arthur Woolf.*

57. Le mode de condensation inventé par Watt étant alors devenu la propriété du public, et le terme de la patente de Hornblower étant arrivé, Woolf adopta le procédé du dernier, à l'exception qu'il employa la vapeur à haute pression dans le petit cylindre, et l'appareil à condensation de Watt. Mais un changement dans la manière de faire agir la force de la vapeur aurait été de trop peu d'importance pour motiver la demande d'une patente; et, pour cette raison, Woolf commence sa spécification par réclamer la priorité de la découverte d'une nouvelle loi de l'expansibilité de la vapeur. Il établit, avec beaucoup d'assurance, cette loi de l'expansibilité comme étant le résultat de ses propres essais; mais il s'était évidemment fait illusion. Sa loi supposée consiste en ce que la vapeur, de la force d'un certain nombre de livres par pouce carré au-dessus de la pression de l'atmosphère, peut se dilater en prenant un volume autant de fois plus grand, et conserver encore une force égale à la pression de l'atmosphère, la température ne changeant pas. De la sorte, il supposait que la vapeur produite sous une pression de 40 livres par pouce carré pouvait prendre une expansion égale à quarante fois son volume, et conserverait une force élastique égale à celle de l'atmosphère; mais c'est une loi bien connue de l'expansion des fluides, que, la température restant la même, le volume est en raison inverse de la pression. Ainsi, en supposant la pression de l'atmosphère de 14 livres, nous avons $14 : 14 + 40 :: 1 : 4$, à peu près. C'est pourquoi la vapeur produite à 54 liv. par pouce carré, ou à 40 liv. au-dessus de la pression de l'atmosphère, n'aurait qu'une expansion de quatre fois son volume, au lieu de quarante (*Voyez art. 120*).

Quoique les assertions de Woolf fussent si directement opposées aux lois de la constitution des fluides élastiques, elles ont été reproduites comme des vérités fondées sur d'incontestables expériences, dans des ouvrages qui ont de grands titres à notre considération. Cette circonstance devrait servir de leçon aux

auteurs, à moins que toutes leurs prétentions ne se bornent à réimprimer des annonces.

L'emploi de la vapeur à haute pression agissant avec expansion, au moyen d'un double cylindre, donne le plus haut degré de force, de la manière la plus uniforme et avec le plus de sûreté. En conséquence, soit pour les machines des manufactures, soit pour celles des mines, ce mode semble le plus économique pour produire des effets mécaniques. Je ne dois objecter contre les machines à haute pression que le danger qu'elles présentent; mais mes lecteurs n'auront peut-être pas les mêmes craintes. Les autres patentes de Woolf portent sur des projets de peu ou point d'importance.

58. Il serait injuste de passer sous silence les efforts que fit, vers cette époque, Olivier Evans, pour introduire l'usage des machines à haute pression. Son projet à cet égard n'eut pas, dans le principe, beaucoup de partisans, et lui-même ne fut pas sans rivaux. Sa machine diffère peu de celle de Trevithick et de Vivian, pour la construction; mais, d'après un ouvrage qu'il publia sous le titre *Abortion of the Steam Engineer's Guide*, ou *Avortement du Guide du constructeur des machines à vapeur*, il paraît qu'il se proposait d'employer la force expansive de la vapeur. L'*Abortion* est un ouvrage curieux; on voit cet étrange mélange des vues absurdes et d'une perception confuse de la vérité, qui caractérise la généralité des enthousiastes faiseurs de projets; et cet écrit n'est de quelque prix que pour les personnes qui, grâce à des connaissances ou à une expérience acquises, sont à même de faire un choix raisonné. Parmi les projets d'Evans, on remarque une machine à vapeur volcanique, ainsi que l'idée d'employer la force de la chaleur du soleil, à l'aide d'un verre ardent, pour faire mouvoir une machine¹.

59. Nos frères d'Amérique ont cependant plus de droit que nos voisins du continent à réclamer leur part des perfectionne-

¹ Ce dernier projet avait été présenté, dès 1614, par Salomon de Caus, dans son ouvrage intitulé, *la Raison des Forces mouvantes*, et sous une autre forme très-ingénieuse, par Hautefeuille (*Voyez Pendule perpétuelle*, etc.; Paris, 1678).

ments apportés aux machines à vapeur, sous le rapport de la construction et de l'application qui en a été faite; et nous avons lieu de nous glorifier des prétentions des Américains plutôt que d'en éprouver un sentiment d'une autre nature. Le génie et l'industrie de l'Angleterre ne se sont pas éteints en se transplantant dans un autre climat. Il est vrai d'ajouter que plusieurs des projets formés jusqu'à ce jour aux États-Unis se font plutôt remarquer par leur extravagance que par leur nouveauté, étant rarement fondés sur de sages vues scientifiques; mais c'est un mal auquel le temps remédiera, et l'on peut croire qu'ils tiendront, dans le Nouveau-Monde, le rang que la Grande-Bretagne, depuis plusieurs siècles, occupe avec tant d'honneur dans l'ancien hémisphère. Le principal objet de leurs mécaniciens a été de faire servir la vapeur à la navigation; et si l'on considère de quelle importance il est pour l'Amérique de pouvoir naviguer sur ses immenses rivières, on ne sera pas surpris que ce soit sur ce continent que la puissance de la vapeur ait été pour la première fois, à force d'essais et de persévérance, appliquée avec succès, comme moteur, à bord des bâtiments. Ce but fut atteint, grâce à l'activité et au zèle de Fulton, qui cependant paraît devoir une grande partie de ses connaissances sur ce point à ce qui avait été pratiqué en Écosse ¹. Le premier bateau à vapeur américain qui réussit complètement fut lancé à New-York le 3 octobre 1807; sa machine avait été faite en 1804 par Boulton et Watt ². Peu de temps après, ce bâtiment fit le service entre New-York et Albany, distance de 160 milles ou 26 myriamètres.

60. C'est à M. Henri Bell que nous devons la première application qui ait été faite avec succès de la navigation par la vapeur dans la Grande-Bretagne. En 1811, il construisit un bateau à

¹ M. Tredgold aurait dû dire plutôt en France, puisque Fulton exécuta à Paris ses deux premiers bateaux d'expérience, et qu'il en fit l'essai sur la Seine, en 1805, et attendu qu'il avait vu, au Conservatoire, le bateau à vapeur de M. Desblancs, et avait pu prendre connaissance des essais antérieurs de Jouffroy, de Dauxion, de Péricr, etc., ainsi que des projets de Papin et de Gautier. M.

² Cinquième rapport sur les bateaux à vapeur de Holyhead à Dublin, *Lettre de Watt*, page 210.

vapeur d'après ses propres plans , auquel il donna 12^m de quille et 3^m,2 de bau ; il y installa une machine avec les aubes , et l'appela *la Comète* , parce qu'il en commença et acheva la construction dans l'année où parut une grande comète.

Depuis cette époque, les progrès de la navigation par la vapeur ont été excessivement rapides, et ont puissamment contribué à l'extension du commerce de la Grande-Bretagne.

61. Une quantité presque innombrable de projets de perfectionnements pour les machines à vapeur ont été mis sous les yeux du public depuis dix ans ; mais , à l'exception d'un petit nombre d'entre eux , relatifs à la construction , et qui encore sont d'une faible importance, il n'a rien été produit qui fût digne de fixer l'attention du lecteur, soit sous le rapport d'amélioration dans la machine , soit quant à la manière de produire la vapeur pour augmenter l'effet utile du combustible.

62. Quelques expériences importantes sur la force élastique , le volume et la chaleur latente de la vapeur , faites par M. John Southern en 1803, furent publiées par Watt ; celle du docteur Ure et de M. P. Taylor , sur la force élastique de la vapeur , ont considérablement avancé les recherches théoriques. Les perfectionnements dans la fabrication des machines à vapeur ont aussi été importants ; mais nous n'avons aucun motif de compter sur une augmentation essentielle dans leur force , qui semble avoir atteint le plus haut degré auquel elle puisse parvenir : autrement , on pourrait , avec la même raison , espérer d'ajouter à la force de l'homme et du cheval. Mais on peut imaginer de nouveaux modes d'employer cette force et de l'appliquer avec utilité à de nouveaux usages , en même temps que la connaissance de ses principes théoriques deviendra plus générale et plus parfaite.

On peut aussi trouver que , dans certains cas , la vapeur de quelques substances autres que l'eau peut être employée avec avantage ; cependant cet espoir n'est pas très-fondé , et mes raisons , à l'appui de cette opinion , seront démontrées lorsque je traiterai des propriétés de la vapeur (art. 115). On découvrira probablement quelque autre source de force qui détournera l'attention des faiseurs de projets ; et la seule , dans la nature ,

qui paraisse n'avoir pas été employée par l'homme, est peut-être celle du fluide électrique. Quant au degré d'utilité dont peut être ce fluide, c'est un sujet curieux de recherches, ainsi que le danger qu'il présente, et qui est en proportion de sa force et de l'ignorance où nous sommes de sa nature.

Ce qui peut donner quelque idée des progrès rapides de l'application de la force de la vapeur, c'est que la première machine de ce genre, établie à Manchester, ne date que de 1789. Avant cette époque, les manufactures étaient dispersées dans les districts les plus reculés, parce que leur moteur principal consistait en chutes d'eau, la force des animaux étant la seule dont on pût, en outre, faire usage, et occasionnant des dépenses trop élevées. Les machines de Watt amenèrent la plus complète révolution à cet égard : les manufactures furent transportées des lieux les plus déserts et les plus inaccessibles dans le sein des villes et des cités, et réunirent sous le même toit les diverses branches de fabrication, au point qu'aujourd'hui la matière brute est convertie, sans déplacement et avec une étonnante rapidité, en une étoffe parfaitement confectionnée.

La première machine à vapeur, employée dans le district de Glasgow, pour filer le coton, fut établie dans la filature de Scott et compagnie, près Springfields, en janvier 1792, ou sept ans après que Boulton et Watt eurent placé leur première machine, du même genre et destinée au même usage, dans les ateliers de MM. Robinson, à Papplewick, dans le Nottinghamshire.

Le nombre des machines à vapeur existant à Glasgow et dans le voisinage, en 1825, suivant les renseignements recueillis par M. Cleland, est fixé comme il suit :

	Nombre des machines.	Force en chevaux.
Dans les manufactures.	176	2970
mines de charbon.	58	1411
carrières.	7	39
bateaux à vapeur.	68	1926
forges de Clyde	1	60
TOTAUX.	310	6406

La force moyenne des machines est de 20 chevaux $\frac{2}{3}$.

63. Les machines à vapeur employées dans les filatures de coton de la Grande-Bretagne et de l'Irlande, pendant l'année 1817, égalaient une force de plus de 20000 chevaux ; et tel a été l'avantage résultant de l'application de ces machines, qu'une seule personne peut, dans un temps donné, filer plus de coton que ne l'eussent fait 200 personnes il y a 60 ans environ.

Dans les forges et dans les fabriques de draps et de toile, les résultats avantageux de l'emploi de la machine à vapeur n'ont pas été moins importants.

La force réunie des machines à vapeur employées dans la Grande-Bretagne est estimée, par le baron Dupin, équivaloir à celle de 320000 chevaux en action continuelle. Cette immense force contribue donc puissamment à la prospérité du commerce anglais, outre qu'elle augmente à un très-haut point le bien-être et les jouissances de la vie.

L'emploi de la vapeur en Angleterre n'a cependant, en aucun cas, pris un accroissement aussi frappant que dans son application à la navigation. Un seul bateau à vapeur naviguait sur la Clyde en 1811 : 51 y naviguaient en 1825, et, depuis le premier essai, fait avec succès en 1811, jusqu'à 1822, le nombre des navires de ce genre, pour toute la Grande-Bretagne, s'est élevé à 140 environ, représentant une force égale à celle de 4700 chevaux, et un tonnage de 16000 tonneaux.

63 bis. *Introduction et progrès des machines à vapeur sur le continent.* — Les premières machines établies en France sont antérieures à l'année 1744 ; car Gensanne, qui s'occupa de les perfectionner vers ce temps-là, en indique plusieurs comme étant en activité ¹, entre autres, celle de Fresne près de Condé. Il mentionne aussi une machine employée à Sars près de Charleroi, pour l'épuisement des mines de houille, et une autre à Namur dans les mines de plomb. Bélidor alla à Fresnes observer la machine pendant son travail, et en donna quelque temps après une bonne description dans son grand ouvrage ².

¹ *Machines approuvées par l'Académie des Sciences*, tom. VII, p. 300.

² *Archit. et. hydraulique*, tom. II, p. 500.

Une autre machine fut établie, en 1749, aux mines de Litry près de Caen, pour l'extraction de la houille : elle a été remplacée en 1799.

Mais une autre machine plus importante, qui subsiste encore, est celle de Chaillot, établie en 1777, par MM. Périer frères, pour le service des eaux de Paris ; une machine semblable avait été aussi établie, par eux, au Gros-Caillou, mais elle a été remplacée récemment par une machine à haute pression.

Depuis cette époque, les troubles politiques du continent ont retardé la propagation des machines à vapeur, et ce n'est guère qu'à dater de 1815 que leur emploi a commencé à prendre de l'extension dans les mines, les usines et la navigation : c'est surtout dans ces dernières années que leur accroissement en France a été notable. En effet, 57 de ces machines ont été établies en 1830, 60 en 1851, 79 en 1852, 150 en 1855, et cette progression continue toujours. A la fin de 1855, le nombre des machines en activité était de 946, distribuées dans 54 départements, et elles représentaient une force réunie de 1451 chevaux.

La plus forte de ces machines est de 100 chevaux ; elle est employée dans le département de la Loire pour l'épuisement d'une mine de houille ; la plus faible est de la moitié de la force d'un cheval.

Sur ces 946 machines, il y en a 759 d'origine française, 144 d'origine étrangère, et 43 d'origine non constatée.

C'est le département du Nord qui possède le plus de machines à vapeur : il y en a 172. Vient ensuite celui de la Seine, qui en possède 158 ; viennent ensuite, dans l'ordre de leur importance, la Loire, la Seine-Inférieure, le Rhône, Saône-et-Loire, l'Aisne et la Marne.

La force moyenne de ces machines à vapeur est d'environ 15 chevaux, c'est-à-dire d'un quart au-dessous de la moyenne des machines en Angleterre.

Le nombre total des chaudières à vapeur, autres que celles des machines, fonctionnant en France à la fin de 1855, et réparties dans 36 départements, était de 568, dont 520 d'origine française, 22 étrangères et 28 inconnues. Le nombre des bateaux

à vapeur, à la même époque, était de 75, non compris les bâtiments de l'État.

En Belgique, la force totale des machines à vapeur en activité s'élève au nombre d'environ 20,000 chevaux. C'est principalement dans le Hainaut, à Charleroi et dans le Borinage, mais surtout dans la province de Liège, que se trouvent les plus puissantes de ces machines.

Dans cette dernière province, on en compte 216, représentant une force totale de 5445 chevaux; ce qui établit la force moyenne à 25 chevaux. La plus forte est de 300 chevaux, et la plus faible d'un et demi. Sur le nombre total, il ne s'en trouve que trois d'origine étrangère.

Leur force est répartie comme il suit :

18	machines	de la force	de 100 à 300	chevaux.
20	<i>id.</i>		de 50 à 100	
38	<i>id.</i>		de 20 à 50	
139	<i>id.</i>		de 5 à 20	
1	<i>id.</i>		de 1 $\frac{1}{2}$.	

[Ainsi, la Belgique possède plus de machines à vapeur que la France, et la disproportion devient énorme, eu égard à l'étendue et à la population respective des deux États.] M.

64. Il n'est pas sans importance, en terminant cette esquisse historique, de remarquer qu'elle tend, dans tout son ensemble, à prouver que la machine à vapeur, dans l'état le plus avancé de perfection où elle ait été portée jusqu'à ce jour, est entièrement d'origine anglaise. Cette remarque ne s'étend pas moins à la découverte des principes physiques qu'à celle des combinaisons mécaniques. Aucun nouveau principe, aucune nouvelle combinaison de principes, n'a encore été puisé à une source étrangère, les machines à vapeur les plus parfaites employées à l'étranger étant sans contredit copiées sur celles fabriquées en Angleterre, et étant assez souvent faites par des ouvriers anglais.

64 bis. [*Résumé de l'Histoire des Machines à vapeur* ¹. —

¹ Il nous a paru utile autant pour rectifier que pour compléter le récit, parfois

La force de la vapeur, connue des anciens, n'a reçu d'eux aucune application utile. Ce n'est qu'au commencement du xvii^e siècle, et en France, qu'a été faite la première proposition d'employer ce moteur aux mines.

Année 1615. — Salomon de Caus décrit une machine propre à élever l'eau par la pression directe de la force de la vapeur sur le liquide.

1663. — Le marquis de Worcester reproduit cette idée, en l'accompagnant d'une description énigmatique.

1682. — Papin invente la soupape de sûreté, et l'applique aux marmites à haute pression, connues depuis sous le nom d'*Autoclaves*.

1683. — Morland calcule avec assez d'exactitude la force et les effets de la vapeur employée à l'élévation de l'eau.

1690. — Papin conçoit l'idée de la première machine à vapeur à piston, et de la combinaison de la pression de la vapeur, avec la condensation de ce fluide, c'est-à-dire de la *machine atmosphérique*.

Il propose d'employer la vapeur à d'autres usages qu'à l'élévation de l'eau, et d'en obtenir un mouvement rotatif propre aux mines; à cet effet, il indique un mécanisme pour convertir en mouvement circulaire l'action alternative du piston.

Il propose la première machine à vapeur à double effet, mais avec deux corps de pompes.

Enfin, il expose deux applications importantes de la force de la vapeur à la navigation et au jet des projectiles, don-

trop partial de notre auteur anglais, d'ajouter ici un résumé historique, où les faits et les dates sont rétablis dans leur exactitude. M.

nant ainsi le projet réalisé un siècle plus tard, des *bateaux à vapeur* et des *armes à vapeur*.

1698. — Savery s'occupe d'appliquer aux épuisements des mines l'action de la vapeur à haute pression, au moyen d'une machine établie sur le principe de Salomon de Caus.
1699. — Amontons, académicien français, décrit une machine ingénieuse, à rotation immédiate, qu'il nomme *roue à feu*, et dont le mouvement est produit par l'effet de la chaleur sur l'air et l'eau contenus dans la machine.
1705. — Delorme imagine les fournaux fumivores, et fait des essais sur l'emploi de la vapeur à haute pression, pour faire jaillir l'eau à de grandes hauteurs.
1705. — Newcomen, Cawley et Savery se réunissent pour obtenir leur patente, relative à la machine atmosphérique, et y introduisent le perfectionnement de la condensation de la vapeur, par injection directe de l'eau dans le cylindre.
1710. — Papin invente la première machine à haute pression et à balancier, sans condensation, et il y emploie un robinet de distribution très-ingénieux, dit robinet à 4 ouvertures.
1710. — Potter, ouvrier chargé de manœuvrer les robinets d'une machine atmosphérique, trouve un moyen de faire exécuter ce travail par la machine même.
1718. — Beigton perfectionne ce procédé par l'adoption de la tringle à encliquetage.
1737. — Jonathan Hulls renouvelle l'idée des bateaux à vapeur, mus par une machine atmosphérique.

1744. — Gensanne applique à la machine de Salomon de Caus et de Savery un mécanisme ou régulateur analogue à celui de la machine atmosphérique, pour le faire fonctionner spontanément.
1758. — Fitzgerald reproduit le moyen de Papin, pour convertir le mouvement alternatif du piston en mouvement circulaire, et il ajoute l'idée du volant pour faciliter et régulariser ce mouvement.
1767. — Watt imagine 1° D'effectuer la condensation de la vapeur dans un vase séparé du cylindre, et qu'il nomme condenseur; 2° De rendre cette condensation plus efficace par l'addition de la *pompe à air*; 3° D'augmenter l'effet utile des machines, en employant la détente de la vapeur; 4° D'obtenir une machine à double effet, avec un seul corps de pompe; 5° De produire un mouvement de rotation immédiat, au moyen d'une *roue à vapeur*.
1778. — Périer construit le premier bateau à vapeur; ses essais sont répétés par de Jouffroy, en 1778 et 1781; par Ficht, en 1786; par Miller, en 1791; par Stanhope, en 1795, et par Symington, en 1801.
1782. — Watt invente le *parallélogramme articulé*, la *roue planétaire*, l'*indicateur de la pression* dans le cylindre, et applique le *compteur*, ainsi que le *régulateur à force centrifuge*.
1803. — Fulton construit en France, et importe en Amérique les premiers bateaux à vapeur qui aient réussi.] M.

DEUXIÈME SECTION.

DE LA NATURE ET DES PROPRIÉTÉS DE LA VAPEUR, DE SA FORCE ÉLASTIQUE ET EXPANSIVE ET DE SA PUISSANCE DYNAMIQUE.

65. Les corps naturels existent sous trois formes différentes : état *solide*, état *liquide*, état *gazeux* ; plusieurs sont susceptibles de changer d'état : ainsi, l'eau, naturellement liquide, peut se présenter à l'état solide, comme la glace, et à l'état gazeux, comme la vapeur. Ces changements ont lieu sous certains degrés déterminés de chaleur et de pression. Mais il y a quelques corps gazeux qui ne peuvent être réduits à l'état liquide par aucun des moyens connus jusqu'à présent, quoiqu'il y ait tout lieu d'assurer que tous les gaz seraient susceptibles de cette réduction, si l'on pouvait produire un degré suffisant de condensation et de refroidissement.

66. On appelle *gaz permanents* ceux qui ne sauraient être liquéfiés par les changements de température ou de pression que nous pouvons produire. Ceux qui peuvent être rendus liquides par nos moyens ordinaires de refroidissement et de compression sont appelés *vapeurs*.

67. La chaleur est répandue dans tous les corps de la nature, qu'ils soient solides, liquides ou gazeux ; elle tend constamment à l'équilibre, de telle sorte que si, par un moyen quelconque, elle est accumulée dans certains corps particuliers, une portion s'en dégage bientôt pour se distribuer aux corps environnants, jusqu'à ce que l'ensemble soit parvenu à une température commune. De même, quand certains corps ont été privés d'une partie de leur chaleur, il leur en est cédé, par les corps environnants, pour rétablir l'équilibre.

68. Quand il existe un équilibre de chaleur, c'est-à-dire quand tous les corps d'un système sont à la même température, si l'on trouble cet équilibre par l'introduction d'une nouvelle quantité de calorique, on observe que les différents corps se la partagent, en proportions inégales, dans l'établissement du nouvel équilibre. La quantité particulière que chaque corps absorbe dans les mêmes circonstances est nommée *chaleur spécifique* de ce corps. Dans la comparaison des chaleurs spécifiques des différents corps, on prend ordinairement pour unité celle de l'eau à 15°.

69. Cette propriété des corps d'absorber des quantités inégales de chaleur, pour élever leur température d'un même nombre de degrés, est quelquefois appelée *capacité pour la chaleur*; mais cette expression devrait être affectée seulement à désigner la quantité totale de chaleur contenue dans chaque corps : c'est dans ce sens que j'en ferai usage. De l'inégale absorption de chaleur qui a lieu dans les différents corps pour produire un changement égal de température, il résulte que tous les corps ne se dilatent pas et ne se contractent pas également dans ce changement.

70. Le fait incontestable que les diverses substances ont des capacités différentes pour la chaleur présente une autre conséquence nécessaire, laquelle, bien qu'elle ne pût rester inaperçue, a été rarement appliquée : c'est que, dans tous les changements chimiques, les capacités des corps pour la chaleur sont altérées, et, par suite, l'équilibre du calorique est troublé; car la capacité d'un composé diffère de celle de ses éléments.

71. Par le simple accroissement de la chaleur, quelques solides peuvent prendre l'état liquide, et quelques liquides l'état gazeux. D'un autre côté, par une diminution convenable de chaleur, les gaz peuvent devenir liquides, et les liquides devenir solides; mais ce changement d'état est accompagné d'un changement de capacité pour la chaleur. La capacité de la vapeur est plus grande que celle de l'eau; car la vaporisation exige une quantité additionnelle de calorique pour porter les molécules d'un liquide à la distance mutuelle qui constitue l'état gazeux. Cette nouvelle

quantité de chaleur n'affecte point le thermomètre. Ainsi, quand une masse donnée d'eau, chauffée à 100° centigrades, est convertie en vapeur à la même température, la chaleur nécessaire pour produire ce changement aurait pu élever de 10° à 100° la température d'une masse d'eau d'environ six fois plus grande.

72. La chaleur ainsi absorbée pendant la formation de la vapeur est appelée *chaleur latente*. Cette expression tend à donner une fausse notion de l'état de la chaleur dans les corps : car la chaleur n'est pas latente ; il n'y a qu'une simple différence de quantité, et non de qualité : il serait à désirer qu'on employât un terme mieux approprié à la nature du phénomène ¹.

73. Le calorique latent, absorbé ou dégagé pendant le changement d'état d'un corps, se mesure comme la chaleur spécifique, c'est-à-dire en prenant pour unité la quantité de chaleur qui élève de 1° un kilogramme d'eau prise à la température ordinaire (ou 15°).

C'est l'illustre docteur Black qui a découvert le premier (en 1762) que le changement d'état des corps exige une certaine absorption ou un certain dégagement de chaleur, variable suivant la nature différente des corps, et aussi suivant l'espèce du changement. Cette découverte est d'une grande importance pour la physique générale, et ses plus belles applications se rapportent à la théorie des machines à vapeur.

74. La chaleur latente relative à la vaporisation de chaque liquide n'est pas très-facile à déterminer ; mais, depuis la découverte de Black, des expériences ont été faites, à ce sujet, par plusieurs physiciens distingués pour leur habileté dans des recherches aussi délicates. La méthode adoptée par Black est simple et d'une application facile, mais peu susceptible d'exactitude. Quand un vase contenant de l'eau est placé sur le feu, le liquide s'échauffe graduellement jusqu'à ce que sa température atteigne 100° ; mais, arrivée à ce point, elle cesse de croître. L'eau est convertie en vapeur, et la chaleur n'élevant point la

¹ Une dénomination qui me semble convenable est celle de *chaleur de vaporisation*. M.

température, comme elle l'aurait fait si le vase eût été clos, nous devons en conclure que la chaleur, qui aurait été communiquée au liquide en vase clos se combine avec la chaleur dans le vase ouvert, sans élever sa température au-dessus de celle de l'eau bouillante. Pour estimer la quantité de chaleur qui est combinée avec la vapeur, le docteur Black plaçait de l'eau dans un vase d'étain sur une plaque de fer chauffée au rouge. La température de l'eau était d'abord de 10° ; en quatre minutes, l'eau commençait à bouillir, et en vingt minutes la vaporisation était complète. Pendant les quatre premières minutes, le liquide avait élevé sa température de 90° en tout, ou de $22^{\circ} \frac{1}{2}$ par minute. Si nous supposons une égale absorption de chaleur par minute, pendant toute la durée de l'ébullition, la chaleur qu'aurait reçue le liquide pour se convertir en vapeur aurait été de $22^{\circ} \frac{1}{2} \times 20 = 450^{\circ}$. Ces 450 degrés ne sont pas indiqués par le thermomètre; car la température de la vapeur est seulement de 100° : c'est ce que Black appelle *chaleur latente* ¹.

Mais le résultat est évidemment inexact, parce qu'il se forme de la vapeur pendant que l'eau s'échauffe jusqu'au point de l'ébullition, parce que le vase perd de la chaleur, par ses parois, en proportions inégales, et que l'effet du feu est pareillement inégal, devenant moindre à mesure que l'eau s'échauffe.

75. La chaleur nécessaire pour former la vapeur peut être déterminée avec plus d'exactitude en condensant la vapeur par le contact d'un liquide froid. La chaleur communiquée au liquide, par un poids donné de vapeur, indique la quantité additionnelle de la chaleur contenue dans la vapeur. Watt fit plusieurs expériences de ce genre en 1781; et celles qui lui inspiraient le plus de confiance donnaient 530° pour la chaleur constituante de la vapeur d'eau ².

Le comte de Rumford, M. Southern et le docteur Ure ont fait d'autres expériences d'après ce même plan ³.

¹ Doct. Thomson's *System of Chemistry*, vol. I, p. 101.

² Watt's *Notes*, ou Robinson's *Mechan. Phil.*, vol. II, p. 7.

³ Ce procédé a quelquefois conduit à des résultats erronés, par un défaut

L'eau peut être chauffée, dans le digesteur de Papin, jusqu'à 200°, et au delà, sans bouillir, parce que la compression empêche la formation ou le dégagement des vapeurs. Si, quand la température est de 205°, on enlève subitement le couvercle, une partie de l'eau s'échappe à l'état de vapeur; mais la plus grande partie conserve l'état liquide, et sa température s'abaisse immédiatement à 100°. Ainsi, 105° de chaleur ont soudainement disparu, et doivent avoir été entraînés par la vapeur. Maintenant, comme environ un cinquième de l'eau a été vaporisé, la vapeur formée doit contenir non-seulement les 105° qui lui sont pro-

d'attention, relativement au calcul. La quantité de chaleur étant mesurée par la chaleur spécifique de l'eau, soit P le poids d'eau employée à condenser la vapeur, et t sa température après la condensation, t' étant la quantité dont sa température s'est élevée. Soit aussi p le poids de la vapeur, et c sa chaleur spécifique, quand elle est condensée; soit enfin x la quantité totale de la chaleur requise pour la formation de cette vapeur.

Alors la quantité de chaleur communiquée à l'eau par la vapeur sera proportionnelle à son poids multiplié par son accroissement de température, ou à Pt' .

La vapeur condensée acquiert, après l'opération, la température t ; et comme sa quantité de chaleur était px avant la condensation, elle doit être cpt après: donc on aura

$$Pt' = px - cpt \quad \text{ou} \quad x = \frac{Pt'}{p} + ct$$

pour la quantité de chaleur qui forme le poids de vapeur p .

Si T est la température de la vapeur avant sa condensation, et c' sa chaleur spécifique, alors on aura

$$\frac{Pt'}{p} + ct - c'T$$

pour la chaleur qu'exige la conversion en vapeur. Cette quantité paraît, d'après les expériences, rester à peu près constante pour le même liquide.

Comme on suppose ordinairement égales les chaleurs spécifiques de poids égaux d'un liquide et de sa vapeur, la formule devient, plus simplement,

$$\frac{Pt'}{p} + c(t - T).$$

Pour l'eau, on a $c = 1$. Ainsi, dans ce cas, la chaleur latente est

$$\frac{Pt'}{p} + t - T.$$

pres, mais aussi les 105° perdus par chacun des quatre autres cinquièmes; elle renferme donc $105^{\circ} \times 5$ ou 525° de chaleur environ.

76. Les résultats des expériences du docteur Black ne diffèrent pas considérablement de ceux obtenus par Schmidt; car celui-ci trouve que la quantité de chaleur nécessaire pour la formation de la vapeur est de 5,33 fois celle qui élèverait un poids d'eau égal, de la température de la glace fondante à celle de l'eau bouillante, le baromètre étant à 76 centimètres ¹. C'est le mode le plus convenable pour exprimer cette quantité; car il y a lieu de croire que la chaleur spécifique de l'eau varie avec la température. Mais, pour réduire cette expression à la mesure ordinaire en degrés, il suffit de multiplier par le nombre de degrés compris entre la glace fondante et l'eau bouillante, ou 100° . Ainsi,

$$5,33 \times 100 = 533^{\circ}.$$

77. En 1803, M. Southern et M. W. Creighton ont fait, avec le plus grand soin, quelques expériences au moyen de la condensation de la vapeur engendrée à divers degrés de température et de pression. Le volume d'eau étant supposé 1 centimètre cube, le tableau suivant indique la pression, la température, la chaleur employée à la formation de la vapeur, ainsi que le volume de vapeur produit.

PRESSION en centimètres de mercure.	TEMPÉRATURE du thermomètre centigrade.	CHALEUR nécessaire pour former la vapeur.	RAPPORT du volume de la vapeur au volume de l'eau à 15° .	CE VOLUME calculé d'après la première expérience.
100	109 ^o	625	1208	1208
200	132	673	588	635
300	146	680	404	427

¹ Nicholson's *Philosophical Journal*, vol. V, p. 208, octavo series.

Si de la quantité totale de la chaleur on déduit la différence de température, on trouve 625° , 646° , 643° ; d'où il paraît que la chaleur nécessaire pour former la vapeur est à peu près constante quand la température est la même, quelle que soit la densité.

Toutefois, le mode le plus convenable pour exprimer la quantité de chaleur est celui adopté par M. Southern. Il consiste à évaluer la quantité constante de chaleur qu'il faut ajouter à la température actuelle de la vapeur pour composer la quantité totale de chaleur nécessaire à sa formation. Cette quantité est ici,

$$625^{\circ}-109^{\circ}=516^{\circ}, \quad 673^{\circ}-132^{\circ}=541^{\circ}, \quad 680^{\circ}-146^{\circ}=534^{\circ},$$

dont la moyenne est 530 .

Dans une autre série d'expériences, faites sous les mêmes pressions et aux mêmes températures, les quantités de chaleur ajoutées aux températures furent 523° , 523° et 528° ¹, dont la moyenne est 525° , et pour les deux séries d'expériences 528° . On avait eu égard à la chaleur communiquée au vase, ce qu'on n'avait pas fait dans la série précédente. Ces expériences sont précieuses, comme prouvant que la quantité de chaleur additionnelle pour former la vapeur est, sinon exactement, du moins à peu près constante ².

¹ Robison's *Mech. Phil.*, vol. II, p. 160-166.

² L'écart considérable de ces expériences, depuis 516° jusqu'à 541° , ne permet pas de compter beaucoup sur leur exactitude, d'autant qu'elles ne s'accordent pas avec les résultats plus précis que M. Clément a obtenus par d'autres expériences. Elles ne suffisent donc pas pour établir la conséquence tirée par M. Tredgold, que la *chaleur de vaporisation* d'un même fluide est constante pour toutes les températures. Loin de là, les expériences de M. Clément tendent à établir que cette chaleur décroît en raison inverse de la température d'ébullition; de sorte qu'elle peut diminuer jusqu'à devenir nulle.

Suivant ce chimiste, la chaleur de vaporisation de l'eau (prise à 100°) est de 550° , qui, joints à la chaleur sensible, donnent pour la chaleur totale de la vapeur 650° , le point de départ étant au 0° du thermomètre. Or, la loi générale trouvée par M. Clément est que *cette chaleur totale* (et non celle de vaporisation) *demeure constante dans tous les cas*, ou, en d'autres termes, qu'un poids donné de vapeur contient la même quantité de chaleur, à quelque tempéra-

78. Elles font voir aussi que le volume de la vapeur est *en raison inverse de la pression* quand la température ne change pas ; car l'on a $200 : 100 :: 1208 : 604$, et ce dernier nombre, augmenté de la dilatation due à la température, donnerait 635 environ ; on a aussi $300 : 100 :: 1208 : 402$, qui, avec la dilatation, donne 427. Ainsi, *la densité est en raison directe de la pression*, les expériences étant aussi précises qu'on puisse l'espérer dans des recherches aussi délicates.

79. Le comte de Rumford a obtenu un résultat plus élevé, et son habileté connue dans cette matière doit inspirer beaucoup de confiance en ses expériences. La chaleur était mesurée par la température communiquée à un vase de cuivre rempli d'eau, qu'il appelait *calorimètre*. Dans ce calorimètre, un mince serpentin de cuivre contenait la vapeur destinée à la condensation ; on évitait ainsi le mélange des fluides et la perte due au dégagement de la vapeur. L'eau contenue dans le calorimètre était à une température inférieure de 2 à 3° à celle de la chambre ; et quand le thermomètre du calorimètre annonçait un accroissement de température de 5 à 6°, on mettait fin à l'expérience.

ture et sous quelque pression qu'elle soit formée. D'après cette donnée, on peut former le tableau suivant, qui montre le décroissement successif de la chaleur de vaporisation.

TEMPÉRATURE de la vaporisation.	CHALEUR constituante totale de la vapeur.	CHALEUR de vaporisation.
0°	650°	650°
100	650	550
200	650	450
400	650	250
600	650	50
650	650	0

La loi adoptée par M. Tredgold suppose, au contraire, que les nombres de la troisième colonne sont constants et égaux à 528° environ. M.

L'eau produite par la condensation de la vapeur dans le serpentín était soigneusement pesée, et de sa quantité, aussi bien que de la chaleur communiquée au calorimètre, on déduisait la chaleur développée par la condensation de la vapeur.

Comme une petite partie de la chaleur communiquée au calorimètre était due au refroidissement de l'eau condensée dans le serpentín après la liquéfaction de la vapeur, il fallait tenir compte de cette circonstance. À cet effet, on supposait que l'eau, au moment de la condensation, était à la température de 100° ou de l'eau bouillante, et l'on déterminait, par le calcul, quelle partie de la chaleur communiquée au calorimètre devait provenir du refroidissement de cette eau à 100°.

En faisant ce calcul, le comte de Rumford remarque qu'on ne tenait pas compte de la variation de la capacité de l'eau pour la chaleur, eu égard à sa température, ce qui n'est qu'imparfaitement connu; et d'ailleurs la correction qui en serait résultée n'aurait pu être que très-petite.

Voici les détails et les résultats de deux expériences faites le 21 janvier 1812. La durée de chacune d'elles était de 10 à 11 minutes. On avait fait bouillir l'eau pendant quelque temps, pour la purger d'air, avant d'introduire la vapeur dans le serpentín du calorimètre ¹.

TEMPÉRATURE de la chambre.	ÉTAT DU CALORIMÈTRE dont la chaleur spécifique était équivalente à celle de 2780 grammes d'eau.			Quantité de vapeur condensée.	Chaleur nécessaire pour la conservat. de l'eau en vapeur.
	Température au commencem.	Température à la fin.	Élévation de température.		
16° centig.	13°,2	20°	6°,8	28 gram.	572°
16,8	14,2	20	5,8	24,40	580
				Moyenne	576

¹ *Philosophical Magazine*, vol. XLIII, p. 65.

En appliquant au résultat de la seconde expérience notre formule de la note (art. 75), nous aurons

$$\frac{2780 \times 5,8}{24,40} + 20 = 680;$$

d'où déduisant 100°, dans la supposition que la chaleur spécifique de la vapeur est égale à celle de l'eau, nous avons 580° pour la quantité constante de chaleur nécessaire à la formation de la vapeur d'eau.

80. Le comte de Rumford a aussi fait des expériences sur la quantité de chaleur développée par la condensation de la vapeur de l'alcool. Les résultats en sont moins réguliers que ceux des expériences faites sur l'eau, comme on eût dû s'y attendre; mais il y règne néanmoins assez d'uniformité pour donner, avec quelque certitude, la quantité de chaleur.

La vapeur qui dégage de l'alcool en ébullition varie un peu avec l'intensité du feu employé; c'est pourquoi le comte de Rumford notait la durée de chaque expérience, afin de pouvoir juger, par la comparaison de la quantité de vapeur condensée avec le temps employé à sa formation, quelle était l'intensité de la chaleur qui faisait bouillir le liquide. On trouvera, dans le tableau suivant, les détails et les résultats de cinq expériences faites, le même jour (21 janvier 1812), avec de l'alcool à divers degrés de pureté. La chaleur spécifique du calorimètre et de l'eau qu'il contenait était toujours égale à celle de 2780 grammes d'eau.

Pesanteur spécifique de l'alcool employé.	Durée de l'expérience.	Températ. de la chambre.	ÉTAT DU CALORIMÈTRE.		Accrois- sement.	Quantité de vapeur d'alcool condensée.	Chaleur nécessaire à la vaporisat.
			Températ. au commenc.	Températ. à la fin.			
0,81763	4 $\frac{1}{4}$ min.	16° cent.	13°3	19°1	5°8	57 gram.	266°7
0,84714	8	15,6	13	18,6	5,6	49	277,8
0,85342	7	16	12,4	20,3	7,9	74	277,5
0,85342	5	16	13,3	19	5,7	52	264,9
0,85342	6 $\frac{1}{2}$	17,7	14	22	8	71	277,6
Moyenne							272,9

En déterminant, par le calcul, la quantité d'eau qui peut être échauffée d'un degré par la chaleur développée dans la condensation de la vapeur, le comte de Rumford eut égard à la différence de capacité pour la chaleur qui existe entre l'eau et l'alcool ¹.

Le résultat de son calcul est à peu près le même que celui donné par la formule (art. 75, note), en supposant que la chaleur spécifique de l'alcool gazeux et liquide soit la même et égale à 0,58. En partant de la seconde expérience, nous aurons

$$\frac{2780 \times 5,6}{49} + 0,58 \times 18,6 = 328;$$

d'où, déduisant $80 \times 0,58$ pour la chaleur due à la température de la vapeur, nous avons 282 environ pour la chaleur employée à la conversion du liquide en vapeur. Rumford trouve 277°,8.

Le même physicien s'est aussi assuré que la chaleur développée

¹ *Philosophical Magazine*, vol. XLIII, p. 67.

par la condensation de la vapeur d'éther sulfurique est environ la moitié de celle fournie par l'alcool, ou le quart de celle que donne la vapeur d'eau.

81. En 1817, le docteur Ure a fait quelques expériences sur différents corps, relativement à la chaleur absorbée pendant la formation des vapeurs¹. Sa manière de procéder était extrêmement simple. L'appareil consiste dans une cornue de verre de très-petite dimension, à col très-court, qui s'insère dans un récipient sphérique de verre très-mince et d'environ 8 centimètres de diamètre. Ce récipient est solidement fixé dans un bassin de verre contenant 210 gram. d'eau à une température connue; 15 gram. du liquide dont on voulait étudier la vapeur étaient introduits dans la cornue et rapidement distillés dans le récipient par la chaleur d'une lampe d'Argent. La température de l'air était de 7° centigrades, celle de l'eau dans le bassin, de 5 à 6°, et l'accroissement de température occasionné par la condensation de la vapeur n'excédait jamais celle de l'air de plus de 2°. Comme la communication de la chaleur est très-lente entre les corps dont la température diffère peu, l'air ne pouvait exercer aucune influence sensible sur l'eau du bassin pendant la durée de l'expérience, qui était toujours terminée en cinq ou six minutes. Un thermomètre très-délicat était continuellement plongé dans l'eau, et l'on y lisait, à l'aide d'une lentille, jusqu'aux petites fractions de degré.

La distillation s'effectuait très-prompement, et le docteur Ure assure avoir trouvé une grande concordance en répétant plusieurs fois la même expérience. Le tableau suivant donne le résultat moyen; la dernière colonne a été calculée par la formule de l'article 75.

¹ *Transactions philosophiques* pour 1818.

LIQUIDES.	PESANTEUR spécifique.	TEMPÉRATURE de l'eau dans le bassin.			Degré de l'ébullit.	Chaleur pour conversion en vapeur.
		au commenc.	à la fin.	Accroisse- ment.		
Eau.	1,000	5°,8 cent.	9°,4	3°,6	100°	521°,4
Alcool.	0,825	5,5	6,61	1,11	80	236
Éther sulfurique	0,7	5,5	6,6	1,1	44,4	168
Huile de téré- benthine. . .	0,888	5,5	6,4	0,9	158	81
Pétrole.	0,75	5,8	6,6	0,8	152	83,3
Acide nitrique. .	1,494	5,5	7,5	2	74	287,2
Ammoniaque. . .	0,978	5,5	8,6	3,1	60	466,6
Vinaigre.	1,007	5,8	9,2	3,4		483,3

Le docteur Ure n'a pas donné la quantité d'eau dont la chaleur spécifique équivaut à la chaleur absorbée par les vases; mais nous nous écarterons peu de la vérité en la supposant de 110 grammes environ. Ainsi, nous avons

$$2100 + 110 = 2210 \text{ grammes}$$

pour l'eau équivalente à la chaleur spécifique du réfrigérant; et, par la formule citée, on trouve,

$$\text{pour l'eau, } \frac{2210 \times 5,6}{13} + 9°,4 - 100 = 521°,4,$$

$$\text{et pour l'alcool, } \frac{2210 \times 1,11}{13} + 0,65 (80 - 6°,61) = 256.$$

Si l'on calcule de la même manière pour les autres liquides, on trouvera les nombres rapportés dans la dernière colonne, en prenant les chaleurs spécifiques dans les tables usuelles. Par une méprise de calcul, les nombres donnés par le docteur Ure, dans les *Transactions philosophiques*, sont erronés.

82. On doit faire une dernière correction pour la quantité de vapeur qui reste dans la cornue et pour la perte de chaleur qui a lieu dans l'opération. Par une correction récente, relative à la perte de chaleur, le docteur Ure évalue à 555° la chaleur absorbée pendant la conversion de l'eau en vapeur ; et comme je regarde les expériences du comte de Rumford à ce sujet comme les plus soignées, je suis porté à croire que ce nombre est à peu près exact. Si nous supposons la perte provenant de ces deux causes équivalente à la chaleur spécifique de 130 grammes d'eau de plus, nous aurons

$$\frac{2540 \times 3,6}{12} + 9,4 - 100 = 557,4 ;$$

en corrigeant les autres nombres de la même manière, nous formerons le tableau suivant ¹.

CHALEUR NÉCESSAIRE pour la formation de la vapeur.	A POIDS égal.	A VOLUME égal.
Eau.	557 ^o ,4	557 ^o ,4
Alcool.	253	208,3
Éther sulfurique.	178	126,1
Huile de térébenthine.	89,4	74,4
Pétrole.	81,6	69
Acide nitrique.	306,6	461
Ammoniaque.	497,2	486
Vinaigre.	516,6	520

Ayant exposé les résultats les plus certains, connus jusqu'ici, sur la chaleur requise pour la production des vapeurs, notre objet immédiat doit être de leur donner une forme plus directement utile pour le but de cet ouvrage ; car la quantité de chaleur

¹ *Dictionnaire de Chimie* du docteur Ure, art. *Calorique*.

ne peut être d'aucune utilité si l'on ne connaît aussi le volume occupé par cette vapeur, ainsi que la force élastique.

De la force élastique de la vapeur.

83. Pour obtenir la loi qui détermine la force de la vapeur à une température donnée, ou la température correspondante à une force donnée, nous devons procéder empiriquement, d'après les résultats des meilleures expériences. Cette méthode n'est pas la plus satisfaisante, mais c'est la seule que nous puissions employer quand les causes réelles de la variation nous sont inconnues; cependant, quelques raisonnements préliminaires peuvent nous faciliter la découverte de la loi.

En premier lieu, il est probable que l'exposant de la puissance de la température qui représente la force élastique dans la nature doit être un nombre simple. Ainsi, l'exposant 5,13, employé par M. Southern ¹, n'est point probablement celui de la véritable loi; l'exposant 6, de M. Creighton ², ou celui du docteur Young ³, qui est 7, sont, l'une ou l'autre; plus vraisemblables. La véritable fonction peut être très-composée, mais cela n'est point probable; et, dans l'ignorance où nous sommes de sa nature, si nous pouvons représenter les résultats par un seul exposant, avec une exactitude suffisante pour les usages pratiques, nous devons préférer la forme la plus simple, surtout quand elle est aussi vraisemblable qu'une forme plus compliquée. Dans toute tentative pour trouver l'exposant par la méthode ordinaire des différences, les erreurs de l'expérience auraient une trop grande influence.

84. En second lieu, il paraît probable qu'il y a un degré de froid auquel la vapeur ne peut exister ⁴; et ce cas doit avoir lieu

¹ Robison's *Mechanical philosophy*, vol. II, p. 172.

² *Philosophical Magazine*, vol. LIII, p. 266.

³ *Natural philosophy*, vol. II, p. 400.

⁴ Un mémoire intéressant sur ce sujet, publié par M. Faraday, rend également probable que la limite est différente pour différentes vapeurs. Ma formule m'a conduit à la même conclusion; ainsi, elle possède une autre propriété, que confirme l'expérience (Voy. *Philosophical Magazine*, vol. LXVII, p. 344).

quand elle est condensée par le froid, au point que l'attraction des molécules excède la force répulsive du calorique interposé entre elles : le changement d'un fluide élastique en solide peut alors s'effectuer sans le passage intermédiaire par l'état liquide. Cette circonstance physique nous permet de fixer un autre élément du calcul ; car il doit y avoir une température où la force est nulle.

85. Troisièmement, nous devons considérer maintenant la plus grande force possible de la vapeur ; car nous sommes certains que notre formule serait erronée si elle excédait cette limite. Supposons une quantité donnée d'eau, un centimètre cube, par exemple, renfermée dans un vase clos, qu'elle remplit exactement, et que, dans cet état, elle soit exposée à une haute température : alors le volume dilaté est à la quantité dont il a crû par la dilatation, sans changement d'état, comme le module de l'élasticité de l'eau à cette température est à la force de la vapeur de même densité que l'eau. Si notre règle donnait pour la vapeur une plus grande force que celle déterminée par cette proportion, à la même température et à la même densité, elle serait erronée. Avec ces limitations, nous avons beaucoup de moyens de nous garantir de l'erreur, et nous devons maintenant passer à l'exposition de la méthode.

86. Soit f la force élastique de la vapeur, en centimètres de mercure, et t la température correspondante ; soit aussi a la température pour laquelle la force élastique est 0. Considérons f comme l'abscisse, et $t + a$ comme l'ordonnée d'une courbe, dont l'équation soit

$$A^n f = (t + a)^n ;$$

nous aurons pour le coefficient constant

$$A^n = \frac{(t + a)^n}{f}.$$

Que l'abscisse devienne f' , et l'ordonnée $t' + a$, alors

$$\frac{(t + a)^n}{f} = \frac{(t' + a)^n}{f'}$$

d'où, en prenant les logarithmes, nous tirerons, pour la valeur de n ,

$$n = \frac{\log f' - \log f}{\log (t' + a) - \log (t + a)}.$$

Maintenant, si ces points sont voisins d'une des extrémités de la série des expériences, et qu'on considère de même deux autres points voisins de l'autre extrémité, on aura aussi

$$n = \frac{\log f'' - \log f'}{\log (t'' + a) - \log (t' + a)};$$

et par conséquent, en égalant les deux valeurs de n ,

$$\frac{\log f'' - \log f'}{\log f' - \log f} = \frac{\log (t'' + a) - \log (t' + a)}{\log (t' + a) - \log (t + a)}.$$

De quatre résultats des expériences de M. Southern sur la vapeur d'eau, on déduit que $a = 73$ satisfait aux conditions; et cette valeur de a , étant insérée dans la formule, donne

$$n = 6 \text{ et } A = 84,$$

dont le logarithme est 1,92428. Ainsi, pour l'eau, on a

$$f = \left(\frac{t + 73}{84} \right)^6, \text{ ou } t = 84 \times f^{\frac{1}{6}} - 73,$$

† Cette formule, en mesures anglaises, est

$$f = \left(\frac{t + 100}{177} \right)^6, \text{ ou } t = 177f^{\frac{1}{6}} - 100.$$

Quoique la formule du texte en ait été déduite par une transformation immédiate, je trouve cependant qu'elle s'accorde moins avec les expériences que la suivante, dont les constantes ont été tirées directement des observations exprimées en mesures métriques, et qui paraît, sous ce rapport, devoir être préférée.

$$f = \left(\frac{t + 75}{85} \right)^6, \text{ ou } t = 85f^{\frac{1}{6}} - 75,$$

et en logarithmes,

$$\begin{aligned} \log f &= 6 [\log (t + 75) - \log 85], \\ \log (t + 75) &= \frac{1}{6} \log f + 1.92942. \end{aligned}$$

M

et en logarithmes ,

$$\log f = 6 [\log (t + 73) - 1,92428].$$

87. Si la dilatation de l'eau renfermée, quand sa température s'élève à 620°, est 0,9672 de son volume, la force nécessaire pour la ramener à son volume à 15°, quand elle est exposée à la température 620° (le module de l'eau étant 22,100 atmosphères à 15°), serait environ de 6936 atmosphères ¹.

Notre formule donne pour la force de la vapeur à cette température et à cette densité 4148 atmosphères, et, dans l'incertitude sur la dilatation de l'eau à une température aussi élevée, ainsi

¹ La force expansive de la chaleur et le décroissement du module de l'élasticité doivent être dans la même proportion; il est très-probable que l'un et l'autre varient comme le carré de la distance des molécules, et, par conséquent, comme la puissance $\frac{2}{3}$ du volume. Ainsi, soit d la dilatation, et m le module; en prenant pour unité le volume primitif, on doit avoir

$$\frac{m}{(1 + d)^{\frac{2}{3}}}$$

pour le module à dilatation d : conséquemment, par l'article 85, on aura la proportion

$$1 + d : d :: \frac{m}{(1 + d)^{\frac{2}{3}}} : \frac{me}{(1 + d)^{\frac{5}{3}}},$$

dont le quatrième terme exprime la force de compression capable de retenir le fluide dans sa densité initiale.

La dilatation varie comme la force expansive de la chaleur et comme la température, par conséquent, comme la puissance $\frac{5}{3}$ de la température; elle doit être 0, à 4°,5 (ou à 40° du thermomètre de Fahrenheit), qui est la température⁶ du *maximum* de densité de l'eau: donc

$$e = A (t - 4,5)^{\frac{5}{3}};$$

et comme de 4°,5 à 100° elle doit être, d'après l'expérience, de 0,04533, nous avons

$$\log e = \frac{5}{3} \log (t - 4,5) - 4,66322,$$

et en degrés Fahrenheit ,

$$\log d = \frac{5}{3} \log (t - 40) - 5,08909.$$

Le tableau suivant fait voir l'accord de la formule avec l'expérience.

que sur le décroissement de son module, il est plus prudent de rester au-dessous de la limite que de la dépasser; mais, à la température de 620° ou environ, la règle cesserait d'être d'aucun usage, parce qu'alors elle donne simplement le pouvoir expansif de l'eau comprimée, et ce pouvoir varie comme la quantité dont l'eau se dilate par un changement donné de température.

Ayant ainsi expliqué les méthodes par lesquelles on a obtenu les règles, il ne nous reste qu'à leur donner la forme la plus simple pour l'usage, et à en éclaircir l'application par quelques exemples.

88. RÈGLE I. Trouver la force de la vapeur d'eau en centimètres de mercure, la température étant donnée en degrés du thermomètre centigrade.

Ajoutez 73 à la température, et divisez la somme par 84; la sixième puissance du quotient sera la force cherchée en centimètres.

TEMPÉRATURE		DILATATION par la formule.	DILATATION par l'expérience.
Centésimale.	Fahrenheit.		
4,5	40°	0,00	0,00
18	64,4	0,00166	0,00145
40	104	0,00833	0,00825
100	212	0,04333	0,04333
200	392	1,463	
400	752	0,4627	
600	1148	0,9672	
622,5	1170,5	1,0000	

De l'expression de la force donnée ci-dessus, nous tirons pour la température 620° (1148 Fahrenheit),

$$\frac{me}{(1 - d)^{\frac{5}{3}}} = \frac{22100 \times 0,9672}{(1,9672)^{\frac{5}{3}}} = 6956 \text{ atmosphères}$$

Exemple. Trouver la force de la vapeur à la température de 155°.

$$\frac{155 + 73}{84} = 2,7142,$$

qui, élevé à la sixième puissance, donne 400 centimèt. pour la force de la vapeur en centimètres de mercure.

Par logarithmes. Ajoutez 73 à la température, et du logarithme de cette somme, ôtez 1,92428; six fois la différence sera le logarithme de la force cherchée en centimètres de mercure.

Exemple. Trouver la force de la vapeur à la température de 121°.

Log. (121 + 73 = 194) =	2,28780
Otant le logarithme constant	1,92428
	0,36352
Multipliant par	6
On obtient	2,18112,

qui est le logarithme de 152 centimètres, correspondant à 2 atmosphères.

89. RÈGLE II. La force de la vapeur étant donnée, trouver sa température. Multipliez par 84 la racine sixième de la force en centimètres de mercure, et ôtez 73 du produit; le reste sera la température cherchée en degrés centigrades.

Exemple. Soit la force de la vapeur 8 atmosphères, équivalant à 608 centimèt. de mercure, trouver sa température.

La racine sixième de 608 peut être aisément calculée par une table des carrés et des cubes, en prenant d'abord la racine carrée, et ensuite la racine cubique de cette racine carrée. On trouve ainsi 2,911; d'où $2,911 \times 84 - 73 = 171,5$. M. Southern a obtenu, par l'expérience, 173°,1.

Par logarithmes. Au sixième du logarithme de la force ajoutez 1,92428; la somme est le logarithme de la température, augmentée de 73.

Exemple. Soit la force de la vapeur égale à 152 centimèt. de mercure, ce qui est environ 1 kilogramme par centimètre carré au-dessus de la pression de l'atmosphère, trouver la température.

Log. 152 =	2,18184
dont le sixième est	0,56564
Ajoutant le logarithme constant	<u>1,92428</u>
on trouve	2,28792,

qui est le logarithme de 194; d'où ôtant 75; on a 121° pour la température. M. Southern, par l'expérience, a trouvé 121°,5.

90. Quand on emploie l'eau de mer, comme elle bout à une température différente, la force de la vapeur n'est plus la même. La correction qui en résulte, dans les règles, se fait aisément, en trouvant le nombre constant qui correspond à une force de 76 centimètres de mercure, au point d'ébullition à différents degrés de saturation de l'eau par les sels. Quelques-uns des mécaniciens qui s'occupent de machines pour bateaux ne croient pas encore qu'il y ait de différence entre la température de la vapeur de l'eau commune et celle de l'eau de mer, par une même pression. Je ferai voir ailleurs (section IV) l'effet de cette circonstance sur la force des machines à vapeur; mais notre objet présent est de déterminer la pression de la vapeur. James Watt est la seule personne qui ait fait quelques expériences sur la vapeur de l'eau salée; elles sont de l'année 1774¹. Il ne les donne pas pour très-exactes; mais elles suffisent pour établir le fait d'une différence, et M. Faraday a eu dernièrement occasion de s'en assurer lui-même par diverses expériences².

91. Le tableau suivant donne le point d'ébullition de l'eau contenant en dissolution différents sels.

¹ Robison's *Mechanical Philosophy*, vol. II, p. 34.

² Voyez le *Quarterly Journal of Science*, vol. XIV, p. 440

NOMS DES SELS.	POIDS du sel sec contenu dans 100 parties de la dissolution.	POINT d'ébullition.	AUTEURS de l'expérience.
Acétate de soude.	60	124,04 centig.	Griffiths ¹ .
Nitrate de soude.	60	119,0	<i>Idem.</i>
Sel commun.	37	107,7	Tredgold.
Muriate de soude.	30	106,6	Griffiths.
<i>Idem.</i>	»	105,7	Achard ² .
Sulfate de magnésie.	57,5	105,5	Griffiths.
Sulfate de chaux.	45	104,4	<i>Idem.</i>
Alun.	52	104,4	<i>Idem.</i>
Sulfate de fer.	64	102,2	<i>Idem.</i>
Sulfate de soude.	31,5	100,5	<i>Idem.</i>
<i>Idem.</i>	»	103,0	Achard.

92. Suivant l'analyse du docteur John Murray, 10000 parties d'eau de mer, de la pesanteur spécifique de 1,029 ³, contiennent :

Muriate de soude	220,01	=	$\frac{1}{46}$
Sulfate de soude	33,16	=	$\frac{1}{302}$
Muriate de magnésie	42,08	=	$\frac{1}{238}$
Muriate de chaux.	7,84	=	$\frac{1}{1276}$
	303,09	=	$\frac{1}{33}$

Ainsi, une partie d'eau de mer contient 0,030309 de différents sels, ou $\frac{1}{33}$ environ de son poids.

93. Comme les sels ne se dégagent pas avec la vapeur, l'eau, dans une chaudière remplie d'eau de mer, se sature graduellement de plus en plus, et, après un certain temps, elle commence à déposer du sel, si les moyens inventés pour prévenir cet effet n'ont pas été employés (*voyez* la sect. III) : mais, lors même qu'ils

¹ *Quarterly Journal of Science*, vol. XVIII, p. 90.

² Thomson's *Chemistry*, vol. II, p. 14.

³ *Philosophical Magazine*.

l'auraient été, on doit tenir compte d'un certain degré de saturation. Le tableau suivant, avec les nombres constants pour différents degrés de saturation, éclaircira cette matière. Le point d'ébullition de l'eau paraît croître d'un degré par chaque addition de 4,5 parties à la proportion du sel commun contenu dans 100 parties d'eau : au moins, cette loi régulière ne diffère pas sensiblement des résultats moyens de mes expériences, qui ont été faites avec beaucoup de soin ; mais il est difficile de tenir compte du degré de saturation, qui varie continuellement pendant la durée de l'expérience. »

POIDS du sel contenu dans 100 parties d'eau.	TEMPÉRATURE d'ébullition.	NOMBRE constant.	LOGARITHME constant.
Solution saturée. 36,37 = $\frac{1,2}{3,3}$	108,00	88	1,94448
33,34 = $\frac{1,5}{3,3}$	107,2	87,6	1,94250
30,3 = $\frac{1,8}{3,3}$	106,5	87,2	1,94052
27,28 = $\frac{2,1}{3,3}$	105,8	86,9	1,93902
24,25 = $\frac{2,4}{3,3}$	105,2	86,6	1,93752
21,22 = $\frac{2,7}{3,3}$	104,6	86,3	1,93601
18,18 = $\frac{3,0}{3,3}$	104,0	86	1,93450
15,15 = $\frac{3,3}{3,3}$	103,3	85,6	1,93247
12,12 = $\frac{3,6}{3,3}$	102,6	85,3	1,93095
9,09 = $\frac{3,9}{3,3}$	102,0	85,0	1,92942
6,06 = $\frac{4,2}{3,3}$	101,3	84,6	1,92737
Eau de mer. 3,03 = $\frac{4,5}{3,3}$	100,6	84,3	1,92583
Eau pure. 0	100	84	1,92428

94. Comparons maintenant la formule avec l'expérience, et commençons par les expériences de Watt sur l'eau salée. L'eau était presque saturée de sel ; elle était plus privée d'air que l'eau commune, mais on en séparait difficilement celui qu'elle contenait encore.

Le tableau suivant montre les résultats comparés avec ce que donne la formule pour l'eau salée.

Expériences de Watt sur la vapeur de l'eau salée.

TEMPÉRATURE.	FORCE EN CENTIMÈTRES DE MERCURE	
	Par les observations de Watt.	Par la formule pour la solution saturée.
7 ^o ,7 centig.	0,025	0,06
29,4	1,47	2,5
45	4,3	5,9
60	9,0	11,8
73,3	15,9	19,6
76	20,5	24,0
82,2	27,5	30,5
86,1	32,0	33,0
90,8	39,0	42,5
94,1	43,5	47,5
97,2	49	53,0
98,1	55,5	56,0
100	58	58,3
102	62,5	63
103,3	65	66
104,4	67,2	68

Dans ces expériences, comme dans toutes celles qu'on a faites anciennement sur la force de la vapeur, la force pour les basses températures est moindre qu'elle ne doit être.

Les expériences de Watt sur l'eau pure offrent une semblable discordance, comme on peut le voir dans le tableau suivant, formé de résultats pris au hasard dans ses séries d'expériences ¹.

¹ *Physique mécanique* de Robison, vol. II, p. 32-34

TEMPÉRATURE.		FORCE DE LA VAPEUR			
		D'APRÈS L'EXPÉRIENCE.		D'APRÈS LA FORMULE.	
Fahrenheit.	Centésim.	En pouces.	Centimètr.	En pouces.	Centimètr.
55°	12,8	0,15	0,38	0,45	1,24
118	47,8	2,68	6,8	3,59	9,1
180	82,2	14,73	37,5	15,67	39,8
225	107,2	37	94,0	33,32	97,3
240	115,5	49	124	50,24	127,6
261	127,2	68	172	72,00	182,0
272,5	133,6	82	208	86,89	220,7

L'explication proposée par Watt lui-même ne suffit pas pour rendre compte de cette différence, excepté dans les plus basses températures.

Il suppose que l'échelle du baromètre stationnaire doit avoir été placée 0,5 millimètre trop bas, d'où résulterait la nécessité d'une addition pareille aux forces rapportées dans le tableau précédent pour l'eau salée. Quoi qu'il en soit, ces tableaux d'expériences ne sont pas choisis comme étant d'une exactitude suffisante, mais seulement pour mettre en évidence ce fait important, que la force de la vapeur d'eau dépend de la température du liquide qui la produit, ou avec lequel elle est en contact. Elles sont, pour cela, suffisamment exactes, et c'est une circonstance qui affecte la force élastique, soit dans la chaudière, soit dans le condenseur, ce qui intéresse particulièrement ceux qui s'occupent de machines pour les bateaux à vapeur. Les températures n'étant pas les mêmes, la comparaison n'est pas aussi facile; mais à 80°,2 (180°, F.), la force de la vapeur de l'eau salée est de 27,5 centimètres (10,85 pouc.), et 37,5 centimètres (14,730 pouces) pour l'eau pure : à 100° (212° F.), elle est de 57,8 centimètres

(22,74 pouces) pour l'eau de mer, et de 75 centimètres (29,56 pouces) pour l'eau pure.

95. Les expériences faites par le professeur Robison ont été conduites de la même manière. Comme la même méthode a été employée par Bétancourt, dont les résultats s'accordent extrêmement avec ceux de Robison, il peut être utile de la décrire.

Appareil du professeur Robison pour déterminer la force de la vapeur. Cet appareil, dans les premières expériences, consistait en un petit digesteur de cuivre ABCD (fig. 4, pl. II), portant à son sommet un thermomètre plongé jusqu'au centre, et une soupape chargée en V, avec un troisième orifice pour l'insertion d'un tube de baromètre SGF, destiné à mesurer la force de la vapeur aux températures inférieures à celle de l'eau bouillante. A des températures plus élevées, la force était mesurée par une romaine sur la soupape, et le tube SGF était remplacé par un bouchon; mais, de cette manière, les résultats étaient irréguliers et peu satisfaisants. Pour y remédier, on adaptait au digesteur le tube de verre MNK, ayant en L un renflement pour le mercure; et la force, au lieu d'être mesurée par la soupape, l'était par l'ascension du mercure dans le tube MN. Le digesteur était chauffé par une lampe.

Pour déterminer la pression aux températures inférieures au point d'ébullition de l'eau, le tube SGF était placé comme dans la figure, et une cuvette de mercure disposée en F. La lampe commençant à agir, l'eau du digesteur produisait de la vapeur, jusqu'à ce que celle-ci s'échappât par la soupape et par le tuyau F, de façon à chasser l'air. La lampe étant alors enlevée, et la soupape, ainsi que le tube, étant fermés (celui-ci par l'immersion dans le mercure en F), le mercure s'élevait dans le tuyau GF à mesure que l'appareil se refroidissait, et l'on notait les hauteurs correspondantes aux différentes températures. On faisait des observations semblables quand on réchauffait l'appareil.

Pour estimer la force élastique à de plus hautes températures, on insérait en E l'extrémité K du tube MNK, et à mesure que la température croissait, la pression de la vapeur dans le renfle-

ment L déterminait l'ascension du mercure, et donnait ainsi le moyen de mesurer l'élasticité de la vapeur.

L'objection qu'on peut faire contre ce mode d'expérience, c'est que la température du mercure doit changer continuellement pendant la durée de l'observation, et par conséquent occasionner à sa surface, tantôt une condensation, tantôt une production de vapeur. À chaque observation, la température devrait être la même dans toute l'étendue de l'appareil, et par conséquent la colonne indiquant les pressions doit être réduite à la température moyenne. La seule observation dans laquelle on ait tenu compte de ces circonstances paraît être celle où le thermomètre marquait $5^{\circ},56$; alors la colonne dans le siphon était à $75,45$ centimètres, et le baromètre marquait $75,8$. La différence est la force de la vapeur à $5^{\circ},56$, c'est-à-dire $0^{\circ},35$. En abaissant la température jusqu'à 0° , la force n'était pas sensiblement différente; et nous savons, par les dernières expériences, que ce résultat est à très-peu près exact. Toutefois, le professeur Robison paraît avoir cru que la force de la vapeur doit être 0 à la température de la glace fondante ¹.

¹ *Mechanical Philosophy*, vol. II, p. 54.

Expériences de Robison sur la force de la vapeur.

TEMPÉRATURE DE LA VAPEUR.	FORCE DE LA VAPEUR EN CENTIMÈTRES DE MERCURE	
	Par les observations de Robison.	Par la formule.
0° centigr.	0,00	0,43
4,4	0,25	0,62
10	0,51	0,94
15,5	0,89	1,40
21	1,40	1,98
26,7	2,08	2,83
32,2	3,0	3,92
37,8	4,0	5,2
43,3	5,7	7,1
48,9	7,6	9,4
54,4	10,0	12,2
60,0	13,0	15,8
65,5	17,1	20,0
71,1	22,0	25,5
76,7	28,0	32,0
82,2	35,6	40,2
87,8	48,8	49,2
93,3	57,5	60,2
98,9	73,0	73,3
103,4	91,0	88,7
110,0	111,0	106,0
115,5	139,0	128,0
121,1	170,0	151,0
126,7	204,0	180,0
132,2	239,0	212,0
137,8	269,0	248,0

Si la force élastique 0,35, qui sert de point de départ à Robison, eût été ajoutée à tous les résultats des expériences au-dessous de la température 100°, comme elle aurait dû l'être, ils se seraient écartés de très-peu de ceux des dernières expériences entreprises sur ce sujet. Celles de M. Achard s'éloignent rarement de plus d'un demi-degré ou d'un degré des nombres rapportés dans le tableau ci-dessus.

96. Les recherches de Dalton furent conduites sur un plan différent. Il prit un tube de baromètre parfaitement desséché, et l'emplit de mercure (purgé d'air par l'ébullition), en marquant

le point où il demeurerait stationnaire ; alors il divisa le tube en pouces et dixièmes de pouces au moyen d'une lime. Il plaça dans le tube une petite quantité d'eau (ou de tout autre liquide sujet de l'expérience), de manière à humecter seulement les parois ; après cela, il renversa le tube dans le mercure, en le retournant soigneusement, afin de chasser tout l'air. Le baromètre étant fixé, une portion du liquide, environ un huitième ou un dixième de pouce, s'élevait au sommet de la colonne de mercure le long des parois du tube. Il prit alors un autre tube cylindrique de verre, ouvert aux deux extrémités, de 2 pouces de diamètre et 14 pouces de long ; à l'un et à l'autre bout de ce tube était adapté un bouchon, percé au milieu, pour admettre le tube barométrique à frottement rude. Le bouchon supérieur était fixé à 2 ou 3 pouces au-dessous du sommet du tube, et à demi coupé, pour laisser passer le liquide, son objet étant simplement d'assujettir le tube. Les choses étant ainsi disposées, l'eau, à une certaine température, pouvait être versée dans le grand tube, de manière à entourer la partie supérieure du vide du baromètre. L'effet de la température sur la production de la vapeur intérieure pouvait être apprécié par la dépression de la colonne de mercure. De cette manière, Dalton versa de l'eau échauffée jusqu'à 70° (158° F.) ; mais comme une plus haute température pouvait endommager un appareil de verre, il employa l'appareil suivant pour les températures plus élevées.

Ayant pris un tube d'étain de 4 pouces de diamètre et de 2 pieds de long, à une extrémité duquel était soudée une plaque circulaire du même métal, portant à son centre un tube rond, semblable à celui d'un télescope à réflexion, il souda dans l'axe de ce tube un autre tube plus petit, de même longueur et ouvert par les deux bouts. Par cette construction, l'eau pouvait être versée dans le grand tube, de façon à le remplir, tandis que le tube intérieur était exposé à sa température. Dans ce tube central, Dalton insérait ensuite la moitié supérieure d'un baromètre à siphon, qu'il fixait par un bouchon, le sommet du petit tube étant également bouché. On pouvait ainsi estimer l'effet d'une température supérieure à 100°, la dépression de la colonne de

mercure étant connue par l'ascension dans la partie extérieure du siphon. Dalton remarque d'ailleurs que la force de la vapeur d'eau entre 25° et 100° peut aussi être déterminée au moyen d'une machine pneumatique; et les résultats de ce nouveau genre d'expériences s'accordent très-bien avec ceux obtenus par le procédé qui vient d'être décrit. Qu'on prenne un flacon à demi rempli d'eau chaude, et dans lequel plonge la boule d'un thermomètre; que l'on couvre le tout d'un récipient sur un des plateaux de la machine, et qu'on place sur l'autre un manomètre: l'air étant lentement enlevé, et notant l'état du manomètre et du thermomètre au moment où l'ébullition commence, la hauteur du premier indiquera la force de la vapeur de l'eau à la température observée. La même méthode peut être employée pour d'autres liquides. Il est à propos d'observer que les différents thermomètres employés dans ces expériences étaient exactement ramenés à un même modèle.

Après avoir répété ses expériences par ces diverses méthodes, Dalton, par une comparaison scrupuleuse des résultats obtenus, put construire une table de la force de la vapeur d'eau à toutes les températures, depuis la glace fondante jusqu'à l'eau bouillante¹. Nous ne prendrons dans cette table que les résultats d'expérience, en les comparant avec ceux fournis par notre formule.

¹ *Journal Philosophique* de Nicholson, vol. VI, p. 263.

Expériences de Dalton sur la force de la vapeur.

TEMPÉRATURE DE LA VAPEUR.	FORCE EN CENTIMÈTRES DE MERCURE	
	Par les observations de Dalton.	Par la formule.
	0° centigr.	0,51	0,46
6,25	0,75	0,71
12,45	1,10	1,12
18,75	1,6	1,71
25	2,3	2,54
31,25	3,25	3,68
37,5	4,6	5,2
43,75	6,4	7,2
50	8,85	9,9
56,25	12,1	13,3
62,5	16,4	17,6
68,75	21,6	23,1
75	28,6	29,7
81,25	37,0	38,2
87,5	47,7	48,6
93,75	61,0	61,2
100	76,2	76,2

De ces résultats, Dalton déduisit le rapport correspondant à chaque intervalle, et calcula les degrés intermédiaires par interpolation, en considérant la force comme croissant en progression géométrique. A cette époque, Dalton ne fit point d'expériences au-dessus de 100°, quoiqu'il étendit sa table jusqu'à 165°; depuis, elle a été trouvée défectueuse pour les températures au-dessus de 100°.

97. Plus tard, Dalton examina de nouveau ce sujet, et conclut, de divers essais, que la force de la vapeur à 0° ne peut être au-dessous de 0,5 centimètre, et qu'elle est probablement de 0,65 mais après avoir vu les résultats obtenus par le docteur Ure et par

M. Southern, et avoir fait lui-même de nouvelles expériences pour les températures entre 100° et 150°, il a donné le tableau suivant, construit d'après ce qu'il regarde comme les expériences les plus exactes qu'on ait entreprises sur ce sujet ¹.

TEMPÉRATURE DE LA VAPEUR.	FORCE EN CENTIMÈTRES DE MERCURE.	
	Nombre de Dalton.	Par la formule.
20,2 centigr.	0,73	0,51
17,7	1,91	1,60
35,5	4,95	4,67
55,5	12,88	12,88
78,3	33,5	34,2
104,4	81,0	88,4
133,3	226	219
171,1	587	660

Il paraît, d'après cela, qu'il y a une plus grande différence entre les résultats des diverses expériences qu'entre ces résultats et ceux que donne notre formule; ce qui doit la faire présumer d'une exactitude très-approchée.

98. Pour l'entière satisfaction du lecteur, nous devons rapporter les principaux résultats des expériences du docteur Ure, et décrire son simple et élégant appareil, qui peut être utilement adopté pour toute autre espèce de fluide ².

La figure 5, planche II, représente un appareil employé pour les températures inférieures ou peu supérieures au point d'ébullition. Dans les figures 6 et 7, on voit ceux employés pour les températures plus élevées; le dernier est le plus convenable.

L'appareil était suspendu au plafond d'une fenêtre élevée, et

¹ *Annals of Philosophy*, vol. XV, p. 130, année 1820.

² *Transact. philosoph.* pour 1818.

placé, avec le tube LD, dans une position exactement verticale, au moyen d'un fil à plomb. Les expériences sont toutes fondées sur ce principe, que l'accroissement progressif de force élastique, déterminé par la chaleur dans la vapeur du liquide placé sur le mercure en *l*, est mesuré par la longueur de la colonne qui doit être ajoutée au-dessus de *l* pour rétablir le niveau primitif du mercure en *l*. Ces deux points de départ sont nettement marqués par un anneau de fil de platine très-fin, fortement serré autour du tube.

Au commencement de l'expérience, et après que le liquide, bien privé d'air, a été introduit, on amène le mercure à coïncider avec le bord de l'anneau *l*, en le versant avec précaution, en filet très-mince, dans la branche ouverte du siphon D; on ajuste alors avec soin l'anneau qui doit marquer le niveau en *l*.

D'après la manière de conduire l'expérience, il reste toujours une certaine quantité de liquide en contact avec la vapeur, et c'est une circonstance qui est essentielle pour l'exactitude des résultats. Supposons que la température de l'eau ou de l'huile en A (fig. 5), marquée par un thermomètre très-sensible, soit celle de la glace fondante; et soit LD la colonne qui fait équilibre à la pression atmosphérique. Qu'on chauffe le cylindre A, au moyen de deux lampes d'Argant, dont la flamme agisse doucement par-dessous. Quand le thermomètre indique 6°, diminuez la flamme, de manière à maintenir une température constante pendant quelques minutes.

Alors, l'élasticité sera exactement mesurée par la colonne de mercure, qu'il faudra ajouter au-dessus de D pour ramener le mercure à son niveau initial en *l*.

En E est fixée une pièce de liège entre les deux branches parallèles du siphon, pour le soutenir et servir de point de suspension à l'ensemble de l'appareil.

Pour les températures supérieures au point d'ébullition, la partie du siphon au-dessous de E est évidemment superflue, puisqu'elle contient dans ses deux branches un poids inutile de mercure en équilibre; on adopte alors l'appareil représenté figures 6 et 7, en procédant d'ailleurs de la même manière.

L'ouverture O (figure 7) sert à admettre la boule d'un thermomètre qui reste fixé contre le tube. Après avoir rempli de mercure la partie recourbée du tube, on fait passer au travers une petite quantité du liquide jusqu'à l'extrémité fermée. Le récipient C, rempli d'huile ou d'eau, est échauffé par une lampe d'Argent, et la température est maintenue pendant quelques minutes au degré de l'ébullition ; alors il faut ajouter en D quelques gouttes de mercure, jusqu'à ce que L et l soient dans le même plan horizontal. La suite de l'expérience ne diffère pas de ce qui a déjà été décrit. Le liquide en C s'échauffe progressivement ; et, par suite, il faut ajouter graduellement de nouvelles quantités de mercure au-dessus de L, pour rétablir le niveau primitif, en contre-balançant l'élasticité croissante. La colonne au-dessus de L exprime l'accroissement de force élastique. Quand cette colonne doit s'étendre très-haut, le tube vertical doit être soutenu dans une rainure pratiquée le long d'un prisme de bois.

Expériences du docteur Ure sur la force de la vapeur.

TEMPÉRATURE DE LA VAPEUR.		FORCE EN CENTIMÈTRES DE MERCURE.	
Thermomètre Fahrenheit.	Thermomètre centigrade.	Observations du docteur Ure.	Par la formule.
24°	— 40,4	0,43	0,30
32	0	0,51	0,44
40	4,4	0,63	0,63
50	10	0,91	0,94
55	12,7	1,06	1,14
60	15,5	1,31	1,40
70	21	1,84	1,98
80	26,7	2,56	2,81
90	32,2	3,45	3,88
100	37,8	4,72	5,28
110	43,3	6,24	7,08
120	48,9	8,31	9,35
130	54,4	11,04	12,22
140	60,0	14,65	15,77
150	65,5	19,06	10,17
160	71,1	24,38	25,42
170	76,7	30,60	32,00
180	82,2	38,50	39,80
190	87,8	48,3	49,1
200	93,3	59,9	60,2
210	98,6	73,3	73,3
212	100	76,2	76,2
220	104,4	90,2	88,7
225	107,2	99,4	91,3
230	110	109,4	106,7
240	115,5	131,2	127,6
250	121,1	157,2	151,8
260	126,7	183,6	179,8
270	132,2	219,2	219,0
280	137,8	258,7	248,7
290	143,3	305,2	290,5
295	146,1	327,6	313,6
300	148,9	361,4	343,6
310	154,4	416,2	398,6
312	155,5	430,8	410,2
312	155,5	427,0	410,2

S'il eût été question d'établir un accord précis avec une série particulière d'observations, on eût pu modifier la formule, pour

qu'elle en devint une représentation fidèle; mais en exécutant ce calcul, on trouve que la force élastique augmenterait dans une plus grande proportion que nous ne sommes autorisés à le croire, d'après d'autres expériences : et les dernières recherches de Dalton établissent que les nombres vers 65° sont plus élevés que les résultats du docteur Ure.

99. Les expériences de M. Southern, sur la vapeur à de hautes pressions, ont été faites avec un digesteur. Un thermomètre était adapté à un tube métallique, de manière que la tige du thermomètre pût être plongée jusqu'à la hauteur où le mercure s'élevait. Au lieu de mesurer la force de la vapeur par une soupape chargée, on employait un cylindre alésé avec soin et un piston qui s'y adaptait à frottement doux, et à la tige duquel était appliqué un levier. Pour que cette construction ne donnât lieu à aucune erreur, on substituait une colonne de mercure, et l'accord était sensible, à $\frac{1}{4}$ de millimètre près.

Les observations à chaque degré de température et de pression étaient continuées pendant quelques minutes, la température étant alternativement augmentée et diminuée, de manière que la pression fût tantôt en excès, tantôt en défaut, et l'on rapportait ensuite le résultat à une température moyenne. Cette méthode me paraît mériter une grande confiance, et c'est dans les résultats qu'elle a fournis que j'ai pris les principales données de ma formule (*Voyez* art. 86).

Les expériences au-dessous de 100° furent faites presque comme celles du docteur Robison, et celles au-dessous de 16° furent exécutées par M. Creighton. Ces expériences sur la vapeur à des pressions peu élevées ne paraissent pas aussi importantes que les quatre expériences pour la haute pression.

Expériences de M. Southern sur la force de la vapeur.

TEMPÉRATURE DE LA VAPEUR.	FORCE EN CENTIMÈTRES DE MERCURE.	
	Par l'observation.	Par la formule.
0° centigr.	0,41	0,44
5,5	0,58	0,68
11,1	0,89	1,02
16,7	1,32	1,49
22,2	1,85	2,14
27,8	2,59	3,00
33,3	3,60	4,14
38,9	4,98	5,61
44,4	6,76	7,49
50,0	9,09	9,88
55,5	12,0	12,8
61,1	15,5	16,6
66,7	20,0	21,2
72,2	25,5	26,7
77,8	32,3	33,4
83,3	40,7	41,5
100,0	76,2	76,2
121,3	152,3	152,3
145,2	304,6	306,0
173,1	609,2	629,4

100. Une table de la force élastique de la vapeur à de hautes températures a été publiée, en 1822, par M. Philip Taylor (*Philosophical Magazine*, vol. IX, p. 452). L'appareil employé n'a pas été décrit; mais les résultats paraissent s'accorder avec les meilleures expériences, et surtout pouvoir représenter l'effet dans la pratique, où l'on doit toujours s'attendre à quelque perte de force.

Échelle de la force de la vapeur, suivant M. Taylor.

TEMPÉRATURE DE LA VAPEUR.	FORCE EN CENTIMÈTRES DE MERCURE.	
	Observations de Taylor.	Par la formule.
	100° centigr.	76,2	76,2
104,4	83,8	88,8
110	103,4	105,7
115,5	127,0	127,6
121,1	150,2	151,8
126,7	178,1	179,8
132,2	209,5	212,0
137,3	247,3	248,7
143,3	290,8	289,8
148,9	339,7	338,3
160	455,7	453,4

101. Les expériences de Schmidt présentent un accord surprenant avec notre formule pour les températures entre 150 et 110°; au delà de ces limites, elles s'en écartent progressivement, de sorte qu'à 150° la formule est en défaut de 28 centimètres, et en excès de 4 millimètres à 6°¹.

102. On ne possède pas encore assez de recherches expérimentales sur la force de la vapeur à de hautes températures. Le professeur Arsberger, de Vienne, en a fait quelques-unes qui paraissent mériter une certaine confiance².

¹ *Philosophie naturelle* du docteur Young, vol. II.

² *Bulletin des Sciences technologiques*, vol. I, p. 294.

Expériences d'Arsberger sur la vapeur à haute pression.

TEMPÉRATURE DE LA VAPEUR.	FORCE	
	EN CENTIMÈTRES DE MERCURE.	
	Par l'observation.	Par la formule.
111 ^o ,1 centigr.	115,78	110,64
120,5	150,11	149,19
134,4	225,55	226,06
161,1	447,04	466,54
188,9	825,5	919,5
222,2	1574,8	1872,0

Ici la formule est en excès de plus d'un sixième, à 222°; mais, dans une expérience communiquée par M. Clément à M. Poisson¹, la force de la vapeur à 215° centigrades est estimée à 35 atmosphères, ou 2660 centimètres de mercure, tandis que notre formule donne seulement 1625 centimètres. Je doute de l'exactitude de l'expérience².

103. M. Cagniard de la Tour³ a fait quelques essais pour évaluer l'espace et la température nécessaires à la vaporisation totale d'une quantité donnée d'eau; mais la rupture fréquente des tubes de verre et la perte de leur transparence ont rendu les résultats difficiles à observer.

¹ *Philosophical Magazine*, vol. LXI, p. 60.

² Cette expérience est en effet erronée; car les recherches récentes, faites avec le plus grand soin par les ordres de l'Académie des sciences, n'ont donné pour la force de la vapeur à la température de 215°, que 20 atmosphères ou 1520 centimètres de mercure, au lieu de 2660. M.

³ *Philosophical Magazine*, vol. LXI, p. 58.

L'auteur établit, cependant, qu'à une température peu éloignée du point de fusion du zinc, l'eau pourrait être convertie en vapeur dans un espace équivalent à environ quatre fois son volume. Si ce résultat avait été réellement obtenu avec exactitude, il fournirait une donnée importante; mais on ne peut accorder de confiance à une approximation aussi grossière.

Dans un article sur la force de la vapeur, inséré dernièrement, par M. Ivory, dans le *Magasin philosophique*, on trouve une méthode de calcul entièrement différente de la mienne; cependant elle ne donne pas des résultats plus concordants avec les expériences d'où la formule est déduite, tandis qu'elle présente plus de difficultés dans l'application, et devient défectueuse pour les hautes températures.

Appelant t la température comptée à partir de 212° (F.), et f la force élastique évaluée en pouces, la formule de M. Ivory est

$$\log \frac{f}{30} = 0,0087466t - 0,000015178t^2 + 0,000000024825t^3.$$

Les coefficients ont été calculés d'après les expériences du docteur Ure. On trouvera dans le tableau suivant la comparaison des résultats obtenus par l'expérience, par la formule de M. Ivory, par diverses autres expériences et par ma formule.

TEMPÉRATURE de la vapeur.	FORCE ÉLASTIQUE DE LA VAPEUR EN POUCES DE MERCURE.			
	Par les expériences du docteur Ure.	Par la formule de M. Ivory.	Par diverses expériences.	Par la formule de M. Tredgold.
32(F.)	0,2	0,185	0,16 Creighton.	0,172
50	0,36	8,56		0,57
70	0,726	0,721		0,78
90	1,560	1,378		1,53
110	2,456	2,654		2,79
130	4,536	4,408		4,81
150	7,530	7,424		7,91
170	12,05	12,05		12,60
190	19,00	18,93		19,35
210	28,88	28,81		28,86
230	43,10	42,63	41,51 Taylor.	42,00
250	61,9	61,5	60 Southern.	59,79
270	86,3	86,7	82,5 Taylor.	83,45
290	120,15	119,9	114,5 Taylor.	114,4
310	161,5	162,8		154,5
337		240	254 Christian.	226,5
345,6		264	240 Southern.	247,8
419		714	1050 Clément.	635
432		852	620 Arsberger.	737

A la température de 770° environ (410° centés.), la formule de M. Ivory donne un résultat égal au module de l'élasticité de l'eau; d'où il s'ensuivrait que la vapeur serait plus dense que l'eau, tandis que M. Cagniard de la Tour trouve qu'à une température à peu près égale, l'eau exige, pour se convertir en vapeur, un espace de quatre fois son volume. M. Ivory ne connaissait pas sans doute les expériences d'Arsberger, ou bien il aurait eu un motif pour douter de l'exactitude de l'observation de M. Clément; mais comme cette observation n'est appuyée ni de la description du procédé, ni d'observations analogues pour d'autres températures, et qu'elle s'écarte en plus, soit des formules fondées sur une suite nombreuse d'expériences, soit de beaucoup d'autres résultats, c'est un motif suffisant pour la ré-

voquer en doute, plutôt que de changer ma formule. Du reste, M. Ivory remarque très-judicieusement que cette recherche offre un nouvel exemple de la grande difficulté qu'on éprouve à découvrir les lois générales par la comparaison des résultats particuliers. Cette considération doit engager les géomètres aussi profonds que l'est certainement M. Ivory, à s'efforcer de remonter aux premiers principes du phénomène, plutôt que de chercher à déduire des analogies des expériences seules.

A défaut d'expériences directes sur la force de la vapeur à de très-hautes températures, il est difficile d'établir une règle certaine, et nous devons maintenant essayer de découvrir si la force des autres vapeurs apportera quelque nouvelle lueur sur ce sujet.

De la force élastique de la vapeur d'alcool.

104. Différents physiciens ont fait des recherches sur la force élastique de la vapeur de l'alcool. La plupart des expériences ont eu lieu pour de basses températures, et ont été conduites de la même manière que celles relatives à la vapeur d'eau ; mais en les décrivant, il y aura quelque avantage à commencer par celles de M. Cagniard de la Tour, sur l'espace qu'occupe l'alcool quand il se convertit entièrement en vapeur. Pour faire cette évaluation, il introduisait de l'alcool à 0,837 de pesanteur spécifique dans de petits tubes de verre, fermés ensuite hermétiquement. Un tube, ainsi rempli d'alcool aux $\frac{2}{3}$, était lentement échauffé. Quand le volume était à peu près devenu double, le liquide disparaissait complètement, et se changeait en une vapeur si transparente, que le tube paraissait tout à fait vide. En le laissant refroidir un instant, un épais nuage se formait dans l'intérieur, et le fluide revenait à son premier état. Un second tube, presque à moitié rempli du même liquide, donna un résultat semblable ; mais un troisième, qui contenait une plus grande proportion de liquide, éclata lorsqu'il fut échauffé.

Voici le procédé employé pour estimer la pression. Un tube était courbé en siphon, une des branches contenant le liquide,

et l'autre renfermant de l'air maintenu à la température fixe de 22° centigrades par un appareil réfrigérant, et séparé de l'alcool par du mercure. Après avoir fermé les deux branches, on échauffait celle où se trouvait le liquide, et quand celui-ci était vaporisé, on notait la diminution survenue dans le volume de l'air.

L'alcool, à la température spécifique 0,837, était réduit en vapeur à la température de 258° centigrades, dans un espace un peu moindre que trois fois son volume primitif, et 476 parties d'air étaient réduites à 4; ce qui, suivant M. Cagniard de la Tour, indique une pression de 119 atmosphères ou 9044 centimètres de mercure.

105. Les expériences sur la vapeur d'alcool à de basses températures sont rassemblées dans le tableau suivant.

La formule d'après laquelle a été calculée la dernière colonne, en supposant l'alcool d'un degré de pureté tel qu'il entre en ébullition à 173° Fahrenheit, est

$$f = \left(\frac{t + 100}{154,8} \right)^6,$$

les constantes étant calculées de la même manière que celles relatives à la vapeur d'eau (art. 86). En prenant les logarithmes, on a

$$\log f = 6 [\log (t + 100) - 2,189976],$$

formule dans laquelle t désigne la température de la vapeur en degrés de Fahrenheit, et f la force élastique en pouces de mercure. Par cette formule, la force à 497° est de 3280 pouces; l'expérience de M. Cagniard de la Tour donne 3570 pouces¹.

¹ Si t est exprimé en degrés centésimaux, et f en centimètres, la formule devient

$$f = \left(\frac{t + 73}{73,66} \right)^6,$$

ou

$$\log f = 6 [\log (t + 73) - 1,86725].$$

M.

Expériences sur la force de la vapeur d'alcool¹.

TEMPÉRATURE de la vapeur.	FORCE EN POUCES DE MERCURE.					
	Par les expér. du docteur Ure.	Par les expé- riences de Watt.	Par les expér. de Robison.	Par les expé- riences de Dalton.	Par les expér. de Bélaucourt.	Par la formule.
32° (F.)	0,40	»	0,0	»	0,0	0,383
40	0,56	0,929	0,1	»	»	0,546
50	0,86	»	»	»	»	0,826
54,5	»	»	»	»	0,48	0,986
60	1,23	»	0,8	»	»	1,215
64	»	»	»	1,51	»	1,41
70	1,76	»	»	»	»	1,75
77	»	»	»	»	1,62	2,228
80	2,45	»	1,8	»	»	2,465
90	3,40	»	»	»	»	3,41
96	»	»	»	4,07	»	4,11
99,5	»	»	»	»	3,63	4,57
100	4,50	»	3,9	»	»	4,64
110	6,0	5,63	»	»	»	6,22
120	8,10	7,12	6,9	»	»	8,23
122	»	»	»	»	7,36	8,67
130	10,60	»	»	»	»	10,73
132	»	10,34	»	11,0	»	11,3
140	13,90	»	12,2	»	»	13,85
144,5	»	»	»	»	13,7	15,48
150	18,0	»	»	»	»	17,7
160	22,60	20,71	21,3	»	»	22,4
167	»	24,47	»	»	25,4	26,25
170	28,30	»	»	»	»	28,1
173	30,0	»	»	29,70	»	30,00
180	34,73	»	34,0	»	»	34,92
189,5	»	»	»	»	42,0	42,66
190	43,20	»	»	»	»	43,11
200	53,0	»	52,4	»	»	52,83
210	65,0	»	»	»	»	64,3
212	»	»	»	»	68,8	66,84
220	78,5	»	78,5	80,20	»	77,81
230	94,10	»	»	»	»	93,6
234,5	»	»	»	»	105,0	101,5
240	111,24	»	115,0	»	»	112,0
250	132,3	»	»	»	»	133,2
260	155,20	»	»	»	»	157,7
264	166,10	»	»	»	»	168,6

La pesanteur spécifique de l'alcool employé par le docteur

¹ Il a paru inutile de traduire en mesures métriques les tableaux relatifs à la vapeur d'alcool et aux autres vapeurs qui ne sont encore d'aucun usage dans la pratique; mais on a fait la transformation des formules numériques dans chaque cas.

M.

Ure était 0,813, et son point d'ébullition 173° F. (78°,2)¹. Les caractères de l'alcool dont s'est servi Watt ne sont pas exprimés²; ses expériences sont très-irrégulières. L'alcool employé par le docteur Robison bouillait à 173° F.³. Les expériences au-dessus de 100° F. s'accordent bien avec les observations postérieures. L'alcool expérimenté par Dalton paraît avoir eu son point d'ébullition à 175°⁴, et celui de Bétancourt à 173°⁵, quoiqu'il ne le dise pas expressément. Ses résultats, comme ceux de Robison, sont trop faibles pour les basses températures.

Les expériences du docteur Ure sont confirmées par celles de Dalton, et peuvent être regardées comme s'approchant beaucoup de la vérité. Il est à remarquer que la formule les représente avec une grande exactitude.

De la force élastique de la vapeur d'éther sulfurique.

106. M. Cagniard de la Tour a fait quelques expériences sur l'éther, de la même manière que sur l'alcool. L'éther était converti en vapeur dans un espace moindre que deux fois son volume primitif, à une température de 200°. Cette expérience, répétée trois fois, a toujours donné le même résultat, et 328 parties d'air étaient réduites à 14; ce qui donne 37,5 atmosphères pour la force élastique⁶.

107. On a fait d'autres expériences, dont les résultats sont consignés dans le tableau suivant.

¹ *Philosophical Transactions*, 1818.

² Robison's *Mechanical Philosophy*, vol. II, p. 33.

³ *Idem*, *Idem*, vol. II, p. 35.

⁴ *Annals of Philosophy*, 1820, vol. XV, p. 150.

⁵ Prony, *Architecture hydraulique*, vol. II, p. 130.

⁶ Les expériences sur la vapeur de l'éther sulfurique peuvent être assez exactement représentées par la formule suivante,

$$f = \left(\frac{t + 210}{178,7} \right), \text{ ou } \log f = 6 [\log (t + 210) - 2,252124],$$

en supposant que le point d'ébullition de l'éther soit à 104 ou 105° (F.). Si ce point d'ébullition était à 98° (F.), le logarithme constant serait 2,259524. La température est exprimée d'après le thermomètre de Fahrenheit, la force est évaluée en pouces de mercure. Si t était rapporté au thermomètre centigrade, et f évalué

Expériences de M. Cagniard de la Tour sur l'éther.

TEMPÉRATURE du thermomètre.		VOLUME à l'état liquide, 7 parties. VOLUME à l'état de vap., 20 parties.		FORCE calculée en atmosphères par la formule pour les gaz dilatés (art. 119).	VOLUME à l'état liquide, 3 $\frac{1}{2}$ parties. VOLUME à l'état de vap., 20 parties.		FORCE de la vapeur en atmosphères par la formule art. 106, not
centigr.	de Fahr.	Force de la vapeur en atmosphères.	Différences.		Force de la vapeur en atmosphères.	Différences.	
100°	212	5,6					5,78
111	234,5	7,9	2,3				7,9
125	257	10,6	2,7				10,63
131,5	279,5	12,9	2,3				14,1
150	302	18,0	5,1				18,4
162	324,5	22,2	4,2				23,8
175	347	28,3	6,1				30,6
185,5	369,5	37,5	9,2				38,7
		} état de vap.	11,0				38,7
200	392		48,5	11,2			
212,5	414,5	59,7	9,1				60,7
230,5	447	68,8	9,2	68,8			82,3
243	469,5	78,0	8,3	70,5			100,7
255	492	86,3	6,0	72,2			
270	514,5	92,3	11,8	73,9			
280	537	104,1	8,6	75,6			
290	559,5	112,7	6,7	77,4			
300	572	119,4	4,3	78,3			
315	594,5	123,7	7,2	80,0			
325	617	130,9		81,8			

En comparant les deux séries, on observera que la pression, correspondante au point où le liquide est entièrement converti en vapeur, est la plus grande dans le tube qui contient la moindre proportion de liquide; mais cela me paraît tenir à ce que le procédé n'est pas susceptible de beaucoup d'exactitude. Au-dessous de ce même terme, la formule déduite des expériences du docteur Ure représente les résultats avec une admirable précision; mais, au delà de ce point, une autre formule serait

en centimètres, la formule serait

$$f = \left(\frac{t + 134,4}{85} \right)^6, \text{ ou } \log f = 6 [\log (t + 134,4) - 1,92948].$$

Pour l'expérience ci-dessus, la formule donne 48 atmosphères pour la force élastique de l'éther à la température de 200° (392° F.); mais l'accord de la formule avec les expériences du tableau est plus satisfaisant.

Cette remarque s'applique plutôt au tableau suivant qu'au tableau précédent, dont les écarts sont encore assez considérables. M.

nécessaire. La formation de vapeur de mercure dans l'appareil doit aussi, très-probablement, affecter les résultats dans les hautes températures.

108. *Expériences de M. Ure et de M. Dalton sur l'éther.*

TEMPÉRATURE DE LA VAPEUR.	FORCE EN POUCES DE MERCURE.		
	Par les expériences du docteur Ure.	Par les expériences de M. Dalton.	Par la formule.
34° (F.)	6,20		6,48
36		7,5	6,8
44	8,10		8,25
54	10,30		10,4
64	13,00	15,0	13,0
74	16,10		16,1
84	20,00		19,83
94	24,70		24,2
96		30,00	25,2
104	30,00		30,00
140	56,90		56,4
150	67,60		66,9
160	80,30		78,8
170	92,80		92,5
173		120,8	98,9
<i>Seconde espèce d'éther.</i>			
105	50,00		50,0
110	52,54		53,0
115	55,90		56,2
120	59,47		59,7
125	43,24		43,4
130	47,14		47,4
132		60,0	49,1
135	51,90		51,8
180	108,30		108,1
190	124,80		125,8
200	142,80		146
210	166,00		168,5
220		240,0	194

L'éther employé par M. Dalton bouillait, dans un tube ¹, à 96° (F.), et sa force élastique peut être assez exactement représentée en augmentant d'un cinquième la quantité donnée par la formule. Ainsi, à 132°, nous avons

$$49,1 + \frac{49,1}{5} = 58,92,$$

au lieu de 60; et pour 220°,

$$194 + \frac{194}{5} = 232,8,$$

au lieu de 240.

L'éther dont s'est servi le docteur Ure bouillait à 104° ou 105°, et ses expériences sont très-régulières ².

De la force élastique de la vapeur de sulfure de carbone.

109. Le composé remarquable de soufre et de charbon, qu'on désigne ordinairement par le nom de *sulfure de carbone*, et quelquefois par celui de *carbure de soufre*, est un liquide transparent et incolore comme l'eau.

Sa vapeur est âcre et piquante, quelque peu aromatique; il a une odeur nauséabonde et caractéristique. Sa pesanteur spécifique est 1,272; il bout promptement et se vaporise entre 44 et 47° centigrades, suivant son degré de pureté. Quand il est chauffé à 360 ou 370°, avec le contact de l'air, il s'enflamme et brûle avec une flamme bleue. Il est à peine soluble dans l'eau; il paraît être composé, en poids, de

Soufre	84,21
Carbone	15,79
	100,00

On peut le préparer en mêlant environ dix parties de char-

¹ Thomson's *Annals of Philosophy*, vol. XV, p. 150.

² Doct. Ure, *Dictionary of Chemistry*.

bon de bois en poudre, bien calciné, avec cinquante parties de sulfure de fer natif pulvérisé, et distillant le mélange dans une cornue communiquant à un récipient tubulé, entouré de glace. Ces quantités fournissent un peu plus d'une partie de sulfure de carbone.

110. Ce liquide me paraîtrait pouvoir être employé avec quelque avantage dans une machine à vapeur, pourvu qu'il n'agît pas trop fortement sur les parties métalliques de l'appareil, et qu'il ne souffrit pas d'altération par les passages continuels du chaud au froid ; car il a une grande force élastique à de basses températures. A la température de l'eau bouillante, sa force est déjà égale à environ quatre atmosphères, et il aurait, par conséquent, l'avantage de donner une machine à haute pression, sans l'inconvénient d'une haute température.

Expériences sur la force élastique de la vapeur de sulfure de carbone.

TEMPÉRATURE.	FORCE EN POUCES DE MERCURE.	
	Par l'expérience.	Par la formule.
550,5 (F.)	7,4	11,75
72,5	12,55	16,35
110,0	50	30

La formule pour le sulfure de carbone est, en logarithmes,

$$\log f = 6 [\log (t + 280) - 2,344878],$$

Elle a donné les chiffres de la colonne ci-dessous jusqu'au point où le liquide se convertit en vapeur complètement ¹.

111. Voici le tableau qui résulte des expériences faites par M. Cagniard de la Tour sur la force élastique de la vapeur de ce liquide.

TEMPÉRATURE.		VOLUME		FORCE en atmosphères, par la formule.
Centigrade.	Fahrenheit.	à l'état liquide, 8 parties ; à l'état de vapeur, 20 parties.		
		Force.	Différences.	
106°	212°	4,2		4,03
111	234,5	5,5	1,3	5,3
125	257	7,9	2,4	6,8
137,5	279,5	10,0	2,1	8,7
150	302	13,0	3,0	11,0
162	324,5	16,5	3,5	13,8
175	347	20,2	3,7	17,3
185	369,5	24,2	4,0	21,5
200	392	28,8	4,6	26,2
212,5	414,5	33,6	4,8	31,9
230	447	40,2	6,6	42,0
243	469,5	47,5	7,3	50,3
255	492	57,2	9,7	60,2
270	514,5	66,5	9,3	71,4
280	537	77,8	11,3	84,5
290	559,5	89,2	11,4	99,5
300	572	98,9	9,7	
315	594,5	114,3	15,4	
325	617	129,6	15,3	
330	628,5	133,5	3,9	

Les irrégularités dans toutes les expériences de M. Cagniard

¹ Cette formule, traduite en mesures métriques, devient

$$f = \left(\frac{t + 173}{105} \right)^6,$$

et en logarithmes,

$$\log f = 6 [\log (t + 173) - 2,02119]. \quad M.$$

de la Tour doivent être occasionnées par la dilatation des tubes sous l'influence de températures aussi élevées et de pressions aussi considérables ; aussi, celui qui essaierait de faire concorder exactement ces résultats avec le calcul annoncerait par là qu'il méconnaît l'influence des effets physiques ; ce qui arrive, au reste, très-souvent dans de pareilles recherches. L'usage ordinaire de suppléer à l'absence d'observations directes par de minutieux calculs est un des grands défauts de notre mode actuel d'application des recherches scientifiques au perfectionnement de la pratique des arts.

112. On a fait des expériences sur les forces des vapeurs de différents autres liquides, mais sans avoir spécialement égard à celles qu'il serait convenable d'adopter pour les machines, c'est-à-dire à celles qui donnent une force considérable à de basses températures, et qui, par conséquent, n'exigent pas de faire agir le feu sur des surfaces aussi étendues que lorsqu'on emploie la vapeur d'eau. D'un autre côté, un fluide qui a une force élastique peu considérable à une température élevée peut quelquefois être convenablement employé, comme véhicule, pour transmettre à la vapeur motrice une chaleur uniforme, de sorte qu'il est difficile de dire à quelles substances il n'est pas à propos d'étendre nos recherches.

Dalton a fait quelques expériences sur la vapeur d'ammoniaque ; celle qu'il employait entraînait en ébullition à 140° F., et sa pesanteur spécifique était 0,9474. La vapeur avait une force de 4^{pouces},3 à 60° ; mais en élevant davantage la température, la partie gazeuse se séparait d'abord, et laissait le reste combiné avec une plus grande proportion d'eau, et exigeant, par conséquent, une température encore plus haute pour se convertir en vapeur : c'est pourquoi ce fluide est inapplicable.

113. La force élastique des vapeurs de pétrole et d'huile de térébenthine a été déterminée par le docteur Üre ; ses résultats sont contenus dans les tableaux suivants.

Les formules sont, pour la vapeur de pétrole, dont le point d'ébullition est à 316° F.,

$$\log f = 6 [\log (t \div 100) - 2,372906] ,$$

et pour la vapeur d'huile de térébenthine, qui bout dans un tube à 304°,

$$\log f = 6 [\log (t + 100) - 2,360194] ^ 1.$$

Expériences sur la force de la vapeur du pétrole ou naphte.

TEMPÉRATURE de la vapeur.	FORCE EN POUCES DE MERCURE	
	Par les expériences du docteur Urc.	Par la formule.
316° Fahrénh.	30	30
320	31,7	31,8
325	34	34,1
330	36,4	36,6
335	38,9	
340	41,6	42
345	44,1	
350	46,86	48,1
355	50,2	
360	53,5	54,8
365	56,9	
370	60,7	62,4
372	61,9	
375	64	66,5

¹ En mesures métriques, elles deviennent

$$\log f = 6 [\log (t + 73,3) - 2,05017],$$

$$\log f = 6 [\log (t + 73,3) - 2,03745].$$

Expériences sur la force de la vapeur de l'huile de térébenthine.

TEMPÉRATURE de la vapeur.	FORCE EN POUCES DE MERCURE	
	Par les expériences du docteur Ure.	Par la formule.
504° Fahrénh.	30	30
307,6	32,6	31,6
310	33,5	32,7
315	35,2	33,3
320	37,06	38
322	37,8	39
326	40,2	41,1
330	42,1	43,6
336	45	
340	47,3	50,1
343	49,4	52,5
347	51,7	
350	53,8	57,5
354	56,6	
357	58,7	
360	60,8	65,4
362	62,4	

114. Il existe encore une substance qui paraît posséder les propriétés qu'on désire dans la vapeur comme moteur des machines ; on l'appelle *vapeur du gaz de l'huile*, et on la sépare de ce gaz par la compression, au moyen de laquelle on rend portatif le gaz de l'huile. Elle a été étudiée par M. Faraday (*Transactions philosophiques* pour 1826), qui a trouvé qu'elle n'est soluble dans l'eau qu'en très-petite quantité. La dissolution bout à 170° environ du thermomètre de Fahrenheit ; mais elle conserve l'état liquide aux températures ordinaires. Cette matière consiste dans la combinaison de plusieurs fluides de différents degrés de volatilité, qui peuvent être séparés par des distillations réitérées à diverses températures : le plus abondant se sépare entre 170° et 200°.

Aux températures communes, le fluide qui se sépare entre 170 et 200° (F.) se présente comme un liquide transparent et incolore, d'une pesanteur spécifique de 0,85 à 60°, et ayant l'odeur ordinaire du gaz de l'huile. Au-dessous de 42°, il devient solide, et se contracte beaucoup pendant sa congélation; à zéro, il paraît comme une substance blanche et transparente, pulvérulente, et d'une dureté semblable à celle du sucre en pain. À l'air, il s'évapore entièrement; et quand sa température s'élève à 186°, il entre en ébullition, et fournit une vapeur dont la pesanteur spécifique est 2,7 fois celle de l'air atmosphérique. Il paraît qu'à une plus haute température la vapeur est décomposée, et laisse déposer du carbone.

Ce fluide est composé de six volumes de carbone et trois volumes d'hydrogène, condensés en un seul.

115. Dans un mémoire inséré aux *Transactions philosophiques* pour 1823, et relatif à l'application des liquides formés par la condensation des gaz comme agents mécaniques, sir Humphry Davy examine la probabilité de l'emploi de la force élastique des gaz comprimés, au mouvement des machines. Il fonde cet emploi sur l'immense différencé qui existe entre les accroissements de force élastique dans les gaz sous de hautes et de basses températures, quoique par des accroissements de mêmes nombres de degrés. La force de l'acide carbonique a été trouvée égale à celle de l'air comprimé au $\frac{1}{30}$, à 12° Fahrenheit, et à celle de l'air comprimé au $\frac{1}{36}$, à 32°; ce qui donne un accroissement de pression équivalent au poids de treize atmosphères.

116. On trouvera cependant, je crois, que, dans l'évaluation des propriétés des gaz comprimés comme agents mécaniques, on doit avoir égard à deux autres circonstances. La première, c'est la distance à laquelle cette force agira; car si cette distance, ou l'amplitude de son action, diminue dans le même rapport que la force est augmentée par la compression, il n'y aura rien de gagné, la puissance d'un agent mécanique devant s'estimer par le produit de la force et de la distance à laquelle s'étend sa sphère d'activité. En second lieu, il faut aussi considérer la quantité de

chaleur requise pour produire le changement de température ; car si le même pouvoir mécanique exige une aussi grande dépense de chaleur que celui produit par la vapeur ordinaire, le changement n'offrirait aucun avantage important, puisqu'il n'aurait plus d'autre utilité que de diminuer l'étendue des surfaces à chauffer.

L'idée d'employer de très-hautes pressions agissant dans un espace resserré paraît plus heureuse au premier aspect que ne le confirme un examen approfondi. Sans doute alors une machine d'une force considérable tiendra moins de place et pèsera moins, mais les inconvénients réels sont la grande masse de combustible nécessaire pour alimenter la machine pendant un temps donné, et l'immense surface qui doit être exposée à un foyer ardent pour obtenir une quantité donnée de chaleur dans un temps donné. En outre, quand on emploie habituellement de hautes pressions, il faut apporter beaucoup d'exactitude et de précision dans l'exécution des machines, et avoir égard à l'élasticité des matériaux ; ce qui rend les machines fort chères et d'un usage peu durable.

Toutefois, les succès obtenus par M. Faraday dans la liquéfaction de différents gaz n'en ont pas moins une grande importance. Son procédé consiste à produire les gaz dans un tube de verre hermétiquement fermé aux deux extrémités ; alors, si l'on refroidit l'une des extrémités, et qu'on échauffe l'autre quand la chaleur est nécessaire, le gaz se condense à l'état liquide dans l'extrémité froide.

117. L'acide carbonique exige les plus grandes précautions pour qu'on puisse effectuer sa liquéfaction avec sûreté. Le liquide obtenu est limpide, incolore, extrêmement fluide, et flotte sur les matières contenues dans le tube, sans s'y mêler ; il se vaporise rapidement à la différence de température entre 0° et 18°. Son pouvoir réfringent est beaucoup moindre que celui de l'eau, et sa vapeur exerce une pression de trente-six atmosphères à la température de la glace fondante. En essayant d'ouvrir, à l'une des extrémités, les tubes qui les contenaient, M. Faraday a

trouvés qu'ils éclataient toujours avec de très-fortes explosions ¹.

Le tableau suivant indique les gaz qui ont été réduits en liquides par M. Faraday, leurs densités et le rapport de leurs puissances dynamiques avec celui de la vapeur d'eau ².

SUBSTANCES.	Densité du gaz, celle de l'air étant 1.	Densité du liquide, celle de l'eau étant 1.	Température.	Force en atmosphère.	Puissances dynamiques de poids égaux des gaz.
Gaz acide carbonique. . .	1,527		0° cent.	36	
Gaz acide sulfureux. . .	2,777	1,42	7,2	2	426
Gaz acide hydro-sulf. . .	1,192	0,9	10	17	650
Oxyde de chlor.	2,365				
Deutoxyde d'azote. . . .	1,527		7,2	50	
Cyanogène. . .	1,818	0,9	7,2	3,6	395
Ammoniaque.	0,5962	0,76	10	6,5	1057
Gaz acide hydro-chloriq.	1,285		10	40	
Chlore. . . .	2,496	1,33	10	4	440
Vapeur d'eau.	0,48	1,00	100	1	1710

¹ L'ingénieur M. Brunel s'occupe de construire une machine dont la vapeur motrice serait celle de l'acide carbonique liquide. Il est à regretter que son rare talent pour les combinaisons mécaniques s'emploie à des recherches qui offrent aussi peu de chances de succès.

² La puissance dynamique est proportionnelle au produit de la force élastique du gaz, par l'espace que le gaz abandonne quand il passe à l'état liquide. On mesure cet espace en comparant la densité du corps devenu liquide avec sa densité à l'état gazeux, sous la même pression; et le poids de l'air étant à celui de l'eau :: 1 : 828 *, nous devons, pour trouver la puissance dynamique d'un même volume du liquide, multiplier simplement 828 par la pesanteur spécifique du même corps à l'état de gaz. La force élastique ou la pression n'entre pas dans ce calcul, puisque la densité du gaz augmente évidemment dans la même proportion. La quantité de chaleur est très-probablement en raison de la puissance; et s'il en est ainsi, tous les corps donneraient des quantités égales de force pour des quantités égales de chaleur.

* L'auteur ne dit pas sur quelles expériences il se fonde pour admettre ce rapport; je crois devoir rappeler ici que le rapport généralement reçu en France est celui de 1 à 770, qui a été déterminé par MM. Biot et Arago.

Telles sont les principales recherches qui ont été faites sur la force élastique des vapeurs à différentes températures, lorsqu'elles sont toujours en contact avec les liquides d'où elles proviennent; mais pour traiter le sujet plus complètement, il nous reste à considérer la force des vapeurs, ainsi que leur densité, quand, une fois produites, elles cessent d'être en contact avec les liquides qui les ont engendrées, et que, par conséquent, elles se comportent comme des gaz permanents.

De la force élastique des vapeurs séparées des liquides qui les ont produites.

118. On a remarqué (art. 87) que la loi suivant laquelle la force élastique d'une vapeur dépend de la température n'est plus la même lorsque la vapeur cesse d'être en contact avec le liquide générateur. La densité de la vapeur ne continue plus à croître par l'accumulation de la chaleur; la chaleur élastique est seulement celle qui tient à l'expansibilité, et doit se mesurer par la quantité dont la vapeur se dilaterait si elle était libre. On sait que la dilatation a été trouvée la même, pour un même accroissement de température, dans tous les gaz et toutes les vapeurs, et, aussi, que la densité est proportionnelle à la pression, au moins jusqu'à 60 atmosphères. Il est donc facile de calculer cette sorte de force.

Il sera utile aussi, plus tard, de calculer le volume occupé par une vapeur de densité donnée, sous une pression donnée, au moins jusqu'à 60 atmosphères. Les besoins de la pratique n'exigent pas qu'on aille plus loin.

119. La dilatation d'un gaz ou d'une vapeur se détermine aisément par la règle suivante.

A la température avant et après la dilatation, exprimée en degrés du thermomètre centigrade, ajoutez 273; divisez ensuite la plus grande de ces deux sommes par la plus petite, et le quotient, multiplié par le volume à la plus basse température, donnera le volume à la température la plus élevée.

Ou, soit t la température pour le volume V , et t' une autre température pour le volume V' , on aura

$$V' = V \left(\frac{273 + t'}{273 + t} \right)^3.$$

Pour trouver la force élastique à la température t' , il faut observer que cette force doit être à la force de la vapeur à la température t , comme le volume que la vapeur occuperait à la température t' , si elle était libre de se dilater, est au volume qu'elle occupe effectivement à la température t , ou

$$\frac{f'}{f} = \frac{V'}{V};$$

ce qui donne

$$f' = \frac{V'}{V} f,$$

et par conséquent,

$$f' = f \left(\frac{273 + t'}{273 + t} \right)^3.$$

En prenant pour exemple les expériences de M. Cagniard de la Tour sur l'éther, nous trouvons que le fluide était complètement vaporisé à une température qui ne dépassait pas 230° ;

* L'auteur a adopté cette formule, au lieu de la formule plus usitée

$$V' = V \frac{267 + t'}{267 + t},$$

afin de faire mieux cadrer les résultats de l'expérience avec ceux du calcul, pour les hautes températures; mais, comme ce sont les températures moyennes, c'est-à-dire celles de 50 à 150° qui se retrouvent le plus fréquemment dans la pratique, la formule suivante s'appliquera mieux à ces cas,

$$V' = V \left(\frac{270 + t'}{270 + t} \right)^3.$$

On l'a déduite des deux autres, en prenant la moyenne des deux constantes 267 et 275 , et elle offre l'avantage d'être d'un calcul plus facile que celles-ci. M.

mais les différences n'indiquent pas que cela ait eu lieu au-dessous. La force de la vapeur à cette température était 68,8 atmosphères. On demande quelle est sa force à 325° : dans ce cas, nous avons

$$\frac{273 + 325}{273 + 230} \times 68,8 = 81,6 \text{ atmosphères.}$$

D'après l'expérience de M. Cagniard de la Tour, ce serait 94 atmosphères, et la différence provient, sans doute, de la vapeur de mercure qui se forme dans l'appareil (art. 107), et la même remarque s'applique aux autres expériences du même physicien ; car notre formule de la dilatation est plutôt au-dessus qu'au-dessous de la vérité.

120. En renversant la règle précédente, nous pouvons trouver le volume que doit occuper la vapeur sous une pression qui n'excède pas 60 atmosphères, connaissant son volume sous une pression donnée et à une température donnée. Par exemple, à 15° centigrades, et sous la pression atmosphérique, le volume de la vapeur d'eau est 1325 fois celui de l'eau †. Si l'eau était élevée à la température t' , son volume deviendrait

$$1325 \left(\frac{273 + t'}{273 + t} \right) = 4,6 (273 + t) ;$$

on aurait, de plus

$$\frac{f}{76} = 4,6 \frac{(273 + t')}{V},$$

$$\text{d'où } V = \frac{76 \times 4,6}{f} (273 + t') = 349 \frac{(273 + t')}{f},$$

pour le volume correspondant à la température t' et à la force f .

121. De là se déduit cette règle simple pour trouver le volume

† On trouve aisément le volume d'une vapeur ou d'un gaz à cette température et à cette pression d'après les tableaux qui donnent les pesanteurs spécifiques des fluides élastiques, comparées à celles de l'air, dans les mêmes circonstances; car,

de la vapeur, en prenant pour unité celui de l'eau, lorsqu'on donne sa température et sa force élastique. A la température exprimée en degrés du thermomètre centigrade ajoutez 273, et multipliez la somme par 349 : le produit divisé par la force élastique, exprimée en centimètres de mercure, donnera le volume cherché.

Si, par exemple, la force est de 4 atmosphères ou 304 centimètres de mercure, la température correspondante à cette force sera, par les expériences de M. Southern, 146° centigrades (art. 77).

le volume de l'air étant 828 *, celui d'un égal poids d'eau, le nombre 828 étant multiplié par la pesanteur spécifique du liquide comparée à celle de l'eau, et divisé par la pesanteur spécifique de la vapeur comparée à celle de l'air, donnera le rapport du volume de la vapeur à celui d'un poids égal du liquide. Ainsi, pour l'eau, la densité de sa vapeur étant 0,625, ce rapport sera

$$\frac{828}{0,625}, \text{ c'est-à-dire } 1325.$$

LIQUIDES.	Densité du liquide, celle de l'eau étant 1.	Densité de la vapeur, celle de l'air étant 1.	Rapport du volume de la vapeur à celui du liquide.	Nombre constant pour la formule.	Rapport du volume de la vapeur à celui du liquide à la température de l'ébullition.	Température d'ébullition.
Eau	1	0,625	1325	349	1713	100°
Alcool	0,825	1,6133	423	112	520	80
Éther sulfurique	0,632	2,586	203	53,5	218	40
Carbure de soufre	1,272	2,6447	398	105	441	46,5
Naphte	0,758	2,833	224	58,5	276	85
Huile de térébenthine..	0,792	5,013	130	34,5	195	156,5
Gaz de l'huile liquéfié.	0,85	2,7	260	70	300	85,5

Il paraît, par ce tableau, qu'un volume d'eau produit plus de vapeur qu'un égal volume des liquides ci-dessus mentionnés.

* Le volume de l'air à 0° n'étant que 770, serait à 15°, suivant la formule même de l'auteur, $\frac{770 \times (273 + 15)}{273} = 812$; ce qui est un peu moindre que le nombre 828, qu'il a adopté. Il en est de même de la densité de la vapeur, qu'il a prise à 0,625, au lieu de 0,623. Au reste, l'excès de ces deux évaluations se trouve en partie compensé dans le résultat du calcul. M.

Dès lors,

$$273 + 146 = 419,$$

et
$$\frac{419 \times 349}{304} = 482;$$

c'est-à-dire que le volume occupé par la vapeur sera 482 fois celui du liquide. Le volume trouvé par l'expérience est 404; et lorsque l'on considère les difficultés de déterminer le volume par suite des pertes qu'occasionnent les fuites de vapeur à ces hautes températures, on doit considérer ce résultat comme suffisamment d'accord avec le calcul. Suivant les expériences du docteur Ure, la force de la vapeur à 148° est de 527 centimètres; ce qui donne 448 pour le volume occupé par la vapeur sous cette pression et cette température ¹.

Du mélange d'air et de vapeur.

122. C'est un fait bien connu que l'eau commune renferme toujours une grande quantité d'air, qui, lorsque l'eau est convertie en vapeur, se mêle avec elle, et s'en sépare en conservant l'état gazeux quand elle se condense. Si l'on ne prend aucun moyen pour expulser du condenseur d'une machine à vapeur cette matière gazeuse, elle s'y accumulera et finira par gêner le mouvement du piston. Mais, lors même qu'on emploie pour chasser l'air les moyens convenables, il en reste toujours une

¹ On arriverait à des résultats plus voisins de l'expérience par la formule

$$V = \frac{349}{f'} (270 + t), \text{ ou encore par la formule } V = \frac{4.6}{f'} (270 + t), \text{ dans}$$

laquelle f' exprime des atmosphères.

Ainsi, lorsque $t = 100$ et $f' = 1$, on a

$$V = 4.6 \times (270 + 100) = 1702, \text{ ou } V = \frac{349}{76} (270 + 100) = 1699;$$

ce qui ne diffère pas sensiblement de l'évaluation ordinaire, qui porte le volume de la vapeur à 1700 fois celui de l'eau. M.

certaine quantité dans le condenseur, et nous devons, par conséquent, étudier les effets de ce mélange d'air et de vapeur à différentes températures et sous des pressions diverses.

Supposons que nous ayons de l'air et de la vapeur à la même température t et de la même force élastique p , que leurs volumes soient V et V' . Si nous les plaçons l'un sur l'autre dans un vaisseau fermé, du volume $V + V'$, l'équilibre s'établirait à cause de l'égalité de pression et de température; mais cet équilibre ne serait pas stable.

L'expérience prouve que les deux gaz se mélangeraient entre eux jusqu'à ce que le mélange fût uniforme; elle montre d'ailleurs que, dans cette opération, la température ne serait ni augmentée ni diminuée; de sorte que lorsqu'après un certain temps le mélange est devenu parfaitement homogène, la température et la pression sont partout t et p . De ces faits, établis par l'observation, nous pouvons en déduire un autre, que l'expérience confirme également.

123. Supposons deux gaz, ou un gaz et une vapeur, qui, mêlés ensemble, occupent un volume V à la température t . Si p et f désignent les pressions qu'ils exerceraient en occupant, chacun séparément, le même volume V à la même température t , la pression du mélange sera $p + f$.

En effet, concevons que les deux gaz soient d'abord séparés, et soit f plus grand que p ; alors, dilatant le gaz sous la pression f , jusqu'à ce que f devienne p , son volume deviendra $\frac{Vf}{p}$, puisque la température n'a pas changé. Plaçant maintenant les deux gaz l'un sur l'autre, leur volume total sera

$$v + \frac{vf}{p} \text{ ou } \frac{v}{p} (p + f);$$

c'est-à-dire celui qui convient à la pression $p + f$.

124. Ces deux gaz, comme nous l'avons dit plus haut, se mêleront uniformément, sans changer leur température ni leur pression commune. Maintenant, suivant la loi du volume en raison inverse de la pression, qui est vraie pour les gaz mélangés

comme pour les gaz simples, si nous comprimons le mélange, sans changer sa température, jusqu'à ce que son volume

$$\frac{v}{p} (p + f)$$

devienne v , la pression p deviendra $p + f$; ce qu'il fallait démontrer. La démonstration serait la même pour trois ou un plus grand nombre de gaz, ou pour des mélanges de gaz et de vapeurs. Dans tous les cas, la pression totale sera égale à la somme des pressions que chaque gaz ou chaque vapeur exercerait séparément, quand il occuperait seul le même volume v à la même température t .

Quand il survient un changement de température après ou pendant le mélange, alors on a, en supposant que la température t devienne t' ,

$$\left(\frac{273 + t'}{273 + t} \right) \times \frac{v (p + f)}{p}$$

pour le volume à la nouvelle température.

125. Cette formule est comparée, dans le tableau suivant, avec les expériences du général Roy (1), dont j'ai choisi les résultats moyens. Commencant à $-17^{\circ},7$ et sous la pression de 80,45 centimètres de mercure, la première et la seconde colonne montrent comment 1000 parties d'air en contact avec l'eau croissent en volume par la formation de la vapeur, suivant les accroissements de température, et la troisième donne la force de la vapeur à ces diverses températures, calculée par notre formule; la quatrième indique le volume du mélange déterminé par la formule de l'article précédent². On remarquera que l'accord

¹ *Philosophical Transactions*, vol. LXVII, p. 653.

² On a reproduit dans plusieurs ouvrages une formule erronée du volume, qui

serait

$$\frac{vp}{p - f},$$

et qui ne s'accorde pas du tout avec l'expérience.

J'ai donné une démonstration de la règle exacte dans mon ouvrage sur le chauffage et la ventilation. Ce sujet a été aussi traité par M. Poisson, à qui j'ai emprunté la marche exposée dans le texte.

entre le calcul et l'expérience est très-parfait; ce qui présente une confirmation nouvelle et indirecte de notre formule pour la force de la vapeur aux degrés inférieurs au point d'ébullition.

TEMPÉRATURE.	VOLUME D'AIR et de vapeur par l'expérience.	FORCE de la vapeur.	VOLUME D'AIR et de vapeur par le calcul.
— 17° 7 centig.	1000,00	0,08 cent.	1000
0	1071,29	0,43	1076
+ 11,1	1123,03	1,02	1132
22,2	1182,50	2,15	1190
33,3	1255,14	4,20	1260
44,4	1353,75	7,5	1360
55,6	1491,06	12,9	1500
66,7	1688,96	21,1	1680
77,8	1929,78	33,9	1950
88,9	2287,44	51,2	2300
100	2671,94	76	2850

126. Dans le condenseur d'une machine, la vapeur a une force élastique correspondante à sa température, et cette température est déterminée par celles des fluides qui servent à la condensation.

Après une certaine durée de l'action de la machine, la vapeur sera saturée d'air à la température et sous la pression données. Il paraît, par les recherches précédentes, que cette saturation aura lieu quand le condenseur contiendra des volumes égaux d'air et de vapeur; conséquemment, la moitié seulement du fluide soutiré par une pulsation de la pompe sera de l'air; le reste sera de la vapeur non condensée. La quantité d'air soutirée à chaque pulsation doit être au moins égale à tout celui qui arrive par la chaudière, par l'eau d'injection et par les joints de la machine, dans l'intervalle d'une pulsation à l'autre. Cependant, une légère variation dans un sens ou dans l'autre n'aura presque aucun

effet pour retarder la machine, ainsi qu'il est aisé de s'en convaincre.

Comme le volume occupé par l'air et la vapeur oblige à augmenter proportionnellement la grandeur de la pompe, et par suite les dépenses de construction, on pourrait, pour les diminuer, adapter à la pompe un second tuyau d'injection; mais le plus qu'on pourrait gagner par là n'excéderait que très-peu la différence de volume due à la température, et ne s'élèverait, en aucun cas peut-être, au dixième du volume du corps de pompe.

Il est important de remarquer que lorsqu'on emploiera l'eau salée, la même quantité d'air occupera plus d'espace, parce que la force élastique de la vapeur sera moindre à la même température; mais peut-être y aura-t-il plus que compensation, à cause de la moindre quantité d'air que contient l'eau salée.

Du mouvement des fluides élastiques.

127. La connaissance des principes et des circonstances qui concernent le mouvement des fluides élastiques est d'une grande importance pour déterminer les proportions des parties d'une machine à vapeur. C'est un sujet qui a été très-peu étudié lorsqu'on a discuté la théorie de cette précieuse machine, et c'est pourquoi nous lui accorderons beaucoup d'attention dans cet ouvrage. La vapeur est en mouvement durant son action; elle doit circuler à travers les conduits, pour produire son effet, et doit ensuite être expulsée par d'autres conduits, et il serait difficile de déterminer, d'après la pratique seule, les effets de la disproportion de ces passages; le résultat dépend d'un trop grand nombre de circonstances accidentelles.

La meilleure méthode, pour cela, doit être de séparer les effets et d'examiner chacun isolément, sauf à tâcher de les réunir ensuite pour en former un seul ensemble.

128. L'état des fluides élastiques libres est réglé par la pression et la température de l'atmosphère, comme nous l'avons vu, et quand un fluide élastique est renfermé dans un vase clos, son

état, à une température et sous une pression données, doit être semblable à ce qu'il serait dans une atmosphère du même fluide capable d'exercer sur lui la même pression.

129. Le mode le plus convenable d'étudier le mouvement d'un fluide élastique, est de trouver la hauteur d'une colonne homogène du même fluide capable d'exercer sur lui une pression égale à celle qu'il supporte; car alors le fluide se mouvrait dans un vide parfait avec une vitesse égale à celle qu'acquerrait un corps pesant en tombant de la hauteur de cette colonne, pourvu qu'on eût fait une réduction convenable pour la contraction de l'orifice.

130. Si un tuyau fait communiquer deux vaisseaux contenant des fluides élastiques de forces inégales, la vitesse du courant dans le tuyau serait au premier instant égale à celle qu'acquerrait un corps grave en tombant d'une hauteur égale à la différence des deux colonnes homogènes qui représentent les pressions des deux fluides. Après un certain temps, les forces élastiques deviendraient égales, et la vitesse du courant serait nulle.

131. La considération des cheminées présente un autre cas du mouvement des fluides élastiques, où, par l'accroissement de la température, une partie d'une colonne atmosphérique a changé de densité. Quelques méprises ont été commises en traitant ce cas; mais nous devons nous attacher surtout aux mouvements qui ont lieu dans les machines. Occupons-nous d'abord de la manière de tenir compte des contractions des orifices.

132. Dans l'écoulement des fluides élastiques, il paraît, d'après les expériences, que l'action oblique produit presque le même effet que dans le mouvement de l'eau au passage des ouvertures, et que des remous se produisent dans les mêmes circonstances et tendent considérablement à retarder les mouvements.

133. La vitesse du mouvement qui résulte de l'action directe et continue de la colonne de fluide qui le produit, étant prise

pour unité ou représentée par les nombres *	1	8	4,4
la vitesse par une ouverture pratiquée dans une paroi mince se réduit, sous la même pression, à	0,625	5	2,75
par un ajutage cylindrique long de deux ou trois fois son diamètre	0,82	6,5	3,6
par un tube de même longueur placé en dedans	0,68	5,45	3,0
par un ajutage conique, de même forme que la veine contractée.	0,98	7,9	4,5.

134. Tout élargissement d'un tuyau qui est suivi par une contraction réduit la vitesse proportionnellement à la nature de la contraction, et tout angle ou courbure donne lieu à une diminution dans la vitesse. On doit donc, autant que les circonstances le permettent, éviter ces causes de perte, et lorsqu'elles existent, adopter les formes telles que l'effet soit diminué autant que possible.

Du mouvement de la vapeur dans une machine.

135. Nous avons établi (art. 129) que le mode le plus convenable de déterminer le mouvement de la vapeur est de trouver la hauteur d'une colonne de même fluide qui produirait la même pression sur une base d'égale étendue. La manière de déterminer cette colonne est donc le premier point que nous devons considérer. La force de la vapeur est quelquefois exprimée par le poids équivalent à la pression sur une surface donnée; d'autres fois par la hauteur d'une colonne de mercure, et fréquemment par le nombre d'atmosphères équivalent. Il sera utile de calculer la hauteur de la colonne d'eau équivalente à chacune de ces expressions, et en la multipliant par le volume relatif et par la pression de la vapeur, on aura la hauteur de la colonne de vapeur.

La hauteur d'une colonne d'eau à 15°, équivalente à la

* Lorsque $h = 1^p$ ou 1^m , on a $v = \sqrt{2gh} = 8^p$ ou $4^m, 4$.

pression

d'un kilogramme par centimètre carré, est . . .	10^m ,
d'un kilogramme sur un centimètre circulaire . . .	$12^m,7$
d'un centimètre de mercure	$0^m,136$
de l'atmosphère	$10^m,33$.

L'eau est supposée à la température ordinaire, et la pression atmosphérique de $0^m,76$ de mercure. Le volume de la vapeur dépendra de la pression et de la température, et se trouvera dans un tableau que nous donnerons à cet effet pour la pratique à la fin du volume, et qu'on pourra d'ailleurs calculer par la règle exposée dans l'article 121. Ainsi, par exemple, le volume de la vapeur à 100° centigrades étant 1710 fois celui de l'eau à 15° , et la pression étant 76 centimètres de mercure, nous avons

$$1710 \times 10^m = 17100 \text{ mètres}$$

pour la hauteur de la colonne de vapeur à 100° dont la pression équivaut à celle d'une atmosphère.

136. Si l'on pratiquait une ouverture de telle manière qu'il n'y eût pas d'action oblique en passant au travers, un gaz ou une vapeur en sortirait, comme dans un vide parfait, avec une vitesse égale à celle d'un corps grave qui serait tombé de la hauteur d'une colonne de même fluide capable d'exercer une pression égale.

Cette vitesse, en mètres par seconde, est égale à 4,4 fois la racine carrée de la hauteur de la colonne ¹; mais dans les tuyaux

¹ Pour la déterminer par l'analyse, soit f la force de la vapeur ou la pression sur le fluide, exprimée en centimètres de mercure; b le volume du fluide rapporté à l'eau prise pour unité, et h la hauteur d'une atmosphère de fluide de densité uniforme; alors on aura

$$0,136fb = h \text{ et } v = 4,4 \sqrt{h} = 4,4 \sqrt{0,136fb}, \text{ ou } v = 1,6 \sqrt{fb},$$

lorsque le fluide se précipite dans le vide, sans qu'il y ait contraction à l'ouverture.

Dans les tuyaux les mieux disposés, la vitesse devient

$$v = 4,3 \sqrt{h},$$

et dans les tuyaux ordinaires,

$$v = 3,6 \sqrt{h}.$$

Mais, d'après l'article 121, on a

$$b = \frac{549 (273 + t)}{f};$$

ou les autres ouvertures, la vitesse sera seulement 2,75 ou 3,6, ou quelque autre nombre de fois la racine carrée de la hauteur de la colonne, comme on le voit dans l'article 133, suivant chaque espèce d'ouverture¹.

137. Si la hauteur de la colonne de vapeur équivalente à la pression de la vapeur dans une chaudière est déterminée, ainsi que celle de la colonne de vapeur équivalente à la pression qu'éprouve le piston du cylindre à vapeur, alors la vitesse sera égale à 3,6 fois la racine carrée de la différence entre les deux hauteurs. Ce résultat donne la vitesse dans un tube rectiligne.

138. La quantité de vapeur engendrée peut être considérée comme égale à la quantité consommée dans le même temps, si la chaudière est d'une capacité convenable. Comme cette condition est essentielle pour une bonne machine, nous la supposons remplie (*Voyez* section III, article 210, pour ce qui est relatif aux proportions de la capacité des chaudières).

139. Le volume de vapeur nécessaire au jeu d'une machine, dans une seconde, est égal à l'aire du piston multipliée par sa vitesse, par seconde. Sa densité et sa force élastique doivent être moindres que celles de la vapeur dans la chaudière, afin de permettre que le même poids de vapeur passe dans une seconde par les conduits; car si elle y passait avec une vitesse qui n'excédât pas celle du piston, ces conduits devraient être de la même aire que le cylindre; mais comme ils sont d'une aire moindre, l'excès de vitesse doit être produit par un excès correspondant de force dans la chaudière.

140. La vapeur, jusqu'à ce qu'elle ait traversé la partie la plus étroite des passages, aura la même densité que dans la chau-

d'où l'on tire, lorsque la température de la vapeur est exprimée par t' ,

$$v = 3,6 \sqrt{47,5 (273 + t')}$$

ou

$$v = 25 \sqrt{273 + t'}$$

¹ Cette vitesse, en pieds anglais par seconde, est égale à 8 fois la racine carrée de la hauteur de la colonne, et elle se réduit, suivant la contraction des ouvertures, à 5 ou 5,6 fois cette racine carrée.

dière; mais elle doit se dilater dans le cylindre jusqu'à ce que sa densité soit diminuée de manière à produire la différence de pression qui détermine la vitesse dans les passages resserrés. Comme la densité est en raison de la force élastique, la force de la vapeur dans la chaudière, multipliée par sa vitesse et par l'aire du passage, doit être égale à la force élastique sur le piston, multipliée par son aire et par sa vitesse.

Soit f la force de la vapeur dans la chaudière, exprimée par la hauteur de la colonne de mercure correspondante; a l'aire des passages de la vapeur, v la vitesse, p la pression sur le piston, A son aire et V sa vitesse. On aura donc l'équation

$$fav = pAV,$$

d'où
$$v = \frac{pAV}{fa}.$$

donc
$$\frac{pAV}{fa} = 3,6 \sqrt{0,136b(f-p)},$$

b étant le rapport du volume de la vapeur à celui du même poids d'eau. Si l'on demande l'aire du passage, on déduit de l'équation précédente

$$a = \frac{pAV}{3,6f \sqrt{0,136b(f-p)}},$$

ou bien
$$a = \frac{pAV}{3,6f \sqrt{47,5n(273+t)'}}$$

ou
$$a = \frac{pAV}{25f \sqrt{(273+t)'n}},$$

ces deux dernières ayant lieu quand $nf = f - p =$ la perte de force; ce qu'on ne doit pas dépasser.

141. Il est d'usage, dans la pratique, pour les machines à basse pression, de faire le diamètre du passage égal au cinquième environ du diamètre des cylindres, et alors son aire est $\frac{1}{25}$ de celle

du cylindre. Comme cette proportion est fondée sur l'expérience des difficultés éprouvées en faisant les passages plus larges, on ne doit pas s'en écarter sans un avantage bien évident.

142. Cette formule s'applique seulement au cas d'un tuyau sans coudes ou rétrécissements. Nous n'avons pas d'expériences qui permettent d'évaluer avec exactitude l'effet des circonstances de ce genre, et nous devons nous efforcer d'y suppléer par la considération des principes qui agissent en pareil cas. A cet effet, considérons la partie du tuyau où commence le changement de figure comme un vase pourvu d'une ouverture du genre le plus semblable à la figure du tuyau, et la perte de force comme égale à celle que produirait une telle ouverture.

Quand l'angle du coude est droit, la perte de vitesse peut être considérée comme la moitié de celle qui a lieu lorsqu'un tuyau est inséré dans la paroi d'un vase, et par conséquent elle sera

$$\frac{1,00 - 0,82}{2} = 0,09,$$

c'est-à-dire environ un dixième de la vitesse pour chaque courbure à angle droit.

La même réduction doit être faite quand un tuyau s'embranché sur un autre à angle droit.

143. Dans un tuyau dont la forme est une courbe régulière, ou qui est brisé seulement à angle obtus, la réduction n'excédera pas celle qui a lieu avec un ajutage conique, et qui est environ le $\frac{1}{50}$ de la vitesse. Si le tuyau aboutit à une boîte à soupape, on fera une réduction de $\frac{1}{5}$ pour la perte de vitesse à ce passage.

144. Peu de machines présentent moins de trois courbures qui équivalent au passage par plusieurs ouvertures différentes; on peut croire que la vitesse est diminuée de manière à réduire à 2,5 le coefficient 3,6. La formule devient donc

$$a = \frac{pAV}{2,5f \sqrt{47,5n(273 + t)'}}$$

ou

$$a = \frac{AV}{17(n+1)\sqrt{n(273+t)'}}$$

C'est la formule que nous emploierons pour la comparaison avec la pratique, après avoir considéré les autres causes de perte de force.

Perte de force par le refroidissement.

145. Une partie de la force de la vapeur se perd dans son trajet par les tuyaux, en vertu du refroidissement.

La quantité de vapeur qui passe dans une seconde est comme l'aire de la section et la vitesse de la vapeur, ou égale à $\frac{a v}{10000}$, a étant évalué en centimètres carrés, le reste en mètres. La surface du tuyau est comme la longueur et le diamètre, ou est égale à $\frac{4l \sqrt{a}}{100}$. La perte de chaleur est en raison directe de la surface, et en raison inverse de la vitesse. Nous avons donc, lorsqu'il s'agit de tuyaux métalliques ¹,

$$0,65 \frac{(T - t'') \times 4l \sqrt{a} \times 10000}{60av \times 100} = t'''$$

pour la perte de chaleur éprouvée par la quantité de vapeur qui passe en une seconde. En réduisant, cette formule devient

$$t''' = \frac{4,3l (T - t'')}{dv},$$

T étant la température de la surface du tuyau, qui sera d'environ un vingtième moindre que celle de la vapeur, t'' la température de l'air, l la longueur du tuyau en mètres, d son diamètre en centimètres, et v la vitesse en mètres par seconde.

146. Ces diverses circonstances sont les seules nécessaires à considérer quand on applique cette formule pour trouver la perte de chaleur; mais quand on veut évaluer la perte de force élastique, il y a un autre point important sur lequel je désire diriger

¹ Voyez *Traité du Chauffage*, par Tredgold, art. 44.

particulièrement l'attention des constructeurs de machines, c'est l'abaissement qu'éprouve la température de la vapeur dans son passage par le tuyau. On dit que fréquemment la température s'abaisse au-dessous du terme de l'ébullition de l'eau. Quand cela arrive, nous savons qu'une partie de la vapeur reprend l'état liquide, et que le reste acquiert la force élastique correspondante à la température de l'ébullition; ainsi tout l'excès de force engendré par la chaudière est détruit par le refroidissement dans ce passage.

147. Il est d'autant plus important de connaître et d'évaluer cette cause de la réduction de la force de la vapeur à la pression atmosphérique, que les constructeurs les plus estimés de machines à vapeur, sans en excepter Boulton et Watt, obligent la vapeur à passer entre le cylindre et son enveloppe, et comme s'ils eussent l'intention expresse de l'exposer, autant que possible, au pouvoir refroidissant de l'atmosphère, afin de réduire la force élastique avant qu'elle entre dans le cylindre pour exercer sa puissance.

148. L'abaissement de la température de la vapeur diminue sa force élastique, et en même temps une portion de la vapeur revient à l'état liquide. Si f désigne la force de la vapeur dans la chaudière, et f' cette force après la perte de chaleur, $\frac{f-f'}{f}$ sera la quantité réduite en eau; et cette quantité, multipliée par la chaleur nécessaire pour la conversion de l'eau en vapeur, devra égaler la perte totale de chaleur qui a eu lieu par le refroidissement. Ainsi,

$$t''' = 540 \frac{(f - f')}{f}; \quad \text{d'où} \quad f' = f \left(1 - \frac{t'''}{540}\right),$$

en supposant 540 degrés pour la quantité de chaleur nécessaire à la formation de la vapeur (*voyez* art. 82), quoique je regarde le nombre 555 comme plus exact.

On doit remarquer ici, que quand t''' devient égal à la chaleur de conversion, f' se réduit à zéro, et, par conséquent, toute la chaleur reprend l'état liquide, comme cela a lieu dans les ap-

pareils pour chauffer les édifices. Nous sommes maintenant en état de répondre à la question : quelle est la perte de force dans chaque cas particulier ? Supposons que la température de la vapeur soit 105° , et sa force élastique 90 centimètres de mercure, la longueur du tuyau $3^m,6$, son diamètre 15 centimètres, la vitesse de la vapeur dans le tuyau 24 mètres par seconde, et enfin la température de l'air 15° . Par la formule de l'article 145, nous aurons

$$i''' = 3,6, \text{ et } f \left(1 - \frac{i'''}{540} \right) = 90 \left(1 - \frac{3,6}{540} \right) = 89,4.$$

Il y a donc, dans ce cas, une perte de force équivalente à 0,6 centimètres de mercure, ou à $\frac{1}{90}$ de la force. Mais on peut dire que ce cas est un des plus favorables qui se présentent ordinairement dans la pratique. Dans les machines des bateaux où la vapeur doit passer autour du cylindre, on assure, d'après l'observation, que la force dans le cylindre n'excède pas 70 centimètres, quand la force dans la chaudière est d'environ 90 centimètres.

149. Plus la force et la température seront considérables, plus la réduction sera grande évidemment. C'est pourquoi, dans les machines construites sur le système de Woolf, où la vapeur doit circuler autour des cylindres, la perte doit être plus grande et enlever une partie de cet accroissement d'effet dû à l'emploi des hautes pressions.

De l'aire des passages de la vapeur.

150. La formule pour calculer le mouvement de la vapeur dans une machine n'a pas de *maximum* qui puisse nous déterminer dans le choix d'une proportion pour l'appliquer dans la pratique; mais elle nous montre que plus on agrandit l'ouverture, plus on diminue la perte de force élastique qu'éprouve la vapeur. D'un autre côté, elle nous fait voir que la perte de force, par le refroidissement, est d'autant plus grande que la vitesse est moindre, et ses variations croissent dans la même proportion que le

diamètre du tuyau. Quoi qu'il en soit, la pratique a prouvé que les proportions qui méritent la préférence sont celles qui rendent égales les pertes provenues de ces deux cas. Il y a pour cela deux règles qui ne s'accordent exactement ni l'une ni l'autre avec ce que la théorie indique.

151. L'une est de faire le diamètre du conduit de la vapeur égal au cinquième de celui du cylindre. Telle paraît être la proportion adoptée par Boulton et Watt.

152. L'autre est de donner à l'aire du passage 6 centimètres carrés pour chacun des chevaux à la force desquels équivalait l'effet dynamique de la machine.

153. L'objet évident de ces règles est que la vapeur se meuve avec la même vitesse, ou produise la même force d'impulsion dans chaque machine. L'une ou l'autre donne presque ce résultat, mais ni l'une ni l'autre ne le donnent exactement; car la force d'un cheval dans une petite machine exige plus de vapeur que dans une grande; c'est pourquoi la proportion assignée pour l'aire des ouvertures est trop faible dans les petites machines ou trop forte dans les grandes.

De plus, les machines dont le cylindre est court se meuvent plus lentement que celles où il est long, et par conséquent elles devraient avoir leurs ouvertures pour la vapeur dans une proportion différente avec leur diamètre suivant la vitesse.

154. Pour rendre la vitesse à très-peu près la même dans tous les cas, nous avons cette règle¹:

¹ L'équation (art. 144), quand $n = 0,007$, c'est-à-dire quand on suppose que le $\frac{1}{144}$ de la force est perdu pour produire la vitesse, nous donne

$$a = \frac{AV}{1,45 \sqrt{267 + l}}$$

En désignant par l la longueur de la course, et par m le nombre de coups par minute, nous aurons $2lm = 60 V$, et par conséquent,

$$a = \frac{A2lm}{45 \sqrt{267 + l}}$$

Multipliez la longueur de la course par le nombre de coups par minute, et divisez le produit par 732; la racine carrée du quotient, multipliée par le diamètre du cylindre, donnera le diamètre du tuyau à vapeur.

Exemple. Trouver le diamètre du tuyau d'une machine dont le diamètre du cylindre est de 0^m,6, la longueur de la course 0^m,8 et le nombre de coups par minute 36; nous aurons

$$\frac{36 \times 0,8}{732} = \frac{28,8}{732} = \frac{1}{25} \text{ environ.}$$

La racine carrée de $\frac{1}{25}$ étant $\frac{1}{5}$, le diamètre du tuyau doit être, dans ce cas, le cinquième de celui du cylindre.

La même règle s'applique à toutes les machines à haute ou à basse pression, et elle s'applique aussi bien aux conduits d'entrée et de sortie de la vapeur.

Quand $t = 105^{\circ}$, cette équation devient

$$a = \frac{Atm}{840}$$

formule équivalente à la règle énoncée dans le texte, sauf la valeur du coefficient.

Si $t = 160^{\circ}$, alors

$$a = \frac{Atm}{890};$$

ce qui montre qu'il faudra une plus petite ouverture pour la vapeur à haute pression; A et a sont les aires du cylindre et du tuyau en centimètres circulaires.

M. Tredgold, par une erreur de multiplication, arrive à des résultats un peu différents; ses deux dernières formules, en mesures anglaises, sont

$$a = \frac{Atm}{2400} \quad \text{et} \quad a = \frac{Atm}{2520},$$

qui sont équivalentes, en mesures métriques, à

$$a = \frac{Atm}{752} \quad \text{et} \quad a = \frac{Atm}{770}.$$

(La première donne la règle du texte.)

Elles correspondent à une perte de force de $\frac{1}{200}$, au lieu de $\frac{1}{144}$. M.

L'excès de force nécessaire pour produire la vitesse est à très-peu près le $\frac{1}{144}$ de la force de la vapeur (*Voyez* la note ci-jointe).

De la perte de force par le refroidissement du cylindre.

155. La vapeur, après être entrée dans le cylindre, éprouve une perte de force par le refroidissement. Dans de grandes machines, le cylindre est ordinairement renfermé dans une enveloppe appelée *chemise*, et la vapeur est introduite entre cette enveloppe et le cylindre pour maintenir ce dernier à un degré de chaleur uniforme; mais la perte en combustible est la même par cette disposition qu'avec un cylindre nu, et il n'y a aucun avantage évident à conserver la force de la vapeur par l'addition de cette enveloppe, à moins qu'on ne fournisse de la vapeur à celle-ci par un tuyau séparé (*Voyez* art. 147).

156. La recherche faite précédemment pour la perte de force dans le tuyau à vapeur s'applique, avec très-peu de changement, au cas d'un cylindre nu. La vapeur, dans ce cas, se présente progressivement aux parois du cylindre; par conséquent, la perte sera un peu moindre, mais non sensiblement, que si la vapeur était constamment en contact avec toute l'étendue des parois.

Mais à la surface courbe du cylindre, il faut ajouter ses deux fonds. Avec cette addition, la quantité du refroidissement en degrés par seconde devient (art. 145)

$$t''' = \frac{0,021 (2.l + d) \cdot (T - t'')}{dv},$$

où l est la longueur du cylindre, d son diamètre en mètres, v la vitesse du piston en mètres par seconde, T la température de la vapeur diminuée d'un vingtième, et t'' la température de l'air. La force sur le piston est réduite à

$$f' = f \left(1 - \frac{t'''}{540} \right).$$

157. Quand on emploie la vapeur à une basse pression, alors $T = 100^\circ$, et supposant que la température de l'air t'' soit de 15° , que $l = 2d$ et que $v = 1^m$, on a

$$t''' = \frac{0,021 (4d + d) \cdot (T - t'')}{dv} = 9^\circ,$$

et la perte de force est $\frac{9}{540} = \frac{1}{60}$.¹ Ainsi, dans toutes les ma-

chines à basse pression, il y a une perte constante de $\frac{1}{60}$ de la force quand on emploie une enveloppe et qu'elle est tenue toujours pleine de vapeur; la perte de chaleur, et par conséquent de force, à égalité de combustible, est plus grande par la nécessité de maintenir continuellement la surface à la température de la vapeur. Ceci suffira, j'espère, pour démontrer que cette pièce est une addition inutile à la dépense d'une machine.

158. Dans une machine à haute pression, travaillant à 150° , la perte par un cylindre nu est seulement le $\frac{1}{40}$ de la force.

159. La meilleure manière de prévenir la perte de force est de placer le cylindre dans une enveloppe fermée à l'air, sans la remplir de vapeur; ce qui donnerait, outre l'avantage d'épargner le combustible, celui de ne pas tant échauffer la chambre de la machine.

¹ Le nombre donné par M. Tredgold serait

$$\frac{5,1}{540} = \frac{1}{106}.$$

On ne voit pas pourquoi il fait ainsi, $t''' = 5^\circ,1$, lorsque la formule précédente donne $t''' = 9^\circ$. Il en conclut que la perte de force n'est que de $\frac{1}{106}$, au lieu de $\frac{1}{60}$.

La même remarque s'applique à l'art. 158, qui donne $\frac{1}{65}$, au lieu de $\frac{1}{40}$, que fournit la formule.

M.

160. La machine à simple effet perdra plus de chaleur que celle à double effet, mais non pas tout à fait le double. Nous établirons donc la perte dans le cylindre à environ $\frac{L}{33}$ de la force. Il y aura également une perte double par le passage de la vapeur de la chaudière dans le cylindre.

161. Dans les machines atmosphériques, la perte de force par le refroidissement du cylindre, quand on emploie pour condenseur un vase séparé, est un sujet intéressant de recherche. Supposant que le piston est tenu étanche sans l'emploi de l'eau, la perte sera plus grande que dans les simples machines à vapeur, de la quantité perdue pendant la moitié du temps, par le refroidissement des parois du cylindre. Par conséquent, la vapeur de la longueur du cylindre l doit être augmentée de moitié, outre qu'il faut doubler l'aire exposée dans un temps donné. L'équation (art. 156) pour la diminution de température deviendra donc

$$t''' = \frac{0,042 (3l + d) \cdot (T - t'')}{dv}$$

En supposant les proportions et les températures de l'exemple rapporté dans l'article 157, on trouve que la perte par le refroidissement est environ le $\frac{1}{22}$ de la force; c'est pourquoi ce n'est pas ce genre de perte qui empêcherait d'employer dans les mines une machine aussi simple.

Si l'on emploie l'eau au-dessus du piston pour en fermer les joints, la perte additionnelle due à la conversion de cette eau en vapeur sera considérable. Si la température de cette eau est de 82°, on devra déduire l'effet de chaque mètre carré d'aire, qui absorbera ou détruira 0,3 mètre cube de vapeur par minute; ce qui correspond à la quantité d'évaporation d'un mètre carré de surface d'eau maintenue à cette température. Ainsi, dans une machine travaillant à raison de 54 mètres de vitesse par minute, c'est-à-dire dépensant 27 mètres cubes de vapeur à la densité atmosphérique dans une minute, pour chaque mètre carré de

l'aire du cylindre, la perte sera $\frac{2}{27} \times 0,3$ ou $\frac{1}{45}$ de la force; à quoi ajoutant l'effet du refroidissement, nous aurons

$$\frac{1}{45} + \frac{1}{22} = \frac{1}{15} \text{ environ.}$$

162. Quant aux machines atmosphériques ordinaires, où l'injection est faite dans le cylindre, Smeaton est le seul qui ait tenté de calculer la perte de force. M. Farey a donné, dans l'Encyclopédie de Rees, un compte succinct de ces recherches.

Le mode de calcul n'est pas très-clairement exposé, et il a été établi à une époque où les propriétés de la chaleur étaient peu connues.

163. Les cylindres sont ordinairement faits de la même épaisseur de métal, ou, du moins, la différence ne mérite pas d'être prise en considération; ils sont refroidis par l'injection qui les fait passer de 100° à 65°. Rarement cette température est plus basse, et dans les bonnes machines, elle ne descend pas au-dessous de 75° ou 88°. On peut adopter, pour le calcul, la moyenne 70°. La chaleur spécifique du fer est environ 200 fois celle de la vapeur, et en calculant la masse du fer dont la température doit être élevée de 70° à un autre point entre 70 et 100°, pour chaque cylindre plein de vapeur, nous trouverons la quantité dont la température de la vapeur doit être abaissée.

La surface du cylindre est égale à sa longueur augmentée de la moitié de son diamètre et multipliée par sa circonférence, c'est-à-dire $(l + \frac{1}{2} d)\pi d$; et l'épaisseur, en ajoutant quelque chose pour la perte de la chaleur à la surface extérieure, est de 4 centimètres = $\frac{1}{25}$ de mètre. La masse de métal équivalente à l'absorption de la chaleur est donc

$$\frac{(l + \frac{1}{2} d)\pi d}{25};$$

et si l'on tient compte de la diminution qui résulte de ce que

la vapeur n'est en contact avec les parois du cylindre que graduellement, et en évaluant cette diminution à moitié, alors la chaleur spécifique devient égale à celle de

$$\frac{200 (l + d) \pi d}{50}$$

mètres cubes de vapeur échauffés d'un degré. Mais la température s'élèvera à la moyenne entre le point de condensation et celui de l'ébullition, c'est-à-dire à $\frac{100^\circ + 70^\circ}{2} = 85^\circ$; l'accroissement sera donc de 15° . Ainsi, la quantité totale de chaleur consommée sera

$$\frac{200 \times 15 \times (l + d) \pi d}{50}$$

Cette quantité, divisée par le volume du cylindre $\frac{l\pi d^2}{4}$, donne pour l'abaissement de température,

$$t''' = \frac{16 \times 15 \times (l + d)}{ld} = \frac{240 (l + d)}{ld}$$

Quand la longueur du cylindre est deux fois son diamètre, ou $2d = l$, la perte devient

$$t''' = \frac{360}{d}$$

Maintenant, la condensation imparfaite, qui a lieu dans les machines atmosphériques plus que dans celles qui ont un condenseur séparé, fait perdre en sus un cinquième de la force; ce qui équivaut à

$$\frac{625}{5} = 125^\circ \text{ de chaleur.}$$

La condensation et le refroidissement du cylindre font perdre $\frac{560}{d}$; ainsi la chaleur totale nécessaire en sus de ce qu'exigent

les autres machines équivalent à la conversion en vapeur de

$$\frac{125 + \frac{360}{d}}{833}$$

fois la quantité d'eau nécessaire pour une machine ayant un condenseur séparé, et agissant par la pression directe de la vapeur.

En faisant, par exemple, $d = 0,5$ et $d = 2$, on trouve que les machines atmosphériques exigent le double de combustible des machines du système de Watt à simple effet, lorsque leur cylindre est d'un demi-mètre de large. Elles n'en exigent que le tiers, lorsque le cylindre a 2 mètres.

164. Ceci nous permet d'éclaircir un fait observé par Watt, lorsqu'il réparait, en 1763, un modèle fonctionnant d'une machine à vapeur appartenant à l'université de Glasgow. Le cylindre du modèle avait 15 centimètres de course du piston et 3 centimètres de diamètre. « Je fus surpris, dit Watt, de ce que sa « chaudière ne pouvait l'alimenter de vapeur, quoiqu'elle fût, « en apparence, assez grande. » En soufflant le feu, Watt parvint à lui faire donner quelques coups, mais il fallait une énorme quantité d'eau d'injection, quoique le piston éprouvât peu de résistance par la petite colonne d'eau contenue dans le corps de pompe. Il s'aperçut bientôt que cela était causé par la petitesse du cylindre, qui présentait pour condenser la vapeur une plus grande surface, en proportion de la capacité, que cela n'a lieu dans les cylindres de grandes machines.

C'est sans doute cette difficulté qui tourna les vues de Watt vers le perfectionnement de la machine à vapeur. Si nous appliquons notre règle à ce cas, nous avons.

$$l = 0^m,15, \quad d = 0^m,05,$$

et par conséquent,

$$\frac{240(l+d)}{ld} = \frac{240(0,15+0,05)}{0,15 \times 0,05} = 6400^e, \text{ et } \frac{6400+540}{540} = 12,85;$$

c'est-à-dire que 12,85 fois le volume de vapeur qui remplirait le cylindre¹, serait consommé pour la condensation à 70°. En diminuant la charge élevée, et conséquemment en ne condensant pas la vapeur à une aussi basse température, Watt parvint à faire fonctionner la machine.

165. Nous devons maintenant observer dans notre formule que 15° est la moitié de l'abaissement de température que la vapeur a éprouvé par la condensation, et si nous diminuons cette quantité, la chaleur perdue sera diminuée dans la même proportion, mais la perte par la vapeur non condensée sera plus grande. L'effet de la machine sera le plus grand possible quand la somme de ces deux pertes sera un *minimum*, et c'est par conséquent suivant cette condition que sa charge doit être établie.

La perte par le refroidissement du cylindre est

$$\frac{8(100 - t)(l + d)}{ld},$$

t étant la température de condensation.

La perte par la condensation imparfaite est

$$\frac{f' \times 625}{76};$$

mais, par notre formule (art. 86, note),

$$f' = \frac{(t + 75)^6}{(85)^6};$$

¹ Ce résultat est évidemment exagéré, et cela provient de la fausse application que fait M. Tredgold de sa formule, laquelle est établie pour un cylindre de 4 centimètres d'épaisseur, tandis que le cylindre du modèle n'avait probablement pas un demi-centimètre. Au reste, voici son calcul en mesures anglaises, où il arrive (par une erreur d'opération, il est vrai) à un résultat moindre ;

$$\frac{1300(l + d)}{ld} = \frac{1300(0,5 + \frac{1}{8})}{0,5 + \frac{1}{8}} = 2600, \text{ et } \frac{2600 + 967}{967} = 3,8;$$

tandis qu'en effectuant les opérations, on trouve

$$\frac{1300(0,5 + \frac{5}{8})}{0,5 \times \frac{5}{8}} = \frac{1300 \times 4}{0,5} = 10400,$$

au lieu de 2600°, que donne la première opération.

M.

donc la perte totale est

$$\frac{625 (t + 75)^6}{76 \times (85)^6} + \frac{8 (100 - t) (l + d)}{ld}.$$

C'est cette fonction de t qui doit être un *minimum*, et par conséquent, sa fonction dérivée doit être égale à zéro; ce qui fournit l'équation

$$\frac{625 \times 6 (t + 75)^5}{76 \times (85)^6} - \frac{8 (l + d)}{ld} = 0;$$

d'où l'on déduit

$$t = \left[\frac{76 \times (85)^6 \times 8 (l + d)}{625 \times 6ld} \right]^{\frac{1}{5}} - 75,$$

ou, en réduisant, $t = 7,2 \left(\frac{l + d}{ld} \right)^{\frac{1}{5}} - 75.$

166. Quand $l = 2d$, cette formule devient

$$t = \frac{150}{d^{\frac{1}{5}}} - 75,$$

ou, en logarithmes,

$$\log (t + 75) = 2,17609 - \frac{1}{5} \log d.$$

167. Il paraît, d'après cela, que lorsque la longueur du cylindre est double de son diamètre, la température de condensation qui donne le *maximum* d'effet varie en raison inverse de la racine cinquième du diamètre. Quand le diamètre $d = 2$ mètres, la température de condensation $t = 55^\circ$; quand le diamètre est de 1 mètre, on trouve $t = 75^\circ$. Cette règle, à l'aide d'une table de logarithmes, donne un moyen facile de calculer la température de condensation la plus convenable pour tout autre cas.

De l'ascension de la fumée dans les cheminées.

168. Si un tube recourbé, de diamètre uniforme, ACB

(fig. 8, pl. II) était prolongé jusqu'à la limite de l'atmosphère, le point le plus bas C étant placé au centre de l'ouverture d'une cheminée de même dimension que le tube, alors tant que les températures resteraient les mêmes à la même hauteur dans les deux branches, le système serait en équilibre. Mais supposons qu'une partie CD soit à une température plus élevée que la partie correspondante de l'autre branche, l'air qu'elle contient étant d'une densité moindre que l'air froid, l'équilibre sera troublé, et le mouvement aura lieu avec une force égale à la différence entre le poids des deux colonnes d'air. Maintenant on peut considérer une cheminée comme une partie de ce tube recourbé; car, quoique dans une cheminée, la colonne d'air se termine avec le tuyau, les pressions que l'air rencontre ensuite dans l'atmosphère équivalent à celles qu'il éprouverait dans le tube recourbé, et peuvent être mesurées de la même manière.

169. Supposons que CA soit la hauteur d'une atmosphère homogène, et CD celle de la cheminée; que DE désigne la quantité dont l'air se dilate par la chaleur qu'il éprouve en traversant le foyer. La hauteur ED, ou son égale FG, représente la hauteur de la colonne d'air qui produit le mouvement, et la vitesse sera celle d'un corps pesant qui tomberait de la hauteur FG. Si toute la hauteur CA était vide, la vitesse serait celle acquise par un corps pesant qui tomberait de BII, hauteur de l'atmosphère, pourvu que l'air n'éprouvât pas de contraction à l'entrée; mais on sait bien que cette contraction a lieu pour l'air comme pour l'eau.

170. En appliquant cette théorie à une cheminée, il faut observer que la fumée étant quelquefois d'une autre densité que l'air commun à la même température et sous la même pression, le même accroissement de température produira un plus grand ou un moindre effet, suivant que la fumée sera d'une densité inférieure ou supérieure à celle de l'air commun. On trouvera cet effet en retranchant de la dilatation la pesanteur spécifique de la fumée, rapportée à celle de l'air, ou bien, en retenant une portion de la température pour la différence de densité. L'une et l'autre méthode donnent le même résultat, quand on calcule con-

venablement. Je préfère dans ce cas adopter la première méthode. La seconde est suivie dans mon *Traité du Chauffage* ¹.

171. Soit h la hauteur en mètres de la cheminée, comptée du lieu où entre le courant d'air jusqu'au sommet; ε , le volume qu'acquiert un mètre d'air par le changement de température; v , la vitesse; p , la pesanteur spécifique de la fumée, celle de l'air étant 1; et a , l'aire de la cheminée en centimètres carrés.

Quand $CD = h$, la dilatation étant comme la hauteur, nous aurons DE ou $FG = h(\varepsilon - 1)$. Mais la vitesse est celle qu'acquerrait un corps grave en tombant de la hauteur FG ; donc

$$V = 4,4 \sqrt{FG} = 4,4 \sqrt{h(\varepsilon - p)}.$$

Quand $FG = BH$, la ligne AB représentant le niveau supérieur d'une atmosphère homogène, la vitesse devient

$$V = 4,4 \sqrt{BH}.$$

Dans tout autre cas, elle dépend de la différence $DC - CE = ED$ quand EC est réduit à la même densité que BH .

Soit B le volume de l'air avant qu'il soit échauffé, il devient $B\varepsilon$ après l'échauffement; ainsi

$$\frac{Va}{(100)^3} = \frac{4,4a}{(100)^2} \sqrt{h(\varepsilon - p)} = B\varepsilon; \text{ d'où } B = \frac{4,4a}{(100)^2\varepsilon} \sqrt{h(\varepsilon - p)},$$

et

$$\frac{a}{(100)^2} \frac{B\varepsilon}{4,4} \sqrt{\frac{1}{h(\varepsilon - p)}}.$$

¹ Les principes de calcul adoptés, tant dans le présent traité que dans celui cité plus haut, sont parfaitement identiques avec ceux employés par M. Gilbert dans un intéressant article qu'il a publié sur ce sujet dans le treizième volume du *Quarterly Journal of Science*, p. 113; seulement la notation et le mode de calcul sont différents. Le procédé de M. Gilbert pour calculer la dilatation ne donne pas des résultats tout à fait satisfaisants, outre qu'il ne tient compte ni des contractions ni des pertes de forces dues au mouvement curviligne. Je mentionne ces circonstances, parce que quelques personnes regardent comme différentes des choses réellement identiques, ainsi qu'on peut le voir en adoptant la même notation et réduisant par les règles de l'algèbre. Le grand objet d'un analyste pratique est de rendre l'équation finale d'une application aussi aisée que possible.

On pourra trouver la dilatation ε au moyen de la table donnée dans mon *Traité du Chauffage* (art. 230).

Mais, par la loi de la dilatation des gaz, le volume à la température t' doit être, en prenant pour unité le volume à la température t ,

$$\varepsilon = \frac{273 + t'}{273 + t}; \quad \text{d'où} \quad \varepsilon - p = \frac{273 + t'}{273 + t} - p.$$

Substituant cette expression dans l'équation, nous avons

$$\frac{a}{(100)^2} = \frac{B\varepsilon}{4,4\sqrt{h(\varepsilon-p)}} = \frac{B(273+t')}{4,4(273+t)} \sqrt{\frac{273+t}{h[t-tp-273(p-1)]}}.$$

172. Le diviseur 4,4 doit être changé suivant les espèces d'ouvertures (*voyez* l'art. 133); mais celui qui convient généralement est 2,75, et t sera moyennement de 12°; dans ce cas, B étant le volume d'air consommé par heure,

$$\begin{aligned} a &= \frac{B(273+t') \times 10000}{2,75 \times 60 \times 60} \times \frac{1}{\sqrt{h[t-tp-273(p-1)]}} \\ &= \frac{B(273+t')}{16,8\sqrt{h[t-tp-273(p-1)]}}. \end{aligned}$$

Pour la fumée de charbon de terre, on a $p = 1,05$, et la formule devient

$$a = \frac{B(273+t')}{16,8\sqrt{h(t-26)}}.$$

Quand on emploie la vapeur à basse pression, on a

$$a = \frac{2,4B}{\sqrt{h}},$$

qui exprime l'aire en centimètres carrés.

Nous donnerons plus tard l'application de la formule, avec quelques règles simples qui en dérivent pour les machines de différentes forces, ainsi que les proportions du foyer, cette re-

cherche n'ayant été exposée ici que pour séparer les calculs théoriques des détails pratiques.

De la sortie de la vapeur par les soupapes de sûreté.

173. Ce sujet a été peu étudié. Si nous supposons la vapeur de même densité que l'air atmosphérique, et sa force élastique double, elle s'élancerait dans l'atmosphère avec la même vitesse que l'air atmosphérique s'élance dans le vide. Quand la force élastique de la vapeur est plus grande ou moindre, si n désigne le nombre de fois que sa pesanteur spécifique excède celle de la vapeur atmosphérique, la pesanteur spécifique de l'air étant prise pour unité, nous aurons

$$v = 4,4 \sqrt{(n - 1)h},$$

h étant la hauteur d'une atmosphère d'air homogène. Cette hauteur, équivalente à 76 centimètres de mercure, est 8,500 mètres; ainsi,

$$v = 405 \sqrt{n - 1}.$$

174. En certains cas, cette vitesse peut être augmentée par la légèreté relative de la vapeur qui s'échappe, et elle peut être diminuée pour une vapeur très-dense, par la cause contraire; mais ces effets ne sont pas assez considérables pour qu'on ait besoin de les introduire dans le calcul. On peut toutefois les rendre sensibles en tournant l'ouverture d'écoulement en haut ou en bas; le fluide très-rare s'échappe avec la plus grande vitesse dans le premier cas, et le fluide dense dans le second.

175. Soit a l'aire de l'ouverture en centimètres carrés; si nous réduisons la vitesse à cause de la contraction que la vapeur éprouve en passant par l'ouverture, nous aurons

$$79a \sqrt{n - 1}$$

pour le nombre de mètres cubes de vapeur sortis dans une heure

Désignant par q le nombre de litres d'eau vaporisés en une heure, nous aurons

$$a = \frac{q}{44n\sqrt{n-1}}$$

pour l'aire de l'ouverture ¹.

¹ Voici le développement de ce calcul, qui paraît trop abrégé pour être clair.
La vitesse de la vapeur, étant

$$v = 405\sqrt{n-1},$$

sera réduite, à cause de la contraction à l'ouverture, à environ

$$v = 220\sqrt{n-1}.$$

Le volume en mètres cubes qui passera par une ouverture dont l'aire a serait exprimée en centimètres carrés sera, par seconde,

$$\frac{a}{(100)^2} \times v = \frac{220}{(100)^2} a\sqrt{n-1},$$

et par heure,

$$\frac{220 \times 3600}{(100)^2} a\sqrt{n-1} = 79,2 a\sqrt{n-1}.$$

Le volume d'eau équivalente serait $\frac{1}{1800}$ du volume de la vapeur, si celle-ci était à la pression de l'atmosphère; mais comme cette vapeur est n fois plus dense, le volume d'eau sera $\frac{n}{1800}$ de celui de la vapeur; de sorte qu'on aura pour ce volume, exprimé en mètres cubes,

$$q = \frac{n}{1800} \times 79,2 a\sqrt{n-1} = \frac{an\sqrt{n-1}}{22,8},$$

ou, en litres,

$$q = 1000 \times \frac{an\sqrt{n-1}}{22,8} = 44 an\sqrt{n-1};$$

d'où l'on tire

$$\frac{q}{44n\sqrt{n-1}},$$

comme dans le texte.

Cette quantité de vapeur doit être évidemment la plus grande que le feu pourrait produire dans toutes les circonstances possibles.

Quand n est moindre que 1, ou quand la densité est moindre que celle de la vapeur atmosphérique, c'est-à-dire de la vapeur à la température de 100° et sous la pression de l'atmosphère, la quantité sous le radical devient négative, et alors la vapeur s'élève seulement par la différence entre cette quantité négative et la force ascensionnelle due à sa légèreté; ce qui conduit à la belle théorie de l'évaporation.

La formule correspondante en mesures anglaises est

$$a = \frac{g}{10n \sqrt{n-1}}.$$

Soient, par exemple, $g = 28$ litres, ce qui correspond à la consommation pour la force d'un cheval, et $n = 1 \frac{1}{4}$ atmosphère pour la chaudière à basse pression, on aura

$$a = \frac{28}{44 \times \frac{5}{4} \sqrt{\frac{1}{4}}} = 1 \text{ centimètre carré.}$$

Ainsi, l'ouverture devra être d'autant de fois 1 centimètre carré qu'il y a de force en chevaux.

Au reste, ce mode de calcul paraît défectueux, en ce que n prend à la fin une valeur différente de sa valeur primitive, et de ce que, en outre, on n'y tient pas compte de l'influence de la densité de la vapeur sur la vitesse. Voici comment il semble devoir être rétabli :

n désignant la densité de la vapeur, par rapport à celle de la vapeur d'une atmosphère prise pour unité, on aura, en tenant compte de la contraction,

$$V = 2,75 \sqrt{\frac{n-1}{n}} h = 2,75 \sqrt{\frac{n-1}{n}} \times 1710 \times 10^{\frac{1}{3}} = 365,5 \sqrt{\frac{n-1}{n}},$$

$$\text{et } g = \frac{a V \times 3600}{(100)^2} \times \frac{n}{1710} = \frac{a \sqrt{n(n-1)}}{15} \text{ en mètres cubes,}$$

Une règle équivalente est exposée dans mon *Traité du Chauffage*; mais quoiqu'elle dérive des mêmes principes, elle n'en est pas déduite d'une manière aussi directe ni aussi générale †.

ou
$$q = 77a \sqrt{n(n-1)} \text{ en litres ;}$$

d'où l'on déduit
$$a = \frac{q}{77 \sqrt{n(n-1)}}.$$

Pour l'exemple ci-dessus, on aura

$$a \approx 0,65, \text{ au lieu de } a = 1.$$

M.

† *Traité du Chauffage*, trad., p. 216 (art. 127).

TROISIÈME SECTION.

De la production et de la condensation de la vapeur et des appareils qui y sont propres.

176. La vapeur est produite par l'action de la chaleur et condensée par le froid (art. 71). Nous avons maintenant à considérer les meilleures sources de chaleur pour produire la vapeur avec économie, et les moyens de l'appliquer de la manière la plus efficace. Notre section se divise naturellement sous les titres suivants :

- Recherches sur la combustion et les combustibles ;
- Effet et emploi des combustibles ;
- Construction des chaudières et des foyers ;
- Principes de la condensation ;
- Appareils dépendants des chaudières.

De la combustion et des combustibles.

177. Il y a différentes substances qui, chauffées à un degré de température relative à leur nature particulière, commencent à dégager de la chaleur et continuent à le faire jusqu'à ce que toute leur masse soit complètement transformée en de nouveaux produits, la plupart à l'état de gaz et se dissipant communément dans l'atmosphère. Toute substance qui subit ce changement est dite corps combustible ou corps en ignition ; si on l'emploie habituellement pour produire la chaleur, cette matière est dite alors *un combustible*.

178. La quantité de chaleur dégagée pendant la combustion est égale à la différence entre celle que le corps combustible contenait avant la combustion et celle qu'il retient après. Cette quantité est invariable quand on opère sur la même quantité de matière, et elle est simplement proportionnelle à la quantité de combustible employée, à moins toutefois que l'opération soit mal

conduite, ou que nous puissions rendre les produits de telle nature, qu'ils contiennent moins de chaleur que ceux qu'on obtient habituellement. Ce dernier cas serait peut-être le sujet de recherches infructueuses, quoique la Chimie fasse tous les jours des progrès rapides vers les moyens de résoudre pleinement cette question. Il est cependant de la plus haute importance, depuis l'application de la vapeur à la navigation, de déterminer l'effet du mélange des corps combustibles dans le double dessein de statuer sur ceux qui contiennent le plus de chaleur dans une quantité donnée de matière, et de rendre les produits d'une moindre capacité pour la chaleur, de manière à obtenir le plus grand effet possible; le mot *capacité* signifiant ici la chaleur totale que contiennent ces produits, ainsi qu'on l'a défini (art. 69).

179. Il est hors de doute qu'un corps solide contient moins de chaleur que la même substance à l'état liquide, et que celle-ci en contient moins qu'à l'état gazeux, pourvu que le corps demeure toujours le même composé chimique; mais si un solide formé du mélange de différentes substances simples est exposé à un certain degré de chaleur, les éléments réagiront les uns sur les autres, et l'on pourra obtenir des produits gazeux qui contiendront moins de chaleur que le mélange: tel est le cas de la poudre à canon, formée de charbon, de salpêtre et de soufre, et cette espèce de combustion semble exiger qu'un des éléments du composé soit aisément fusible. C'est une notion tout à fait erronée que de penser que la présence d'une substance particulière quelconque est essentielle à la combustion; car celle-ci doit se développer dans tout mélange de corps réagissant chimiquement les uns sur les autres à une certaine température, de manière à former de nouveaux produits qui contiennent moins de chaleur que les corps mélangés.

180. Ce qui se passe dans un mélange de corps aura lieu également lorsqu'un corps simple ou un composé chimique sera exposé à l'action d'un autre corps, avec lequel il forme de nouvelles combinaisons chimiques par l'intermédiaire d'une haute température; c'est ainsi que le charbon de bois chauffé à environ 370° brûle avec le contact de l'oxygène. La nouvelle combi-

raison qui en résulte est du gaz acide carbonique, c'est-à-dire du carbone uni à l'oxygène. A la température d'environ 425°, ce charbon enlève librement l'oxygène à l'air atmosphérique et donne ainsi lieu à la combustion. Or, comme le gaz oxygène ne change ni de volume ni de force élastique, on peut conclure que toute la chaleur contenue dans le charbon est dégagée, outre quelques portions de celle que contenait auparavant l'oxygène.

181. Il est important dans cette recherche de connaître dans quel état coexistent les éléments des corps, parce que cette circonstance doit affecter considérablement la quantité de chaleur. Si, dans les composés solides, l'hydrogène était lui-même à l'état solide, il devrait dégager alors moins de chaleur que l'hydrogène à l'état de gaz; mais je pense que l'hydrogène, le carbone et les autres gaz permanents sont combinés à l'état de gaz fortement comprimé et non à l'état solide. On trouvera cette opinion confirmée par les expériences comparatives que je présentai sur la combustion, et qui rendent assez certain que, dans l'échelle des températures que nous pouvons produire, ces corps élémentaires ne se trouvent même jamais à l'état-liquide dans leurs combinaisons. Nous sommes ainsi délivrés de ce que j'avais regardé comme la plus grande difficulté pour rendre la théorie de la combustion applicable aux opérations de la pratique¹. Lorsque l'on considère l'importance croissante de cette théorie, il y a lieu de s'étonner que, depuis les recherches de Rumford, elle soit demeurée aussi négligée. On admet généralement que la navigation par la vapeur réclame impérieusement de nouvelles recherches. L'immense approvisionnement qu'il faut aux bateaux à vapeur en combustible ordinaire rend presque impraticables les voyages de long cours; tant qu'il y aura probabilité de rendre

¹ Il a été supposé, par le petit nombre de personnes qui ont examiné ce sujet, que la combinaison de l'oxygène et de l'hydrogène développait la même quantité de chaleur, quoique l'hydrogène se trouvât dans un composé gazeux, liquide ou solide; mais cela ne pourrait avoir lieu si, dans ce dernier composé, l'hydrogène était uni molécule à molécule : d'où je conclus qu'il n'existe dans les corps solides qu'à l'état de gaz fortement comprimé, puisqu'il paraît développer la même quantité de chaleur dans tous les cas.

le combustible plus efficace ou d'en trouver d'autres qui produise plus d'effet, ce sera un sujet digne de toutes nos études.

182. Le premier point et le plus difficile consiste à déterminer la chaleur dégagée lorsque deux corps simples ou élémentaires se combinent et forment un corps composé ; quand on aura déterminé la chaleur correspondante à chacune des combinaisons binaires, il sera facile de calculer celle que développe toute autre combinaison.

183. La mesure de l'effet d'un combustible s'exprime par le nombre de degrés dont la chaleur développée par la combustion élèverait la température d'un poids égal d'eau ; ou bien par le poids de l'eau qui serait échauffée d'un degré, le poids du combustible étant pris pour unité.

184. La chaleur dégagée par le carbone, par suite de sa combinaison avec l'oxygène, est diversement évaluée : les résultats dépendent en quelque sorte des procédés employés pour mesurer la chaleur, tandis que dans d'autres cas, la différence provient de la qualité du charbon ¹.

Le carbone se combine avec deux tiers de son poids d'oxygène.

Un kilogramme de carbone peut élever, suivant le docteur

Crawford.	5760	kilog. d'eau de 1°.
Lavoisier.	7428	
Rumford.	5400	
Clément et Désormes. . .	7390	
Rassenfratz	7155	
Dalton.	3111	
	<hr/>	
	36244	
	<hr/>	
Moyenne.	6040.	

¹ *Philosophical Magazine*, vol. XLI, p. 295. — Thomson's *System of Chemistry*, vol. I, p. 149.

Le plus grand écart a lieu dans les expériences de Dalton, et paraît dû aux procédés employés par ce savant. En prenant 6000 kilog. d'eau élevée d'un degré pour mesure de l'effet d'un kilogramme de carbone, nous serons à peu près voisins de la vérité ¹.

185. La chaleur dégagée par l'hydrogène qui se combine avec l'oxygène est aussi différemment évaluée. Ce gaz se combine avec 8 fois son poids d'oxygène, et il développerait les quantités suivantes de chaleur, d'après les expériences

De Crawford.	37333 kilog. d'eau élevée de 1°.
Lavoisier.	23000
Dalton.	24900
Total.	<u>85233</u>
Moyenne.	28411.

Le nombre 27800 représente l'effet moyen de l'hydrogène d'une manière assez approximative, et en le comparant aux résultats d'autres expériences, nous l'avons trouvé-très voisin des effets réels.

186. Le phosphore, par sa combinaison avec l'oxygène, donne les quantités de chaleur ci-après :

Expériences de Lavoisier.	8556 kil. d'eau élevée de 1°.
Dalton	4744
Total	<u>13300</u>
Moyenne	6650.

Le soufre en se combinant avec l'oxygène produit, suivant Dalton, une quantité de chaleur équivalente à 1555 fois son poids d'eau élevé de 1°.

187. Au moyen de ces données, nous pouvons comparer les

¹ Ce résultat est un peu trop faible; il aurait fallu rejeter l'expérience de Dalton, qui est évidemment défectueuse, et la moyenne se fût élevée à 6626. M. Clément a trouvé dans ses expériences le nombre 7050. M.

divers corps composés qu'on a soumis à l'expérience, et nous pouvons aussi déterminer les proportions de l'oxygène qui est absorbé.

La première colonne du tableau suivant contient le nom de la substance et l'auteur de l'analyse; la seconde colonne donne la composition en parties décimales du poids; la troisième indique la quantité d'oxygène qu'exige chacun des éléments, ainsi que la totalité qu'absorbe le combustible; la quatrième colonne donne la chaleur dégagée par chacun de ces éléments, et leur somme exprime la totalité de celle que le combustible peut fournir; la cinquième et dernière colonne contient les quantités totales de chaleur développée par chaque substance, d'après l'expérience.

NOMS.	COMPOSITION de la partie combustible.	POIDS de l'oxygène nécessaire à la combustion, le poids du combustible étant pris pour unité.	NOMBRE DE KILOGRAMMES D'EAU élevés de 1° par kilogramme de combustible.	
			Par le calcul.	Par l'expérience.
GAZ.				
Hydrogène carboné.	Hydrogène, 0,25	2	6950	6622 Dalton.
	Carbone, 0,75	2	4500	
		4	11450	
Gaz oléfiant.	Hydrogène, $\frac{1}{7}$	1,14	3971	6833 Dalton.
	Carbone, $\frac{6}{7}$	2,3	5143	
		3,44	9114	
Oxyde de carbone..	Carbone, 0,43	0,57	2580	1944 Dalton.
LIQUIDES.				
Alcool. Pesant. spéc.. 0.812. <i>Analyse de M. Ure.</i>	Hydrogène, 0,1224	0,98	3400	4511 Dalton. 6194 Rumford.
	Carbone, 0,4785	1,27	2851	
		2,25	6251	
Éther sulfurique. Pesant. spéc., 0.7. <i>Analyse de M. Ure.</i>	Hydrogène, 0,133	1,06	3700	4882 Dalton. 8030 Rumford.
	Carbone, 0,536	1,59	3576	
		2,65	7276	
Huile de térébenth. <i>Analyse de M. Ure.</i>	Hydrogène, 0,0962	0,77	2700	4667 Dalton.
	Carbone, 0,825	2,2	4950	
		2,97	7650	
Naphte. <i>Analyse de M. Ure.</i>	Hydrogène, 0,123	0,98	3630	7333 Rumford.
	Carbone, 0,83	2,22	4980	
		3,20	8610	
Huile d'olive.	Hydrogène, 0,1336	1,07	3720	11000 Laplace. 7000 Crawford. 9000 Rumford. 8000 Dalton.
	Carbone, 0,772	2,06	4632	
		3,13	8352	
Huile de navette ou de coïza.				9300 Rumford.
SOLIDES.				
Cire jaune.	Hydrogène, 0,1137	0,91	3150	10344 Laplace. 7489 Crawford.
	Carbone, 0,8069	2,15	4841	
		3,06	7991	
Cire blanche.				9820 Rumford. 8100 Dalton.
Suif.				8370 Rumford. 8100 Dalton.
Bois de chêne. Fibre ligneuse sèche. <i>Expériences de Gay- Lussac et Thénard.</i>	Hydrogène, 0,0569	0,455	1580	
	Carbone, 0,5253	1,4	3152	
		1,855	5732	

SUITE DU TABLEAU.				
NOMS.	COMPOSITION de la partie combustible.	POIDS de l'oxygène nécessaire à la combustion; le poids du combustible étant pris pour unité.	NOMBRE DE KILOGRAMMES D'EAU élevés de 1° par un kilogramme de combustible.	
			Par le calcul.	Par l'expérience.
Bois de chêne. . . .	Déduisant 20 p. c/ pour l'eau, muci- lage, etc.	1,464	3823	3200 Rumford.
Houille collante de Newcastle. <i>Anal. de Thompson.</i>	Hydrogène, 0,0416 Carbone, 0,7516	0,334 2,060 <u>2,334</u>	1155 4500 <u>5655</u>	6155 Black. 5123 Watt.
Houille dite <i>cherry</i> , de Glasgow. <i>Anal. de Thompson.</i>	Hydrogène, 1,100 Carbone, 0,666	0,8 1,76 <u>2,58</u>	2780 3996 <u>6776</u>	
Houille à feuillets de Glasgow. <i>Anal. de Thompson.</i>	Hydrogène, 0,044 Carbone, 0,568	0,35 1,52 <u>1,87</u>	1222 3408 <u>4630</u>	
Houille à feuillets, la matière terreuse indéterminée. <i>Analyse de M. Ure.</i>	Hydrogène, 0,043 Carbone, 0,709	0,345 1,89 <u>2,235</u>	1194 4254 <u>5048</u>	
	Déduisant 10 p. % pour les cendres.	.....	4893	
Houille dite <i>cannel</i> <i>coal</i> , des environs de Coventry. <i>Anal. de Thompson.</i>	Hydrogène, 0,2 Carbone, 0,626	1,6 1,67 <u>3,27</u>	5555 3956 <u>9501</u>	
<i>Cannel coal</i> de Woodhall, près Glasgow. <i>Analyse de M. Ure.</i>	Hydrogène, 0,0393 Carbone, 0,722	0,315 1,93 <u>2,245</u>	1092 4332 <u>5424</u>	
	Déduisant 10 p. % pour les cendres.	.....	4882	
Tourbe carbonisée. <i>Anal. de Klaproth.</i>	Carbone, 0,525	1,4	3150	
Coke préparé en vase clos. <i>Moyenne des exp. de Thumps.</i> ¹	Carbone, 0,84	2,27	5040	5071 ²

188. Tels sont les résultats que les recherches les plus ré-

¹ Les analyses de Thompson sont publiées dans les *Annales de Philosophie*, et celles du docteur Ure se trouvent dans son *Dictionnaire de Chimie*.

² Ce résultat est extrait d'une comparaison d'expériences de Lavoisier, *Traité du Chauffage des édifices*, art. 51.

centes de chimie nous permettent de faire entrer en comparaison; ils suffisent pour montrer que l'accord du calcul et de l'expérience est assez exact et que les nombres que nous avons choisis pour les composés binaires sont très-près de la vérité. On remarquera particulièrement que la théorie et l'expérience concordent d'une manière satisfaisante pour la cire, l'huile et les autres substances qui sont de nature à donner les résultats les plus exacts.

Il existe cependant un autre mode de poursuivre nos recherches, non moins susceptible peut-être de donner des résultats aussi satisfaisants.

189. Dans les usines de l'éclairage par le gaz qui produisent une quantité déterminée de gaz et de coke pour un poids donné de houille ou autre substance, nous trouverons un moyen approximatif de mesurer l'effet de celle-ci comme combustible; mais, faute de notions précises sur la densité du gaz dans chaque cas, nous serons obligés de la regarder comme égale à celle de l'hydrogène carboné.

ESPÈCES de combustibles.	COMPOSITION.	OXYGÈNE.	CHALEUR.
Houille dite <i>cannel coal</i> de Wigam ¹ .	Gaz, 0,134	0,54	1528
	Coke, 0,635	1,45	2200
		1,99	3728
Houille inférieure de Staf- fordshire ² .	Gaz, 0,123	0,49	1367
	Coke, 0,61	1,39	3174
		1,88	4541
Tourbe. <i>Anal. de Klapproth</i> ³ .	Gaz, 0,100	0,4	1144
	Carbone, 0,200	0,535	1200
		0,935	2344

¹ Murdoch, *Philosophical Transactions*, 1808.

² *Encyclopædia Britannica*, supplément, article *Gaz light*.

³ *Philosophical Magazine*, vol. XVII, p. 312.

190. Lorsqu'on emploie l'un de ces combustibles pour produire la vapeur, il doit y avoir une perte d'effet équivalente à la quantité de vapeur formée par l'hydrogène et par l'eau qui se trouvent dans la substance : un kilogramme d'hydrogène formera 2 kilogram. de vapeur, et dans la pratique, la perte d'effet sera d'un cinquième de l'effet de l'hydrogène. En déduisant cette partie proportionnelle de l'effet total, ainsi que 650° pour chaque kilogramme d'eau contenu dans le combustible, nous trouvons les résultats suivants pour la puissance calorifique des espèces de combustibles les plus importantes ¹.

ESPÈCES DE COMBUSTIBLES.	EFFET en kilog. d'eau chauffée d'un degré par kilog. de combustible.	EFFET en kilog. d'eau convertie en vapeur à 105°.	QUANTITÉ de combustible pour convertir 1 hectol. d'eau en vapeur à basse pression.	Idem, en ajoutant 10 p. 1/10 pour les pertes.
Huile d'olive	6710 kil.	11,7	8,5 kil.	9,4
Houille collante	5400	8,4	11,9	13,1
Coke préparé en vase clos	5000	7,7	13,0	14,3
Houille à feuilletts	4400	6,75	14,8	16,3
Houille de Staffordshire.	4160	6,4	15,6	17,2
Bois de chêne sec.	3330	5,13	18,4	20,2
Tourbe carbon. en vase clos	3150	4,85	20,6	22,7
Tourbe compacte et sèche.	2160	3,35	30	33
Bois de chêne commun.	2000	3,07	32,5	35,8
Tourbe compacte dans son état ordinaire de dessèche- ment	1800	2,8	35,7	39,3

Ces quantités uniquement déduites de considérations théo-

¹ La chaleur latente de la vapeur est de 555° (art. 82). La température de la vapeur à basse pression est 105°; et la température moyenne de l'air étant d'environ 10°, nous avons

$$555 + 105 - 10 = 650;$$

d'où, en divisant par 650 l'effet calorifique en kilogrammes d'eau élevée d'un degré, nous déduisons le nombre de kilogrammes d'eau qui seraient convertis en vapeur, et, par suite, la quantité de combustible nécessaire pour vaporiser un hectolitre d'eau.

riques sont tellement voisines des effets actuellement fournis par la pratique ¹, qu'elles laissent peu à espérer de nouveaux perfectionnements; et si l'on ajoute un dixième pour les diverses causes qui tendent à diminuer l'effet, on pourra les adopter comme la mesure de cet effet, dans les calculs que nous aurons à faire. Le tableau donne en outre un moyen facile de comparer la dépense des diverses espèces de combustibles.

191. Les expériences pour déterminer la quantité de vapeur que peut produire un poids donné de combustible sont loin d'être aussi nombreuses que pourraient l'espérer ceux qui ignorent les difficultés qu'on rencontre dans la recherche de résultats précis. On est en général éloigné de se livrer à des expériences soignées, tant à cause de la dépense qu'à cause du haut degré d'attention qu'elles exigent; mais ces inconvénients seraient considérablement diminués par le choix de procédés que fournit une connaissance approfondie du sujet. Quoi qu'il en soit, le tableau suivant ne laissera pas que d'être utile.

¹ Ces quantités théoriques sont trop faibles, à en juger par les expériences faites en France. Ainsi, M. Clément trouve que 1 kilogramme de houille ou de coke de bonne qualité peut vaporiser jusqu'à 10^k,8 d'eau prise à 0°; et M. Despretz a éprouvé qu'un charbon très-pur (provenant de la calcination du sucre) était susceptible de vaporiser 12^k,56 d'eau prise aussi à 0°. Il en résulte qu'on serait loin d'avoir atteint, dans la pratique, le degré de perfection que font espérer des effets théoriques aussi élevés. M.

ESPÈCES DE COMBUSTIBLES.	EFFET en kilogrammes d'eau chauffée d'un degré par kilogramme de combustible.	VAPEUR A BASSE PRESSION DE 105°, l'eau prise à 10°.	
		Kilogram. d'eau vaporisés par kilogramme de combustible.	Kilogrammes de combustible pour vaporiser 1 hectol. d'eau.
Houille de Newcastle (de	5860	5,95	16,8
ou de Swansea, sui- (à	5780	8,9	11,2
vant Watt, (moyenne.	4820	7,4	13,5
Houille de Newcastle, suivant le docteur Black	5120	7,9	12,6
<i>Idem</i> de Walls' End, par mes ex- périences	5580	8,6	11,6
Houille de Wednes- (de	2900	4,45	22,5
bury, suivant Watt, (à	4350	6,68	15,0
(moyenne.	5615	5,56	18,0
Bois de pin sec, exp. de Rurnford.	2010	3,1	32,5
Bois de chêne sec, <i>idem</i> .	3150	4,85	20,6
Tourbe compacte de Dartmoor dans son état ordinaire de dessèchement.	par 1353	2,05	48,8
Houille (<i>culm</i>) de Glasgow.	mes 1850	2,85	35,0
<i>Idem</i> , du pays de Galles.	expérien. 2530	3,56	28,0

Le charbon menu ou de rebut produit environ les $\frac{3}{4}$ de l'effet de bonne houille de même qualité.

Nous n'avons considéré jusqu'à présent que l'effet du combustible, lorsqu'il dégage la totalité ou la presque totalité de sa chaleur; mais pour atteindre ce but, il faut observer certaines conditions dans la combustion et la conduite du feu.

Opération de la combustion.

192. Les corps élémentaires exigent différents degrés de chaleur pour former de nouvelles combinaisons. M. Davy a rendu probable que le charbon de bois et l'oxygène se combinent à environ 370° hors de la présence de l'air ordinaire, et que l'hydrogène et l'oxygène se combinent à environ 425°; mais quand

l'oxygène est fourni par l'air libre, la température de 420° pour le charbon et celle de 510 pour l'hydrogène¹, semblent être celles où ces corps s'enflamment rapidement. Quand le combustible dégage des gaz inflammables, l'intensité de la température a besoin d'être encore plus élevée; aussi ne devons-nous pas être surpris de ce que dans les procédés ordinaires de l'application de la chaleur, il y ait peu ou point d'avantage à ce que le combustible contienne une grande proportion d'hydrogène, sauf toutefois l'accroissement de tirage qui en résulte dans le fourneau. D'un autre côté, si l'intensité de la chaleur est trop grande, les matières terreuses du combustible se combinent avec quelques portions du carbone, et entrent en fusion en formant les scories vitreuses nommées *mâche-fer*; ce qui fait perdre une partie de la matière combustible. Il y a lieu de croire que cet effet a lieu à un degré considérable, quand la chaleur approche d'environ 800°; d'où nous pouvons conclure que la meilleure température pour l'effet utile doit être une température moyenne, n'excédant pas 650°.

Nous avons maintenant à considérer les circonstances et les précautions nécessaires pour que le combustible et ses produits se maintiennent à cette température jusqu'à ce qu'ils soient consumés.

193. 1° Il faut ménager vers toutes les parties de la masse brûlante un accès aussi libre que possible pour le volume d'air qui doit fournir l'oxygène nécessaire à la combustion, et il faut éviter d'exposer la surface du combustible au contact refroidissant de toute autre portion d'air superflue, en tant que le permettra le tirage de la cheminée.

194. 2° La quantité ou la masse de matière en combustion doit être tellement proportionnée à l'étendue et à la température de la surface à chauffer, qu'elle ne puisse perdre qu'une quantité de chaleur égale à celle qu'elle développe, du moment qu'on

¹ Le docteur Thompson adopte 555°, d'après des expériences qui lui sont propres. *System of Chemistry*, vol. I, p. 224.

atteint la meilleure température pour la combustion, tout en tenant compte du refroidissement qu'éprouve la surface par l'action de l'air nécessaire à l'opération.

195. 3^o On doit tenir la flamme et la fumée en contact avec le vase à chauffer, aussi longtemps que ce dernier est susceptible d'en recevoir un accroissement de chaleur.

196. 4^o Le liquide qu'il s'agit de vaporiser doit être introduit de manière à recevoir le premier degré de chaleur au point où la fumée agit en dernier lieu sur le vase, afin qu'il y ait la plus grande différence possible entre la température de la fumée et celle du fluide; par ce moyen, le liquide dépouille la fumée de sa chaleur, à mesure qu'il s'échauffe graduellement jusqu'à la température de la vapeur, qu'il finit par acquérir en arrivant au-dessus du foyer.

Volume d'air nécessaire à la combustion, et surface de la grille.

197. Le procédé le plus efficace qu'on ait encore essayé pour alimenter régulièrement les foyers avec l'air nécessaire à la combustion, consiste à brûler le combustible sur une grille placée au-dessus d'un cendrier qui reçoit les cendres, et sert en même temps de passage à l'air atmosphérique.

Dans l'examen de ce sujet, la première recherche qui se présente est celle de la quantité d'air qui doit passer dans le foyer pour la combustion de chaque espèce de combustible. Nous avons vu que chaque variété exigeait des quantités différentes d'oxygène. Pour les diverses espèces de houille, cette quantité varie de 1,87 à 3 kilogrammes, par chaque kilogramme de charbon. Or, un kilogramme d'oxygène occupe un volume de $\frac{3}{4}$ de mètre cube, et il exige cinq fois son poids d'air atmosphérique pour qu'une quantité équivalente passe dans le foyer; ainsi donc, il faudra $3\frac{3}{4}$ mètres cubes d'air pour fournir un kilogramme d'oxygène. Mais il n'est pas possible de rendre efficace la totalité de l'air; une partie s'échappera sans éprouver de changement par la combustion: la proportion que j'ai adoptée est de

ne regarder comme efficace que les $\frac{2}{3}$ de la quantité employée. En conséquence, il nous faudra 5,6 mètres cubes d'air par kilogramme d'oxygène; le produit sera du gaz acide carbonique, quand le carbone seul sera consumé, et la pesanteur spécifique de l'air, qui aura ainsi servi à la combustion, deviendra 1,05. Mais certains combustibles contiennent de l'hydrogène, et dans ce cas, l'oxygène et l'hydrogène formant de la vapeur qui occupe un volume double de celui de l'oxygène, le volume total ou le mélange d'air et de vapeur sera 6,4 mètres cubes par chaque kilogramme d'oxygène combiné avec l'hydrogène; la pesanteur spécifique de ce mélange sera réduite à 0,9. La dernière colonne du tableau suivant a été calculée en prenant pour base les nombres donnés dans la dernière colonne du tableau précédent (art. 190).

ESPÈCES DE COMBUSTIBLES.	AIR ET FUMÉE par kilogramme.	PESANTEUR spécifique de la fumée.	AIR ET FUMÉE par mètre cube d'eau converti en vapeur à basse pression.
	mètres cubes.		mètres cubes.
Houille grasse ou collante.	13,4	1,03	1780
—— cerise.	15,2	1,00	
—— à feuillets. . . .	10,7	1,02	1780
—— dite <i>cannel coal</i> .	11,7	1,01	
Coke.	13,5	1,05	1950
Bois ordinaire.	10,8	0,90	3900

Il paraît, en conséquence, que nous pouvons assigner, pour les quantités d'air et de fumée exprimées en nombres ronds, les valeurs suivantes :

Pour la houille	180 à 200 mètres cubes.
Pour le coke.	200 <i>id.</i> <i>id.</i>
Pour le bois	200 <i>id.</i> <i>id.</i>

à raison de chaque hectolitre d'eau, converti en vapeur ¹.

198. La grille doit avoir une étendue suffisante pour laisser passer l'air nécessaire à la combustion dans l'état de dilatation où le met la température du combustible enflammé; ce volume d'air est entraîné à travers le foyer par l'effet réuni du tirage de la cheminée et du cendrier. Ainsi, on devra se ménager un cendrier aussi profond que possible, et le disposer de manière qu'il se rétrécisse en montant jusqu'à n'avoir plus que la largeur de la grille, le but qu'on doit se proposer étant d'augmenter l'énergie du feu, sans cependant donner trop de vitesse à la fumée, le long des conduits ou carneaux ². A l'aide de la formule (art. 172), il nous est facile de calculer l'aire des espaces vides de la grille, dans de semblables circonstances.

Pour la houille, la quantité d'air nécessaire à la vaporisation d'un hectolitre d'eau est de 200 mètres cubes; la température n'étant pas moindre que 425°, et la hauteur génératrice du mouvement étant exprimée par h , nous aurons pour l'aire du vide de la grille, exprimé en décimètres carrés,

$$a = \frac{9}{\sqrt{h}}.$$

Or, comme les barres de la grille ont ordinairement la même épaisseur que les intervalles laissés entre elles, nous aurons pour l'aire totale

$$A = \frac{18}{\sqrt{h}}.$$

¹ En prenant pour terme de comparaison 50 litres d'eau vaporisés par heure, qui représentent la consommation correspondante à environ la force d'un cheval, ces valeurs deviendront :

Pour la houille.	54 à 60 mètres cubes.
Pour le coke.	60 <i>id. id.</i>
Pour le bois.	120 <i>id. id.</i>

² La recommandation de faire le cendrier très-profond paraît peu fondée dans la pratique, attendu que l'air, avant d'atteindre la grille, n'étant chauffé que par le rayonnement, n'acquiert qu'un faible degré de chaleur, et ne peut, en conséquence, augmenter sensiblement le tirage; il vaudrait mieux donner à la cheminée cet excédant de hauteur recommandé pour le cendrier. M.

ou bien, en mètres carrés,

$$A = \frac{0,18}{\sqrt{h}}.$$

Mais, pour produire effectivement cette quantité de vapeur, il faudra employer le double de cette aire; ce qui reviendra à

$$A' = \frac{0,36}{\sqrt{h}};$$

et s'il s'agit de vaporiser 28 à 30 litres par heure, ou la quantité consommée par force de cheval, notre expression sera

$$A'' = \frac{0,1}{\sqrt{h}}.$$

Quand la hauteur, depuis le cendrier jusqu'au point où la fumée entre dans la cheminée, est de 1^m,25, l'aire est alors 0^m,09, ce qui est en effet l'étendue adoptée par les mécaniciens, par chaque force de cheval.

La proportion entre les parties pleines et les parties vides de la grille n'est pas toujours la même; mais elle ne devrait pas différer beaucoup de celle que nous avons mentionnée ci-dessus, attendu que l'air se dilate par le contact du feu à près de 2 $\frac{1}{2}$ fois son volume.

199. Pour la combustion du bois et de la tourbe, l'aire de la grille sera

$$\frac{0,72}{\sqrt{h}},$$

à raison de chaque hectolitre d'eau converti en vapeur; ce qui revient à

$$\frac{0,2}{\sqrt{h}},$$

à raison de chaque force de cheval, h exprimant toujours la hauteur du cendrier en mètres, l'augmentation d'aire de la grille

dans ce cas devant s'obtenir par l'élargissement des barres¹.

De la surface des chaudières exposée au feu.

200. La surface d'une chaudière, pour produire un effet donné, doit être suffisante pour recevoir la chaleur capable de vaporiser la quantité d'eau exigée. Or, la surface du fond ou celle qui est exposée à la flamme, étant la plus efficace, c'est cette partie qui doit être d'une étendue suffisante pour recevoir toute l'action de la flamme, tandis que les surfaces des conduits, ou surfaces latérales, pourront ne recevoir que l'action de la fumée. Cette distinction nous fournit un moyen facile d'en déterminer les proportions.

Nommons T la température moyenne d'un foyer fermé;

t , la température de la vapeur;

s , la surface du fond de la chaudière.

La chaleur de conversion de l'eau en vapeur étant 556° , ajoutés à sa température moins 12° , nous aurons, d'après une expérience du professeur Leslie²,

$$\frac{s}{4} (T - t) = 544 + t,$$

¹ Dans ce calcul, M. Tredgold paraît prendre la hauteur du cendrier comme hauteur de la colonne génératrice de la vitesse, ce qui est évidemment erroné, puisque le tirage est principalement produit par la cheminée et par la colonne d'air brûlé qu'elle contient, et qui s'y trouve à une température bien plus élevée que celle du cendrier. Il arrive cependant à un résultat assez conforme à la pratique; mais c'est en faisant, dans le cours du calcul, des hypothèses non moins fautive, qui forment une compensation en sens contraire.

Au reste, les formules correspondantes en mesures anglaises sont, pour la houille,

$$a'' = \frac{2}{\sqrt{h}},$$

et pour le bois et la tourbe,

$$a'' = \frac{4}{\sqrt{h}}.$$

² *Recherches sur la nature de la chaleur*, expériences 51—52.

lorsque la quantité d'eau vaporisée par heure est de 1 mètre cube ; on déduit de là , pour la surface ,

$$s = 4 \frac{544 + t}{T - t}.$$

201. Quand une masse de combustible doit être brûlée dans un foyer fermé , nous avons vu qu'il n'était pas à désirer que sa température dépassât 650° (art. 192). Or, le fond de la chaudière doit être à quelque distance du combustible pour permettre le développement de la flamme , et par suite la chaleur devant agir sur une plus grande surface , diminuera d'intensité ; mais , terme moyen , elle ne devra pas être moindre que 425° lorsqu'on brûlera de la houille ; en conséquence , nous pouvons adopter ce nombre pour valeur de T. Pour la vapeur à basse pression , nous avons $t = 107^{\circ}$: en conséquence , notre formule devient

$$s = 4 \times \frac{544 + 107}{425 - 107} = 8^{\text{m}},20.$$

Si la vapeur devait être à la température de 150°, ce qui correspond à une force élastique de 2^{kil},85 par centimètre circulaire , nous aurions pour la surface

$$s = 4 \times \frac{544 + 150}{425 - 150} = 10^{\text{m}}.$$

Ces exemples suffiront pour montrer l'accroissement de surface exposée au feu qu'exige la vapeur à haute pression. Occupons-nous maintenant d'évaluer l'étendue des surfaces latérales.

202. Nous avons vu que la houille exige , pour produire l'effet ci-dessus , c'est-à-dire pour vaporiser un mètre cube ou 10 hectolitres d'eau , le développement de 2000 mètres cubes d'air brûlé , ou autres produits gazeux élevés à la température de 425° ; la chaleur spécifique de l'air étant 0,00032 , son effet sera le même que pour élever un mètre cube d'eau à la température exprimée par

$$0,00032 \times 2000 \times (425 - t) = 0,64 (425 - t).$$

Or, il sera suffisamment exact, pour notre objet, de considérer l'excédant effectif de température comme étant un peu moindre que la température moyenne entre 425 et t ; nous aurons alors

$$\frac{\frac{s'}{4} (425 - t)}{2,5} = 0,64 (425 - t);$$

d'où l'on tire $s' = 6^m,4$.

203. En comparant $0,64 (425 - t)$ avec $544 + t$, nous trouvons que la puissance calorifique des surfaces latérales n'est environ que le quart de l'effet des surfaces du fond; nous pouvons donc réduire la surface exposée au feu calculée par notre règle, d'un quart de sa valeur, à raison de chaque mètre cube d'eau vaporisé par heure. La formule ainsi modifiée, deviendra

$$s = 3 \frac{544 + t}{425 - t}.$$

204. Mais dans les chaudières des machines à vapeur, cette quantité ne suffirait que tout juste pour la consommation courante, tandis qu'il faut que la chaudière ait une force de vaporisation telle qu'elle puisse fournir, au besoin, le double de la quantité actuellement requise; autrement la pression sur le piston diminuerait et l'effet s'affaiblirait dans le même rapport (*voyez* art. 331 et 339): en conséquence, la surface du fond sera, d'après cette condition,

$$s = \frac{6,6 (544 + t)^2}{425 - t}.$$

* La valeur de cette surface, correspondant à la force d'un cheval, sera

$$s = \frac{0,2 (544 + t)}{425 - t};$$

ce qui revient à peu près, en mesures anglaises, à

$$s = \frac{2 (948 + t)}{800 - t}$$

M.

La surface latérale sera constamment $2 \times 6,4 = 12^m,8$; de sorte qu'on peut adopter 13 mètres en nombre rond.

Tableau des surfaces de fond et de côtés pour les chaudières à vapeur.

PRESSION en atmosphères	TEMPÉRA- TURE.	SURFACE EXPOSÉE AU FEU.		
		Nature des surfaces.	Pour vaporiser un mètre cube d'eau par heure.	Par force de cheval.
1 $\frac{1}{4}$	107	Fond de la chaudière.	13 ^m ,5	0,40
		Côtés.	13	0,39
2	122	Fond.	14,5	0,43
		Côtés.	13	0,39
5	135	Fond.	15,5	0,47
		Côtés.	13	0,39
4	145	Fond.	16,3	0,49
		Côtés.	13	0,39
5	153	Fond.	17	0,51
		Côtés.	15	0,39
8	172	Fond.	18,7	0,56
		Côtés.	15	0,39
<i>Pour l'eau de mer et la vapeur à basse pression.</i>				
1 $\frac{1}{4}$	110	Fond de la chaudière.	13,7	0,41
		Côtés.	15	0,39

205. Si l'on veut comparer ces nombres avec ceux que donnent les règles en usage, il faut prendre la somme des surfaces de fond et de côtés. On peut remarquer que la vaporisation de $\frac{1}{3}$ de mètre cube, ou environ 30 litres, représente d'une manière assez approchée la consommation de vapeur correspondante à la force d'un cheval pour les machines de grandes dimensions; et nous l'avons en effet considéré comme équivalente dans le cal-

cul du tableau ci-dessus. On peut admettre qu'un hectolitre de bonne houille, comme celle de Newcastle, peut vaporiser 6 hectolitres d'eau environ.

Smeaton a dressé, avec son exactitude accoutumée, un tableau contenant la surface des chaudières qui devait être exposée au feu et à la fumée, pour les machines atmosphériques, ainsi que la quantité de houille qu'elles doivent consommer par heure. La quantité de surface qu'il donne comme correspondante à la consommation d'un hectolitre de houille est de $17^m,9$, et pour 66 hectolitres, il donne un peu moins de 16 mètres par hectolitre¹. Ceci revient à $26^m,7$ ² de surface pour vaporiser un mètre cube d'eau par heure. Notre calcul donne un nombre peu différent, c'est-à-dire $26^m,5$ pour la vapeur à basse pression.

Watt rapporte qu'il a trouvé que dans les fourneaux les mieux construits, il faut 26 mètres de surface de chaudière exposée au feu, pour vaporiser un mètre cube d'eau par heure³, ce qui n'est que la règle de Smeaton en termes généraux.

206. La proportion de la surface du fond, ou celle qui reçoit immédiatement l'action du feu et de la flamme, semble n'avoir été soumise à aucune règle fixe; les proportions adoptées en pratique varient de 10 à 16 mètres carrés, pour chaque mètre cube d'eau vaporisé par heure. M. Millington paraît être le premier qui ait proposé de mesurer le pouvoir vaporisant d'une chaudière par la surface du fond, et il donne pour exemple qu'une chaudière pour une machine de 20 chevaux a ordinairement $4^m,6$ de long et $1^m,8$ de large, représentant $8^m,28$ carrés de surface, ou $0^m,41$ par chaque force de cheval⁴, et qu'une chaudière pour une machine de 14 chevaux présente $5^m,7$ de surface; ce qui revient aussi à $0^m,41$ par force de cheval. J'ai observé que des chaudières étaient hors d'état de fournir la quantité proposée

¹ *Ree's Cyclopædia*, art. *Steam engine*.

² Ce résultat correspond à $0^m,8$ pour 50 litres d'eau vaporisés, ou à peu près pour la force d'un cheval.

³ Robison's *Mechan. Philosophy*, vol. II, p. 147.

⁴ *Epitome of Natural Philosophy*, p. 266.

de vapeur, quand elles avaient moins de $0^m,10$ de surface, et qu'au contraire, l'effet se trouvait très-satisfaisant quand elles avaient les proportions assignées par les règles ci-dessus, pourvu qu'elles eussent aussi une étendue convenable de surface dans les conduits ou carreaux.

207. Pour ce qui concerne la vapeur à haute pression, quelques expériences intéressantes ont été faites par M. Wood ¹, sur les machines de chariots à vapeur; elles montrent combien l'emploi de la chaleur est désavantageux lorsqu'on essaye de produire la vapeur, en élevant la température plutôt qu'en augmentant les surfaces.

La première expérience a eu lieu sur une chaudière cylindrique de $2^m,4$ de long, de $1^m,25$ de diamètre, et contenant un tube intérieur de $0^m,5$ de diamètre, lequel en occupe toute la longueur, contient le cendrier, la grille et le foyer, dans sa partie antérieure, et après avoir donné passage à la fumée, aboutit vers l'extrémité de la chaudière à un tube vertical servant de cheminée. La pression de la vapeur dans la chaudière était limitée à $3^{kl},5$ par centimètre carré au-dessus de l'atmosphère.

La surface totale du tube formant foyer et conduit de la fumée n'était que de $3^m,7$, et elle était la même dans toutes les expériences; mais dans le fait, il n'y en avait guère que les $\frac{2}{3}$, c'est-à-dire $2^m,4$, qui produisissent de l'effet comme surface chauffée.

208.

Résultat des expériences.

Durée de l'expérience.		Houille consommée par heure.	Eau vaporisée par heure.	Combustible pour vaporiser 1 hectolitre d'eau.	Surface chauffée pour chaque hectol. d'eau.
heures.	minutes.	kilogrammes.	hectolitres.	kilogrammes.	mètres carrés.
9	35	120	4,4	27	0,55
9	27	122	4,25	28	0,57
4	48	146	4,5	32,5	0,54

¹ *Treatise on Rail roads*, p. 249.

L'intensité moyenne du feu, pour produire cet effet, doit avoir été de 650°; le combustible consommé est un peu plus que le double de la quantité qui est ordinairement nécessaire pour produire la même quantité de vapeur.

209. Dans une autre expérience, la longueur de la chaudière était 2^m,8, son diamètre de 1^m,2, et celui du tube de 0^m,56; la force de la vapeur était encore limitée à un excédant de 3^{kl},5 par centimètre carré. Dans ce cas, la surface totale du tube en contact avec l'eau de la chaudière ne dépassait pas 4^m,8, ce qui donne 3^m,2 seulement de surface utile, en ne considérant comme efficaces que les deux tiers de la surface totale.

Durée de l'expérience.		Houille consommée par heure.	Eau vaporisée par heure.	Combustible pour vaporiser 1 hectolitre d'eau.	Surface chauffée pour chaque hectol. d'eau.
heures.	minutes.	kilogrammes.	hectolitres.	kilogrammes.	mètres carrés.
6	52	104	3,45	30	0,93
1	26 $\frac{1}{4}$	186	6,5	28,5	0,49

La différence dans les résultats de ces expériences est due principalement à la différence de densité de la vapeur dans la chaudière, dont l'état n'a pas été déterminé; et, bien qu'il eût pu l'être d'une manière indirecte, d'après le nombre de coups par minute et la résistance, ce ne serait pas un moyen assez exact pour qu'on pût en tirer des conclusions utiles.

De l'espace occupé par la vapeur et l'eau dans les chaudières.

210. Il faut évidemment qu'une chaudière contienne assez de vapeur pour alimenter la machine pendant chaque coup de piston, sans donner lieu à un décroissement sensible dans la force élastique; ainsi l'espace réservé à la vapeur dépendra de la ma-

nière dont ce fluide sera fourni au cylindre. Si la vapeur n'est introduite que pendant une partie de la descente du piston, il doit y avoir d'autant plus de vapeur relativement au volume qui est employé, que la durée de l'interruption est plus grande. En supposant que la vapeur soit engendrée d'une manière uniforme, qu'elle n'occupe qu'un espace égal au volume consommé à chaque course, et qu'on ait besoin de toute cette quantité durant la descente du piston, la force élastique dans la chaudière variera de moitié, et la perte d'effet sera considérable.

Ce sujet mérite donc quelques recherches ultérieures, afin que nous puissions voir jusqu'à quel point les maximes de la pratique se trouvent confirmées par les principes raisonnés. On assure, sans spécifier le genre des machines, qu'une chaudière doit avoir une contenance de 5 ou 6 fois le volume de vapeur exigé à chaque coup ¹; d'autres établissent 8 fois; le docteur Young cite une remarque d'après laquelle ce serait 10 fois le volume ², et M. de Prony assure que c'est un des avantages de la machine à double effet de n'exiger qu'une chaudière de moindre dimension que celle des machines à simple effet ³.

211. Supposons que l'action du feu soit uniformément la même, et que pendant l'unité de temps, elle engendre un volume de vapeur représenté par 1, lequel soit suffisant pour alimenter la machine; mais supposons que la totalité de ce volume soit requise pour un temps plus court t . Soit c la contenance de la chaudière relativement à l'espace occupé par la vapeur, et p la force élastique au moment où la vapeur commence à sortir. Alors la quantité de vapeur qui restera dans l'espace c sera à la fin de l'écoulement,

$$c + t = 1;$$

et la force élastique, étant en raison inverse du volume, deviendra,

¹ Millington's *Epitome of Natural Philosophy*, p. 157.

² *Natural Philosophy*, vol. II, p. 259.

³ *Architecture hydraulique*, vol. II, p. 106.

au bout de ce temps,

$$\frac{p(c + t - 1)}{c};$$

de sorte que la variation sera

$$p - \frac{p(c + t - 1)}{c} = p \left(\frac{1 - t}{c} \right).$$

Or, dans une machine à simple effet, le temps t , pendant lequel la vapeur agit à pleine pression, est $\frac{1}{2}$; par conséquent, la perte de force élastique sera

$$\frac{p}{2c}.$$

Mais si nous faisons $c = 8$ fois la quantité exigée, la perte sera seulement

$$\frac{1}{16} p;$$

de sorte que la force élastique ne variera que de $\frac{1}{16}$, ou d'environ $\frac{1}{2}$ hectogramme par centimètre circulaire pour la vapeur à basse pression.

212. Si la vapeur est interceptée avant la fin de la course, la variation s'étendra évidemment plus loin : par exemple, dans une machine à simple effet, où la vapeur serait interceptée au milieu de la descente du piston, la variation de la force élastique dans la chaudière sera

$$p \frac{3}{4c};$$

ce qui revient à environ $\frac{3}{11}$ lorsque la contenance de la chaudière, relativement à la vapeur, est égale à 8 fois le volume de ce fluide dépensé à chaque coup.

213. Dans les machines à double effet, lorsque la vapeur agit à pression constante ou sans expansion, le temps t est presque le même que celui désigné par 1, et il suffira, dans ce cas, de 3 fois

le volume dépensé à chaque coup de piston ; mais si la vapeur est interceptée à une partie quelconque de la course, faisons t égal à cette fraction, et nous trouverons jusqu'à quel point la contenance doit être augmentée pour rendre la variation de force peu sensible. Ainsi, lorsque la vapeur est interceptée au milieu de la course, nous avons

$$p \left(\frac{1 - \frac{t}{2}}{c} \right) = \frac{p}{2c} ;$$

ce qui est le même résultat que pour les machines à simple effet. Nous ne devons pas donner à c une valeur moindre que 8 ; mais il faut remarquer que, dans tous ces cas, c'est c fois le volume de la valeur employée telle qu'elle est dans la chaudière, et non c fois la contenance du cylindre, parce qu'il n'entre pas de vapeur dans ce dernier pendant tout le temps où l'expansion s'effectue.

214. Nous pouvons adopter, sans erreur sensible, que chaque coup de piston consomme un mètre cube de vapeur, à raison de chaque mètre cube d'eau vaporisé par heure dans les chaudières à basse pression ; et si, ce qui s'accorde avec les autres parties de la disposition de la machine, la variation est limitée à $\frac{1}{30}$ de la force de la vapeur, nous aurons

$$\frac{1 - t}{c} = \frac{1}{30} ;$$

d'où nous tirons

$$c = 30 (1 - t) ;$$

ce qui revient à la règle suivante : en prenant pour unité de temps l'intervalle qui s'écoule entre les moments des ouvertures successives des soupapes de distribution, retranchez de l'unité la fraction qui exprime le temps pendant lequel les soupapes restent ouvertes, et 30 fois la différence donnera l'espace que doit occuper la vapeur en mètres cubes dans une chaudière à basse pression.

Par exemple, soit une machine à double effet dans laquelle la

vapeur soit interceptée aux $\frac{2}{3}$ de la course; dans ce cas, la course entière correspond à l'intervalle entre les ouvertures successives des soupapes, et $\frac{2}{3}$ est la fraction à soustraire; on a donc

$$c = 30 \left(1 - \frac{2}{3} \right) = 10;$$

ce qui donne dix mètres cubes pour la partie de la capacité de la chaudière réservée à la vapeur, en supposant que le volume de vapeur dépensé soit d'un mètre cube à chaque pulsation.

215. La même règle est applicable à une chaudière à haute pression, à cela près qu'au lieu d'en déduire directement l'espace en mètres, il faudra diviser trente fois la différence par la densité de la vapeur, comparée à la vapeur atmosphérique prise pour unité.

C'est ce qu'on peut faire avec une approximation suffisante pour la pratique, en divisant par le nombre d'atmosphères équivalent à la force de la vapeur dans la chaudière.

Si, pour une machine à haute pression et à double effet, dans laquelle la vapeur n'est introduite que durant la moitié de la course, la force de la vapeur dans la chaudière est de quatre atmosphères, alors, pour chaque mètre cube d'eau vaporisé, on aura

$$30 \cdot \frac{\left(1 - \frac{1}{2} \right)}{4} = 3^{\text{mèt. cub.}};75$$

pour l'espace occupé par la vapeur.

216. Même dans une machine destinée à agir à pleine pression, durant toute la course, il faudra déduire le temps d'ouvrir et fermer les soupapes; dans quelques-uns des modes usités, un quart de la course au moins est employé à cette manœuvre. Ainsi, dans quelque cas que ce soit, nous ne pouvons guère adopter moins de huit, divisé par le nombre d'atmosphères représentant la force de la vapeur dans la chaudière, pour expression en mètres cubes de l'espace occupé par la vapeur, par chaque mètre cube d'eau consommé par heure.

217. *Espace ou volume de l'eau dans la chaudière.* Il est

assez évident que l'eau doit couvrir les parois de la chaudière sur tous les points exposés au feu, c'est-à-dire un peu plus haut que les conduits de la fumée; mais il y a une autre condition qui est moins évidente, quoique de grande importance par ses effets, surtout dans les bateaux à vapeur, où l'on doit chercher à réduire autant que possible le volume et le poids des appareils.

La quantité d'eau qu'une machine consomme n'est pas introduite avec une régularité parfaite : cette alimentation se fait d'une manière plus uniforme quand l'eau est refoulée par une pompe mue par la machine; la portion introduite est régularisée par un flotteur (*Voyez* pl. III, fig. 2).

La quantité d'eau nécessaire pour produire la vapeur devant cependant être fournie dans tous les cas, supposons que sa température soit de 40° , et celle de l'eau dans la chaudière de 107° ; la quantité qui est dans la chaudière doit être proportionnée à celle qui est introduite, de manière que la température ne soit pas abaissée jusqu'à réduire la force de la vapeur d'un trentième; autrement il y aurait évidemment une perte considérable d'effet dans l'action de la vapeur. Mais l'abaissement d'un degré dans la température de l'eau diminuerait sa force d'un trentième; ainsi, supposant la quantité introduite à chaque fois égale à 1, et la quantité dans la chaudière égale à x , on aura

$$\frac{(1 \times 40) + (x \times 107)}{1 + x} = 106;$$

d'où l'on tire $x = 66$ à peu près : ainsi, il faut soixante-six fois autant d'eau dans la chaudière qu'on en introduit chaque fois pour son entretien ¹; autrement la force de la vapeur serait abais-

¹ Cette fixation paraît trop forte; elle est fondée, en effet, sur la supposition que l'eau introduite refroidira subitement le volume d'eau et de vapeur qui se trouve dans la chaudière. Mais si l'eau alimentaire est introduite vers le fond de celle-ci (comme c'est l'ordinaire), elle se trouvera échauffée, et portée même au degré d'ébullition, avant d'arriver à la surface et de pouvoir refroidir la vapeur par son contact. Il n'y aurait, au reste, pas d'inconvénient à adopter, pour les machines fixes, le volume d'eau fixé par M. Tredgold; mais il pourrait en résulter une surcharge inutile dans les bateaux et les voitures à vapeur, où la légèreté des appareils, comme il le reconnaît, est d'une si grande importance. M.

sée de plus d'un trentième. La règle s'applique également à la vapeur à haute et à basse pression ; car la variation par un changement d'un degré de température est presque proportionnelle. Plus les appareils alimentaires agissent fréquemment, moins les chaudières exigent d'eau ; et nous voyons en cela un motif plus puissant pour se servir d'eau chaude pour la chaudière que celui d'épargner simplement le combustible, puisque plus l'eau est froide, plus la vapeur perd de sa force. Si la chaudière était alimentée à chaque coup de piston, elle devrait avoir cinq mètres cubes d'eau pour chaque mètre cube d'eau qu'elle pourrait vaporiser par heure, soit qu'on employât la vapeur à haute ou à basse pression.

218. Un appareil alimentaire, à jeu spontané, a besoin d'être ajusté avec beaucoup de soin pour que les intervalles de son jeu puissent être réduits même à deux fois cet espace de temps ; c'est pourquoi ces chaudières exigent au moins dix mètres cubes d'eau pour chaque mètre cube d'eau vaporisé par heure¹. On trouvera au reste, dans les planches III et IV, les moyens de régler l'appareil alimentaire.

219. On voit donc que, pour limiter les chaudières à basse pression des machines à double effet, à un changement de force élastique qui n'excède pas *un trentième*, il faut ménager un espace de dix mètres cubes pour la vapeur, et autant pour l'eau, à raison de chaque mètre cube d'eau que la chaudière veut vaporiser par heure ; ce qui revient à 0^m,3, ou 300 lit. par force de cheval. Si la vapeur est interceptée avant la fin de la course, on doit laisser un espace plus grand à la vapeur.

220. On dit habituellement qu'il faut 0^m,7 cubes de capacité dans la chaudière pour chaque force de cheval ; d'autres disent que 0^m,6 suffisent ; on est descendu même jusqu'à 0^m,2 ; tandis que d'autres prétendent qu'il n'y a pas de relation entre la contenance de la chaudière et la force de la machine. Nous venons cependant d'établir, en nous servant de principes incontestables,

¹ Voyez la note précédente.

les conditions qui doivent déterminer la moindre contenance de la chaudière, et il paraît erroné de ne pas tenir compte, soit de la surface exposée au feu, soit de la contenance de la chaudière. Ces deux éléments devraient être pris en considération, selon les diverses circonstances.

De la puissance vaporisante des chaudières à basse pression.

221. La puissance avec laquelle les chaudières produisent la vapeur est très-affectée par les pertes de chaleur, qui ont lieu de diverses manières : cet effet est plus sensible dans les petites chaudières que dans les grandes.

C'est un de ces cas qu'on ne peut, à ce qu'il semble, bien déterminer que par l'expérience. Dans une chaudière proportionnée à l'effet qu'on veut produire, la perte d'énergie semble avoir lieu dans le combustible, et il paraît assez conforme à la pratique de considérer la perte comme proportionnelle au rapport qui existe entre la surface et le volume de la quantité de combustible, en supposant le tout limité par des formes semblables. C'est d'après ces principes qu'on a formé le tableau suivant.

EAU vaporisée par heure, repré- sentant la force de la chaudière.	SURFACE CHAUFFÉE par force de cheval.		FORCE en chevaux pour machine à basse pression.	VOLUME D'EAU de la chaudière par force de cheval ¹ .
	Surface de fond	Surface latérale		
Litres ou kilogram.	Décim. carrés.	Décim. carrés.		Lit. ou décim. cub.
60,0	85,0	80,0	1	600
48,9	66,0	64,7	2	489
44,1	59,5	57,6	3	441
41,7	55,8	55,9	4	417
39,7	53,0	51,7	5	397
38,7	52,0	50,7	6	387
37,7	50,7	49,7	7	377
36,5	49,7	48,7	8	365
35,6	48,7	47,7	9	356
35,7	46,7	46,5	10	357
34,5	46,5	45,5	12	345
33,9	45,5	44,6	14	339
33,7	44,6	43,7	16	337
33,7	44,6	43,7	18	337
33,7	44,7	42,7	20	337
32,7	42,7	41,8	25	327
31,6	42,7	41,8	30	316
30,0	41,7	40,9	40	300

Lorsque les chaudières sont destinées à une force de plus de trente à quarante chevaux, il vaut mieux employer deux chaudières et les poser à côté l'une de l'autre. Outre ces deux chaudières, il doit y en avoir une de réserve, dont on fait usage durant la réparation des autres. Ainsi, pour une machine de quarante chevaux, je recommanderais trois chaudières de la force de vingt chevaux chacune; pour une machine de soixante chevaux, trois chaudières de la force de trente chevaux chacune, et ainsi de suite; pour les petites machines, on se servirait de deux chaudières ayant chacune une force équivalente à celle de la machine.

De la forme des chaudières sous le rapport de leurs effets.

222. Après avoir déterminé la quantité de surface exposée au

¹ En supposant que l'on fasse usage de l'appareil ordinaire d'alimentation.

feu et à la fumée, ainsi que la capacité de la chaudière, nous allons considérer la forme qui convient le mieux pour obtenir ces proportions d'une manière commode. Si nous n'avions qu'à considérer la force du métal, ces chaudières devraient être à peu près sphériques; mais nous savons bien que la sphère est de tous les solides celui qui, à capacité égale, présente le moins de surface.

223. Les premières chaudières dont on a fait usage pour les machines étaient à peu près sphériques; le fond fut bientôt changé en surface concave. On rendit verticales les parois des conduits latéraux, et on laissa à la partie supérieure sa forme sphérique; en définitive, la figure de la chaudière consista essentiellement en un court cylindre placé sur sa base et dont la partie supérieure était terminée par une calotte hémisphérique.

224. *Chaudières de Watt.* La forme rectangulaire fut adoptée par Watt, pour la partie inférieure de la chaudière; la partie supérieure formait un demi-cylindre; le fond était de forme concave, mais les côtés étaient plats. Pour la vapeur à basse pression, on peut faire une chaudière suffisamment forte en employant cette forme, et l'on peut en obtenir un peu plus de surface, sans accroître sensiblement le volume. En faisant le fond concave du côté du feu, il en résulte aussi que les sédiments se déposent dans les angles, au lieu de se former immédiatement sur la surface exposée au feu. Dans les grandes chaudières, on a disposé intérieurement un conduit longitudinal, qui est entièrement couvert par l'eau.

Watt a remarqué, avec raison, que le seul objet qu'il s'était proposé dans l'arrangement de ses chaudières, était d'économiser autant que possible le combustible. Ce n'est pas la petite ou la grande profondeur de la chaudière qui produit cet effet, mais sa forme, qui doit être telle, que l'air passant au travers du feu soit dépouillé de presque toute sa chaleur avant qu'il ne s'échappe¹. Watt assurait au docteur Thomson que ce but était parfaitement

¹ Doct. Thomson's *Annals of Philosophy*, vol. VII, p. 157.

atteint par la construction qu'il avait adoptée, et c'est ce qui a lieu effectivement.

225. Quand on fait usage des chaudières à forme rectangulaire (*voyez* pl. III), les relations de longueur, largeur et profondeur, pour obtenir les quantités nécessaires de surface et de capacité, sont faciles à déterminer dans le cas où il n'y a pas de conduits intérieurs; il est douteux au reste qu'il y ait aucun avantage à adopter ces conduits. Voici une règle approximative à ce sujet.

RÈGLE. Divisez le volume d'eau de la chaudière par la surface exposée au feu (art. 221) : le quotient donnera la hauteur de l'eau. Multipliez ensemble la surface du fond et la surface des côtés exposés au feu et à la fumée (art. 221), divisez le produit par deux fois le volume de l'eau, moins la surface du fond, et le résultat, multiplié par 0,375 ou $\frac{3}{8}$, donnera une des dimensions du fond.

Divisez la surface du fond par la dimension trouvée; et vous obtiendrez l'autre dimension.

Exemple. Trouver les proportions d'une chaudière pour une machine de la force de 12 chevaux, le volume de l'eau étant de 0^m,34 cubes par force de cheval.

Dans ce cas, on a

$$12 \times 0^m,34 = 4,08 \text{ mètres cubes.}$$

pour le volume de l'eau dans la chaudière.

La surface du fond est égale à

$$12 \times 0^m,465 = 5^m,58;$$

d'où l'on tire

$$\frac{4,08}{5,58} = 0^m,73$$

pour la hauteur de l'eau.

La surface du fond, multipliée par la surface des côtés, donne

$$5^m,58 \times 5^m,54 = 30^m,91,$$

qui, divisé par

$$2 \times 4^m,08 - 5^m,58 = 2^m,58,$$

donne

$$\frac{50^m,91}{2,58} = 12^m,$$

et enfin $12 \times 0,375 = 4^m,5,$

pour une dimension; conséquemment, l'autre dimension sera égale à

$$\frac{5,58}{4,5} = 1^m,24:$$

donc, la chaudière aurait 4^m,5 de longueur, sur 1^m,24 de profondeur.

226. Si la capacité de la partie supérieure destinée à la vapeur est la même que celle pour l'eau, et que sa forme soit un demi-cylindre, la hauteur totale de la chaudière peut être déterminée avec une exactitude suffisante pour la pratique, en la faisant égale à deux fois plus un dixième la profondeur de l'eau; dans cet exemple, on aurait

$$0^m,73 \times 2,1 = 1,53.$$

Les proportions données par la règle diffèrent considérablement de celles dont on fait usage ordinairement, sinon quant à la capacité des chaudières, du moins quant à la surface exposée au feu, ainsi qu'à l'excès de leur longueur et à la diminution de leur largeur. Des chaudières ainsi proportionnées sont incontestablement plus fortes, et d'un plus grand effet.

227. *Chaudières cylindriques.* Pour obtenir de la vapeur à haute pression, on devrait toujours faire usage de chaudières cylindriques avec des fonds sphériques; et même, pour la vapeur à basse pression, cette forme semble encore préférable. (*Voyez* pl. IV). Différents plans ont été proposés pour l'emploi des combinaisons de cylindres ou de tubes; mais il est très-douteux qu'aucun de ces projets soit supérieur à de simples cylindres à bases convexes, dont on emploierait un nombre suffisant.

228. Quelquefois le foyer est placé dans l'intérieur du cylindre

formant la chaudière, et en conséquence de cet arrangement, il est impossible d'augmenter la surface exposée au feu, à moins de faire la chaudière d'un diamètre tel, que l'usage en serait extrêmement dangereux. La perte considérable de ce système est démontrée par les expériences de M. Wood (art. 208). Ces chaudières ont cependant un diamètre de 1^m,2 et supportent une pression de quatre atmosphères, tendant à séparer les diverses parties de la chaudière avec une force de plus de 140 tonnes; elles n'ont qu'une grossière soupape pour limiter la vapeur à cette pression.

229. RÈGLE *pour les chaudières cylindriques*. Quand le foyer est extérieur au cylindre et que ce dernier contient à la fois l'eau et la vapeur, il faut ajouter ensemble les capacités occupées par ces deux fluides, ainsi que les quantités de surfaces exposées au feu; ensuite diviser deux fois la capacité par la quantité de cette surface: le quotient donnera le diamètre. Enfin 1,27 fois la capacité divisée par le carré du diamètre donnera la longueur.

Exemple 1^{er}. Supposons qu'on ait à déterminer les proportions d'une chaudière à haute pression, de manière qu'elle soit capable de vaporiser 0,2 mètre cube d'eau par heure, sous une pression de 4 atmosphères.

Une chaudière, dans ce cas, devrait contenir environ neuf mètres d'eau pour chaque mètre cube d'eau vaporisée par heure: par conséquent son contenu total doit être de $0,2 \times 9$ ou 1,8 mètre cube. Sa surface exposée au feu serait (*voyez* article 204) égale à

$$0,2 \times (16,3 + 13) = 5^m,86;$$

donc on aurait

$$\frac{2 \times 1,8}{5,86} = 0^m,61$$

pour le diamètre; et l'on trouve pour la longueur

$$\frac{1,27 \times 1,8}{0,61 \times 0,61} = 6^m,2.$$

Exemple 2^e. Supposons qu'on veuille une chaudière qui fournisse 0,68 mètre cube de vapeur par heure, à trois atmosphères ; avec onze mètres cubes d'espace dans la chaudière, à raison de chaque mètre cube réduit en vapeur.

Alors sa contenance sera égale à

$$11 \times 0,68 = 7,48;$$

on aura pour la surface

$$0,68 (15,5 + 13) = 19,4:$$

par conséquent, le diamètre sera égal à

$$\frac{2 \times 7,48}{19,4} = 0,77,$$

et l'on trouvera enfin pour la longueur

$$\frac{1,27 \times 7,48}{(0,72)^2} = 16, \text{ ou deux chaudières de } 8^{\text{m}}.$$

Exemple 3^e. Si l'on voulait une chaudière cylindrique à basse pression pour une force de douze chevaux, et remplissant les mêmes conditions qu'une chaudière rectangulaire (*voyez art. 2.25*), sa contenance ¹ serait égale à

$$12 \times 2 \times 0^{\text{m}},34 = 8^{\text{m}},16,$$

et l'on aurait pour la surface

$$12 \times (0,46 + 0,45) = 10^{\text{m}},92.$$

Le diamètre serait égal à

$$\frac{2 \times 8,16}{10,92} = 1^{\text{m}},5;$$

et l'on aurait enfin pour la longueur

$$\frac{1,27 \times 8,16}{1,5 \times 1,5} = \frac{10^{\text{m}},4}{(1,5)^2} = 4^{\text{m}},6.$$

¹ La chaudière est supposée contenir, dans ce cas, par force de cheval, 0,34 mètre cube d'eau, ou 12 fois la quantité vaporisée par heure.

La chaudière aurait donc 4^m,6 de longueur et 1^m,5 de diamètre. Je crois que cette forme serait meilleure que celle des chaudières rectangulaires usitées (*Voyez* pl. IV).

230. Le tuyau à vapeur S doit partir immédiatement du dessus du foyer; l'eau doit être introduite par l'extrémité opposée en N, et afin que son sédiment se dépose dans l'endroit où le feu a le moins d'énergie, j'établirai une cloison O transversalement à la chaudière, et élevée jusqu'à un décimètre environ de la surface de l'eau; ce qui empêchera l'eau froide d'arrêter la formation de la vapeur, forcera le sédiment à se déposer vers l'endroit où l'eau entre dans la chaudière, et retiendra les parties les plus froides de l'eau vers l'endroit où la fumée n'agit plus qu'avec une température très-abaisée.

231. On a souvent proposé pour la production de la vapeur de petits cylindres, ou plutôt des chaudières à tubes: celles de Blakey ont été déjà mentionnées (art. 25). Le comte de Rumford avait établi une de ces chaudières à l'Institution royale en 1796, pour chauffer les chambres par la vapeur; ses idées sur l'application de ce système aux chaudières des machines à vapeur sont dignes d'attention.

232. *Chaudière du comte de Rumford.* L'objet de cette chaudière était d'obtenir une plus grande quantité de surface; ce physicien en avait fait faire un modèle, qu'il présenta à l'Institut de France en octobre 1806. La description de ce modèle, en tant qu'il diffère des chaudières ordinaires, suffira pour indiquer au lecteur comment on peut l'appliquer sur une grande échelle.

Le corps de la chaudière a la forme d'un tambour. C'est un cylindre vertical, en cuivre, de 0^m,3 de diamètre et de hauteur, dont les fonds sont formés de plateaux circulaires.

Dans le centre du plateau supérieur, est un col cylindrique de quinze centimètres de diamètre, et de sept et demi de hauteur, fermé au sommet par une feuille en cuivre de même diamètre, et de six millimètres d'épaisseur, fixée dessus par des boulons.

Le plateau circulaire du fond de la chaudière, qui a trois décimètres de diamètre, est percé de sept trous, chacun de 7^{centim},5 de diamètre; sept tubes cylindriques en cuivre très-mince, de

même diamètre et de 23 cent. de longueur, fermés à l'extrémité inférieure par des disques circulaires, sont fixés dans ces trous où ils sont solidement rivés, et soudés ensuite au plateau de la chaudière.

En ouvrant la communication entre la chaudière et le réservoir alimentaire, l'eau remplit d'abord les sept tubes, et s'élève ensuite jusqu'au corps cylindrique de la chaudière; mais elle ne peut jamais y monter plus haut que quinze centimètres, parce que quand elle a atteint cette hauteur, le flotteur est assez élevé pour fermer le robinet par lequel elle entre dans la chaudière. Comme les sept tubes qui descendent du plateau de la chaudière dans le foyer sont enveloppés de tous côtés par la flamme, le liquide que contient la chaudière est chauffé et porté à l'ébullition en peu de temps, et avec une consommation de combustible relativement très-petite. Quand les parois verticales, ou corps de la chaudière, et sa partie supérieure sont convenablement enveloppées, afin de prévenir la perte de la chaleur par ces surfaces, cet appareil peut être employé avec beaucoup d'avantage dans tous les cas où il s'agit de produire l'ébullition de l'eau pour obtenir de la vapeur.

Dans le cas où la chaudière serait construite sur une grande échelle, les sept tubes qui descendent du fond de la chaudière dans le feu pourraient être en fer fondu, tandis que le corps de la chaudière serait en tôle de fer ou de cuivre.

Mais, dans les cas où l'on aurait à produire une grande quantité de vapeur, il sera toujours préférable d'employer plusieurs chaudières d'une moyenne grandeur, placées les unes à côté des autres, et chauffées chacune par un feu séparé, au lieu de faire usage d'une grande chaudière, chauffée par un seul feu, comme le comte de Rumford l'a démontré par expérience dans son sixième essai sur la conduite du feu et l'économie du combustible; il est constant qu'au delà d'une certaine limite, il n'y a aucun avantage à augmenter la capacité d'une chaudière.

L'augmentation de surface qu'on obtient par l'emploi des tubes est incontestable, et la construction proposée par Rumford peut être employée avec succès, quand on veut avoir beaucoup de surface dans un espace resserré.

Les tubes devraient cependant avoir la proportion de capacité nécessaire à une chaudière suivant la force de la machine, et ne pas être trop petits, afin de permettre deux courants, l'un ascendant et l'autre descendant (*Voyez* la fin de la légende de la planche IV).

233. *Chaudières de Woolf*. L'idée des tubes cylindriques et d'un réservoir pour l'eau et la vapeur fut ultérieurement développée par M. Woolf, sous un grand nombre de formes qui furent successivement adoptées et abandonnées. Son premier projet fut d'avoir un cylindre horizontal pour contenir l'eau et la vapeur, avec une série de tubes horizontaux placés au-dessous et en travers, et réunis au cylindre par de courtes tubulures. Les tubes inférieurs et la moitié du cylindre devaient être remplis d'eau; la flamme et la fumée devaient passer alternativement dessus et dessous les tubes, dans une direction sinueuse. Pour la vapeur à haute pression, Woolf employait deux autres cylindres plus petits, un de chaque côté, placés parallèlement au grand cylindre et au-dessus des tubes transversaux, auxquels ils étaient joints alternativement par de courtes tubulures. Le grand cylindre communiquait seulement avec les cylindres latéraux ¹.

Le but immédiat de cette disposition est de pouvoir introduire l'eau froide sans interrompre ou ralentir la production de la vapeur, défaut qui est commun à la première disposition aïnsi qu'au système du comte de Rumford.

Un autre mode d'application adopté par M. Woolf, consiste à placer les tubes longitudinalement dans le sens du grand cylindre, et parallèlement les uns aux autres, mais légèrement inclinés; les extrémités supérieures de ces tubes ouvrent toutes dans le grand cylindre vers le fond. Les tubes ont environ 0^m,25 de diamètre, et s'étendent dans toute la longueur du foyer, placés au-dessous d'eux. Le feu frappe directement le dessous de ces tubes; la flamme et la fumée chauffent le dessous du principal cylindre. Cette disposition semble être la dernière que Woolf ait imaginée. Ce mécanicien a, sous ce rapport, dépensé un

¹ *Magasin philosophique*, vol. XVII, p. 40.

grand fonds de génie pour n'obtenir que de faibles résultats.

234. Il y a une autre forme de chaudière, donnée par Woolf, qui est trop ingénieuse pour ne pas être mentionnée. Cette construction consiste en deux chaudières, l'une supérieure, l'autre inférieure, réunies par de courtes tubulures. Pour une chaudière à basse pression, cette disposition procure beaucoup de surface, mais elle serait plus embarrassante à exécuter que les chaudières ordinaires; elle donne d'ailleurs un avantage peu sensible, et qui ne surpasse pas celui qu'on obtient en pratiquant un conduit intérieur.

235. Les motifs pour rejeter les formes compliquées des chaudières à tubes ou à bouilleurs, de Rumford et de Woolf, exigent très-peu de développement. Nous sommes certain que si une chaudière a la quantité convenable de surface et de capacité, elle produira tout l'effet nécessaire, et que tout ce qu'on peut faire pour ce but avec une chaudière à tubes, c'est d'obtenir ces proportions dans un espace moindre peut-être; mais si nous les obtenons d'une forme plus simple, nous devons certainement lui donner notre préférence: or, quant à la sûreté que présentent ces chaudières, il ne peut pas y avoir de différence, à moins que la capacité du cylindre de la chaudière ne soit réduite au-dessous du volume nécessaire à l'approvisionnement de vapeur; car on doit se rappeler que l'effort qu'éprouve le grand cylindre est indépendant de la disposition ou de la grandeur des petits tubes, et que la moitié de la capacité de ce cylindre doit être suffisante pour contenir l'approvisionnement de vapeur.

On peut élever contre ces chaudières une autre objection tirée de la nécessité de l'emploi de la fonte; mais, relativement à l'imperfection de ce métal, j'aurai soin d'en parler plus longuement en établissant les règles pour déterminer la résistance des chaudières.

236. Nous avons à considérer maintenant les chaudières à foyer intérieur; elles ont été longtemps le sujet favori des faiseurs de projets, et particulièrement depuis que les machines à haute pression ont été mises en usage par Trevithick. Ces chaudières constituent un appareil resserré et compact, qui semble très-con-

venable pour appliquer la chaleur, et si nous pouvions oublier un instant le courant d'air chaud entraîné par la cheminée, nous pourrions penser, comme quelques personnes, que tout le foyer étant placé dans la chaudière, celle-ci doit profiter de toute sa chaleur ; mais une telle opinion est trop absurde.

On ajoute que cette chaudière est sûre, parce que la partie exposée au feu se trouvant en dedans, si elle vient à éclater, la vapeur fera explosion intérieurement. C'est ce qu'on peut admettre ; mais il n'en reste pas moins la nécessité d'avoir une chaudière plus grande, laquelle, par suite, est plus dangereuse.

237. Les proportions de ces chaudières dépendent des considérations suivantes : Il faut que le cendrier ou la partie du fourneau sous la grille soit d'une dimension suffisante pour fournir l'air nécessaire ; ce qui détermine le diamètre de ce conduit. Il faut avoir égard à l'aire de la grille (*voyez* art. 198), et alors la longueur du tube intérieur doit être assez grande pour fournir toute la quantité de surface chauffée qui serait indispensable (*Voyez* art. 104). Il faut enfin que la capacité de la chaudière soit telle à peu près que, déduction faite de l'espace occupé par le conduit intérieur contenant le feu, la partie qui reste contienne l'approvisionnement nécessaire d'eau et de vapeur (*Voyez* art. 215).

238. Si la destination de la machine permet d'employer une chaudière supplémentaire pour recevoir et chauffer l'eau froide nécessaire au remplacement de l'eau vaporisée, alors le conduit intérieur ne doit avoir que la quantité de surface nécessaire pour recevoir le contact de la flamme ; la fumée serait conduite sous la chaudière supplémentaire, comme Oliver Evans le proposait. Quand on ne peut pas employer une chaudière supplémentaire, on perd plus d'un quart de l'effet du combustible, par suite de la haute température que conserve la fumée à sa sortie.

239. La construction des chaudières pour les bateaux à vapeur doit être telle que ces navires ne puissent courir aucun risque d'incendie, et elle doit présenter le moins de volume et de pesanteur qu'il soit possible. Quand ces chaudières sont à basse pression, et je recommande vivement de ne pas en employer d'autres

sur mer, la force modérée de la vapeur n'empêche pas l'emploi des surfaces planes, pour former les parois des conduits et du foyer : l'objet subséquent sera de disposer les foyers et les conduits dans l'intérieur de la chaudière, de manière à obtenir la quantité convenable de surface exposée au feu et à la fumée, jointe à une capacité suffisante et à des moyens faciles pour nettoyer l'appareil.

J'ai observé que la tendance ordinaire, fruit de quelques années de pratique, est de simplifier à la fois la construction et les procédés pour réaliser les effets qu'on a en vue.

240. La chaudière est quelquefois établie de manière à laisser un espace d'environ cinq décimètres entre ses parois et les côtés du bateau; mais cette excellente pratique n'est en aucune manière généralisée comme elle aurait dû l'être; car non-seulement elle diminue beaucoup le risque d'incendie, mais elle rend encore plus faciles et plus satisfaisantes les inspections et les réparations de la chaudière.

241. La grille ne doit pas être à moins de 6 déc. du plancher, et la somme des aires des *carneaux* ou conduits du foyer doit être un peu plus grande que l'aire de la cheminée, ou bien, lorsqu'il n'y a qu'un foyer et qu'un conduit, ce dernier doit être un peu plus grand que la cheminée. Il sera avantageux d'avoir autant de foyers séparés que la commodité le permettra, pour plusieurs raisons : 1° Le feu est plus facile à servir, et il en résulte moins d'interruption dans la formation de la vapeur; 2° les surfaces exposées à la flamme et à la fumée sont ramassées dans un moindre espace, parce que deux conduits, à passage égal, présentent plus de surface qu'un seul. Il est cependant assez difficile de poser les limites qui devraient déterminer le choix dans les différents cas, et trop souvent on évite une dépense première d'établissement, dans la croyance qu'elle est plus qu'équivalente à la perte inconnue de l'effet; cependant celle-ci devient aussi régulière qu'elle est certaine.

242. C'est une bonne proportion que de donner à un conduit trois décimètres de largeur, et cinq à six de hauteur, en rendant un de ses bouts facilement accessible. L'augmentation

en hauteur donne plus d'effet que l'augmentation en largeur, parce que les couches les plus chaudes de fumée s'élèvent toujours contre la partie supérieure du conduit, tandis que le fond se couvre promptement d'une couche de suie; et comme cette matière est un mauvais conducteur de la chaleur, il s'ensuit que la surface du fond n'a que très-peu d'effet calorifique. Ainsi, en évaluant la quantité de surface, on ne doit pas tenir compte du fond.

243. Le foyer est nécessairement entouré d'eau; mais il n'en résulte aucun avantage, parce que l'eau est un conducteur si rapide de la chaleur, qu'elle l'enlève trop promptement au combustible et le refroidit; de sorte que rien ne rend la combustion plus imparfaite que l'absorption rapide de la chaleur. Les parois du foyer devraient être revêtues de briques réfractaires dans toute la longueur en contact avec le charbon. L'économie qu'on obtiendrait par une combustion plus parfaite, et par une plus longue durée de la chaudière, ferait plus que compenser les inconvénients de cette disposition.

On voit dans la planche XXI, fig. 1, 2 et 3, les dessins d'une chaudière pour bateau à vapeur, construite sur ce principe; elle diffère en certains points des formes usitées, mais seulement dans quelques détails. Le principal but est d'obtenir une quantité suffisante de surface chauffée, et il n'est pas moins important de faciliter le nettoyage des conduits.

244. *Chaudières portatives et à haute pression.* Les chaudières pour les voitures à vapeur, et pour les autres cas où l'on ne peut asseoir les fondements en maçonnerie, doivent être disposées de la même manière que celles pour les bateaux à vapeur, avec cette différence, que leur forme doit être de nature à résister à une forte pression.

La chaudière et les conduits intérieurs doivent être cylindriques. La difficulté, dans ce cas, consiste à obtenir la quantité convenable de surface chauffée, sans donner à la chaudière trop de largeur; ainsi, tout ce qu'on peut faire pour améliorer la construction actuelle, c'est d'allonger les chaudières en diminuant leur diamètre; de tenir la chaudière pleine d'eau et le conduit

intérieur plus large; enfin, de ménager l'approvisionnement de vapeur dans des réservoirs ou cylindres verticaux, disposés autour des cylindres à vapeur.

Des foyers.

245. On a essayé différents procédés pour améliorer la construction et le mode d'alimentation du foyer des chaudières à vapeur. Smeaton les perfectionna au point qu'on n'a obtenu depuis que très-peu d'effet utile, au delà de ce que donnaient quelques-unes de ses chaudières. Les dernières recherches sur la combustion conduisirent Watt à ajouter quelques nouveaux perfectionnements; mais l'expérience lui apprit qu'il ne fallait pas compter, dans la pratique, sur les résultats qu'on pourrait obtenir de soins très-assidus et de principes très-rigoureux.

246. *Foyer de Watt.* Pour perfectionner les fourneaux, Watt procéda à peu près d'après les principes de la lampe d'Argand. La grille et le plateau qui est en avant furent posés dans une direction inclinée depuis la porte, selon un angle d'environ 25° . Le feu était allumé comme de coutume, et l'on introduisait une petite quantité d'air par une ou deux ouvertures pratiquées à la porte, de manière à souffler directement sur le point enflammé du foyer. Le feu était d'abord retenu près du plateau, et le nouveau charbon avec lequel il était alimenté était posé sur ce plateau, en contact avec le combustible enflammé, mais non pas au-dessus; quand il fallait regarnir le foyer, on repoussait en avant le charbon enflammé et celui qui était sur le plateau, sans les mêler, et l'on mettait de nouveau charbon sur le plateau, mais sans en jeter jamais au-dessus des charbons ardents, ce qui n'aurait pas manqué de dégager instantanément un grand volume de fumée. Par cette disposition, le nouveau charbon était graduellement desséché; la fumée qui s'en échappait était consumée par le courant d'air de la porte, à son passage sur la flamme du foyer. L'ouverture ou les ouvertures par lesquelles l'air entraient étaient réglées par un registre, de manière à n'admettre que la quantité

d'air justement nécessaire pour consumer la fumée; une plus grande quantité aurait été nuisible.

Watt construisit d'abord ses fourneaux d'une manière un peu différente; mais il trouva plus convenable le procédé que nous venons d'exposer; et, *quand le service est bien fait*, ce procédé remplit parfaitement son but, pourvu qu'on emploie du charbon qui brûle sans s'agglutiner; mais il est difficile à conduire avec de la houille collante.

247. *Fourneaux de Roberton.* On a inventé différents systèmes de construction, pour atteindre le même but que Watt s'était proposé; mais, tout considéré, celui de M. Roberton est peut-être le meilleur. L'ouverture par laquelle on introduit le combustible dans le fourneau est à peu près de la forme d'une trémie, et ses parois sont en fer fondu; elle est établie dans la maçonnerie, en s'inclinant depuis la bouche jusque vers l'endroit où le charbon tombe sur la grille: le charbon fait dans cette trémie l'office d'une porte, et la portion inférieure est par ce moyen amenée à l'état d'incandescence avant d'arriver dans le fourneau. Au-dessous du fond de la trémie le foyer est garni d'une grille verticale qui sert à introduire l'air pour la combustion, et qui permet en outre de passer des ringards pour repousser les charbons de temps en temps, et faire de la place aux nouvelles portions de combustible tombant de la trémie. Par cette disposition, la houille est mise en ignition avant d'atteindre la partie avancée de la grille, où elle est arrêtée ensuite par l'autel du fourneau; de cette manière, la fumée dégagée du nouveau charbon qui s'enflamme est obligée de passer sur les charbons ardents avant de passer dans les carneaux.

Au-dessous de la face supérieure de la trémie, et à la distance d'environ deux centimètres, on introduit un plateau de fonte: ce plateau est au-dessus du combustible, et l'intervalle qui le sépare du dessus de la trémie forme un soupirail destiné à l'introduction d'une couche mince d'air qui, se précipitant par l'ouverture, vient se mettre en contact avec cette partie du feu qui dégage la plus grande quantité de fumée; l'air se mêle avec celle-ci avant d'arriver sur les charbons ardents de l'intérieur,

s'enflamme en traversant le feu, et les produits s'échappent enfin presque entièrement décomposés. C'est l'introduction de l'air froid qui est le vice le plus grand de cet appareil, à cause du refroidissement qu'il fait éprouver au fond de la chaudière.

La quantité d'air qu'on laisse passer au-dessus est réglée au moyen d'un obturateur en fer, en forme de coin.

Les barres ou grilles antérieures sont fermées par des portes qui empêchent la chaleur de se perdre et de venir incommoder les ouvriers.

248. M. Woolf ajouta un perfectionnement important, pour mettre les ouvriers à même de débarrasser la grille du mâchefer et des scories ; son moyen est extrêmement simple. La combustion du charbon commence et se continue principalement sur la partie du fond de la grille voisine de la trémie, et le combustible est repoussé de temps en temps le long de la grille, et lorsqu'il est arrivé vers l'extrémité, les résidus vitrifiés tombent dans une cavité dont le fond est pourvu de coulisses ; ces coulisses, étant tirées au moyen d'une tige à crochet, laissent tomber les scories dans le cendrier (*Voyez* pl. IV).

249. Le défaut du procédé de Roberton, aussi bien que de celui de Watt, consiste dans l'admission d'un courant régulier d'air froid, qui n'est pas constamment indispensable ; ce qui a le mauvais effet de refroidir la fumée au moment où elle vient frapper le fond de la chaudière. On peut remédier en grande partie à cet inconvénient, en introduisant l'air par de petits conduits latéraux ou postérieurs, de manière que l'air venant du cendrier et traversant ainsi la maçonnerie déjà échauffée, acquiert lui-même une température élevée, avant d'entrer dans le foyer. Mais en construisant convenablement la grille, on pourra obtenir le passage d'une quantité d'air suffisante. On trouvera dans la planche IV la modification du procédé que je recommande à cet effet.

Ces soupiraux auraient des soupapes ou des registres pour les ouvrir ou les fermer au besoin ; mais il en résulte peu d'avantages, à moins qu'on n'y apporte plus de soins qu'il n'est d'usage d'en mettre dans le service du foyer des machines.

250. *Fourneau de Brunton.* En conséquence de la difficulté d'alimenter le foyer à la pelle, d'une manière assez régulière pour fournir à la consommation uniforme de vapeur faite par la machine, on a essayé d'employer dans ce but des moyens mécaniques. On a éprouvé divers moyens ; mais le seul qui ait réussi en pratique est celui de M. William Brunton.

Ce procédé consiste en un appareil qui projette le charbon sur la grille, par petites quantités, à de courts intervalles (pas plus de trois ou quatre secondes), et de manière que la fumée dégagée du nouveau charbon passe sur le charbon déjà ardent et y est en conséquence consumée : à cet effet, on introduit dans le foyer un courant d'air uniforme.

Le mécanisme est disposé de manière que la quantité de charbon introduite est proportionnée à la quantité d'effet qu'il s'agit de produire, et l'introduction de l'air est réglée d'une manière analogue.

Les avantages de ce procédé sont évidents, et le surcroît de dépense pour l'exécution n'est pas aussi considérable qu'on pourrait le croire.

Le charbon est jeté sur une grille circulaire horizontale ayant 1^m,5 de diamètre, qui tourne sur un axe vertical, à raison d'un tour par minute. Durant cette révolution, le charbon tombe d'une trémie placée sur la chaudière, par une ouverture oblongue qui traverse celle-ci, et qui est de la même longueur et dans la même direction qu'un des rayons de la grille.

La quantité projetée à la fois de la trémie est réglée par la pression de la vapeur dans la chaudière, et l'opération a lieu par intervalles de quatre ou cinq secondes. Par ce moyen, on obtient une régularité de combustion, déterminée par l'effet même qu'elle doit produire, et avec une certitude de marche aussi absolue que le comporte la nature des choses. Afin d'empêcher l'air d'arriver autrement que par les ouvertures convenablement réglées à cet effet, le dessous de la circonférence de la grille porte une mince languette destinée à tourner dans une auge ou canal circulaire rempli de sable. Mais il sera plus facile de comprendre ces dispositions en se reportant à la description de la planche V, qui

représente l'application de ce système à deux chaudières, construites antérieurement par Boulton et Watt.

On assure que l'économie de combustible obtenue dans cet appareil est d'environ vingt-cinq pour cent. Une grille de 1^m,5 de diamètre brûle par heure 120 kilogr. (un hectolitre et demi) de charbon de Newcastle ou 150 kilogr. de charbon de Staffordshire, c'est-à-dire 68 kilogr. par mètre carré de grille, dans le premier cas, et 85 dans le second. Je suppose qu'il faut ces mêmes proportions pour produire des effets égaux : la grandeur de la grille n'est environ que les deux tiers de celle qui est nécessaire par les procédés ordinaires.

Appareils dépendants des chaudières.

251. *Appareil alimentaire.* L'usage des appareils alimentaires est de fournir aux chaudières l'eau qui doit remplacer celle qui est convertie en vapeur. Le conduit alimentaire qui traverse le dessus de la chaudière est un tuyau vertical, dont la partie inférieure se recourbe à l'extrémité, afin d'empêcher la vapeur de s'élever dans le tuyau; et au point où celui-ci s'ajuste au-dessus de la chaudière dans une position exactement verticale, la jonction est formée par des joints parfaitement clos. Le haut du tuyau est terminé par une cuvette alimentée d'eau au moyen d'une petite pompe qui prend ce liquide dans la bêche d'eau chaude; au fond de la cuvette alimentaire est une soupape conique ouvrant de bas en haut, liée par une chaîne au bout d'un levier tournant sur un axe et portant un fil de fer attaché à l'autre extrémité. Ce fil pénètre dans la chaudière au travers d'une boîte à étoupes, et y soutient une pierre plate, ou un disque métallique, qui est équilibré par un contre-poids attaché à l'extrémité opposée du levier, de manière à flotter sur la surface de l'eau. Ce flotteur doit avoir assez d'étendue en proportion de la surface du liquide pour céder avec facilité à la plus légère variation du niveau. Cet appareil agit de la manière suivante : quand une partie de l'eau est vaporisée dans la chaudière, le flotteur descend avec la surface de l'eau, et fait par conséquent lever la soupape coni-

que; alors la cuvette alimentaire étant constamment pleine d'eau venant de la pompe d'eau chaude, aussitôt que la soupape est levée, l'eau entre dans la chaudière, et quand elle est montée à un niveau convenable, elle élève le flotteur et ferme la soupape, jusqu'à ce que cette opération ait besoin de se renouveler. Le surplus de l'eau élevée par la pompe s'écoule de la cuvette alimentaire par un tuyau de trop plein.

252. L'objet le plus essentiel dans la construction de cet appareil est de faire en sorte que la hauteur de l'eau dans la cuvette alimentaire soit suffisante pour contre-balancer la pression de la vapeur; car si cette hauteur était trop petite, l'eau serait refoulée par la vapeur, monterait dans le tuyau alimentaire et serait expulsée au travers de la soupape. Pour de l'eau à 10°, 1^m,25 de hauteur sont équivalents à un hectogramme par centimètre circulaire; mais l'eau dans le conduit alimentaire sera voisine généralement de la température de 100°; alors 1,3 mètres de hauteur seront nécessaires pour contre-balancer la pression. Par conséquent, chaque hectogramme de pression par centimètre circulaire exigera autant de fois la même hauteur.

On doit évidemment placer le flotteur dans la partie de la chaudière où il est le moins sujet à être troublé par les bouillons de la vapeur, et le conduit alimentaire doit déboucher aussi loin que possible de l'endroit où la vapeur se forme en plus grande abondance.

253. Eu égard à la grande force de la vapeur dans les machines à haute pression, on ne pourrait appliquer à la chaudière un tuyau alimentaire sur le même principe, à moins de le faire d'une hauteur très-incommode; c'est pourquoi on injecte l'eau dans la chaudière au moyen d'une petite pompe foulante, mue par un levier lié à l'un des mécanismes alternatifs de la machine; et le liquide, au lieu d'entrer immédiatement dans la chaudière, doit passer par un tuyau ou serpentín qui circule dans l'espace où la vapeur s'échappe de la machine. De cette manière l'eau est déjà considérablement échauffée avant d'entrer dans la chaudière, et alors elle ne peut plus nuire à la formation de la vapeur.

Un procédé cependant qui serait bien préférable, serait de

chauffer une petite chaudière alimentaire, en faisant circuler la fumée tout autour et en ménageant une communication de la petite chaudière à la grande : la pompe, dans ce cas, servirait à alimenter la petite chaudière.

En alimentant la chaudière par une pompe mue par la machine, la même quantité est introduite à chaque fois, quelle que puisse être la quantité réduite en vapeur et la quantité dépensée. Mais la consommation de la vapeur est variable, et la quantité d'eau injectée par la pompe doit être souvent trop grande. On peut remédier à cet inconvénient par l'usage d'un flotteur, pour les machines employées à terre. Soient A, B (pl. III, fig. 2) deux soupapes liées par une tige et placées dans la boîte qui reçoit l'eau de la pompe, la première ouvrant vers la chaudière, la seconde ouvrant vers le tuyau de décharge. Si la tige de ces soupapes est liée au levier d'un flotteur, comme l'indique la figure, l'élévation de l'eau dans la chaudière, au-dessus du niveau convenable, fera descendre la soupape, et fermera la communication avec la chaudière, pendant que la soupape de décharge s'ouvrira pour laisser écouler l'eau superflue. Par ce moyen, la chaudière serait alimentée par la pompe d'une manière suivie et régulière, excepté quand il se trouverait un excédant d'eau; car le flotteur F s'élèverait et fermerait le passage du liquide vers la chaudière, tandis qu'il ouvrirait le tuyau de décharge jusqu'à ce que la quantité introduite cessât d'excéder la consommation. Cette disposition simple rend l'alimentation régulière, et remplit ainsi un objet important.

254. La même construction, appliquée au tuyau alimentaire d'une machine à basse pression, serait de beaucoup préférable au flotteur de pierre dont on fait usage ordinairement, et je pense qu'on pourrait en faire l'application, même aux bateaux à vapeur, comme on le voit dans la planche IV, fig. 2; car les balancements du bateau n'empêcheraient pas le nouveau flotteur de monter ou de descendre, lorsqu'il y aurait un excès d'alimentation ou autrement. D'un autre côté, en faisant usage de l'élévation de l'eau au lieu de son abaissement, pour manœuvrer la soupape, on rendrait l'appareil plus sûr, en même temps qu'on

empêcherait les introductions d'eau irrégulières d'arrêter la formation de la vapeur (*Voyez art. 217*).

255. Dans un appareil inventé par Franklin pour alimenter les chaudières à haute pression, l'eau surabondante doit, pour pouvoir s'écouler, élever une soupape chargée, et l'introduction de l'eau dans la chaudière est réglée par un flotteur à contre-poids, logé dans la chaudière; ce moyen est ingénieux, mais il n'a pas l'avantage de rendre l'alimentation continue; le jeu en est interrompu, comme dans le tuyau d'alimentation ordinaire, jusqu'à ce que le niveau de l'eau soit descendu assez pour lever la soupape.

Des régulateurs du feu pour les chaudières à vapeur.

256. On peut employer la force de la vapeur comme moyen de régler le feu, soit en diminuant l'affluence de l'air, soit en rétrécissant la cheminée par une plaque appelée registre ou soupape. Sous le rapport de la régularité, le premier moyen doit être préféré: il est évident en effet que la diminution directe de la quantité d'oxygène introduite dans le foyer doit être d'un effet bien plus immédiat et plus avantageux que le rétrécissement de la cheminée, l'effet du dernier moyen étant d'accroître la température et la force de la fumée en proportion du resserrement de l'ouverture; et en conséquence la fumée s'échappe à une température plus haute, emportant une grande quantité de chaleur. Le régulateur à soupape est cependant celui dont on fait le plus généralement usage. L'autre moyen est le même en principe, et diffère seulement en ce qu'il est appliqué dans le cendrier, au lieu de l'être dans la cheminée.

257. *Régulateurs mécaniques.* Les régulateurs sont souvent sous la direction des chauffeurs; mais dans le régulateur mécanique, le feu devient lui-même un moyen de direction, de manière à brûler avec plus ou moins de rapidité, selon le besoin: ce qu'on exécute de la manière suivante. Une plaque en fer, ou registre assez grand pour pouvoir fermer entièrement la cheminée ou le conduit du cendrier, peut se mouvoir verticalement

dans des coulisses en fer (*voyez* pl. V) avec le moins de frottement possible. A sa partie supérieure est attachée une chaîne qui passe sur deux poulies *n* et *n*, et ensuite au travers du fond de la cuvette et du conduit alimentaire, et enfin se prolonge suivant l'axe de ce conduit O, jusqu'à une chopine ou pièce de fonte creuse. On donne au conduit un plus grand diamètre dans cette partie, quand il s'agit d'un régulateur mécanique, afin qu'il puisse contenir le poids sans que ce dernier bouche le tuyau, et empêche la descente de l'eau alimentaire. On équilibre le flotteur en le remplissant en partie avec du plomb, de manière qu'il surmonte tout juste le poids et le frottement du registre, des chaînes et des poulies. Lorsqu'il n'y a point encore de feu sous la chaudière, le registre sera tiré, et la cheminée complètement ouverte; en même temps, le poids viendra s'appuyer sur l'épaulement du fond du conduit alimentaire, la longueur de la chaîne étant à cet effet déterminée convenablement. Mais aussitôt que le feu est appliqué et produit de la vapeur dans la chaudière, ce fluide presse la surface de l'eau, et fait monter celle-ci jusqu'à une certaine hauteur dans le conduit alimentaire. Le flotteur étant alors plongé dans l'eau, se trouve avoir une partie de sa pesanteur contre-balancée, et en conséquence n'est plus en état de retenir le registre à sa première hauteur. Celui-ci descend donc jusqu'à ce que l'équilibre se rétablisse; il ferme en partie la cheminée, ce qui ralentit le tirage du feu. S'il se mouvait au point de trop affaiblir le tirage, il se formerait moins de vapeur, l'eau se tiendrait à une hauteur moins grande dans le conduit alimentaire, et le poids recouvrerait alors une partie de sa force pour relever le registre. Si le feu devenait jamais assez fort pour chasser l'eau jusqu'à la cuvette supérieure, le poids devrait s'élever de manière à boucher *presque* la cheminée; car, avec un registre fermant complètement, il est à craindre que l'air inflammable ne se ramasse, et ne fasse explosion dans les *carneaux* ou conduits de la fumée.

Un régulateur à main est cependant un appareil dont une chaudière devrait toujours être munie, parce que, quand une machine ne fonctionne pas, il est utile de fermer en partie la

cheminée; et l'on ne saurait considérer comme parfaite une chaudière qui n'aurait ni régulateur du feu, ni moyen de fermer exactement l'ouverture par laquelle l'air entre pour alimenter la combustion.

258. *Régulateurs mécaniques à air.* Le moyen le plus direct pour gouverner l'action du feu, est de disposer les conduits de manière à pouvoir les ouvrir et les fermer à volonté, et cet effet devient encore plus avantageux quand on l'obtient par la force de la vapeur, de manière que lorsque ce fluide acquiert une pression trop élevée, il ferme lui-même le passage à l'air qui doit alimenter le feu. La construction d'un régulateur mécanique de ce genre est représentée dans la planche V. Il est essentiel, dans cette application, de faire en sorte que toutes les ouvertures qui donnent sur le combustible enflammé soient fermées aussi exactement que possible.

Des soupapes de sûreté.

259. Les appareils de sûreté sont très-importants; on ne devrait jamais construire les chaudières des machines à vapeur sans les en pourvoir, et l'on devrait les exécuter avec le plus de soin possible, de manière à les rendre propres à prévenir tout accident.

Ces soupapes sont appelées *extérieures* ou *intérieures*, selon la nature des accidents qu'elles sont appelées à prévenir. Une soupape intérieure ou *rentrante* est destinée à empêcher la pression de l'atmosphère d'écraser les parois de la chaudière ou les conduits auxquels elle est appliquée. C'est ordinairement une soupape conique renversée, retenue dans son siège par une tige, et liée à un levier qui porte à l'extrémité opposée un poids tel que la force de la pression atmosphérique puisse le soulever, quand son action dépasse de deux à trois hectogrammes par centimètre circulaire la force élastique de la vapeur dans l'appareil.

On voit cette soupape (planche III, fig. 1^{re}) telle qu'elle est placée dans le plateau du *trou d'homme*, *a* étant la soupape

tenue dans son siège par le poids qui repose sur le levier en *b*.

260. La *soupape de sûreté extérieure* sert à prévenir le risque d'explosion dans le cas où la vapeur dépasserait le degré de force que la chaudière est destinée à supporter ; c'est pourquoi il est de la plus grande importance qu'elle soit construite de la manière la plus convenable, et que cette soupape ne soit pas sujette à se déranger. L'application d'une soupape à poids, pour limiter la force de la vapeur, a d'abord été faite par Papin à ses marmites ou digesteurs et à ses machines. Elle fut ensuite appliquée aux chaudières des machines de Savery. Elle consiste en une soupape conique, retenue dans son siège par un poids à levier, dont la ressemblance avec une romaine lui fit donner le nom de soupape à romaine. Elle est encore très en usage ; mais elle a un défaut évident, c'est que le poids peut être augmenté, soit à la volonté de l'ouvrier, soit même par l'imprudence d'un étranger : c'est pourquoi les soupapes de cette forme ne devraient pas être employées, à moins que le levier et la soupape ne soient renfermés dans une boîte dont le propriétaire aurait la clef. Cette boîte aurait un tuyau, aboutissant dans la cheminée, pour y renvoyer la vapeur, et elle serait munie d'un léger fil métallique, ou d'une chaîne qui ne servirait qu'à soulever la soupape de temps en temps, afin qu'elle ne prît pas de l'adhérence par suite de l'oxydation du métal.

261. Pour la vapeur à basse pression, on peut en rendre la forme plus commode ; la soupape porte directement son poids : il suffit qu'elle soit d'un diamètre suffisant ; l'aire de sa petite base ne doit pas être au-dessous de celle qui résulte de la règle ci-après. La force de la vapeur ayant été déterminée, un poids fixe et invariable, proportionné à cette force, sera attaché sur la tige, au-dessus de la soupape, et le tout renfermé dans une boîte en métal, ayant un passage plus grand que l'aire de la soupape, afin de laisser passer la vapeur qui va se perdre dans la cheminée ou ailleurs. La plus grande force de la vapeur doit être un peu au-dessus de celle qui est nécessaire pour mouvoir la machine. Supposons qu'elle soit de 0,5 kilogrammes par centimètre cir-

culaire, et que le diamètre de la petite base de la soupape soit de 6 centimètres, alors

$$6 \times 6 = 36$$

représente en centimètres circulaires l'aire de la soupape, et

$$36 \times 0,5 = 18 \text{ kilogrammes}$$

représente le poids ou la charge à placer sur la soupape. Celle-ci s'ouvrirait alors que la vapeur la presserait avec une force plus grande que $0^{\text{kil}},5$ sur chaque centimètre circulaire. La boîte en métal renfermant la soupape étant munie d'une serrure, aucun autre que le possesseur de la clef ne pourra faire varier le poids; mais il serait indispensable d'adapter au travers du couvercle une poignée qui servirait à mouvoir la soupape, pour l'empêcher de prendre de l'adhésion par suite de la rouille.

Pour plus de sécurité, on a proposé d'adapter une seconde soupape de sûreté sur la même chaudière, mais un peu moins chargée que la première, afin qu'en s'ouvrant d'abord, elle avertisse ainsi le chauffeur que la vapeur est sur le point de devenir trop forte. Elle doit avoir une poignée plus forte, par laquelle on puisse la lever, soit pour laisser la vapeur s'échapper au besoin, soit pour tout autre but. Le manche de la soupape fermée à clef doit être lié à sa tige par une chaîne ou un léger fil métallique, de façon qu'on ne puisse pas l'arrêter en place pour augmenter la charge de la soupape. Autrement, il vaudrait mieux se fier à une soupape ordinaire qu'à une soupape fermée à clef, laquelle est sujette à prendre de l'adhérence par la rouille.

262. Une soupape à siège conique ne me semble pas être ce qu'il y a de mieux; pour la soupape fermée à clef, je préférerais un siège plat, et je voudrais que les surfaces métalliques en contact fussent étroites et formées d'un métal peu sujet à la rouille, et que la soupape ne fût pas retenue par suite de dilatations inégales dans les pièces métalliques.

263. Pour prévenir le danger de l'adhérence des soupapes, dans les chaudières des bateaux à vapeur, M. Nimmo proposa de les faire hémisphériques, en tournant en bas leur convexité,

et les faisant reposer sur un siège dont la concavité eût la même courbure, afin de s'ajuster exactement. Quant au poids, il propose de le suspendre au-dessous de la soupape (*Voy.* en U, fig. 1^{re}, pl. XXI). Par ce moyen le mouvement du bateau pourrait changer constamment la position de la soupape, sans qu'elle cessât de fermer toute issue à la vapeur dans toutes ses positions, et sans qu'elle fût sujette à adhérer à son siège. On peut aussi attacher une chaîne au-dessus de la soupape, afin de pouvoir la lever sans ouvrir la boîte qui la renferme. Ce moyen est digne d'attention, mais le défaut de cette soupape sera probablement de manquer de stabilité dans son siège.

264. Le procédé le plus certain et le plus sûr pour des chaudières à basse pression, est de contre-balancer la pression de la vapeur par une colonne d'eau d'un diamètre suffisant pour permettre à la vapeur de s'échapper, au besoin, avec autant de rapidité que le feu peut la développer. Un tuyau alimentaire constitue, jusqu'à un certain point, un tube de sûreté de ce genre, mais il n'a ni la grandeur ni la disposition qu'exigerait la sûreté désirable. Le tube ou conduit TW doit être recourbé à l'extrémité inférieure en T, pl. IV, fig. 2, sans déboucher plus bas que le niveau de la face supérieure des carneaux. Il doit aboutir, à l'autre extrémité, dans un tuyau U, destiné à conduire en bas l'eau chaude dont la chute directe pourrait autrement occasionner des brûlures; il se prolongerait à ce même endroit en un tuyau montant V, destiné à renvoyer la vapeur au loin. L'effet de ce tube de sûreté consiste d'abord à abaisser le niveau de l'eau dans la chaudière pour mettre en action le tuyau alimentaire, s'il ne l'était pas avant, et ensuite à laisser la vapeur s'échapper.

J'ai fait faire sur ce principe deux chaudières, dans lesquelles toute tentative d'élever la pression de la vapeur au delà du point convenable était rendue complètement impossible, et la chaudière reprenait sa pression régulière peu de minutes après que le tube s'était déchargé de sa colonne d'eau. L'écoulement d'une portion de l'eau chaude par le tube, et l'introduction d'une certaine quantité d'eau froide par le tuyau alimentaire, tendent à abaisser la température de la vapeur; mais cela ne peut arriver

par le tuyau alimentaire seul, puisque l'eau bouillante y monte alors, et empêche l'eau froide d'entrer. Un autre avantage de cette construction est que si le niveau de l'eau venait à descendre au-dessous de la bouche du tube, la vapeur s'échapperait, et si le bruit qu'elle fait en sortant ne suffisait pas pour avertir le chauffeur de l'état de la chaudière, le manque de vapeur le forcerait bientôt à y regarder de plus près.

La hauteur du tube pour les différentes pressions est facile à calculer : car la hauteur d'une colonne d'eau équivalente à un hectogramme par centimètre circulaire est, pour une température ordinaire, de 1^m,30 ; ainsi, pour une pression de 3^{hect},5 par centimètre circulaire, on a

$$3,5 \times 1,30 = 4^{\text{m}},55,$$

pour la hauteur du tube ; ce qui est équivalent à près de 4^{hect},5 par centimètre carré. Il est clair que cette hauteur n'est convenable que pour la vapeur à basse pression.

265. D'autres moyens ont été proposés pour la construction des soupapes : quelques-uns sont défectueux en principe et les autres sont compliqués dans leur construction et dans leur jeu. La soupape à piston plein, proposée par le chevalier Edelerantz, aurait l'inconvénient, ou de prendre de l'adhérence promptement, par l'effet de la vapeur à haute pression, ou de donner lieu à des fuites continuelles ; à cette difficulté se joindrait d'ailleurs celle d'ajuster un piston plein avec assez de précision pour qu'il puisse retenir la vapeur, et conserver longtemps cette propriété. Si enfin on veut faire usage d'un piston métallique à ressort, la dépense de construction devient considérable. Dans ce cas on ne doit pas se fier à un piston à garniture ordinaire, à cause de l'irrégularité de son frottement.

266. Quant aux chaudières à haute pression, il est nécessaire de porter plus de soins et d'attention aux appareils de sûreté que pour les chaudières à basse pression, puisqu'il est aisé de voir que le danger est beaucoup plus grand. En effet, quelques accidents terribles ont eu pour effet d'inspirer plus de prudence et plus de précautions à cet égard. Trevithick, qui le premier mit

en usage les machines à haute pression, employa aussi divers moyens pour prévenir ces accidents. Il proposa de renfermer la soupape dans une boîte en fer fermant à clef, afin de la rendre inaccessible, et que personne ne pût en augmenter le poids au delà du point convenable.

Il fit encore pratiquer un trou dans la chaudière qu'il boucha avec du plomb, et qui se trouvait au-dessus du fond, à une hauteur telle, que la chaudière ne pût jamais venir à sec par la vaporisation, sans exposer le plomb à se fondre, et ouvrir en conséquence une issue à la vapeur. Trevithick espérait que, dans le cas où l'on aurait à dessein laissé la chaudière se mettre à sec et acquérir une température rouge, ce moyen empêcherait l'explosion qui aurait été la conséquence de l'introduction subite d'eau alimentaire.

267. Un procédé analogue consiste à boucher un trou pratiqué au fond de la chaudière avec une rondelle de métal fusible, qui aura la propriété de fondre et d'ouvrir vers le foyer une issue à l'eau et à la vapeur, toutes les fois que la température de la chaudière s'élèvera au point de déterminer une pression dangereuse.

268. Le manomètre à mercure est d'un usage général pour indiquer l'état de la vapeur dans les chaudières: c'est un tube recourbé ou siphon renversé, dans lequel le mercure s'élève par la force de la vapeur, et en indique la pression (*Voyez section VIII*). Quand le manomètre est appliqué à une chaudière à haute pression, il exige un tuyau d'une hauteur considérable. C'est un moyen de sûreté additionnel contre l'explosion de la chaudière, parce que, si la vapeur devenait trop forte, le mercure serait rejeté hors du tube, dans un récipient disposé à cet effet, et la vapeur s'échapperait par le tube vide dès que la pression excéderait celle que la chaudière doit supporter. Le manomètre est un des appareils dont l'emploi est le plus désirable pour les chaudières à haute pression, parce qu'on y voit d'un coup d'œil l'état de la vapeur, mais, sous le rapport de la sûreté, nous devons rechercher jusqu'à quel point cet appareil ou les rondelles métalliques sont susceptibles d'être efficaces, de peur

qu'une confiance hasardée dans leur bonté ne nous laisse encore exposés aux plus terribles accidents.

269. En premier lieu, il est clair que l'ouverture ou les ouvertures par lesquelles la vapeur doit s'échapper doivent être assez grandes pour que ce fluide trouve une issue proportionnée au plus grand volume que le feu peut en produire, parce que sans cela la vapeur s'accumulerait et pourrait donner lieu à quelque explosion. Or, un mètre carré de surface exposée au feu peut convertir, dans certains cas, 200 litr. ou 0,2 mètre cube d'eau en vapeur (*voyez art. 200*); et sous le rapport de la sécurité, c'est une augmentation bien légère, que d'admettre que chaque mètre de surface puisse vaporiser 0,5 mètre cube d'eau.

RÈGLE. De cette donnée, nous déduisons la règle suivante :

Supposons qu'on ait d'abord déterminé la densité de la vapeur correspondante à la pression; multipliez cette densité par la racine carrée de la quantité dont la densité est plus grande qu'un, et divisez 9,2 fois la surface exposée au feu par le produit: le quotient sera (en centimètres) le carré du diamètre de la petite base de la soupape;

Ou bien, multipliez la surface par le nombre correspondant à la pression ou à la température, dans la colonne des multiplicateurs de la table suivante; le produit sera encore le carré du moindre diamètre de la soupape.

PRESSION		TEMPÉRATURE.	DENSITÉ de la vapeur.	MULTIPLICATEURS.
en atmosphères	en centimètres de mercure.			
1	76	100	1	Infini.
1 $\frac{1}{5}$	90	107	1,28	13,5
2	152	121	2,00	4,5
3	228	135	2,85	2,4
4	304	145	3,70	1,5
5	380	154	4,70	1

Il convient de remarquer que cette règle donne le minimum de l'ouverture qu'il faut employer ; mais plusieurs motifs doivent porter, soit à ajouter une seconde soupape, soit à doubler l'aire donnée par la règle.

1^{er} *Exemple.* Supposons qu'on ait à déterminer l'aire d'une soupape de sûreté pour une chaudière à basse pression, de 5 mètres de longueur sur 1^m,20 de large, la surface chauffée étant considérée comme égale à la surface du fond de la chaudière ; dans ce cas on a

$$5 \times 1,20 = 6 \text{ mètres carrés ;}$$

et le multiplicateur pour la vapeur à basse pression étant 13,5 on en conclut

$$6 \times 13,5 = 81 \text{ centimètres,}$$

qui est le carré du diamètre de l'ouverture ; la racine carrée de ce nombre donne 9 pour le diamètre ; ainsi dans ce cas on doit faire usage de deux soupapes ayant ce diamètre, ou d'une seule, de 12,7 de diamètre.

2^e *Exemple.* Supposons qu'on veuille établir une chaudière destinée à produire de la vapeur à quatre atmosphères, et ayant 6 mètres de surface chauffée ; déterminons quel serait le plus petit diamètre de l'ouverture pour la soupape de sûreté. Le multiplicateur dans ce cas est 1,5, et l'on a pour le carré du diamètre

$$6 \times 1,5 = 9,$$

dont la racine carrée est 3 centimètres.

270. Il suit de là que le diamètre d'un manomètre à mercure, susceptible de donner issue à la vapeur, ne serait pas trop grand pour rendre son emploi incommode dans la pratique, et n'en serait pas moins un moyen très-efficace pour rendre les chaudières plus sûres. On n'en emploierait pas moins une soupape de sûreté, attendu que les coudes du tube retarderaient jusqu'à un certain point la sortie de la vapeur.

271. Je ne pense pas que l'usage des rondelles métalliques

fusibles présente le même degré de sûreté : car si les rondelles étaient rendues fusibles à la pression convenable, elles seraient ramollies par la température continue de l'appareil fonctionnant, au point qu'elles seraient incapables de retenir la vapeur, surtout si elles avaient toute la grandeur suffisante pour leur objet.

Le plomb ne serait rien moins que propre à cet usage, son point de fusion étant à 320°, température à laquelle la vapeur aurait une force d'environ 150 atmosphères.

L'étain fond à 228°, et à cette température la force de la vapeur est au-dessus de 25 atmosphères. On pourrait former des alliages qui seraient fusibles de 100° à 320° ; mais rien ne prouve que le point de fusion reste invariable dans les alliages qui sont régulièrement exposés à une température si voisine de celle à laquelle ils fondent quand on vient de les composer.

Tableau des degrés de fusion des alliages et des métaux.

	PLOMB.	ÉTAIN.	BISMUTH.	DEGRÉS de fusion.
ALLIAGES . . .	1 partie.	3 parties.	5 parties.	Fond à 100°
	1	4	5	120
		1	1	152
		2	1	170
	2	5		168
		8	1	200
L'étain seul fond à				228
Le bismuth				245
Le plomb				320
Le zinc				353

Mais si un excédant d'environ deux atmosphères au-dessus de la pression habituelle est nécessaire pour fondre la rondelle, il est peu probable qu'avec un moindre excédant elle pût résister au service courant. On ne doit pas dans la pratique compter sur

ce moyen de sûreté; on peut adopter les rondelles métalliques comme surcroît de précaution, mais non comme moyen principal, ni même comme moyen auquel on puisse beaucoup se fier.

272. On a proposé aussi d'ajouter un tuyau en quelque endroit de la chaudière, lequel serait formé d'un métal assez mince pour qu'il pût éclater plus tôt que la chaudière; mais ce moyen, non plus que celui des rondelles fusibles, ne peut être utile que dans le cas où les soupapes ordinaires de sûreté n'agiraient pas; car si ce tube est fait de manière à éclater par un léger accroissement dans la pression habituelle, il ne résisterait pas longtemps à celle-ci, parce qu'il est bien connu qu'un métal soumis à un effort voisin de son maximum de résistance se rompt graduellement. D'ailleurs il est extrêmement difficile de déterminer l'effort qu'un tel tuyau pourrait supporter sans se rompre, et même de le faire avec une approximation suffisante pour qu'il n'y ait pas d'imprudence à en faire dépendre la vie des hommes.

273. Le danger dans les chaudières à haute pression, même dans leur état de travail ordinaire, devient d'autant plus considérable que la pression est plus élevée; c'est pourquoi l'on ne saurait prendre trop de précautions dans l'emploi de ces chaudières. On doit au moins munir chacune d'elles d'une bonne soupape de sûreté et d'un manomètre à mercure dont le diamètre soit suffisant pour permettre au besoin la sortie de la vapeur; mais c'est une bonne pratique des mécaniciens prudents, d'employer deux soupapes de sûreté.

La soupape ordinaire de sûreté peut recevoir un perfectionnement utile et qui consiste à la disposer de manière qu'elle soit dégagée d'une partie de sa charge à mesure que la vapeur la soulève.

De l'aire ou de la section des cheminées pour les chaudières des machines à vapeur.

274. Avant de donner aucune règle particulière pour l'aire des cheminées, il peut être utile de remarquer qu'en leur don-

nant de plus grandes dimensions qu'il n'est nécessaire pour le service actuel de la machine, il peut bien arriver que cette disposition devienne plus convenable pour la suite, tandis que d'un autre côté l'excédant de dépense n'est nullement en rapport avec l'accroissement de grandeur : c'est pourquoi je recommanderai de les établir sur des dimensions doubles de celles que donne la règle ; car celle-ci ne s'applique qu'aux cheminées propres au service actuel de la machine.

La hauteur ne devrait pas être de moins de 15 mètres, et elle devrait être plus grande, si l'on voulait éviter le désagrément de la fumée dans le voisinage immédiat ; car, bien que l'augmentation de hauteur de la cheminée ne produise pas une diminution de fumée, elle aide cependant à la répandre plus au loin ¹.

275. RÈGLE. L'aire (en décimètres) de la cheminée d'une machine à vapeur à haute pression, pour une force de plus de dix chevaux, doit être égale à 4 fois la force en chevaux, divisée par la racine carrée de la hauteur de la cheminée.

Pour une force moindre de dix chevaux, il faudra substituer au facteur 4, la fraction $\frac{1}{8}$ multipliée par le nombre qui se trouve vis-à-vis de celui indiquant la force de chevaux, dans la première colonne de la table (art. 221).

¹ Il existe un fait assez curieux à ce sujet, c'est que, quand la vapeur à haute pression et la fumée s'élèvent ensemble dans la même cheminée, la fumée devient presque invisible. Ce fait semble avoir été premièrement observé dans l'application de la machine de Trevithick à une voiture à vapeur, en 1805. L'observation en fut inscrite dans le *Journal de Nicholson*, vol. XII, p. 1, par M. Gilbert, qui ne fit aucun commentaire sur ce fait, et se borna à dire que l'introduction de la vapeur dans la cheminée augmentait le tirage. Nicholson fit une expérience qui expliqua pourquoi la vapeur devient invisible, en ce que la chaleur de la fumée empêche ce degré de condensation, sans lequel la vapeur ne peut être vue * ; mais on n'y rend pas compte de la disparition de la fumée : je pense qu'elle doit se déposer en conséquence de la diminution de densité, qui résulte de son mélange avec la vapeur, et qui ne permet plus à ce mélange de tenir en suspension les particules de suie que la fumée contenait.

* *Journal de Nicholson*, vol. XI, p. 47.

Exemple. Soit à déterminer l'aire d'une cheminée pour une machine de la force de 40 chevaux, la hauteur étant de 20 mètres; dans ce cas on a

$$\frac{40 \times 4}{\sqrt{20}} = \frac{160}{4,47} = 36 \text{ décim. carrés,}$$

dont la racine carrée est 6 décimètres; ce qui donne le côté d'une cheminée à section carrée : ou bien, en multipliant 36 par 1,27, et extrayant la racine carrée, on aurait le diamètre d'une cheminée circulaire, c'est-à-dire

$$\sqrt{36 \times 1,27} = 6,75.$$

Mais, dans l'un ou l'autre cas, je conseille de faire l'aire de la cheminée double, ou de 72 décimètres de surface, ce qui revient à faire le côté égal à 8,5, ou le diamètre à 9,6.

Nous avons supposé dans cette règle que la machine était construite de la manière la plus convenable, et que le charbon qu'on emploierait serait de la meilleure qualité; c'est-à-dire qu'elle n'en consommerait que de 4 à 5 kilogrammes par heure et par cheval, au-dessus de la force de dix chevaux.

Mais lorsque la consommation s'élève à 6 ou 7 kilogr. de charbon par heure, il faut alors agrandir le conduit de la cheminée, en proportion directe de la quantité consommée (*Voyez* la manière de la déterminer d'après la règle, article 168).

276. Quand on fait usage de bois au lieu de houille, il se produit une quantité de fumée beaucoup plus grande; mais comme elle est beaucoup plus légère, on ne fera la cheminée qu'une fois et demie de la grandeur de celle qui est nécessaire pour le charbon de terre.

277. Les mêmes règles peuvent s'appliquer aux machines à

haute pression, en prenant le $\frac{1}{35}$ du nombre de décim. cubes d'eau vaporisés par heure, ou le $\frac{1}{5}$ du nombre de kilogr. de houille consommés par heure, au lieu du nombre exprimant la force en chevaux.

278. Les cheminées des machines pour les bateaux et les voitures à vapeur sont circulaires, et ne doivent pas être plus grandes que ce qui est absolument nécessaire pour que le combustible y produise son effet utile. Cette mesure serait obtenue approximativement en faisant le carré du diamètre égal à 3,2, multiplié par la force de chevaux, et divisé par la racine carrée de la hauteur exprimée en mètres.

Mais il faut remarquer ici que lorsqu'une cheminée a moins de 12 à 15 mètres de hauteur, il faut laisser la fumée s'élever à une température beaucoup plus haute; il ne faut donc pas la refroidir trop, en cherchant à appliquer toute sa chaleur à la chaudière, parce qu'alors la cheminée n'aurait pas de tirage. Ainsi, dans les cheminées basses, le combustible ne peut produire tout son effet.

Différentes manières de couronner les cheminées sont indiquées dans la planche III. La moins dispendieuse, et qui en même temps offre le moins de prise au vent, a la forme d'un obélisque égyptien.

De la condensation de la vapeur.

279. Quand une substance ou corps quelconque plus froid que la vapeur est mis en contact avec elle, celle-ci se condense jusqu'à ce que la température du corps froid devienne la même que celle de la vapeur, ou bien jusqu'à ce que tout le volume de vapeur soit condensé en majeure partie, et que le reste ne conserve plus qu'un faible degré d'élasticité, correspondant à la température à laquelle le corps froid a été élevé par la chaleur de la vapeur. Plus est grande la masse du corps froid, moins sa température s'élèvera; plus est grand son degré de froid, plus la force élastique de la vapeur sera réduite; d'où il suit que pour abaisser le plus possible cette tension de la vapeur, il faut ac-

croître autant qu'on peut le degré de froid et le volume du corps réfrigérant.

280. Tout corps froid peut condenser la vapeur au bout d'un temps suffisant; mais pour que cela s'effectue d'une manière efficace, le corps doit présenter des surfaces étendues, et être de plus bon conducteur de la chaleur; car lorsqu'il s'agit de réaliser la puissance mécanique au moyen de la condensation, l'effet obtenu est d'autant plus grand que la condensation est plus rapide. Il est facile de prouver que si la vapeur était condensée de manière à ne perdre que des degrés égaux de force élastique dans des périodes égales de la durée de son action, on perdrait ainsi la moitié de la puissance (*Voyez* art. 294). C'est là la cause du non-succès des procédés lents de condensation; cette opération ne saurait être trop prompte, à moins que, pour obtenir cette rapidité, on ne soit obligé de faire, d'une manière ou d'autre, une perte de force qui fasse plus que compenser ce qu'on gagnerait par la condensation.

281. On a trouvé que l'eau était la meilleure de toutes les substances pour la condensation de la vapeur: ce liquide est doué d'une grande chaleur spécifique, et l'emporte peut-être même à cet égard sur tout autre corps; c'est un conducteur rapide de la chaleur, et lorsqu'il est lancé en jet éparpillé, il présente à la vapeur une immense proportion de surface refroidissante.

Comme il est souvent difficile de se procurer de l'eau à une basse température, et quelquefois même de l'obtenir en suffisante quantité, il devient important de rechercher quels sont les effets qui ont lieu lorsqu'on l'emploie en diverses proportions et à diverses températures.

282. Le poids de l'eau P , nécessaire à la condensation, multiplié par la quantité $x - t$, dont la température est augmentée, donne la chaleur que le liquide absorbe. Dans les machines à vapeur, où l'opération est répétée dans le même vase et à la même température, l'excès de la température $T - x$, au-dessus de celle de l'eau de condensation, étant ajouté à 555° , et la somme multipliée par le poids p de la vapeur, le produit doit être égal à la chaleur absorbée par l'eau de condensation, c'est-à-dire

qu'on a

$$P(x - t) = p(555 + T - x)';$$

ou bien,

$$P = \frac{p(555 + T - x)}{x - t} \quad \text{et} \quad x = \frac{p(555 + T) + Pt}{P + p}.$$

283. Lorsque la température de l'eau condensée est égale à celle de la vapeur, la quantité d'eau serait égale à celle qui réduit simplement la vapeur en eau, c'est-à-dire à

$$P = \frac{555p}{T - t}.$$

Mais dans ce cas on n'obtiendrait aucun effet utile. Toute quantité plus grande d'eau froide réduira la force élastique, mais cette réduction doit être poussée au point de rendre le gain de force dû à la condensation plus grand que celui nécessaire pour mouvoir la pompe à air, et pour couvrir l'excédant de dépense en eau et en frais de construction.

284. Dans les machines à basse pression, $T = 105^\circ$ et t doit être pris à la température moyenne de 12° , de sorte que si celle du condenseur est de 38° , on aura

$$P = \frac{p(555 + 105 - 58)}{38 - 12} = \frac{622p}{26} = 24p.$$

Ainsi, 24 fois la quantité d'eau nécessaire pour la vapeur représentera la quantité qui convient pour la condensation. Puisque $\frac{1}{1600}$ de mètre cube d'eau produit un mètre de vapeur à la densité où elle est dans le cylindre d'une machine fonctionnant à

¹ Pour rendre cette équation générale, soit c la chaleur spécifique du corps employé à la condensation, C la chaleur de vaporisation, et c' la chaleur spécifique du corps en vapeur; on aura $Pc(x - t) = pc'(C + T - x)$.

cette température, la consommation par mètre cube du cylindre sera

$$24 \times \frac{1}{1600} \text{ mèt. cub.} = 15 \text{ lit.}$$

ce qui revient, pour une consommation de 18 litres, ou par force de cheval, à 0^{lit},42¹.

Si $x = 55^\circ$, il ne faudra, en eau froide, pour la condensation, que 14 fois le poids de la vapeur; et pour 50° , il faudra 16 fois ce poids². La force de la vapeur à 38° est de 5,5 centim. de mercure; sa force, à 55° , est de 12,75 cent.; par conséquent, le gain de force est de 7,25 centimètres ou environ $\frac{1}{4}$ lorsqu'on condense à la plus basse de ces deux températures.

Si l'eau froide est au degré 22° et le condenseur à 55° , nous trouvons alors que la quantité d'eau de condensation doit être égale à 18 fois le poids de la vapeur; elle doit être égale à 37 fois ce poids lorsque l'eau est à 22° et que la condensation se fait à 38° .

285. Au moyen des équations ci-dessus, on peut calculer les effets comparatifs des différentes températures, et l'on pourra connaître jusqu'à quel point il y a économie à employer ou à épargner l'eau de condensation, tandis que par la marche actuelle, on s'efforce souvent d'obtenir la plus grande force de la vapeur, sans tenir compte des dépenses pour les localités où l'eau est très-coûteuse à recueillir.

Lorsque la vapeur est d'une densité considérable, elle ne se condense plus aussi facilement; il est facile d'en voir la raison, puisque la même surface d'eau d'injection, agissant sur une vapeur plus dense et qui contient une plus grande proportion de chaleur, doit nécessairement enlever cette chaleur plus lentement. Cet inconvénient sera écarté, si l'on fait le condenseur assez grand

¹ Watt établit que 1 pinte ou 0^{lit},47 est amplement suffisant (Robison's *Mechanical Philosophy*, vol. II, p. 147).

² La température ordinaire est d'environ 50° , ou à peu près celle que la main peut supporter.

pour que la vapeur puisse s'y dilater, et prendre un volume correspondant à la pression d'environ $1 \frac{1}{2}$ atmosphère. Mais on obtiendrait plus avantageusement ce même effet, en faisant dilater la vapeur dans le cylindre, suivant la méthode de Watt (art. 27), ou bien dans un second cylindre, par le procédé de Hornblower (art. 32).

Lorsqu'on ne peut obtenir par la condensation une température moindre que 82° , l'opération ne paye pas la dépense; et à 82° la quantité d'eau nécessaire pour la vapeur à basse pression sera

$$P = \frac{555 + 105 - 82}{82 - 12} = \frac{578p}{70} = 8 \frac{1}{4} p.$$

Ainsi, la condensation exigera encore $8 \frac{1}{4}$ fois la quantité d'eau nécessaire pour la vapeur.

286. Ces calculs s'appliquent au cas où la condensation est faite dans un vase séparé, et dont nous devons à Watt la première idée. Quand la condensation a lieu dans le cylindre, il faut abaisser à la température de condensation, non-seulement la vapeur, mais encore le métal du cylindre, et l'on perd une grande quantité de vapeur en le chauffant de nouveau à chaque pulsation. On a exposé (art. 165) le moyen d'obtenir le maximum d'effet utile dans ce système de condensation.

287. Pour déterminer la quantité d'eau d'injection qui convient à une machine condensant dans le cylindre, la formule est la même que pour la condensation dans un vase séparé; il n'y a d'autre différence que dans la quantité de vapeur exigée. L'excédant d'eau de condensation dans ce système est, relativement à celui de Watt, de

$$\frac{0,14m (T - x)}{x - t}$$

pour chaque coup de piston: dans cette formule, m désigne le poids du métal du cylindre (Voyez art. 156 et 161).

288. Le tableau synoptique suivant présentera les différents

modes de condensation d'une manière plus claire qu'on ne pourrait le faire sans doute par toute autre espèce de résumé.

La vapeur peut être condensée,	}	1° Dans le vase où la force est appliquée.	}	Savery, en 1698.	
		2° Dans un vase séparé.....		Newcomen, en 1705. Watt, en 1769.	
La vapeur peut être condensée,	}	1° En projetant un liquide froid contre le vase.....	}	Savery.	
		2° En injectant dans l'intérieur.		Newcomen.	
		3° En exposant la vapeur à de grandes surfaces de liquides ou de solides froids.		}	Watt, Cartwright.
		4° Par la pression de liquides froids sur les vases contenant la vapeur.				Perkins.
		5° Par la réunion de deux ou plusieurs de ces procédés.			»

QUATRIÈME SECTION.

De la puissance mécanique de la vapeur ; de la nature des proportions, et de la classification des machines à vapeur.

289. Après avoir considéré la force de la vapeur quand elle est renfermée, suivant sa température et sa densité, ainsi que les circonstances relatives à son mouvement, notre objet doit être maintenant d'étudier le pouvoir de la vapeur pour produire un effet utile. Je m'efforcerai de procéder à cet égard avec la simplicité et l'étendue que réclame un sujet aussi important.

De la puissance de la vapeur, et des moyens de l'obtenir.

290. La production de la vapeur a lieu, comme nous l'avons vu, par l'application de la chaleur. Concevons un vase cylindrique AB (pl. XVIII, fig. 1), placé dans une situation verticale, et contenant de l'eau jusqu'à une hauteur donnée; qu'un piston soit placé sur cette eau, et contre-balancé par un poids équivalent à son poids et à son frottement réunis. Dans cet état, qu'on échauffe la base AC; l'eau se convertissant en une vapeur d'une élasticité un peu supérieure à la pression atmosphérique, le piston s'élèvera jusqu'à ce que toute l'eau soit vaporisée. On doit remarquer que cette vapeur, d'une force élastique presque égale à la pression atmosphérique, n'engendre aucune puissance dynamique, le mouvement étant simplement produit; elle n'a fait que contre-balancer la colonne d'air atmosphérique, et l'a chassée du cylindre jusqu'à une hauteur donnée.

291. Mais si, dans cet état de choses, la vapeur est subitement condensée, il est évident que le piston sera poussé par une force égale à la pression de l'atmosphère, et parcourra une hauteur égale à celle dont il s'est élevé pendant la formation de la vapeur.

292. Il résulte de là que le pouvoir de la vapeur, d'une élasticité égale à la pression atmosphérique, quand elle est subitement condensée, est en raison directe de l'espace qu'elle occupe. Ainsi, en multipliant l'aire de la base du cylindre en centimètres carrés, par la pression de l'atmosphère exprimée en kilogrammes par centimètre carré, et par la hauteur en mètres, le produit, déduction faite du frottement, donnera la quantité que la vapeur élèverait à un mètre de hauteur dans le même temps, c'est-à-dire son *effet dynamique*.

293. L'espace occupé par la vapeur d'une force élastique égale à la pression de l'atmosphère peut être augmenté en élevant sa température au-dessus de celle de l'eau bouillante; mais une quantité de chaleur presque équivalente à celle que nécessite l'accroissement de volume sera absorbée, et par conséquent on n'augmentera pas ainsi l'effet d'une quantité donnée de combustible.

294. Si la vapeur était condensée lentement, comme cela aurait lieu, par exemple, en appliquant un réfrigérant extérieur, l'effet serait de beaucoup réduit, puisque la force mouvante ne serait à chaque instant égale qu'à la différence entre la force élastique de la vapeur, et la pression atmosphérique. La condensation la plus rapide laisse bien une vapeur d'une certaine élasticité; mais comme celle-ci agit dans le même espace que la force de la vapeur, elle ne cause pas de déviation sensible dans la loi de proportionnalité de la force motrice à l'espace occupé par la vapeur.

295. Concevons maintenant le même appareil échauffé par sa base, avec la seule différence que le piston soit chargé d'un poids donné. La vapeur qui se formera élèvera le piston ainsi chargé, mais à une hauteur moindre que dans le premier cas. La vapeur étant en opposition avec la pression atmosphérique et avec la charge du piston, l'espace qu'elle occupera sera en raison inverse des pressions contraires dans les deux cas, en supposant que la température soit la même. Ainsi, si la charge du piston équivaut au double de la pression de l'atmosphère, il s'élèvera seulement au tiers de la hauteur qu'il eût atteinte dans le premier cas; mais,

par la condensation rapide, il descendra avec une force triple. Par conséquent, soit que la vapeur engendrée ait une élasticité égale ou supérieure à la pression atmosphérique, le pouvoir produit par sa formation et sa condensation sera le même à la même température, et il sera en raison directe de la force élastique de la vapeur, multipliée par l'espace qu'elle occupe quand le mouvement du piston est rectiligne (ou *curviligne*. M.).

296. Mais si, comme dans le dernier cas, la vapeur élève un piston chargé, et qu'alors une soupape ouverte permette à la vapeur de s'échapper, l'effet dynamique obtenu sera seulement égal au poids élevé descendant de la hauteur à laquelle il est parvenu. La puissance qui serait résultée de la condensation sera perdue, et cette perte sera égale à la pression de l'atmosphère multipliée par la hauteur à laquelle le piston avait été élevé par la vapeur. C'est ce qui a lieu dans la plupart des machines à vapeur dites à *haute pression*. Il est évident que plus la force élastique de la vapeur est considérable, plus est petite la perte provenant de la non-condensation. Mais on doit remarquer que, à moins que l'ouverture de la soupape ne soit égale au diamètre du cylindre, la vapeur ne peut s'échapper avec la vitesse nécessaire sans qu'une partie de la charge du piston ne serve à la repousser, ce qui augmentera encore la perte. Le pouvoir effectif est en raison directe de l'espace occupé par la vapeur, multiplié par l'excès de sa force élastique sur la pression atmosphérique.

297. Supposons que le même piston chargé soit élevé, par la conversion en vapeur d'une quantité donnée d'eau, à la hauteur qui correspond à la charge et à la température; si alors on enlevait entièrement la charge du piston, celui-ci s'élèverait par la dilatation de la vapeur jusqu'à ce qu'elle devînt d'une force élastique presque égale à la pression atmosphérique, et la condensation produirait le même effet que si la vapeur avait été d'abord formée avec cette élasticité. Ainsi, l'effet de la charge du piston est entièrement additionnel, et le résultat combiné d'une haute pression avec la condensation est produit par la même vapeur. Le pouvoir effectif de la vapeur employée de cette manière est égal à l'espace qu'elle occupe, multiplié par l'excès de sa force

élastique sur la pression atmosphérique, ajouté au produit de l'espace qu'elle occupe quand son élasticité est égale à la pression de l'atmosphère par cette même pression. Ainsi, par cette combinaison d'effet, la puissance dynamique de la vapeur à une haute pression sera presque doublée.

298. Tel n'est pas cependant le mode le plus avantageux d'application de la vapeur ; car, au lieu d'enlever entièrement la charge du piston lorsqu'il est parvenu à la hauteur où l'a portée la production de la vapeur à haute pression, on peut en ôter seulement une partie, et alors la vapeur se dilatera jusqu'à une hauteur qui dépendra de la portion enlevée. Le piston parvenu à cette hauteur, on ôtera une seconde partie de sa charge, et ainsi de suite successivement, jusqu'à ce que la force élastique de la vapeur soit devenue égale à la pression atmosphérique. Dans ce cas, l'effet sera plus grand que dans la combinaison précédente ; nous donnerons ci-après les moyens de le calculer.

299. Le mode précédent n'est pas le seul pour tirer parti de la dilatation de la vapeur ; c'est seulement une découverte récente, qui très-probablement appartient à Woolf, en tant qu'il pouvait la comprendre. Les méthodes de Hornblower et de Watt ne s'appliquent qu'au cas qui nous reste maintenant à considérer.

Supposons que le piston se soit élevé sans charge, comme dans le premier cas, par la conversion d'une certaine quantité d'eau en vapeur d'une force élastique égale à la pression de l'atmosphère. Quand le piston est arrivé à cette hauteur, qu'on ajoute un poids équivalent à la moitié de la pression atmosphérique à la corde passant sur la poulie, fig. 1 ; alors la force de la vapeur n'étant pas contre-balancée, le piston s'élèverait jusqu'à ce que l'élasticité de la vapeur fût devenue égale à la moitié de la pression atmosphérique, c'est-à-dire jusqu'à ce que le piston eût atteint le double de sa hauteur primitive. Concevons maintenant que la vapeur soit condensée, et qu'au même instant le poids soit enlevé de la poulie, la force descensionnelle, moins la force ajoutée pour produire l'ascension, sera de moitié plus grande que lorsqu'on condense simplement la vapeur d'une élasticité égale à la pression de l'atmosphère. Ce rapport sera même aug-

menté si l'on ajoute partiellement le poids additionnel et qu'on diminue en même temps par degrés successifs la force élastique de la vapeur. Tel est le principe d'expansion appliqué dans les machines de Hornblower et de Watt.

300. On a avancé qu'il était impossible d'employer la vapeur, à moins que sa force élastique ne fût égale à la pression atmosphérique; mais cette condition n'est pas indispensable, car il arrive fréquemment que des machines travaillent avec une vapeur d'une élasticité moindre. Le même mode d'explication nous montrera comment cela peut être. Supposons que la moitié de la pression de l'atmosphère sur le piston soit contre-balancée par un poids suspendu de l'autre côté de la poulie; l'action de la chaleur déterminera la formation d'une vapeur dont la force élastique sera égale à la moitié de la pression atmosphérique, et le piston s'élèvera au double de la hauteur à laquelle l'aurait porté une vapeur capable de faire équilibre à la pression de l'atmosphère; par conséquent lorsque la vapeur sera condensée, la force de la descente sera égale à la moitié de la pression atmosphérique multipliée par une hauteur double. Ainsi, la vapeur produit le même effet qu'auparavant.

Nous aurons occasion de montrer l'importance de ce principe pour régler la puissance des machines atmosphériques.

301. Dans cette exposition des différents modes de réaliser la puissance de la vapeur, j'ai considéré la puissance de l'atmosphère comme l'une des forces actives. Pour la plupart des cas, la pression directe de la vapeur est employée dans la pratique; mais la différence, en se servant de l'un ou de l'autre genre de pression, dépend de circonstances autres que sa force, telles que le degré du refroidissement et autres semblables, et elle n'affecte pas les relations des effets de la vapeur agissant seulement avec de petites variations de température.

Calcul de la puissance de la vapeur pour produire un mouvement rectiligne.

302. Si nous supposons la force de la vapeur dans un cylin-

dre égale à la pression moyenne de l'atmosphère, nous pouvons aisément calculer la puissance de la vapeur produite par une quantité donnée d'eau, quand cet effet dynamique est obtenu par la condensation, sans action expansive. Ainsi, l'espace occupé par la vapeur à 100° est 1710 fois le volume de l'eau qui l'a produite (art. 120), quand elle fait équilibre à la moyenne pression de l'atmosphère, et cette pression est égale à $103 \frac{1}{3}$ kilogrammes par décimètre carré. Par conséquent, la vapeur produite par un décimètre cube d'eau élèvera à un mètre de hauteur

$$\frac{1710 \times 103 \frac{1}{3}}{10} = 17670 \text{ kilogrammes.}$$

Multipliant ce résultat par l'aire du cercle dont le diamètre est 1, c'est-à-dire par $\frac{\pi}{4}$, nous avons 13842 kilogrammes élevés à un mètre, pour le plus grand effet d'un cylindre d'un décimètre de diamètre et de hauteur, ou d'un décimètre cylindrique d'eau convertie en vapeur. Sur cela, il faut déduire le frottement du piston et la résistance de la vapeur non condensée. Il serait actuellement prématuré d'apprécier la valeur totale de ces déductions; mais je donnerai au calcul une forme analytique, afin de l'approprier aux machines à expansion et aux autres espèces de machines.

303. Soit f la force de la vapeur en centimètres de mercure, et t sa température; le poids d'un décimètre cube de vapeur en grammes sera

$$\frac{2,87f}{273 + t}.$$

Le poids d'un décimètre cube d'eau est 1000 grammes; ainsi, le volume de la vapeur, rapporté à celui de l'eau pris pour unité, est

$$\frac{1000 (273 + t)}{2,87f} = \frac{349 (273 + t)}{f}.$$

La force de la vapeur sur un décimètre carré est $1,56f$; ainsi,

$$1,36f \times \frac{349 (273 + t)}{f} = 475 (273 + t)$$

exprime le nombre de kilogrammes qu'élèverait à un mètre de hauteur un décimètre cube ou 1 kilogr. d'eau converti en vapeur, à la température t , sans tenir compte de la perte due au frottement, aux fuites et à la vapeur non condensée.

Il résulte de là, comme nous l'avions déjà montré d'une autre manière (art. 294), que le pouvoir de la vapeur est indépendant de sa force élastique.

304. Si f' désigne la force correspondante à la température de la vapeur condensée ou du condenseur, alors la résistance est égale à

$$\frac{475 (273 + t) f'}{f}$$

305. Représentons la perte de vapeur qui a lieu en raison des fuites par $1 - w$, et le frottement du piston par F , la force de la vapeur fournie par 1 décimètre cube d'eau à la température t sera

$$\begin{aligned} 475 (273 + t) w - \frac{475 (273 + t) (f' + F) w}{f} \\ = 475 (273 + t) w \left(1 - \frac{f' + F}{f} \right). \end{aligned}$$

306. Nous pouvons maintenant apprécier l'effet de l'expansion. Quand la température n'éprouve pas d'altération sensible pendant la durée de l'action, la force de la vapeur est en raison inverse de l'espace qu'elle occupe. Ainsi, soit b son volume, p sa force, et x un accroissement variable du volume, dont la différentielle est dx ; on aura

$$b + x : b :: p : \frac{pb}{b + x},$$

et $\frac{pb dx}{b+x}$ sera la différentielle de la force développée par l'expansion pour l'espace dx . L'intégrale de cette expression est $pb \times \log \text{hyperb. } (b+x) + C$. Pour déterminer la constante, observons que la fonction doit être nulle quand $x = 0$: ainsi,

$$pb \times \log \text{hyperb. } b + C = 0.$$

La force dynamique de la vapeur a donc pour expression

$$pb + \log \text{hyp. } \left(\frac{b+x}{b} \right).$$

Pour revenir à notre notation primitive, faisons

$$x = (n - 1) b,$$

et
$$b = \frac{349 (273 + t)}{f};$$

et, de plus, $p = 1,36f$. L'expression de la force développée par l'expansion de la vapeur deviendra

$$\varepsilon = pb \times \log \text{hyp. } \left(\frac{b+x}{b} \right) = 475 (273 + t) \log \text{hyp. } n.$$

307. Quand on emploie le principe de l'expansion, c'est-à-dire quand la vapeur se dilate pendant son action sur le piston, il devient nécessaire d'augmenter la longueur du cylindre. La réduction d'effet qui résulte de cette cause a été totalement négligée. Si n est le volume de la vapeur dans son état de dilatation, en prenant pour unité son volume quand la température est t et la force f , alors

$$475 (273 + t) w \times \left[1 - \frac{n (f' + F)}{f} \right] + \varepsilon$$

est la puissance dynamique d'un décimètre cube ou litre d'eau,

ϵ désignant la puissance additionnelle gagnée par l'emploi de l'expansion de la vapeur.

En substituant dans cette expression la valeur de ϵ trouvée précédemment, elle devient

$$475 (273 \times t) w \div \left[1 + \log \text{hyp. } n - \frac{n(f + P)}{f} \right].$$

Telle est l'expression de la puissance dynamique d'un litre ou kilogramme d'eau réduite en vapeur, quand on emploie la force expansive.

308. Cette fonction de n a un maximum. Pour le trouver, égalons à zéro la différentielle relative à n , et nous aurons

$$n = \frac{f}{f + F}.$$

En substituant cette valeur de n , nous aurons, pour l'expression de la plus grande force dynamique que puisse fournir la vapeur produite par un décimètre cube d'eau,

$$475 (273 + t) w \times \log \text{hyp.} \left(\frac{f}{f + F} \right).$$

Si l'on ne veut pas employer une table de logarithmes hyperboliques, on trouvera le résultat en multipliant par 2,302585 le logarithme de $\frac{f}{f + F}$ pris dans les tables ordinaires, ce qui donnera le logarithme hyperbolique correspondant.

309. Dans les machines les mieux construites, la perte de vapeur n'est pas de moins d'un dixième : nous pouvons donc supposer $w = 1 - 0,1 = 0,9$. Alors la formule ci-dessus devient

$$427,5 (273 + t) \div \log \text{hyp.} \left(\frac{f}{f + F} \right).$$

310. En supposant la même valeur pour w , nous avons, d'après l'art. 304,

$$427,5 (273 + t) \times \left[1 - \left(\frac{f + F}{f} \right) \right],$$

pour le plus grand effet dynamique possible de la vapeur produite par un décimètre cube d'eau, quand on n'emploie pas son expansion. Retranchant ces deux expressions l'une de l'autre, nous trouvons, pour la force additionnelle due à l'expansion de la vapeur,

$$427,5 (273 + t) \times \left[\log \text{hyp.} \left(\frac{f}{f + F} \right) - \left(1 - \frac{(f + F)}{f} \right) \right].$$

311. Ces formules nous montrent les limites de la puissance dynamique de la vapeur. Elles sont les plus propres à mettre en évidence les avantages et les inconvénients des différentes températures et forces élastiques; elles rendent sensible l'économie qu'il y a à se servir d'une vapeur dont la force élastique soit considérable. Cependant il nous reste encore à les appliquer aux diverses sortes de machines¹; c'est ce que nous ferons dans les sections V et VI. Mais, avant de terminer l'exposition des principes généraux, il convient d'examiner le mouvement de rotation produit par la vapeur.

Calcul de la force de la vapeur pour produire un mouvement de rotation.

312. Dans un grand nombre de cas où l'on emploie la vapeur, elle est destinée à produire un mouvement circulaire continu. On est généralement persuadé qu'on gagnerait beaucoup à produire ce mouvement par l'action directe de la vapeur, au lieu de l'obtenir par l'intervention d'appareils intermédiaires, ayant pour objet de convertir le mouvement rectiligne produit par l'action de la vapeur en un mouvement circulaire; mais tous ceux qui ont tenté jusqu'ici de construire une machine à vapeur à rotation

¹ J'ai publié, dans mon *Traité sur les Chemins de fer*, p. 257, des tableaux calculés d'après ces formules.

immédiate n'ont pas obtenu plus d'effet que par les moyens ordinaires : c'est ce qui fait de l'examen théorique du mouvement de rotation un sujet de recherches intéressantes.

313. Concevons un piston DE (pl. XVIII, fig. 2), adapté à un vase régulièrement courbé AB, de manière qu'il puisse se mouvoir autour de C, centre de courbure du vase. Maintenant, que le piston soit mû par la vapeur à haute pression ou autrement, la pression sur chaque centimètre carré de l'aire du piston sera égale dans toutes ses parties, c'est-à-dire qu'elle sera la même au point D le plus éloigné du centre du mouvement, qu'au point E qui en est le plus rapproché. Mais, puisque le piston est contraint à se mouvoir circulairement, les effets de ces pressions égales seront en raison de leurs distances du centre. Ainsi, en supposant la pression effective de la vapeur en D de 7 hectogrammes par centimètre carré, nous aurons

$$DC : EC :: 7 : \frac{7 \times EC}{DC}$$

pour l'effet en E. Si le centre de courbure C était plus rapproché des parois du vase, l'effet en E serait moindre ; c'est pourquoi l'effet dynamique de la pression est moindre que dans un vase droit, ayant même base ; et, si les bases sont les mêmes, l'espace par lequel la pression agit sera en raison de la quantité de vapeur. Conséquemment, les quantités de vapeur étant égales, la force de la machine à rotation sera moindre que celui de la machine à mouvement rectiligne ¹.

314. Si un piston rectangulaire tourne autour du centre C', environ la moitié de la force de la vapeur sera perdue.

Cet examen sommaire suffit pour prouver l'inutilité des tentatives faites pour employer le mouvement de rotation de la vapeur, sans compter les diverses objections relatives à l'excès du frottement et à la difficulté d'exécuter la machine avec le degré d'exactitude nécessaire.

¹ Voyez la note de l'art. 316.

315. Pour déterminer avec plus de précision l'effet des machines à rotation immédiate, posons

DE, le diamètre du piston = b ,
 EC, le rayon du cercle intérieur = r ,
 une portion variable du diam. du piston, comptée de E = x ,
 la largeur du piston = y ,
 la force de la vapeur par centimètre carré. = f .

Alors $CD = r + b$; et, pour déterminer la force en chaque point situé à une distance x du point E, nous avons la proportion,

$$r + b : r + x :: f : \frac{f(r + x)}{r + b}.$$

La différentielle de la pression en ce point sera donc

$$\frac{fy(r + x)}{r + b} dx.$$

L'espace décrit étant $2\pi(r + x)$, la différentielle de la puissance dynamique sera

$$\frac{2\pi fy(r + x)^2}{r + b} dx.$$

En supposant y constant, l'intégrale de cette expression est

$$\frac{2\pi fy(r + x)^3}{3(r + b)} + C.$$

Nous déterminerons la constante arbitraire, en supposant la force nulle quand $x = 0$, et alors nous trouverons

$$\frac{2\pi fy}{3(r + b)} \times (3r^2x + 3rx^2 + x^3).$$

Cette intégrale doit être prise jusqu'à $x = b$, et par conséquent la puissance due à un piston rectangulaire by sera

$$\frac{2\pi f y b}{r + b} \left(r^2 + rb + \frac{2}{3} b^2 \right).$$

316. Si le piston D'C' tourne sur un axe autour du centre C', alors $r = 0$, et l'on a, pour l'expression de la puissance dynamique,

$$\frac{2\pi f y b^2}{3}.$$

Mais l'espace occupé par la vapeur est $\pi b (2r + b) y$, et sa force exercée dans la direction rectiligne est $\pi f b (2r + b) y$. Ainsi le rapport de l'effet rectiligne de la vapeur à l'effet circulaire est celui de

$$2r + b \quad \text{à} \quad \frac{2 (r^2 + rb + \frac{1}{3} b^2)}{r + b},$$

ou bien,

$$2r^2 + 3rb + b^2 \quad : \quad 2 (r^2 + rb + \frac{1}{3} b^2).$$

Quand $r = 0$, le rapport devient celui de 3 à 2. Ainsi un tiers de la force est perdu dans le mouvement de rotation, de quelque manière que la vapeur agisse¹.

¹ Si M. Tredgold se fût demandé ce que devenait cette force perdue, il eût probablement douté de l'exactitude de sa conclusion. Il n'est pas, en effet, de principe mieux établi en mécanique que celui de la conservation des forces vives, en vertu duquel, dans un système de corps en mouvement, les quantités de mouvement perdues par l'un d'eux sont précisément égales aux quantités gagnées par les autres. Or, sa conclusion est directement contraire à ce principe. La source de l'erreur se trouve dans ce qu'au lieu de calculer l'effet dynamique de la vapeur, il a procédé comme s'il s'agissait de déterminer la valeur du moment d'impulsion; et en effet on sait que ce moment, pour des forces égales agissant uniformément sur tous les points d'un rayon, se réduit aux deux tiers de ce qu'il serait si la résultante était appliquée à l'extrémité de ce rayon, proportion conforme à celle que M. Tredgold assigne, quoique mal à propos, à la perte d'effet dynamique.

Voici, au reste, comment le calcul doit être rétabli.

La différentielle de la pression au point x sera $f y dx$.

L'effet dynamique correspondant pour une révolution du piston sera égal à cette quantité multipliée par la longueur de l'espace parcouru, ou à

$$f y dx \times 2\pi (r + x),$$

317. Nous avons supposé le piston à parois rectangulaires; mais dans quelques machines, on a projeté de le rendre circulaire. Dans ce cas, la valeur de $\frac{1}{2} y$ est $\sqrt{bx - x^2}$. Ainsi la différentielle de la force de rotation est alors

$$\frac{4\pi f (r + x)^2 \sqrt{bx - x^2}}{r + b} dx.$$

Cette expression a pour intégrale, entre les limites $x = 0$, $x = b$,

$$2 \times 0,7854\pi f b^2 \times \left(\frac{r^2 + rb + \frac{5}{16} b^2}{r + b} \right).$$

dont l'intégrale entre les limites $x = 0$ et $x = b$ donne pour l'effet dynamique total

$$F = 2\pi f \gamma \left(rb + \frac{b^2}{2} \right).$$

Or, la différentielle du volume de vapeur dépensé à chaque révolution est, pour le point x ,

$$dV = 2\pi \gamma (r + x) dx,$$

dont l'intégrale, prise entre les mêmes limites que ci-dessus, donnera le volume total dépensé, ou

$$V = 2\pi \gamma \left(rb + \frac{b^2}{2} \right).$$

Le rapport de l'effet dynamique au volume de vapeur est

$$\frac{F}{V} = \frac{2\pi f \gamma \left(rb + \frac{b^2}{2} \right)}{2\pi \gamma \left(rb + \frac{b^2}{2} \right)} = f;$$

ce qui donne

$$F = fV.$$

Ainsi, dans les machines rotatives, l'effet dynamique est indépendant de la forme ou des dimensions du vase, et il est proportionnel à la pression et au volume de la vapeur, comme dans toutes les autres machines : il ne peut donc pas y avoir de perte d'effet sous ce point de vue.

M.

Ce résultat est un peu plus petit que l'effet d'un piston rectangulaire. Quand le piston D'E' tourne autour d'un axe, la force rectiligne d'une quantité donnée de vapeur est à la force dans une direction circulaire comme 3,2 est à 2.

Pour un piston rectangulaire, ce rapport était celui de 3 à 2.

On voit donc qu'il n'est pas possible d'employer la vapeur avec le même avantage dans une machine à rotation que dans une machine à mouvement rectiligne. En outre le rayon du cercle décrit doit être très-grand en comparaison du diamètre du piston, ce qui rend la machine d'une exécution difficile. Si l'on donne au piston une autre forme que la forme circulaire, on augmente le frottement, et l'on expose une plus grande portion de la surface au refroidissement produit par l'action de l'atmosphère. Ce sont des objections fondamentales à l'emploi des machines à rotation, qui ne peuvent être détruites par aucun moyen artificiel.

318. Il est assez évident pour qu'il ne soit pas nécessaire de le prouver, que l'impulsion ou choc de la vapeur, au lieu de la pression, ne peut être employée sans une grande perte de combustible. Nous devons cependant mentionner ce moyen dans le tableau général des divers modes suivant lesquels l'action de la vapeur peut être appliquée.

Des modes d'application de la vapeur.

319. Les différents modes d'application de la vapeur seront plus clairement présentés sous la forme d'un tableau que dans une description suivie. Nous avons déjà expliqué, dans les articles 291, 295 et 297, la manière d'obtenir et d'évaluer les diverses espèces de force dynamique par condensation, par production et par expansion de la vapeur.

320. L'action de la vapeur comme force mouvante résulte de

}	1. La production de la vapeur (Worcester).
	2. L'expansion de la vapeur (Hornblower).
	3. La condensation de la vapeur (Savery).

Ces espèces d'action peuvent être employées

}	séparément	Production.
		Condensation.
	ou conjointement.	1 et 2.
		1 et 3 (Savery).
		2 et 3 (Hornblower).
		1, 2 et 3 (Woolf).

L'action peut avoir lieu

}	par pression.
	par impulsion.

Elle peut s'exercer sur

}	un solide (Newcomen).	}	, et elle peut être	continue.
	un fluide (Worcester).			successive.

Le mouvement de la surface qui reçoit l'action peut avoir lieu en

}	ligne droite.
	ligne courbe.

321. La pression de la vapeur est le genre d'action qu'on emploie dans la pratique; et nous avons expliqué (art. 317) les raisons qui font donner la préférence au mouvement rectiligne. Pour l'employer de la manière la plus économique, on a trouvé qu'un solide est plus propre à recevoir son action, les fluides étant sujets à s'altérer par le contact d'une vapeur chaude, ou à faire perdre de la vapeur par la condensation. On a adopté la forme cylindrique comme la mieux adaptée à cet objet, puisqu'elle présente la plus grande capacité avec la moindre surface, et qu'elle occasionne une perte moindre par le refroidissement et le frottement¹. L'action est nécessairement successive ou alternative, afin de rendre le mouvement rectiligne; mais les divers modes d'emploi de la vapeur sont employés ou conjointement ou séparément. C'est d'après ces modes d'action que les machines peuvent être classées.

¹ La vraie raison est plutôt qu'un cylindre métallique s'exécute avec plus de facilité et de précision, et présente, d'ailleurs, plus de solidité que tout autre vase de forme prismatique.

322. On doit remarquer que la vapeur doit être ou condensée, ou bien engendrée sous une certaine pression, afin de produire une force par l'expansion. On peut donc diviser les machines en deux classes, selon qu'on emploie ou non la condensation.

Classification des machines à vapeur.

- | | | |
|---|---|---|
| 323. I. Machines sans condensation agissant par | { | 1. la production seule de la vapeur.
2. la production et l'expansion. |
| 324. II. Machines à condensation agissant par | { | 1. la condensation de la vapeur.
2. la condensation et l'expansion.
3. la production et la condensation.
4. la production, l'expansion et la condensation. |

325. Toutes les machines de la première classe, et les troisième et quatrième genres de la seconde classe, exigent l'emploi de la vapeur à haute pression. Les machines de la première classe sont remarquables par la simplicité de leur construction, mais elles n'utilisent jamais la puissance totale de la vapeur. Celles de la seconde classe exigent une grande quantité d'eau froide pour la condensation de la vapeur, ce qui fait que, dans quelques cas, il est impossible de les employer. Le plus grand effet est donné par les machines du second et du quatrième genre de la seconde classe, ou plutôt, c'est seulement dans ces deux genres qu'on utilise toute la puissance de la vapeur.

326. Dans chaque classe, il y a certaines proportions entre la longueur de la course du piston et le diamètre du cylindre, ainsi qu'entre la même longueur de course et la vitesse, lesquelles donnent un maximum d'effet utile pour une quantité déterminée de vapeur. Il nous reste à considérer ces proportions, ainsi que celles des parties additionnelles nécessaires dans les machines à condensation.

Du rapport entre la longueur de la course du piston et le diamètre du cylindre.

327. Si toutes les ouvertures, ainsi que les autres parties,

sont convenablement proportionnées, et si le mouvement est régularisé de manière à ce qu'on puisse le regarder comme uniforme, il n'y a aucune circonstance relative au mouvement qui puisse avoir quelque influence sur les proportions du cylindre à vapeur, excepté la petite différence provenant de ce que le frottement ne croît pas exactement en raison du carré du diamètre; et cette différence est si légère dans les proportions ordinaires, que nous pouvons la négliger en toute sûreté.

328. La seule autre circonstance qui soit nécessaire à considérer dans la détermination des proportions du cylindre, c'est l'étendue de la surface au refroidissement de laquelle la vapeur est exposée pendant la durée de son action. Cette surface doit être la moindre possible; car la destruction de force qui en résulte par la condensation de la vapeur est considérable (*Voyez* l'art. 156).

L'étendue totale de cette surface comprend l'une des extrémités du cylindre, une des bases du piston, et la surface concave du cylindre; mais cette dernière n'est mise que graduellement en contact avec la vapeur pendant la course du piston, et son effet n'est, par suite, que la moitié de celui que produirait une surface égale constamment en contact avec la vapeur. Or, le pouvoir d'une machine est le plus grand possible quand l'effet d'une quantité donnée de vapeur est lui-même le plus grand possible. Ainsi, la question consiste à trouver la moindre surface qui puisse être en contact avec la vapeur pendant la durée de son action.

329. Une quantité donnée de vapeur est en contact avec la moindre étendue possible de surface, quand la longueur de la course du piston est double du diamètre du cylindre¹. Telle est

¹ Soit x le diamètre du cylindre, l sa longueur, c son volume, et $\pi = 3,1416$ le rapport de la circonférence au diamètre; on a

$$c = \frac{\pi x^2 l}{4},$$

donc la meilleure proportion pour le cylindre d'une machine à vapeur, excepté quand l'espace réservé à la machine oblige à limiter la course du piston.

Cette conclusion s'applique tant aux machines atmosphériques qu'à celles qui agissent par la pression immédiate de la vapeur ¹.

330. En considérant la pratique des constructeurs de machines à vapeur, on ne trouve pas de règle fixe pour les propor-

et, par conséquent,

$$l = \frac{4c}{\pi x^2}.$$

La somme des aires des bases est $\frac{\pi x^2}{2}$, et l'aire de la moitié de la surface concave est $\frac{\pi l x}{2} = \frac{2c}{x}$. Ainsi l'étendue totale des surfaces dont le contact doit refroidir la vapeur pendant la durée de son action est

$$\frac{\pi x^2}{2} + \frac{2c}{x}.$$

Pour que cette surface soit un *minimum*, il faut égarder à zéro sa différentielle, ce qui donne l'équation

$$\pi x - \frac{2c}{x^2} = 0;$$

d'où

$$x^3 = \frac{2c}{\pi}.$$

Substituant, au lieu de c , sa valeur, il vient $2x = l$, conformément à ce qui est énoncé dans le texte.

¹ L'idée de déterminer la proportion du cylindre d'après la considération de la surface de moindre refroidissement paraît peu fondée dans la pratique; M. Tredgold n'évalue lui-même qu'à $\frac{1}{100}$ la perte d'effet due au refroidissement (art. 157). Ainsi, toute réduction qu'on pourrait obtenir sur une aussi faible perte, par une disposition quelconque des cylindres, serait, dans tous les cas, de peu d'importance. C'est donc d'après d'autres considérations que l'on doit fixer le rapport de la longueur des cylindres à leur largeur, et principalement d'après la vitesse qu'on veut obtenir et les facilités de communication de mouvement.

D'un autre côté, les bases du calcul semblent inexactes, en ce qu'on suppose que le refroidissement à travers le piston est aussi considérable que par les fonds, et qu'on n'y tient pas compte du refroidissement de la partie des parois du cylindre exposée au vide; ce qui conduirait alors à ne donner au cylindre qu'une hauteur égale à sa largeur, ou à la moitié de ce que prescrit la règle du texte. M.

tions du cylindre, lorsque rien ne limite la longueur de la course du piston. Les proportions suivies à différentes époques par Watt et Boulton varient depuis $1 \frac{3}{4} : 1$ jusqu'à $3 : 1$; la plus commune est celle de $2,7$ à 1 , et les variations n'offrent aucune régularité.

Dans une table donnée par Smeaton sur les proportions des machines atmosphériques (voyez *l'Encyclopédie* du docteur Rees, article *Steam Engine*), la longueur du cylindre est assujettie à varier à peu près comme la racine carrée de son diamètre : au point le plus bas de l'échelle, la table commence par la proportion de 4 à 1 ; on n'explique pas pourquoi on a fixé la proportion de la racine carrée du diamètre. Les proportions adoptées par Maudslay sont également irrégulières, mais elles se rapprochent du rapport $2 : 1$; celles de Fenton, Murray et Wood équivalent à peu près au rapport $1 \frac{1}{2} : 1$. Leur objet paraît avoir été de rendre la vitesse presque la même dans toutes les machines; nous aurons donc à examiner les circonstances qui doivent déterminer cette vitesse.

Du maximum d'effet utile dans les machines à vapeur.

331. Il y a dans les machines à vapeur une certaine vitesse du piston qui donne un maximum d'effet utile.

Dans une machine déjà construite, la vitesse qui donne le plus grand effet que puisse produire la machine est limitée par les proportions qui ont été établies dans les différentes parties.

Mais dans une machine à construire, toutes les parties doivent être disposées de manière à s'accorder avec la vitesse qui fait produire à une quantité donnée de vapeur le maximum d'effet possible. Ces deux cas sont extrêmement différents; mais en éclaircissant chacun d'eux par des exemples, j'aurai occasion de montrer qu'on ne saurait déduire une règle générale de l'examen d'aucune machine en particulier.

Du maximum d'effet dans les machines régularisées par un volant.

332. Le cas le plus simple à considérer est celui où la pression

sur le piston est la même dans toute la durée de sa course. Nous pouvons supposer le poids du volant, conjointement avec la masse de matière contenue dans la machine, proportionnés de manière à rendre le mouvement à très-peu près uniforme.

Alors la plus grande vitesse constante que la machine pût acquérir serait égale à la moitié de celle qu'acquerrait un corps grave tombant de la hauteur de la course du piston ¹; et avec cette vitesse le travail fait serait nul; toute la force de la vapeur

¹ Il est difficile de reconnaître sur quel fondement M. Tredgold assimile ici la force de la vapeur avec celle de la pesanteur dans la chute des graves, puisque l'énergie des deux forces est tout à fait différente, et que la première varie dans des limites très-écartées, tandis que la seconde est à peu près invariable, et n'imprime au corps soumis à son action qu'une vitesse très-bornée et toujours relative à la hauteur de la chute. C'est ainsi que, dans les roues mues par le poids de l'eau, la vitesse extrême ne peut dépasser la valeur

$$V = 4,4 \sqrt{H},$$

encore cette valeur est-elle double de celle qu'admet M. Tredgold.

D'un autre côté, la vitesse que peut prendre la vapeur sous une pression donnée d'après la formule même de l'art. 175, est

$$V = 405 \sqrt{n},$$

en désignant par n le nombre d'atmosphères équivalent à la pression de la vapeur.

Telle est aussi la vitesse extrême que peut prendre un corps soumis à l'action de la vapeur. On voit que ces vitesses sont excessivement différentes, et que l'on ne peut rien conclure ni de l'une ni de l'autre.

Mais la vitesse du piston est soumise à une autre limite, qui dépend du temps nécessaire à la sortie et à la condensation de la vapeur. Cette condensation ne se fait pas instantanément; de sorte que, si le piston allait trop vite, la vapeur non encore condensée serait un obstacle à sa marche, et diminuerait l'effet utile (Voyez art. 280 et 294). C'est donc là le principe qui doit régler la vitesse des machines à vapeur, et c'est à l'expérience à le déterminer. La pratique a conduit à adopter une vitesse d'environ 1 mètre par seconde pour diverses longueurs de cylindre. On sent, en effet, que cette vitesse doit être constante pour que la condensation puisse s'effectuer uniformément; et cela doit avoir lieu dans les longs cylindres comme dans les courts, sauf les cas de perte de vapeur ou d'expansion. Pour pouvoir augmenter cette vitesse, il n'y aurait d'autre moyen que d'augmenter les conduits de vapeur et le condenseur, ainsi que le volume d'eau d'injection, ou bien de trouver un moyen de condensation plus rapide que celui en usage.

M.

serait dépensée à maintenir la machine en mouvement avec cette vitesse.

Il est évident qu'une vitesse constante ne peut être plus grande que la moitié de celle d'un corps pesant descendu de la longueur de la course du piston, parce qu'avec une autre vitesse la masse mue ne pourrait recevoir ni communiquer d'égales quantités de mouvement en temps égaux, circonstance essentielle à l'uniformité du mouvement d'une machine mue par une force constante.

333. Comme avec la plus grande vitesse possible l'effet utile d'une machine est nul, et comme d'un autre côté, la vitesse serait nulle si la résistance était égale à la pression de la vapeur, il doit y avoir une vitesse intermédiaire qui soit la plus convenable pour faire agir la machine; cette vitesse est la moitié de la plus grande vitesse constante ¹. Maintenant la vitesse qu'acquerrait un corps grave, en tombant de la hauteur de la course du piston est égale à 4,4 fois la racine carrée de cette hauteur en mètres par seconde. Ainsi, la vitesse qui correspond au maximum d'effet, et qui doit être le quart de cette vitesse, est 1,1 fois la racine carrée de la longueur de la course en mètres par seconde, ou 66 fois cette racine carrée en mètres par minute ².

¹ Soit V la plus grande vitesse constante, m la force qui la produit; w la masse de matière par laquelle le mouvement est rendu uniforme, et v une autre vitesse quelconque. Dans ce cas, l'action effective est $mv - wv$; et puisque $mv = Vw$, nous aurons pour la partie qui doit être rendue la plus grande possible,

$$\frac{mVv - mv^2}{v}$$

Prenant la différentielle de cette fonction de v , et l'égalant à zéro, il vient

$$V = 2v.$$

² On sent que cette conclusion doit être aussi contestable que le principe de l'article précédent, qui lui sert de base; elle est de plus appuyée sur une hypothèse non moins erronée, c'est que la vitesse correspondante au *maximum* est égale à la moitié de la vitesse extrême. Si ce nouveau principe était exact, il s'en suivrait que dans les moteurs par pression, comme les roues à augets, par exemple, la vitesse du *maximum* d'effet serait la moitié de celle due à la hauteur de la chute. Or, la théorie s'accorde avec l'expérience pour prouver, au contraire, que

334. Ainsi, pour les machines régularisées par un volant, si la pression sur le piston est constante pendant toute la durée de la course, la meilleure vitesse du piston est, en mètres par minute, 66 fois la racine carrée de la longueur de la course en mètres.

Si donc la course du piston est de 0,81 mètres, la racine carrée de 0,81 étant 0,9, la vitesse sera $0,9 \times 66 = 59^m,4$ par minute. Mais l'action des soupapes ne permettant pas cette perfection, c'est-à-dire l'introduction continue de la vapeur pendant toute la course, presque toutes les machines rentrent dans le cas suivant.

335. Si la vapeur agit par expansion, la vitesse devra être moindre, parce que la pression sur le piston sera variable, et le mouvement uniforme que la vapeur déterminerait serait plus lent.

336. Dans une machine où la vapeur agit par expansion, la quantité de vapeur fournie étant la partie $\frac{1}{n}$ de la course du piston, on trouvera la vitesse la plus convenable pour le piston en multipliant la fraction $\frac{1}{n}$ de la longueur de la course par 0,7

le plus grand effet a lieu lorsque la vitesse de la roue est la plus petite possible. Enfin, ce principe, appliqué rigoureusement à l'action de la vapeur, devrait conduire à donner aux pistons une vitesse égale à

$$\frac{1}{2} V = \frac{1}{2} \times 405 \sqrt{n},$$

ce qui est évidemment inadmissible.

Il est clair, au contraire, que, pour tous les moteurs par pression, le *maximum* d'effet correspond à la plus petite vitesse, puisque la perte d'effet utile est égale à la masse du moteur, multipliée par la vitesse qu'il conserve après avoir agi; mais dans les machines à vapeur cette perte est insensible, à cause du peu de masse du moteur: aussi, peut-on, *sous ce rapport*, augmenter sans inconvénient, et presque indéfiniment, la vitesse du piston.

Les mêmes erreurs de raisonnement se trouvent reproduites dans la démonstration de l'article 312 (note); les règles qui en sont déduites pour les machines à élever l'eau ne semblent pas moins hypothétiques.

M.

ajouté à 2,3 fois le logarithme de n ; alors 66 fois la racine carrée du produit sera la vitesse en mètres par minute †.

Exemple. Supposons $n = 4$, et que la longueur de la course du piston soit de 2^m,4. Le logarithme de n est 0,60206; nous avons donc

$$0,60206 \times 2,3 + 0,7 = 2,0847,$$

qui, multiplié par le quart de la longueur, ou 0,6, donne 1,2508. La racine carrée de ce nombre est 1,12, et, en la multipliant par 66, nous trouvons pour la vitesse 7⁴ mètres par minute quand la vapeur est interceptée au quart de la course.

• 357. Dans la construction ordinaire des machines qui ne sont pas destinées à agir par expansion, on suppose $n = \frac{3}{4}$, et alors on trouve pour la vitesse 57 fois la racine carrée de la longueur de la course du piston.

† Nous avons vu (art. 306) que le pouvoir expansif de la vapeur est

$$pb \times \log \text{hyp.} \left(\frac{b+x}{b} \right).$$

En y ajoutant l'effet primitif de la pression uniforme, et retranchant la résistance r provenant du frottement et de la vapeur non condensée, nous aurons, pour la puissance réelle de la vapeur, l'expression

$$pb \left[1 + \log \text{hyp.} \left(\frac{b+x}{b} \right) - r \right].$$

Mais $b+x = l$, la longueur de la course du piston, et $b = \frac{l}{n}$; ainsi l'expression devient

$$\frac{pl}{n} (1 + \log \text{hyp.} n - r).$$

Dans les circonstances ordinaires, on suppose que $r = 0,3$; ainsi l'on aura pour la vitesse en mètres par minute,

$$66 \sqrt{\frac{l}{n}} (0,7 + \log \text{hyp.} n).$$

Quant aux machines agissant par expansion à la pression ordinaire de 5 à 6 hectogrammes environ par centimètre circulaire, sur la soupape de sûreté, la meilleure proportion pour intercepter la vapeur est d'environ la moitié de la course du piston, et alors la règle nous donne pour la vitesse en mètres par minute, 55 fois la racine carrée de la course du piston.

338. Dans les machines à simple effet, régularisées par un volant, on obtiendrait la même relation entre la longueur de la course du piston et la vitesse; mais de telles machines ne peuvent être employées avec avantage pour produire un mouvement continu.

Du maximum d'effet utile dans les machines à élever l'eau.

339. Dans les machines à simple effet à élever l'eau, nous avons à considérer deux parties très-distinctes dans la course du piston : l'ascension, causée par un contre-poids capable d'élever rapidement le piston, sans ajouter matériellement à sa charge dans la descente; et la descente, qui ne saurait être plus lente que ne le comporte le maximum d'effet utile. Dans les deux cas, il y a perte d'une partie considérable de la puissance de la vapeur.

340. Dans l'ascension du piston, il est évident qu'il ne saurait acquérir une vitesse plus grande que celle avec laquelle la vapeur peut le suivre, en exerçant sur lui une pression presque équivalente à la pression atmosphérique. Quand les ouvertures pour la vapeur sont disposées pour la descente, l'ascension est réglée par le passage de la vapeur à travers les mêmes ouvertures; et si tel est le cas, comme cela arrive toujours dans la construction actuelle de ces machines, notre recherche doit être bornée au cas de la descente.

341. A considérer seulement l'effet de la vapeur, la descente du piston serait évidemment déterminée par la condition d'obtenir d'une quantité donnée de vapeur le plus grand effet possible. Mais elle dépend aussi de la résistance de l'eau, qui croît comme le carré de la vitesse, et du décroissement d'effet

de la vapeur en raison simple de l'accroissement de la vitesse.

342. Nous pouvons maintenant considérer le mouvement comme à peu près uniforme pendant la plus grande partie de la course du piston. Alors, quand la vapeur agit avec toute sa pression pendant la durée entière de la descente ¹, la vitesse en mètres par minute est 54 fois la racine carrée de la longueur de la course du piston ².

343. Quand la vapeur agit par expansion, la vitesse peut se déduire de celle d'une machine à expansion régularisée par un

¹ Supposons les bras du balancier d'égale longueur; les ouvertures pour la vapeur étant les mêmes, l'ascension et la descente du piston auront lieu dans des temps égaux. La plus grande vitesse possible V sera engendrée quand la résistance à l'eau dans les pompes sera égale au contre-poids; et comme les forces sont égales dans l'une et dans l'autre direction, si m est la force qui produit le mouvement, $\frac{1}{2} m =$ la résistance à la vitesse V. La résistance au mouvement dans les tuyaux étant en raison du carré de la vitesse, aura pour expression, à la vitesse v, $\frac{mv^2}{2V^2}$.

Ainsi, le pouvoir effectif, qu'il faut rendre le plus grand, s'exprime par

$$mv - \frac{mv^3}{V^2}.$$

Le *maximum* aura lieu quand la fonction dérivée de cette expression sera nulle: ainsi, on aura pour la déterminer l'équation $V^2 - 3v^2 = 0$, qui donne

$$v = 0,577 V.$$

Pour déterminer V, remarquons que le mouvement commence avec un excès de puissance qui diminue graduellement par l'accroissement de la résistance, jusqu'à ce que la vitesse devienne constante; que l'aire des ouvertures des soupapes est seulement la moitié de l'aire de la pompe, et que la masse de matière mue est

double de l'excès de la force mouvante: donc $V = 4,4 \sqrt{\frac{l}{23}}$, et puisque $v = 0,577 V$, on aura

$$v = 0,90 \sqrt{l}$$

pour la vitesse en mètres par seconde. La vitesse par minute sera donc

$$60 \times 0,90 \sqrt{l} = 54 \sqrt{l}.$$

² Voyez la note 2^e de l'article 333, où cette règle est contredite.

volant (art. 336 à 338), en prenant les 0,8 de celle-ci pour la machine à élever l'eau.

Ainsi, en supposant la course du piston de 2^m,4, et la quantité de vapeur fournie le quart de la course, nous avons trouvé (art. 336) que la vitesse devait être de 74 mètres par minute; multipliant ce nombre par 0,8, nous aurons 59,2 pour la vitesse convenable dans la machine à élever l'eau.

Je n'ai pas cherché, dans les raisonnements précédents, à prendre en considération toutes ces particularités minutieuses qui embarrassent le calcul, sans produire aucun effet sensible sur le résultat.

Des proportions des pompes à air et des condenseurs pour les machines à vapeur.

344. L'eau employée pour la production de la vapeur, et pour sa condensation, contient une grande quantité d'air, et quelquefois d'acide carbonique et d'autres gaz. Ces gaz se dégagent quand l'eau entre en ébullition, et s'élèvent avec la vapeur, d'où il résulte que si l'on ne prenait pas quelque moyen pour enlever l'air quand la vapeur est condensée, le cylindre d'une machine à vapeur se remplirait bientôt d'air chaud de façon à gêner, et enfin à contre-balancer la pression de la vapeur.

345. Pour évaluer les dimensions propres à une pompe à air, il faut donc connaître d'abord la quantité d'air ou d'autres gaz contenue dans l'eau.

Quelques expériences ont été faites sur ce sujet par Dalton ¹, par le docteur Henry, par M. de Saussure, et par le docteur Ure. M. de Saussure ² établit que l'ébullition ne suffit pas pour purger entièrement d'air les liquides, mais que cela peut avoir lieu par l'action combinée de la chaleur et de la machine pneumatique. Dans une machine à vapeur, ces deux causes agissent pour séparer l'air de l'eau introduite dans la machine. Suivant les expé-

¹ *Magasin Philosophique*, vol. XXIV.

² *Annals of Philosophy*, 1815, vol. VI, p. 329.

riences, 100 volumes d'eau absorbent environ 5 volumes d'air atmosphérique.

Dans une expérience faite par le docteur Henry ¹ sur l'eau de source, il a trouvé qu'on en séparait par l'ébullition 4,74 pour 100 de matière gazeuse, dont 3,38 pour 100 était de l'air atmosphérique, et le reste de l'acide carbonique. Mais comme il est probable que cette eau était complètement saturée, il résulte des remarques de M. de Saussure qu'on aurait obtenu une plus grande proportion de gaz si l'on eût joint à l'action de la chaleur celle de la machine pneumatique, et la quantité totale de matière gazeuse contenue dans l'eau de source ne paraît pas pouvoir être estimée à moins de 7 pour 100.

Les expériences du docteur Ure ² furent faites pareillement en soumettant à l'ébullition différentes espèces d'eau, et mesurant les résultats à l'aide de la cuve pneumatique. Voici les proportions de matières gazeuses qu'il a trouvées dans 100 volumes d'eau, à la température d'environ 13° centésimaux :

Eau de canal (en hiver)	2,67
Eau de rivière filtrée, fournie à la ville de Glasgow par les tuyaux de la compagnie Cranstonhill.	2,52
Eau de rivière filtrée, des tuyaux de la compagnie des eaux de Glasgow	2,50
Eau de la rivière de Clyde, quand elle est grossie par les pluies d'hiver	2,80.

On ne peut pas supposer que dans ces expériences la totalité des matières gazeuses contenues dans l'eau ait été obtenue ; mais en supposant que l'ébullition en ait séparé les deux tiers, la quantité totale varie de 3,75 à 4,2 pour 100. C'est pourquoi nous pouvons assurer que l'eau de canal ou de rivière contient 5 pour 100 d'air ou d'autres gaz, c'est-à-dire le vingtième de son volume.

L'action d'élever l'eau par les pompes paraît, d'après les

¹ *Chimie de Thomson*, vol. III, p. 204.

² *Quarterly Journal of Science*, vol. XXI, p. 71.

recherches du docteur Ure, chasser du liquide une portion d'air.

346. L'article précédent nous fournit des données suffisamment exactes pour l'objet de nos recherches, et nous pouvons supposer qu'à une pression et à une température moyennes, l'eau de rivière ou de canal contient $\frac{1}{30}$ de son volume de matière gazeuse, et l'eau de source ou de puits $\frac{1}{4}$.

347. La quantité d'eau qui entre dans une machine à vapeur y dégagera à peu près la totalité de l'air qu'elle contient. Ainsi, en calculant le volume d'eau employé pour produire la vapeur à chaque coup de piston, et y ajoutant celui de l'eau employée pour l'injection dans le même temps, on aura, en prenant le vingtième, la quantité d'air introduite à 15°. Mais dans le condenseur, cet air sera à la température d'environ 50°, et, calculant par la formule de l'article 119 la dilatation que l'air éprouvera par cet accroissement de température, on trouve que le volume de l'air est 5,6 pour 100, ou environ le $\frac{1}{18}$ de celui de l'eau.

348. Supposons que l'eau d'injection ajoutée à l'eau de la vapeur condensée soit, à chaque coup de piston, $\frac{1}{50}$ du volume du cylindre, alors un volume d'air égale à $\frac{1}{18}$ de $\frac{1}{50}$, ou à $\frac{1}{900}$ du volume du cylindre, s'accumulera à chaque coup, s'il n'est pas enlevé à mesure par une pompe à air. Maintenant un mètre cube d'air se mêle avec un mètre cube de vapeur, quand les deux fluides ont la même force et la même température (art. 122). Ainsi, cet air doit s'accumuler et remplir la moitié de la capacité du condenseur, après un petit nombre de coups : la capacité de la pompe à air doit donc être telle qu'elle enlève, à chaque coup, $\frac{1}{900}$ d'air et $\frac{1}{900}$ de vapeur, en tout $\frac{1}{450}$, en supposant que l'air soit d'une densité telle, que sa force élastique soit égale à celle de la vapeur à la température du condenseur.

349. Si l'on admet que la force élastique de la vapeur non condensée est égale à 5 centimètres de mercure, et la pompe à air égale au condenseur, alors le volume de l'air et de la vapeur devant être, d'après ce qui vient d'être dit, $\frac{1}{450}$ à la pression de 76 centimètres, et le volume étant en raison inverse de la pression, nous avons $5 : 76 :: \frac{1}{450} : \frac{1}{30}$.

Ainsi la pompe à air doit débarrasser la machine d'une quantité d'air et de vapeur équivalente à $\frac{1}{30}$ du volume du cylindre, et de $\frac{1}{50}$ de son volume d'eau, ce qui fait en tout environ $\frac{7}{150}$ du volume du cylindre, à chaque coup de piston ¹.

350. Dans une machine à double effet, la pompe à air donne seulement un coup à chaque fois que le cylindre se remplit de vapeur; mais puisque le condenseur reçoit une nouvelle quantité pour remplacer celle qui est enlevée par la pompe, il n'y a pas d'expansion. Ainsi, $\frac{1}{150}$ de la capacité du cylindre d'une machine à double effet est la proportion la plus petite pour la pompe à air, afin que la machine puisse travailler de la même manière qu'une machine à simple effet. On suppose dans les deux cas que le condenseur et la pompe à air sont d'une égale capacité, afin de rendre cette proportion applicable, et l'on admet en outre qu'on emploie de l'eau de source.

¹ Soit $\frac{a}{n}$ le volume d'air contenu dans l'eau d'injection et dans la vapeur, t' la température du condenseur, et f' la force correspondante de la vapeur, f étant la force dans le cylindre; alors a est le volume d'eau pour chaque coup, et celui de l'air est

$$\frac{fa}{fn} \left(\frac{273 + t'}{288} \right).$$

Le condenseur doit pouvoir contenir ces quantités, et, de plus, ce que laisse la pompe à air. Allouant moitié pour les fuites et pour l'imperfection du jeu des soupapes, la capacité du condenseur doit évidemment être au moins égale à

$$\frac{3fa}{fn} \left(\frac{273 + t'}{288} \right) + 2a = 3a \left[\frac{f}{fn} \left(\frac{273 + t'}{288} \right) + 0,67 \right].$$

Quand la pompe s'élève, l'air sera saturé de vapeur, et prendra un volume double; en conséquence, si la pompe et le condenseur le contiennent en cet état, ils seront de dimensions égales, et chaque coup de pompe enlèvera la quantité requise. Supposons $t' = 38$, $f' = 5$ centimètres, et $f = 76$, nous avons, pour la capacité de la pompe à air ou du condenseur,

$$3a \left(\frac{16,4}{n} + 0,67 \right).$$

Si $n = 20$, comme dans l'eau de rivière, alors le volume de la pompe doit être $4,47a$. Si $n = 14$, comme l'eau de puits ou de fontaine, il doit être $5,73a$.

351. Pour l'eau de puits, le même calcul donne environ un douzième pour le rapport entre le volume de la pompe à air et celui du cylindre. La proportion ordinaire dans la pratique de Boulton et de Watt est un huitième; et comme je ne tiens compte ni des fuites ni de l'action imparfaite des soupapes, cette proportion paraît être à peu près correcte pour le cas considéré ¹.

352. Il y a une chose très-évidente dans cette opération; c'est qu'une pompe à air d'un volume moitié moindre serait aussi efficace que la construction actuelle, si l'on pouvait condenser dans la pompe elle-même, ce que je ne vois point de difficulté à faire, comme je me propose de le montrer (art. 400) pour une simple machine atmosphérique. L'avantage, quoi qu'il en soit, sera mieux senti, si nous évaluons la puissance qu'exige le jeu d'une pompe à air.

*De la puissance nécessaire pour le jeu de la pompe à air
d'une machine à vapeur.*

353. Soient v la vitesse en mètres par seconde; p' , la force de la vapeur en kilogrammes par centimètre circulaire; r , le frottement du piston et de sa tige et la résistance des soupapes; a , le diamètre de la pompe à air en centimètres; enfin $\frac{a^2}{n}$ l'aire totale des soupapes. La hauteur capable de produire la vitesse nv au passage des soupapes est (art. 136) $nv = 3,6 \sqrt{h}$, et, par conséquent,

$$\frac{n^2 v^2}{13} = h.$$

Dans un mélange d'air et de vapeur, à la force moyenne qui a lieu dans une telle pompe, une hauteur de 92 mètres est équivalente à la pression d'un kilogramme par centimètre circulaire.

¹ Dans quelques cas, les pompes à air pour les machines à double effet ont eu un diamètre $\frac{2}{3}$ de celui du cylindre, et une longueur de moitié, ce qui est indubitablement trop considérable.

Ainsi, la pression en kilogrammes est

$$\frac{n^2 v^2}{13 \times 92} = \frac{n^2 v^2}{1196}$$

Soit l la longueur de la course du piston ; la résistance à la descente du piston sera

$$ra^2 l + \frac{n^2 v^2 a^2 l}{1196} = a^2 l \left(r + \frac{n^2 v^2}{1196} \right).$$

La résistance à l'ascension du piston se trouvera en considérant que le mélange d'air et de vapeur est comprimé jusqu'à ce que sa force élastique surpasse tellement la pression atmosphérique, que le fluide s'échappe à travers la soupape avec la vitesse correspondante au mouvement du piston. On doit ajouter le mouvement du piston et le poids de l'eau ; et la force de la vapeur dans son état d'expansion peut être considérée comme égale à la somme des forces nécessaires pour la déterminer à passer à travers les soupapes.

Par l'article 306, la résistance du mélange d'air et de vapeur est

$$pb = \left(1 + \log \text{hyp.} \frac{b+x}{b} \right).$$

Observant que $b+x = l$, nous avons

$$b = \frac{p'l}{p},$$

et par conséquent la force est

$$lp' \left(1 + \log \text{hyp.} \frac{p}{p'} \right).$$

Quand la pression de l'atmosphère $p = 0,81$ kilogramme par centimètre circulaire, et lorsque la force de la vapeur $p' = 0^k,054$, ou cinq centimètres de mercure, alors l'expression de la force

est

$$lp' \left(1 + \log \text{hyp.} \frac{p}{p'} \right) = 0,2l.$$

La quantité d'eau sera le sixième de la capacité, ou $0,013 l a'$ kilogrammes élevés à un mètre. Ainsi, la force totale nécessaire pour l'ascension du piston sera

$$a'l (0,2 + 0,013 l + r).$$

354. La totalité de la puissance qu'exige le travail de la pompe est donc

$$\frac{a^2 v}{2} \left(0,2 + 0,013 l + \frac{n^2 v^2}{1196} + 2r \right),$$

exprimant le nombre de kilogrammes élevés à un mètre par seconde.

Exemple. Supposons la vitesse de $0^m,54$ par seconde, le diamètre de la pompe de 60 centimètres, la longueur de sa course de $1^m,2$, le frottement de $0^{kil},15$ par centimètre circulaire, et l'aire totale des soupapes la moitié de celle de la pompe. En substituant ces nombres, nous avons

$$\begin{aligned} & \frac{60 \times 60 \times 0,54}{2} \left(0,2 + 0,013 \times 1,2 + \frac{2 \times 2 \times 0,54 \times 0,54}{1196} + 0,3 \right) \\ & = 972 (0,2 + 0,0156 + 0,001 + 0,3); \end{aligned}$$

ce qui donne, tout calcul fait, 502 kilogrammes élevés à un mètre par seconde. Comme 75 kilogrammes élevés à un mètre par seconde représentent la force d'un cheval, le résultat précédent équivaut à la force de $\frac{502}{75}$ ou de $6 \frac{2}{3}$ chevaux. La pompe correspondrait à une machine à double effet de la force d'environ $13 \frac{1}{2}$ chevaux. Ainsi, dans ce cas, la pompe exige le vingtième de la puissance de la machine. Ce serait le dixième si la machine était à simple effet, avec les mêmes dimensions, et la perte équivaudrait à la force de 13 chevaux. Réduire cette perte de moitié par le mode proposé dans l'article 352, est certainement un objet digne d'attention.

355. Il importe de remarquer les circonstances qui contribuent à cette perte de force. La perte est proportionnelle à la capacité de la pompe ; c'est pourquoi la plus petite pompe est la meilleure , pourvu qu'elle suffise à enlever l'air. Le frottement est près des trois-cinquièmes de la puissance ; la résistance actuelle de la vapeur est à peu près les deux-cinquièmes, et celle de l'eau environ un trente-troisième. La résistance est d'autant plus grande que les passages et les soupapes sont plus petits ; mais un tel accroissement n'affecte pas la puissance d'une manière sensible. L'accroissement du volume de la pompe à air au delà des proportions que j'ai données ne peut être avantageux que dans une machine mal construite et sujette à des fuites ; mais sa diminution au-dessous d'une limite très-rapprochée, réduit considérablement la puissance de la machine.

CINQUIÈME SECTION.

De la construction des machines sans condenseur.

356. Les machines sans condensation, communément appelées *machines à haute pression*, sont mues par la vapeur engendrée sous une pression très-considérable, et c'est l'excès de cette pression sur celle de l'atmosphère qui constitue leur force mouvante. L'excès sur la pression atmosphérique, ordinairement employé en Angleterre, est de deux à trois kilogrammes par centimètre circulaire, ou d'environ trois atmosphères.

357. Les parties actives de la machine consistent en un piston et un cylindre ayant des passages pourvus de robinets ou de soupapes pour l'entrée et la sortie de la vapeur, soit au sommet, soit dans le fond. Le piston joignant exactement les parois du cylindre, se meut d'une extrémité à l'autre par la pression de la vapeur; il est fixé à une tige qui, en glissant à travers une boîte à étoupes au-dessus du cylindre, met en mouvement une manivelle ou autre pièce adaptée à la machine.

358. Supposons que la vapeur dans la chaudière ait une force de deux kilogrammes par centimètre circulaire, que le piston soit au fond du cylindre, que le passage de la chaudière au fond et celui du dehors au sommet soient ouverts, et le reste fermé, la vapeur exercera une pression d'environ deux kilogrammes sur chaque centimètre circulaire de l'aire du piston, et déterminera son ascension. Un peu avant qu'il soit parvenu au sommet, les robinets doivent être fermés, et au moment où il atteint le sommet, les deux autres robinets doivent être ouverts. La vapeur qui sort de la chaudière pressera alors le piston de haut en bas, et celle déjà introduite s'échappera dans l'atmosphère. Les passages doivent encore être fermés un peu avant la fin de la course du piston, et ainsi de suite, l'opération pouvant se continuer indéfiniment.

359. La fermeture des robinets avant la fin de la course du piston prévient, soit les chocs contre les fonds du cylindre, soit l'excès de pression contre l'arbre de la manivelle; et quand l'élasticité de la vapeur convenablement dirigée a détruit le moment d'inertie du piston, elle le repousse en arrière sans perte de force.

Ceci donnera au lecteur une notion générale de l'action de la vapeur dans les machines sans condensation, et le préparera à entrer dans des détails particuliers de leur structure. J'ai divisé ces machines en deux genres, dont il y a d'innombrables variétés, suivant les formes de construction.

360. Les machines sans condensation agissent, par

- | | | |
|--|---|--|
| 1. La force primitive de la vapeur. | { | Leupold (art. 12), 1720.
Watt (art. 26), 1769.
Trevithick (art. 56), 1802.
Olivier Évans (art. 58). |
| 2. La force primitive et la force expansive. . . | { | Évans (art. 53).
Taylor et Martineau. |

361. *Première espèce.* Quand la puissance de la machine provient seulement de la production de la vapeur sous une certaine pression, la construction des parties qui la composent est très-simple. La construction ordinaire est représentée dans la figure 1, planche VI. Dans le but de perdre aussi peu de chaleur que possible par le refroidissement du cylindre, celui-ci est généralement placé en partie dans la chaudière, et la vapeur entre et sort par un robinet A, posé tout près et en dehors de la chaudière, avec une soupape à gorge V pour régler l'entrée de la vapeur venant de S. Celle-ci s'échappe dans l'atmosphère par un tuyau E, qui est généralement entouré d'eau en W, pour l'alimentation de la chaudière; ce qui a l'effet de condenser partiellement la vapeur, et de faciliter sa sortie du cylindre, aussi bien que d'élever la température de l'eau avant qu'elle soit admise dans la chaudière.

362. Cette construction est défectueuse, en ce qu'il doit y avoir une perte absolue de la vapeur dans les parties Ab, At,

des tuyaux d'entrée qui sont situées entre le robinet et le cylindre ; la grande densité de la vapeur à haute pression rend cette perte de force considérable. Pour l'éviter, on devrait employer deux robinets simples, l'un au bas et l'autre au haut du cylindre ; ou bien, les passages peuvent être ouverts et fermés par un tiroir, comme on le voit dans la figure 2 ; il est évident que par ces dispositions les espaces entre les robinets et le cylindre sont rendus aussi petits que possible.

363. Si nous décrivons maintenant l'action de la vapeur, et l'ouverture des passages, nous verrons quels sont les points à considérer pour perfectionner le jeu de la machine. La figure 1 (planche VI) représente une machine, dont C est le cylindre, et P le piston arrivé au sommet et prêt à descendre. Le mouvement du robinet A pourrait finir quand la course du piston est terminée, mais la vapeur serait interceptée, et tous les passages même seraient fermés quand le robinet serait à demi tourné. La fermeture, quand elle est promptement effectuée, commence assez tôt avant la fin de la course pour opérer le recul du piston, et (art. 359) à l'instant de son changement de mouvement, la vapeur agit pleinement sur lui. La compression qu'éprouve la vapeur laissée dans le cylindre, quand le robinet est fermé, n'est pas seulement un moyen de changer le mouvement sans perte de force, mais de plus elle occupe l'espace laissé à la fin de la course, de manière à n'exiger qu'une petite quantité pour le remplir de nouveau de vapeur. Le mouvement pourrait être disposé de telle sorte que les robinets fussent à demi tournés, et tous les passages fermés, juste à la fin de la course du piston ; mais il est préférable que le robinet tourne avec vivacité, car autrement il n'y aurait pas d'accumulation sensible de vapeur pour repousser le piston, et la force de la vapeur dans la chaudière ne commencerait à agir complètement que lorsqu'une partie de la course serait effectuée, de sorte que les pertes à la fin de la course seraient plus grandes. Ainsi, la meilleure méthode est de faire en sorte que le mouvement du robinet se termine quand la course du piston s'achève.

364. Dans la construction représentée (figure 1), à chaque

double course, il y a perte de force de toute la vapeur contenue dans les passages entre le robinet et le cylindre. On peut éviter ce défaut par l'usage d'un tiroir (fig. 2 et 3). Le mouvement du tiroir se terminerait avec la course du piston, comme lorsqu'on se sert du robinet, et dans cette construction la réaction de la vapeur comprimée serait plus grande, vu qu'elle aurait moins d'espace pour se loger. Les mêmes avantages peuvent être obtenus par des soupapes convenablement placées, mais, dans mon opinion, les tiroirs et les robinets sont mieux adaptés aux machines à haute pression.

365. Les modes de communication du mouvement aux robinets, aux tiroirs et aux soupapes sont très-variés; ils dépendent principalement de la nature de l'action à laquelle est destinée la machine. Les mêmes moyens sont applicables à toutes les espèces de machines, c'est pourquoi je les ai décrits simultanément dans la septième section. L'action de la vapeur est ordinairement régularisée par une soupape à gorge, mais plus parfaitement au moyen d'une soupape de Field, art. 517 (*Voyez* la huitième section).

366. *Proportions des parties.* La longueur de la course du piston ne doit pas être, s'il est possible, moindre que le double de son diamètre, d'après ce que nous avons vu dans l'article 327. La vitesse en mètres par minute doit être 57 fois la racine carrée de la longueur de la course en mètres (art. 337); et quant à l'aire des passages pour la vapeur, elle doit être à celle du cylindre dans le même rapport que la vitesse ainsi trouvée est à 732 (art. 154). La force, les proportions et la construction des parties sont données en détail dans la septième section, et les méthodes de régularisation dans la huitième.

367. *La puissance d'une machine sans condensation* peut être calculée avec une grande exactitude, lorsqu'on connaît l'excès de la force élastique de la vapeur dans la chaudière sur la pression atmosphérique, tel qu'il est indiqué par le manomètre, et qu'on connaît le diamètre du cylindre, et la vitesse du piston. La pression exercée sur le piston est moindre que la force de la vapeur dans la chaudière, dans les proportions

indiquées par la table suivante, où cette force est prise pour unité.

Cette diminution est causée :

1° Par la force nécessaire pour l'introduction de la vapeur dans le cylindre (art. 154)	0,007
2° Par le refroidissement dans le cylindre et les tuyaux (art. 158)	0,016
3° Par le frottement du piston et les fuites ou pertes.	0,200
4° Par la force nécessaire pour chasser la vapeur dans l'atmosphère (art. 154)	0,007
5° Par la force perdue dans l'ouverture des soupapes et le frottement des parties de la machine.	0,062
6° Par suite de ce que la vapeur est interceptée avant la fin de la course (art. 363)	0,100
	0,392,

ce qui revient à très-peu près à 0,4. Ainsi, la pression effective est les 0,6 de la force de la vapeur dans la chaudière, diminuée de la pression atmosphérique ; d'où l'on déduit la règle suivante pour calculer la puissance d'une machine de cette espèce.

368. *RÈGLE pour les machines sans condensation fonctionnant à pression constante.* Multipliez les six-dixièmes de l'excès de la force de la vapeur dans la chaudière sur la pression atmosphérique, moins les quatre-dixièmes de cette pression exprimés en kilogrammes par centimètre circulaire, par le carré du diamètre du cylindre en centimètres, et par la vitesse du piston en mètres par minute. Le produit donne la force de la machine en kilogrammes élevés à un mètre par minute ¹.

¹ Soient d le diamètre du cylindre en centimètres, v la vitesse du piston en mètres par minute, et f la force de la vapeur dans la chaudière en centimètres de mercure ; alors l'expression de la puissance en kilogrammes élevés à un mètre par seconde sera

$$\frac{0,6f - 76}{9,5} \times vd^2.$$

Pour évaluer cette force en chevaux, il faut diviser le produit par 4500. Exemple : supposons le diamètre du cylindre de 28 centimètres, la longueur de la course du piston de 0^m,75, le nombre de coups par minute de 33, et la force de la vapeur dans la chaudière de 1^{kl},7 par centimètre circulaire au-dessus de la pression atmosphérique. Dans ce cas, la vitesse du piston est $2 \times 0,75 \times 33 = 49^m,5$ par minute; et par conséquent la valeur de la puissance de la machine, en kilogrammes élevés à un mètre par minute, est

$$(1,7 \times 0,6 - 0,81 \times 0,4) \times 784 \div 49,5 = 27011,$$

ce qui équivaut à $\frac{27011}{4500} = 6$ chevaux, à très-peu près.

369. Si l'on multiplie l'aire du cylindre en mètres carrés par la vitesse de la machine en mètres par minute, on aura le volume de la vapeur consommée quand elle est de même densité que celle de la chaudière. En divisant ce produit par le volume de vapeur que forme un mètre cube d'eau à la température et à la pression de la chaudière (*voyez* l'art. 121, ou les tables de la fin du volume), le résultat donnera le nombre de mètres cubes d'eau consommés par la machine dans une minute, quand la quantité d'eau, et conséquemment la quantité de combustible (art. 190), seront connues; mais la quantité d'eau devra être fournie un peu en excès.

370. Les objets auxquels on a appliqué les machines sans condensation, de cette espèce, sont les voitures à vapeur, l'extraction des matériaux des mines profondes, et leur épuisement dans les lieux de difficiles accès, le service des moteurs dans les lieux où l'eau ne peut pas être obtenue en quantité suffisante, et enfin divers usages pour lesquels la vapeur à basse pression était aussi applicable; mais, pour la plupart de ces objets, ce genre de machines est inférieur à celui qui nous reste à considérer: le seul avantage qui lui soit propre est l'uniformité de la force mouvante à chaque instant de la course du piston, circonstance qui, dans quelques cas, est désirable, et dans d'autres nuisible.

Des machines sans condensation agissant par expansion.

371. *Seconde espèce.* La seule modification nécessaire dans une machine sans condensation, pour nous permettre d'utiliser la force expansive de la vapeur, a lieu dans la disposition pour ouvrir et fermer les passages de la vapeur. La vapeur doit arriver de la chaudière seulement pendant une partie de course du piston, et alors la communication doit être interceptée, tandis que le passage pour la sortie de la vapeur doit rester ouvert pendant tout le temps de la course. Quand le passage de la chaudière est fermé, la vapeur agit par expansion, et la puissance qui en résulte s'ajoute entièrement à celle obtenue dans les machines de l'espèce précédente, d'où résulte l'économie que présente ce système.

372. La question la plus importante consiste à déterminer à quel point de la longueur de la course du piston la vapeur doit être interceptée, afin d'obtenir d'une quantité donnée de vapeur le plus grand effet utile possible; car alors une quantité donnée de combustible produit le *maximum* d'effet. Nous avons vu que la résistance provenant du frottement et de diverses autres causes est, sinon exactement, du moins à très-peu près, 0,4 de la force totale de la vapeur dans la chaudière (art. 367). Il est évident que quand la vapeur est dilatée au point que son excès de force devient égal à cette résistance, l'expansion ne peut plus produire d'effet, et que si l'expansion excède cette limite, il doit y avoir une perte certaine de force. Si donc on prend pour unité le volume du cylindre, la force de la vapeur étant en raison inverse de l'espace qu'elle occupe, on aura la proportion: comme la force totale de la vapeur dans la chaudière est à 1, ainsi la force totale sur le piston, quand elle est exactement égale au frottement, est à la portion de la course au point où la vapeur est interceptée¹. Par exemple, supposons la force totale de la vapeur

¹ Soient f la force dans la chaudière en centimètres de mercure, et $\frac{1}{n}$ la partie de la course du piston qui a été parcourue avant la fermeture de la vapeur; alors

dans la chaudière de 304 centimètres de mercure, la pression atmosphérique étant de 76; la résistance est $304 \times 0,4 = 121$ = le nombre de centimètres équivalent au frottement, et $76 + 121 = 197$ est la force totale sur le piston; conséquemment on a la proportion

$$304 : 197 :: 1 : 0,65 = \frac{1}{1,54}.$$

Le 4^e terme exprime la portion de la course que le piston doit avoir parcourue avant que la vapeur soit interceptée, lorsque la pression dans la chaudière est de 304 centimètres, ou qu'elle est de 228 centimètres au-dessus de la pression atmosphérique¹.

373. L'excès de force dans la chaudière doit être d'environ les quatre-dixièmes de la pression atmosphérique, ou de 30 centimètres de mercure, pour que le mouvement puisse avoir lieu avec la vitesse convenable; mais le frottement absolu étant seulement la moitié de cette force, la machine peut commencer à se mouvoir avec un excès de pression d'environ 15 centimètres.

374. La manière la plus commune d'intercepter la communication entre le cylindre et la chaudière, au point convenable de la course du piston, est de donner au régulateur à coulisse deux mouvements: le premier intercepte la vapeur, et le second la laisse entrer à l'extrémité opposée, en ouvrant la première à l'atmosphère. Cette construction est représentée planche VI, fig. 4,

l'expansion est

$$n = \frac{f}{0,4f + 76}.$$

¹ L'auteur ne tient pas compte ici de l'abaissement de température occasionné par l'expansion de la vapeur; ce refroidissement donne lieu cependant à une perte d'effet plus considérable que plusieurs des causes qu'il a précédemment calculées (art. 367), et il en résulterait qu'il faudrait prolonger l'introduction de la vapeur pendant une plus grande partie de la course.

Il semblerait également utile de ne pas pousser l'expansion de la vapeur jusqu'au point où sa tension devient simplement équivalente aux résistances passives, puisque, vers cette limite, le piston n'ayant presque plus d'effet, les portions correspondantes du cylindre sont à peu près perdues, et que, si l'on a calculé trop bas les résistances passives, comme cela arrive souvent, il y a même alors destruction d'effet utile.

M.

où l'on voit la position du régulateur quand la vapeur est interceptée au premier mouvement. Tel est le procédé suivi par MM. Taylor et Martineau; mais ils placent l'axe du cylindre horizontalement, et construisent les pistons, ainsi que le régulateur, d'une manière un peu différente.

Un piston à tige horizontale ne fonctionne jamais bien, et l'excès de dépense occasionné par le bâti de la machine à cylindre vertical est bien rarement plus grave que ce défaut : néanmoins, dans les districts montueux, où les mines sont de difficile accès, un cylindre horizontal a l'avantage de pouvoir être fixé très-aisément ¹.

375. La force d'une machine de ce genre doit être réglée en changeant la durée de l'introduction de la vapeur; cette force peut varier depuis la pression entière et constante pendant toute la course jusqu'à celle obtenue en interceptant la vapeur au point déterminé ci-dessus. Ce qui donnera le plus d'avantage, ce sera d'arrêter l'introduction en un point moyen entre celui qui produit le *maximum* d'effet et celui qui correspond à la plus grande force nécessaire pour le travail; car il y a perte de puissance quand on intercepte la vapeur plus tôt que ne l'indique la règle, surtout lorsqu'on a calculé la véritable valeur du frottement. Quant aux moyens de mettre en mouvement les régulateurs, voyez l'art. 478.

Olivier Évans a fait une tentative grossière pour évaluer l'avantage d'intercepter la vapeur dans les machines à haute pression, et il réclame ce principe comme lui appartenant; mais la machine qu'il décrit n'est pas disposée pour cet effet : il se sert de soupapes pour les passages de la vapeur ². Une objection grave à l'emploi des soupapes au-dessus d'une certaine dimension est la difficulté de les ouvrir.

376. On peut calculer les proportions des parties pour les

¹ Bélidor décrit la disposition d'un piston pour cylindre horizontal, dont la tige se meut sur des rouleaux à frottement (*Architecture hydraulique*, volume II, page 240).

² *Steam Engineer's Guide*, p. 50 et 67. Philadelphie, sans date.

machines à expansion par les mêmes règles que celles données (art. 366) pour les machines à pleine pression, excepté que la vitesse doit être déterminée par la règle de l'art. 336.

377. Pour déterminer la puissance d'une machine sans condenseur travaillant par expansion, il est convenable d'évaluer d'abord la pression moyenne effective qui a lieu sur le piston, afin d'en déduire la puissance.

Supposons que la vapeur soit interceptée à la partie $\frac{1}{n}$ de la course du piston. Ajoutons 1 à 2,3 fois le logarithme tabulaire de n ; divisons la somme par n , et retranchons 0,4 du quotient: en multipliant le reste par la force totale de la vapeur dans la chaudière en kilogrammes par centimètre circulaire, et ôtant 0,81 du produit pour la pression de l'atmosphère, le résultat est la pression moyenne effective de la vapeur sur le piston en kilogrammes par centimètre circulaire ¹.

¹ Faisant $b + x = l$, et $b = \frac{l}{n}$, nous avons pour la pression (art. 306)

$$pb \left(1 + \log \text{hyp.} \frac{b+x}{b} \right) = \frac{pl}{n} (1 + \log \text{hyp.} n).$$

Par conséquent, la puissance d'un cylindre ayant d centimètres de diamètre, et une vitesse de v mètres par minute, est

$$\frac{pv d^2}{n} (1 + \log \text{hyp.} n) - \text{le frottement et la résistance de l'atmosphère.}$$

Ces deux résistances ont pour valeur $0,4pv d^2 + 0,81vd^2$; donc la puissance, évaluée en kilogrammes élevés à un mètre par minute, est

$$vd^2 \left[p \left(\frac{1 + \log \text{hyp.} n}{n} - 0,4 \right) - 0,81 \right].$$

Le logarithme hyperbolique de n est égal à 2,50285 fois son logarithme tabulaire, d'où résulte la règle énoncée dans le texte.

Quand n est fixé par la règle de l'article 372, la formule se réduit à la forme plus simple

$$\frac{vd^2 p}{n} \times \log \text{hyp.} n,$$

et la valeur de n est

$$n = \frac{p}{0,4p + 0,81}.$$

Pour en déduire la puissance, il faut multiplier cette pression par le carré du diamètre du piston en centimètres, et par la vitesse en mètres par minute. Le produit exprime le nombre de kilogrammes élevés à un mètre par minute.

On réduit cette puissance en forces de chevaux en la divisant par 4500.

378. *Exemple.* Supposons que, dans une machine travaillant par expansion, la vapeur soit interceptée aux $\frac{2}{3}$ ou à la partie $\frac{1}{1,5}$ de la course du piston, le cylindre ayant 30 centimètres de diamètre, la vitesse du piston étant de 48 mètres par minute, et la force totale de la vapeur dans la chaudière de 305 centimètres de mercure, ou de 3^{kil},25 par centimètre circulaire.

$$2,3 \times \log 1,5 = 0,405$$

Ajoutant 1, et divisant par 1,5 0,936

Retranchant 0,4, on a 0,536

Multipliant par la pression de la vapeur, ou 3,25

il vient 1,742.

Retranchant 0,81 pour la résistance de l'atmosphère, on a 0,932 pour la moyenne pression effective sur le piston.

Le carré du diamètre est

$$30 \times 30 = 900.$$

Multipliant par la vitesse 48, on a 43200.

Ce produit, multiplié par la pression trouvée 0,932, donne pour la puissance

40262 kilogr. élevés à 1 mètre par minute.

En divisant ce nombre par 4500, on trouve que cette puissance équivaut à 8,95 chevaux.

379. Quand l'introduction de la vapeur s'arrête à la partie $\frac{1}{n}$ de la course du piston, la quantité de mètres cubes de vapeur

consommée par minute s'obtient en multipliant l'aire du cylindre en mètres carrés, par la vitesse en mètres par minute, augmentée d'un dixième, et divisant le produit par n . Si l'on divise ce résultat par le volume qu'occupe 1 mètre cube d'eau réduite en vapeur de la force de celle de la chaudière (*voyez* l'art. 121, ou les tables de la fin de l'ouvrage), le quotient sera la quantité d'eau que la machine exige par minute, d'où l'on déduira la quantité de chaleur équivalente par la règle de l'article 190. La dépense d'eau alimentaire et la puissance vaporisante de la chaudière devraient être n fois cette quantité; alors la machine pourrait travailler, soit à pleine pression, soit par expansion, suivant que l'occasion le demanderait.

580. Dans une machine à expansion, la force mouvante varie depuis la pression totale jusqu'à zéro pendant la durée de la course du piston. Cette variation est désirable dans quelques cas, parce que le mouvement du piston n'est pas autant accéléré vers l'extrémité de sa course. Cela peut être utile pour quelques-uns des objets auxquels on applique la force de la vapeur; et lorsqu'on ne peut se procurer l'eau facilement, cette espèce de machine devient la plus économique.

581. *Machine à expansion à deux cylindres.* Une machine sans condensation peut être construite pour travailler, par expansion, au moyen d'un double cylindre, suivant la méthode de Hornblower (art. 32). Dans la fig. 5, pl. VI, C est le cylindre pour la vapeur non dilatée, et B celui dans lequel elle agit par expansion. La vapeur arrive de la chaudière par l'ouverture S, et passant, par le conduit t , au sommet du petit cylindre, pousse le piston de haut en bas. La vapeur, qui était préalablement dans le cylindre C, sort par l'ouverture b , et, montant par le tuyau e , entre dans le grand cylindre a , et, par sa force expansive, détermine le piston à descendre. La vapeur dilatée sous le piston s'échappe dans l'atmosphère par le passage c , et par l'ouverture d . Lorsque les petits pistons, dans le passage de la vapeur, ont été portés, par les tiges g , h , aux côtés opposés des ouvertures des cylindres, les pressions s'exercent en sens opposé, et la vapeur dilatée s'échappe dans l'atmosphère par le passage a .

et par l'ouverture f . Cette construction, qui permet d'obtenir le mouvement des deux pistons dans le même sens assez facilement, n'est pas très-compiquée; mais on pourrait évidemment parvenir au même but par un seul régulateur, dont les pistons auraient des mouvements contraires, et alors l'axe du mouvement serait placé entre eux.

Nous avons maintenant à considérer l'effet de ce mode d'application de la vapeur.

382. Soient $0,385 f$ la force par centimètre circulaire sur le petit piston, et a son aire, l la longueur de sa course; soient de même ma l'aire du grand piston, et ln la longueur de sa course: alors, à une portion x de la descente du piston dans le petit cylindre, correspondra une portion nx de la descente dans le grand. L'espace primitif occupé par la vapeur étant la , et sa pression étant en raison inverse de son volume, la force élastique de la vapeur, répartie entre les deux pistons, sera déterminée par la proportion

$$(l - x) a + mnax : la :: f : \frac{fl}{l - x + mnx}.$$

Si $0,385 f'$ est la résistance provenant du frottement, de la perte de force, et de la résistance de l'atmosphère, nous aurons pour les forces des deux cylindres

$$0,385fa \left[1 - \frac{l}{l + (mn - 1)x} + \frac{ml}{l + (mn - 1)x} \right] - 0,385maf'.$$

La différentielle de la puissance mécanique est

$$0,385fa \left[dx + (mn - 1)l \frac{dx}{l + (mn - 1)x} \right] - 0,385mna f' dx,$$

dont l'intégrale est, à la limite $x = 0$,

$$0,385fa \left[x + l \log \text{hyp.} \frac{l + (mn - 1)x}{l} \right] - 0,385mna f' x.$$

Quand $x = l$, cette expression devient

$$0,385fal (1 + \log \text{hyp.} mn) - 0,385mna f' l.$$

En simplifiant, on a définitivement, pour la puissance cherchée,

$$0,385 fal \left(1 + \log \text{ hyp. } mn - \frac{mnf'}{f} \right).$$

383. Le rapport entre le volume du grand cylindre et celui du petit dépend de la valeur totale du frottement et de la perte de force. Dans le petit cylindre, la perte doit être la même que dans le cylindre d'une machine travaillant à pleine pression, perte qui paraît, d'après nos recherches, s'élever à 0,4 de la force de la vapeur dans la chaudière (art. 367). Dans le second cylindre, le frottement du piston, le refroidissement et l'excès de force nécessaire pour chasser la vapeur dans l'atmosphère, équivalent ensemble à

$$0,016 + 0,2 + 0,007,$$

c'est-à-dire à 0,223 de la force restante. Ainsi,

$$\overline{0,223} \times 0,6 + 0,4 = 0,5338$$

est la perte totale dans les deux cylindres. Nous avons donc, pour déterminer le volume du grand cylindre, en prenant pour unité celui du petit, la proportion

$$0,5338f + 76 : f :: 1 : mn = \frac{f}{0,5338f + 76}.$$

Si $f = 305$ centimètres, alors

$$\frac{f}{0,5338f + 76} = 1,28.$$

Ainsi, dans ce cas, le volume du grand cylindre doit être 1,28 fois celui du petit. Dans tous les cas, la valeur de mn doit être moindre que celle de n dans la note de l'art. 577. Puisque $0,5338f + 76 = f'$, nous avons, d'après la formule de l'article

précédent, à cause de $mn = \frac{f}{f'}$,

$$0,385 fd^2V \left(1 + \log \text{hyp. } mn - \frac{mnf'}{f} \right)$$

$$= 0,385 fd^2V \times \log \text{hyp. } \frac{f}{0,5338f + 76},$$

pour la puissance de la vapeur, lorsque la vitesse du petit piston est de V mètres par minute, que son diamètre est de d centimètres, et que la force totale de la vapeur dans la chaudière est de f centimètres de mercure.

En conséquence, la puissance est moindre dans une machine à deux cylindres que dans une machine à un cylindre, dans la proportion du logarithme hyperbolique de

$$\frac{f}{0,5338f + 76} \text{ à celui de } \frac{f}{0,4f + 76}.$$

Cette diminution de puissance, jointe à une disposition plus

¹ Cette diminution d'effet serait au reste fort considérable, et quoiqu'elle augmente peu dans les hautes pressions, elle ne saurait être moindre que le rapport

$$\frac{\log \frac{1}{0,4}}{\log \frac{1}{0,5338}} = 1,46.$$

En prenant pour exemple la pression de trois atmosphères, employée ordinairement dans les machines à deux cylindres, on aura $f = 228$ centimètres, et

$$\frac{\log \left(\frac{228}{0,4 \times 228 + 76} \right)}{\log \left(\frac{228}{0,5338 \times 228 + 76} \right)} = 2,176;$$

ainsi l'effet serait réduit à $\frac{1}{2,176}$, ou 0,46 de celui de la machine à un cylindre.

Ce calcul est peut-être exagéré; mais il faut se rappeler qu'il s'agit de machines sans condenseur.

M.

compliquée, rend la machine à double cylindre inférieure, à tous égards, aux machines simples, sauf que la force y est plus uniforme que dans celle-ci.

384. *De la pression la plus convenable pour la vapeur dans les machines sans condensation.* Les circonstances qui déterminent le choix de la pression de la vapeur sont presque entièrement de nature pratique. En considérant la production même de la vapeur, il faudra une plus grande quantité de combustible pour produire la vapeur à forte pression, et l'opération entraînera une plus grande perte de chaleur; ainsi, sous ce rapport, la plus faible pression est la meilleure. Mais, dans les machines sans condensation, la vapeur doit agir en opposition avec la pression de l'atmosphère, et perdre beaucoup de son effet: ainsi, plus sa force élastique excède la pression atmosphérique, plus est grand l'effet d'une quantité donnée de vapeur, en proportion de cette perte. D'un autre côté, quand la force de la vapeur est considérable, il y a beaucoup de déchet par les fuites¹,

¹ La proportion d'accroissement de la perte par les fuites peut être calculée, car elle dépend et de la bonté de la main-d'œuvre et de la force qui tend à disjoindre les parties de la machine. Aujourd'hui, un bon constructeur peut ajuster les parties de manière à ce que, sous la pression d'une atmosphère, il ne puisse pas s'y former une ouverture continue de plus de $\frac{1}{2000}$ de centimètre de largeur. Dès lors, si f est la force de la vapeur en centimètres de mercure, et d le diamètre du cylindre en centimètres, la grandeur du joint formé par la vapeur sera en centimètres carrés,

$$\frac{\pi df}{2000 \times 76} = \frac{5,1416df}{152000}.$$

La vitesse d'écoulement de la vapeur sera

$$5,6 \sqrt{47,5(273 + t)} \text{ en mètres par seconde (art. 156),}$$

ou bien

$$25 \sqrt{273 + t}.$$

En conséquence, la quantité de vapeur perdue par seconde sera

20*

ce qui, avec le surcroît de dépense en combustible, tend à contre-balancer l'avantage de l'augmentation de pression. En considérant ces circonstances, et en outre le danger d'une trop haute pression, il me semble que la vapeur de la force de $\frac{1}{4}$ ou $\frac{1}{5}$ atmosphères est à peu près la plus convenable pour ces machines.

$$\frac{3,1416df\sqrt{275+t}}{6080}$$

Si v est la vitesse du piston en mètres par seconde, la quantité de vapeur nécessaire dans le même temps sera

$$\frac{\pi d^2 v}{4} = 0,7854d^2 v.$$

Ainsi, en la prenant pour unité, la perte due aux fuites sera

$$\frac{3,1416df\sqrt{275+t}}{0,7854d^2 v \times 6080} = \frac{f\sqrt{275+t}}{1520dv}.$$

En supposant $v = 1^m, 2$, $d = 25$ centimètres, $f = 543$ centimètres, et $t = 150^o$, cette formule donne environ un sixième pour la perte de vapeur provenant des fuites autour du piston.

SIXIÈME SECTION.

De la construction des machines à condensation.

385. Le caractère distinctif de cette classe de machines, c'est que la vapeur s'y condense, ou passe à l'état liquide. La force motrice est à très-peu près équivalente à la force de la vapeur dans la chaudière; elle agit, par la différence de volume, à l'état de vapeur et à l'état liquide. Le mode de construction que l'on adopte rend l'effet utile plus ou moins grand; je vais tâcher d'exposer brièvement les principes généraux: je passerai ensuite aux détails particuliers.

386. Les parties essentielles d'une *machine à condensation à simple effet* consistent en un cylindre percé d'une ouverture à sa partie supérieure, pour donner entrée à la vapeur, et d'une autre ouverture à son extrémité inférieure, pour transmettre cette vapeur à un autre cylindre appelé *condenseur*. Ce cylindre condenseur communique par le bas à une pompe à air, et l'un et l'autre sont plongés dans une bache ou réservoir d'eau froide, dont un jet peut jaillir dans le condenseur. Dans le cylindre se meut un piston dont la tige passe dans une boîte à étoupes placée à la partie supérieure du cylindre. Concevons que ce piston soit muni d'une soupape qui s'ouvre lorsqu'il parvient au bas de sa course, et permette ainsi à la vapeur qui se trouve au-dessus de passer au-dessous. Cela posé, que l'on arrête le jet d'eau froide, que l'on remplisse le cylindre et le condenseur de vapeur venant de la chaudière, le contre-poids suspendu à l'autre extrémité du balancier élèvera le piston vers le sommet du cylindre. Si l'on établit la communication entre la chaudière et le cylindre, et que l'on fasse arriver un jet d'eau froide dans le condenseur, presque toute la vapeur qui se trouve dans ce dernier et dans le cylindre au-dessous du piston sera liquéfiée; et la pression de la vapeur au-dessus étant la même que dans la chaudière, pendant

qu'au-dessous cette pression est très-faible, le piston se trouve pressé par des forces très-inégaies, et il devient capable de soulever un poids égal à la différence, et qui se trouverait suspendu à l'autre extrémité du balancier.

Quand le piston arrive vers le bas du cylindre, la communication avec le condenseur se ferme; et la soupape du piston s'ouvre; la vapeur qui se trouve au-dessus passe au-dessous, pendant que le piston s'élève par l'effet du contre-poids: lorsqu'il est arrivé au haut de sa course, sa soupape se ferme, celle du condenseur s'ouvre, le piston recommence le même jeu, et ainsi de suite.

Mais comme on emploie à chaque coup une quantité d'eau assez notable, et que cette eau renferme beaucoup d'air, le condenseur serait bientôt rempli d'eau et d'air, et la machine ne tarderait pas à cesser de marcher: pour remédier à cela, on adapte au condenseur une *pompe à air*, dont le piston, mù par le balancier, donne le même nombre de coups que le piston du grand cylindre, et enlève l'eau et l'air qui se trouvent dans le condenseur.

387. La machine *atmosphérique* à condenseur diffère de celle dont nous venons de parler, en ce que la vapeur entre et sort par les ouvertures placées à la partie inférieure, et que la descente du piston s'opère par la pression atmosphérique qui s'exerce sur sa surface supérieure, ou celle qui est exposée à l'air.

388. Dans les machines atmosphériques construites avant que Watt eût imaginé d'opérer la condensation dans un vase séparé, le jet d'eau froide se faisait à chaque coup dans le cylindre même, ce qui obligeait de réchauffer et de refroidir à chaque fois le cylindre, et entraînait dans une dépense considérable de vapeur et d'eau froide.

L'addition d'un condenseur séparé est le perfectionnement le plus utile de Watt; après celui-là, le plus important est sa machine à double effet. L'économie et l'augmentation de force qui résultent de ces perfectionnements ne peuvent être bien appréciés que par ceux qui connaissent à fond l'emploi des machines; eux seuls peuvent convenablement déterminer le mérite de cette in-

vention, et c'est d'après leur jugement que doit se former définitivement l'opinion du public.

389. La machine à double effet ressemble, dans ses dispositions générales, à la machine à simple effet décrite dans l'article 386; elle en diffère en ce que la chaudière et le condenseur communiquent l'un et l'autre avec le haut et le bas du cylindre. Cette disposition rend inutile le contre-poids, et dispense de faire passer la vapeur de haut en bas à travers le piston : c'est la force de la vapeur qui fait mouvoir successivement le piston dans les deux directions. Comparée avec une machine à simple effet de même dimension, la machine dont nous parlons consomme deux fois autant de vapeur, et produit un effet double dans le même temps.

390. Dans l'une et l'autre de ces deux espèces de machines, la vapeur peut agir par son expansion, soit que la pression s'exerce au moyen de l'air atmosphérique, ou directement par la vapeur. Mais on peut rendre la force plus uniforme en se servant de deux cylindres de grandeur différente. La vapeur agit d'abord avec toute sa force, pendant toute la durée de la course, dans le plus petit des deux cylindres, et se dilate ensuite dans le second, à mesure que le piston marche; en sorte que l'intensité de la pression est variable; mais comme les forces réunies des deux pistons forment la force motrice totale, celle-ci n'est jamais moindre que la pression de la vapeur sur le petit piston. Cette combinaison a été inventée par Hornblower (art. 32). Ces machines à vapeur peuvent être à simple ou à double effet; mais, dans l'un et l'autre cas, elles sont d'une construction assez compliquée.

391. Nous allons maintenant classer ces machines, et indiquer les proportions qui conviennent à chaque cas particulier.

SECONDE CLASSE. — *Machines à vapeur à condensation.*

I. Par condensation.	}	1. Pression atmosphérique.	Newcomen,	1705.	
		2. Pression directe de la vapeur.	{ à simple effet.	Watt,	1769.
				{ à double effet.	Watt,	1782.
II. Par condensation et expansion.	}	1. Pression atmosphérique.			
		2. Pression directe de la vapeur.	{ à simple effet.	Watt,	1782.
			{ à double effet.	Watt,	1782.
			{ à 2 cylindres.	Hornblower,	1781.
III. Par production et condensation.					
IV. Par production, expansion et condensation,	}	à simple effet.	{	Mécaniciens de Cornouailles,	
				sur le système de Watt.	
				Woolf,	1804.
		à double effet.	{	Mécaniciens de Cornouailles,	
				sur le système de Watt.	
				Woolf,	1804.

De la construction des machines agissant par condensation,

392. On distingue deux genres de machines dans lesquelles la vapeur agit seulement par condensation : dans les unes, la force motrice est la pression atmosphérique ; dans les autres, c'est la pression directe de la vapeur. Le premier genre peut se diviser en celles où la condensation s'opère dans le cylindre et celles qui ont un condenseur séparé ; et le deuxième genre, en machines à simple ou à double effet.

Machines atmosphériques.

393. *Machines atmosphériques ordinaires.* Dans les machines atmosphériques, telles qu'elles sont généralement construites, la condensation s'opère dans le cylindre. L'appareil, dans ce cas, consiste en un cylindre C, planche VIII, figure 1, fermé par le bas et ouvert par le haut ; avec un piston et un conduit S, qui sert au passage de la vapeur de la chaudière dans la partie intérieure du cylindre, et qui est muni d'une soupape V ou d'un robinet. Il y a en outre un tuyau DI pour introduire dans le cylindre en I l'eau d'injection qui est destinée à condenser la vapeur : ce tuyau est garni d'un robinet D. Un autre tuyau E

sert de décharge, pour donner issue à l'eau d'injection, et il est garni d'un clapet F, qui en empêche le retour. Enfin, une soupape G est destinée à donner issue à l'air contenu dans l'eau. Le mécanisme pour ouvrir et fermer les soupapes est lié avec le balancier de la machine. On fait arriver constamment un petit filet d'eau sur le piston, pour humecter la garniture et la rendre imperméable à la vapeur.

394. Le jeu de la machine est simple; le balancier est équilibré de telle sorte que lorsqu'on introduit la vapeur sous le piston, par la soupape V, le piston s'élève jusqu'au haut du cylindre; alors la soupape à vapeur se ferme, le robinet d'injection D s'ouvre et fait jaillir un jet d'eau froide en I, qui condense la vapeur et détruit presque entièrement sa force élastique. L'eau de condensation s'échappe par le tuyau E et la soupape F. La pression atmosphérique sur le piston n'étant plus contre-balancée, le force à descendre; lorsqu'il arrive au bas de sa course, il chasse, par la soupape G, l'air qui s'est dégagé de l'eau.

La soupape à vapeur et le robinet d'injection sont mis en mouvement par des espèces de cames ou taquets fixés sur une bielle que le balancier fait mouvoir. La soupape doit se fermer et le robinet d'injection s'ouvrir à l'instant où le piston parvient au haut de sa course, et l'intervalle de la fermeture du robinet d'injection doit être réglé d'après la puissance que la machine doit produire. La soupape à vapeur doit s'ouvrir aussitôt que le piston s'élève.

395. *Proportions des diverses parties.* La longueur du cylindre doit être double du diamètre (art. 329); la vitesse en mètres par minute sera exprimée par 54 fois la racine carrée de la longueur de la course (art. 342). La machine étant supposée employée à élever de l'eau, l'aire des passages de la vapeur s'obtiendra en établissant la proportion : 1464 est à la vitesse en mètres par minute, comme l'aire du cylindre est à l'aire du passage de la vapeur (art. 154). La température de condensation qui donne le plus grand effet utile s'obtiendra par la règle de l'article 166. Si l'on multiplie l'aire du cylindre évaluée en décimètres par la moitié de la vitesse par minute, aussi en décimètres,

et qu'on multiplie ce produit par la somme $1,23 + 0,43$ divisé par le diamètre (art. 163), le résultat, divisé par 1480, donne le nombre de décimètres cubes ou de litres d'eau nécessaire pour la vapeur par minute. Si de 660 on déduit la température de la condensation, et si l'on divise le résultat par la différence entre la température de l'eau froide et celle de la condensation, le quotient indiquera le rapport de la quantité d'eau requise pour l'injection à celle qui est nécessaire pour la formation de la vapeur (art. 284). En général, ce sera douze fois cette quantité; mais il vaut mieux rester au-dessous qu'au-dessus. L'ouverture d'injection doit être telle que la quantité d'eau ci-dessus soit introduite pendant la durée de la descente du piston; et, en conséquence, si l'on veut que l'injection soit suffisamment énergique au commencement, la hauteur du réservoir devra être égale à trois fois celle du cylindre. L'ouverture du jet devra avoir la $\frac{850^e}{34}$ partie de la section du cylindre; et si elle est carrée, son côté sera $\frac{1}{34}$ du diamètre de celui-ci. Le tuyau de conduite aura un diamètre environ quatre fois plus grand que celui du jet.

Moyen de déterminer la force d'une machine atmosphérique.

396. La force motrice est la pression de l'atmosphère, dont il faut déduire les frottements et la résistance qu'oppose la vapeur non condensée.

La force motrice est la pression d'une atmosphère, ou 1,00

Les pertes de force, mesurées en fractions d'atmosphère, proviennent :

1° De la tension de la vapeur non condensée, dont la température est ordinairement d'environ 70°.	0,33	
2° De la force pour chasser cette vapeur, ainsi que l'air du cylindre (art. 154)	0,007	
3° Du frottement du piston (art. 474)	0,050	
<i>A reporter</i>	0,587	1,00

A CONDENSEUR.

298

	<i>Report.</i> . . .	0,387	1,00
4° De la force nécessaire pour ouvrir et fermer les soupapes, élever l'eau d'injection et vaincre le frottement des axes . . .		<u>0,093</u>	<u>0,48</u>

La partie de la pression de l'atmosphère représentant l'effet utile est par conséquent de 0,52
 ou de 0^{kil},54 par centimètre carré, ou 0^{kil},42 par centimètre circulaire.

397. RÈGLE. Pour calculer la force d'une machine atmosphérique, multipliez 0,42 par le carré du diamètre du cylindre exprimé en centimètres, et le produit par la moitié de la vitesse du piston par minute; le produit sera la force effective exprimée en kilogrammes élevés à 1 mètre par minute.

Pour obtenir le nombre de chevaux auxquels équivaut cette force, il suffira de diviser le résultat obtenu par 4500.

Exemple. Soit le diamètre du cylindre de 180 centimètres; supposons de plus que la longueur de la course soit de 2^m,5, et le nombre des coups par minute, de 10. Dans ce cas, la moitié de la vitesse par minute sera de

$$10 \times 2,5 = 25.$$

Par conséquent, le nombre de kilogrammes que la machine pourra élever, par minute, à 1 mètre de hauteur, sera

$$0,42 \times (180)^2 \times 25 = 340200,$$

et la force en chevaux sera

$$\frac{340200}{4500} = 75,6.$$

Cet exemple est pris d'après les dimensions de la machine de *Chase-Water*, construite sur les plans de Smeaton (*Voyez* art. 24). L'estimation qu'il faisait de la puissance de cette machine diffère de celle-ci, surtout parce qu'il employait une unité différente de force, et aussi parce qu'il supposait que la condensation avait

lieu à une température plus basse que 70°. Pour calculer exactement, il faut, dans chaque cas particulier, tenir compte de la diminution de force causée par la vapeur non condensée.

398. La machine peut être réglée en interceptant la vapeur avant que le piston n'achève sa course, et en arrêtant aussi l'injection plus tôt; on trouvera (section VIII) d'autres moyens de régler ce jeu. Lorsque la vapeur est interceptée, elle agit par son expansion, et alors l'effet est produit par une quantité moindre de vapeur. On doit élever du réservoir d'eau chaude l'eau nécessaire pour couvrir le dessus du piston et pour alimenter la chaudière. La quantité d'eau nécessaire pour ce dernier usage étant déterminée en litres par minute, d'après l'article 395, on obtiendra la quantité de combustible en se rapportant à l'article 190, et l'on déterminera la capacité de la chaudière par les articles 225 ou 229. Dans le cas de la machine de *Chase-Water*, on aura

$$\frac{(1^m,8)^2 \times 0,7854 \times 10 \times 2,5}{1480} + \left(1,23 + \frac{0,43}{1,8}\right) = 63,14.$$

La dépense sera donc de 63^{lit},14 par minute, ou 3788^{lit},4 par heure. Comme un kilogramme de houille grasse suffit pour convertir 7^{lit},6 d'eau en vapeur, la quantité de combustible consommée par heure sera de

$$\frac{3788,4}{7,6} = 498^{\text{kg}},5.$$

La dépense par cheval sera donc

$$\frac{498,5}{75,6} = 6^{\text{kg}},6 \text{ par heure.}$$

La chaudière peut être rectangulaire ou cylindrique, et la tension de la vapeur limitée à 0^{kg},07 par centimètre circulaire.

399. Les machines atmosphériques peuvent être employées pour élever l'eau lorsque le charbon est à bas prix; elles sont faciles à construire: le jeu en est très-simple, et exige moins de soins de la part du constructeur que celles où la vapeur agit par la pression seule. Dans de petites dimensions, elles offrent moins

d'avantage; ainsi, lorsque le cylindre n'a pas plus de 6 décimètres de diamètre, la consommation de charbon devient considérable, en proportion de l'effet produit. Cette machine est convenablement employée pour l'épuisement des mines de houille, pour élever les eaux nécessaires au service des villes et aux irrigations, lorsque le combustible n'est pas cher.

Machines atmosphériques avec condenseur séparé.

400. On voit, planche VIII, fig. 2, comment ces machines sont construites. C représente le cylindre; P, son piston. La vapeur arrive de la chaudière par le tuyau S, et s'introduit dans le cylindre en D, après avoir traversé le tiroir à piston B, qui, au besoin, sert à l'intercepter pendant la course. A, pompe à piston plein, destinée à recevoir la vapeur condensée, l'air et l'eau, et à les expulser. L'injection se fait en E, par le robinet I. F est un robinet destiné à la sortie des portions d'air qui peuvent se rassembler sous le piston P quand la machine est en repos. Pour commencer l'opération, le piston B doit être élevé au-dessus de S, et on laisse entrer la vapeur jusqu'à ce que tout l'air soit chassé par la soupape Q. Les pistons du cylindre et de la pompe à air étant au haut de leur course, on fait fermer le tiroir à piston B, et l'on ouvre le robinet d'injection; la condensation se produit; les deux pistons descendent. Pendant ce premier mouvement, le robinet F doit être ouvert; mais il doit ensuite rester fermé. L'injection étant arrêtée, et le piston B étant descendu pour fermer le passage du condenseur, la communication est en même temps rétablie de la chaudière au cylindre; les pistons s'élèvent de nouveau, et l'air et l'eau de condensation sont expulsés par la soupape Q. Le mouvement se continue ensuite par l'ouverture et la fermeture successives du régulateur et du robinet d'injection.

401. On peut régler cette machine en faisant fermer le régulateur B à toute période de l'ascension du piston, et en fermant le robinet I à un temps quelconque de sa descente. Comme l'application de cette machine est bornée à l'élévation de l'eau, la vitesse en mètres par minute doit être égale à 54 fois la racine car-

rée de la longueur de la course (art. 342); la longueur du cylindre sera 2 fois son diamètre; l'aire de l'ouverture servant de passage à la vapeur sera à la section du cylindre comme la vitesse en mètres par minute est à 1464 (art. 154). La pompe à air aura $\frac{1}{4}$ de la capacité du cylindre (art. 349, note); et si l'on fait la course de la pompe à air moitié de celle du piston à vapeur, le diamètre de cette pompe devra être les $\frac{3}{8}$ de celui du cylindre. La quantité de vapeur s'obtient en multipliant l'aire du cylindre, en mètres, par la moitié de la vitesse, aussi en mètres, et en ajoutant $\frac{1}{5}$ pour le refroidissement (art. 161) et les pertes. Le résultat, divisé par 1480, donnera la quantité d'eau par minute nécessaire pour l'entretien de la chaudière, et 24 fois cette quantité sera nécessaire pour l'injection (art. 284). Le diamètre de l'ouverture pour l'injection devra être $\frac{7}{26}$ de celui du cylindre, et le tuyau d'injection $\frac{1}{5}$.

402. *La force de cette machine atmosphérique* sera égale à la différence entre la pression de l'atmosphère sur le piston et les forces retardatrices multipliées par la moitié de la vitesse.

La pression atmosphérique étant.		1,000
les forces retardatrices seront :		
1° La résistance de la vapeur non condensée à la température de 50°.	0,134	
2° La force nécessaire pour la chasser par les conduits (art. 154)	0,007	
3° Les pertes provenant du refroidissement dans le cylindre, etc. (art. 161)	0,067	
4° Le frottement du piston (art. 474)	0,050	
5° La force nécessaire pour ouvrir les soupapes, pour élever l'eau d'injection et surmonter le frottement des axes.	0,100	
6° La force nécessaire pour faire marcher la pompe à air (art. 354).	<u>0,100</u>	
Total des forces retardatrices.		<u>0,458</u>
Partie de la pression atmosphérique qui produit un effet utile.		0,542.

Cela équivaut à une force de $0^{\text{kil}},56$ par centimètre carré de surface, ou $0,43$ par centimètre circulaire. L'excès de pression de la vapeur dans la chaudière est une suffisante compensation pour les autres pertes de force.

403. RÈGLE. Multipliez $0^{\text{kil}},43$ par le carré du diamètre du piston et par la moitié de la vitesse en mètres par minute; le produit exprimera la force effective en kilogrammes élevés à 1 mètre par minute.

En divisant le résultat par 4500, on aura la force de chevaux.

Exemple. Soit le diamètre du cylindre de $0^{\text{m}},80$ et la moitié de la vitesse de 33 mètres par minute, alors on aura

$$0,43 \times (80)^2 \times 33 = 90816;$$

ce qui exprimera le nombre de kilogrammes que la machine élèvera à 1 mètre par minute;

et
$$\frac{90816}{4500} = 20$$

représentera la force en chevaux.

404. On trouve la quantité d'eau nécessaire pour la chaudière comme on l'a indiqué article 401, et celle du combustible comme dans l'article 190. Dans le cas de l'exemple de l'article précédent, nous avons

$$\frac{1,2 \times (0,8)^2 \times 0,7854 \times 33}{1480} = 13^{\text{lit}},1,$$

ou 786 litres par heure.

Divisant par 7,6, le quotient $103^{\text{kil}},4$ exprime la quantité de houille grasse que la machine consommera par heure, et la consommation par force de cheval sera

$$\frac{103,4}{20} = 5^{\text{kil}},17.$$

Pour la proportion de la chaudière, voyez section III; et pour la force du balancier et des autres parties, voyez section VII.

405. Cette espèce de machine atmosphérique est excellente pour élever de l'eau; elle peut être construite sans difficulté par des ouvriers ordinaires, et elle fournit une puissance motrice très-économique pour les établissements hydrauliques, les épui- sements, les irrigations, l'alimentation des canaux, et en général toutes les fois qu'on a besoin d'élever l'eau en grand volume.

Machines à pression directe de la vapeur.

406. *Machine à simple effet de Boulton et Watt.* Les parties principales et la marche des machines à simple effet ayant été décrites (art. 386), nous n'avons plus qu'à parler de leur construction sous le rapport de l'effet. La figure 4, planche VII, représente la coupe du cylindre C, du condenseur B et de la pompe à air A, d'une machine à simple effet, disposée de manière à laisser voir ses diverses parties. La vapeur pénètre de la chaudière dans le cylindre par le tuyau S et la boîte à soupape O, et presse sur le piston P, qui est supposé au moment de la descente; la vapeur qui se trouve sous le piston se rend dans le condenseur, où elle est liquéfiée par le jet d'eau qui jaillit dans son intérieur. Le piston *p* de la pompe descend dans le mélange de vapeur et d'air que celle-ci a reçu du condenseur pendant l'ascension précédente. Quand le piston est arrêté au bas du cylindre, la tige O prend un mouvement, ferme les soupapes *a* et *c*, et ouvre la soupape *b*; le tuyau E met alors en communication le haut et le bas du cylindre. L'action du contre-poids doit être suffisante pour surmonter le frottement et le poids du piston, et pour chasser la vapeur du dessus au-dessous de ce dernier: le contre-poids doit aussi, au moyen de la pompe à air, chasser l'air et l'eau de condensation par la soupape Q. Le moyen que je viens d'indiquer pour placer et faire agir les soupapes par un seul mouvement n'appartient pas à Watt et Boulton, mais c'est une disposition propre à rendre plus prompt le passage de la vapeur du haut en bas du cylindre, en ce que le vide se trouve formé dans le tuyau E: ce mouvement des soupapes est simple et facile à régler. Le système des soupapes de Watt et Boulton est

pareil à celui de la figure 5; mais chacune se meut indépendamment de l'autre, et c'est ce qui doit avoir lieu pour une machine à expansion, à moins que, pour intercepter la vapeur, on ne fasse usage d'une soupape séparée, mue par un régulateur (*Voyez* section VIII). La planche XIV représente l'élévation d'une machine à simple effet de Watt et Boulton, destinée à élever de l'eau.

407. *Proportions des diverses parties.* La longueur du cylindre doit être de deux fois le diamètre (art. 329). La vitesse du piston en mètres par minute doit être 54 fois la racine carrée de la longueur de sa course (art. 342). L'aire ou section du passage de la vapeur devra être égale à celle du cylindre multipliée par la vitesse du piston en mètres par minute, divisée par 1464 (art. 154). La pompe à air doit avoir le huitième de la capacité du cylindre, ou bien la moitié du diamètre et de la longueur de la course (art. 351); le condenseur aura même capacité. La quantité de vapeur s'obtiendra en multipliant l'aire du cylindre en mètres par la moitié de la vitesse aussi en mètres, et ajoutant $\frac{1}{10}$ pour le refroidissement (art. 160) et les pertes; ce volume, divisé par le volume de la vapeur correspondante à la force qu'elle a dans la chaudière (art. 121), donne la quantité d'eau nécessaire par minute; de celle-ci on déduit facilement les dimensions de la chaudière (*Voyez* section III, art. 224 et 227). Pour la pression ordinaire sur la soupape de $0^{\text{kil}}, 18$ par centimètre carré, ou $0^{\text{kil}}, 14$ par centimètre circulaire, le diviseur sera 1450. La quantité d'eau d'injection sera 24 fois celle qui est nécessaire pour la vapeur (art. 284), et le diamètre du tuyau d'injection sera $\frac{1}{36}$ du diamètre du cylindre. Les soupapes de la pompe à air devront être aussi grandes que possible; les soupapes du piston de la pompe à air, les clapets du condenseur ainsi que celui de décharge ne devront pas avoir une surface moindre. Quant aux proportions du balancier et à la force des autres parties, *voyez* section VII, et quant aux moyens de régularisation et de conduite, *voyez* section VIII.

408. On peut estimer la force d'une machine à simple effet de la manière suivante :

La pression utile sur le piston est moindre que la différence entre la force de la vapeur dans la chaudière et la résistance de la vapeur non condensée.

Représentons la force dans la chaudière par	1,000
Il faudra en déduire :	
1° La force qui produit le mouvement de la vapeur dans les conduits pour aller au cylindre (art. 154).	0,007
2° La perte due au refroidissement dans le cylindre (art. 160) et dans les tuyaux (art. 148)	0,038
3° Le frottement du piston et les pertes par les fuites de vapeur (art. 474)	0,050
4° La force nécessaire pour chasser la vapeur dans les conduits hors du cylindre. . .	0,007
5° La force indispensable pour ouvrir et fermer les soupapes, élever l'eau d'injection et vaincre le frottement des axes. . . .	0,100
6° La diminution d'effet due à ce que la vapeur est interceptée avant la fin de la course	0,098
7° La force nécessaire pour mettre en mouvement la pompe à air (art. 354). . . .	<u>0,100</u>
	<u>0,400</u>
	0,600

La pression de la vapeur dans la chaudière est généralement de 90 centimètres de mercure ; celle de la vapeur non condensée (temp. de 50°) est de 0^m,10. Or, $90 \times 0,60 = 54$ centimètres, et $54 - 10 = 44$ cent. ; ainsi la pression utile sur le piston sera 0^{kil},47. Quand la vapeur dans la chaudière a une autre force, la pression utile moyenne se détermine de la même manière.

409. RÈGLE. Multipliez la pression utile moyenne sur le piston par le carré du diamètre en centimètres, et par la moitié de la vitesse en mètres par minute, le produit donnera la force effective de la machine en kilogrammes, élevés à un mètre par minute.

Divisez le résultat par 4500, et vous aurez la force en chevaux.

Exemple. Soit la force de la vapeur dans la chaudière de 90 centimèt. de mercure, le diamètre du cylindre de 1^m,20, et la moitié de la vitesse par minute 43 mètres. La pression de la vapeur étant de 0^{ki},47 par centimèt. circulaire, on aura

$$0,47 \times (120)^2 \times 43 = 291024 \text{ kilogr.}$$

pour le poids élevé à 1 mètre par minute, et pour le nombre de

chevaux $\frac{291024}{4500} = 64\frac{2}{3}$; l'eau nécessaire sera

$$\frac{1,1 \times (1,20)^2 \times 0,7854 \times 43}{1450} = 36^{\text{lit}},9.$$

La consommation d'eau sera donc, par heure, de 2214 lit., et celle du combustible, en vertu de l'article 190, $\frac{2214}{7,6} = 291$ kilog.

de charbon *, ce qui revient à $\frac{291}{64\frac{2}{3}} = 4^{\text{ki}},5$ par heure et par force de cheval.

410. L'application des machines à simple effet est bornée, par la nature de leur action, à élever de l'eau, ou à d'autres travaux compatibles avec l'interruption d'effet au retour du piston; mais elle offre alors de grands avantages. Je regarderais comme un perfectionnement de faire la condensation, comme on l'a dit (art. 400) pour la machine atmosphérique, et que la vapeur pût agir toujours avec plus ou moins d'expansion; toutefois l'effet entier de l'expansion ne peut être obtenu à moins que le jeu de la machine ne soit réglé par une disposition convenable de pression et de contre-poids.

411. *Machine à simple effet agissant par expansion.* Quand une machine de ce genre agit par expansion, il est nécessaire de déterminer le point de la course où la vapeur doit être interceptée. Or, la pression sur le piston ne doit jamais être moindre que la résistance moyenne; autrement, il serait entraîné et la

* Cela équivaut à 4800 mètres cubes d'eau élevés à 1 mètre par heure et par hectolitre de charbon, ou 60000 kilogrammes d'eau par kilogramme de houille.

colonne d'eau redescendrait. Conséquemment on pourra établir cette proportion : la force de la vapeur dans la chaudière est à 1 comme la moitié de la plus grande force effective utile sur le piston, ajoutée à la résistance du frottement, etc., est à la portion de la course à laquelle on doit intercepter la vapeur. Ainsi, si la pression dans la chaudière est de 90 centimèt. de mercure et celle de la vapeur non condensée de 10 centimètres, on aura

$$10 \div \overline{90 \times 0,40} = 46 \text{ centimètres,}$$

pour les pertes de toute espèce (art. 408); d'où l'on tire

$$\frac{90 - 46}{2} \div 46 = 68,$$

pour la pression sur le piston à la fin de sa course; on aura donc

$$90 : 68 :: 1 : 0,75 = \frac{3}{4} \text{ de la course.}$$

La vapeur agira aussi évidemment par expansion pendant la montée, et dans le même rapport; ce qui exigera un contre-poids moins fort.

412. Cherchons la pression moyenne de la vapeur sur le piston, dans les machines à expansion; supposons que la portion de la course parcourue par le piston au moment où l'on intercepte la vapeur soit représentée par $\frac{1}{n}$.

Alors la $n^{\text{ième}}$ partie de la force totale de la vapeur dans la chaudière en kilogrammes par centimètre circulaire, multipliée par 2,3 fois $\log n$ ajouté à 0,3, est la force motrice ou pression moyenne; c'est de cette valeur qu'il faut se servir dans la règle (art. 409), pour trouver la puissance et aussi pour proportionner la charge.

Exemple. Supposons que la vapeur soit interceptée aux $\frac{3}{4}$ de la course; alors $\frac{1}{n} = \frac{3}{4}$, et $n = 1,33$, $\log n = 0,125156$. La pression totale étant de 90 cent. de mercure, ou de 0^{kil},96 par

centimètre circulaire, nous aurons

$$\frac{3 \times 0,96 \times (2,3 \times 0,125156 + 0,3)}{4} = 0,96 \times 0,441 = 0^{\text{kil}},42,$$

par centimètre circulaire pour la pression moyenne.

413. On trouvera la vitesse par la règle (art. 343). La quantité de vapeur sera une partie de celle requise pour faire marcher la machine à pleine pression, et elle sera d'autant plus faible, que la partie de la course à laquelle on intercepte la vapeur sera plus petite par rapport à la course entière; du reste, les quantités d'eau, de combustible, d'eau de condensation, etc., se détermineront par les règles données¹ art. 407. Le contre-poids devra être moindre, dans le même rapport que la pression sur le piston sera moindre que dans les machines ordinaires. La méthode par expansion exigeant l'emploi de machines de plus grandes dimensions, on ne l'apprécie pas autant qu'on le devrait, excepté cependant lorsqu'on augmente la force de la vapeur dans la chaudière, et je recommanderai à cet effet de la porter à 2 atmosphères, mais pas plus haut.

414. *Machine à double effet de Boulton et Watt.* On a déjà dit (art. 389) en quoi une machine à double effet diffère d'une machine à simple effet. La fig. 1, planche VII, représente une machine de cette espèce, dont C est le cylindre; la vapeur entre en S et passe dans la partie supérieure du cylindre en F, ou dans la partie inférieure en D, comme dans la fig. 3. La fig. 1 représente le piston pendant sa descente, et la fig. 3 pendant son ascension. La vapeur sort par l'ouverture D de la partie inférieure du cylindre (fig. 1), et se rend dans le condenseur B, où elle est liquéfiée par un jet d'eau froide qui jaillit sans interruption; les gaz non condensés et l'eau s'écoulent par la soupape G pendant l'ascension, et ils passent pendant la descente, du dessous au-dessus du piston de la pompe à air à travers les soupapes p; ils sont enlevés pendant l'ascension du piston, et chassés, par la

¹ Si l'on prend l'exemple de l'article 409, nous trouvons que 6000 mètres cubes d'eau peuvent être élevés à 1 mètre par hectolitre de charbon, ou environ 75000 kilogrammes par kilogramme de charbon, et je ne pense pas qu'on ait obtenu un meilleur résultat avec une machine à simple effet et à basse pression.

soupape Q, jusque dans le réservoir d'eau chaude K. Quand le piston P monte, la vapeur qui se trouve au-dessus sort par le passage F et se rend au condenseur par le tuyau E. Les ouvertures pour la vapeur, D et F, sont ouvertes et fermées par un tiroir en D, ainsi nommé parce que sa section ressemble à la lettre D; il est mis en mouvement par la tige O, au moyen de taquets, ou de tout autre mécanisme (*Voyez* la section VII, dans laquelle divers moyens sont décrits). Souvent dans les petites machines, les communications de la vapeur s'ouvrent et se ferment au moyen de robinets; dans les grandes, on se sert de soupapes ou de tiroirs, dont les diverses espèces sont décrites dans la section VII, ainsi que les pistons et les autres parties.

415. *Proportions des parties d'une machine à double effet agissant à pression constante ou sans expansion.* Lorsque l'usage auquel on destine la machine le permet, la longueur du cylindre sera le double de son diamètre (art. 329). La vitesse du piston en mètres par minute s'obtiendra en multipliant la racine carrée de la longueur de la course par 57 pour les machines motrices, ou par 54 lorsqu'il s'agira d'élever de l'eau (art. 337 et 342); l'aire des ouvertures de la vapeur sera égale à celle du cylindre multipliée par la vitesse du piston en mètres par minute, et divisée par 1464 (art. 154); la pompe à air sera $\frac{1}{6}$ de la capacité du cylindre, ou bien elle aura un diamètre et une course du piston moitié moindres que le cylindre (art. 351); le condenseur aura même capacité. On trouvera la quantité de vapeur en multipliant l'aire du cylindre en mètres par la vitesse aussi en mètres, et y ajoutant $\frac{1}{10}$ pour le refroidissement et les pertes : ce nombre divisé par le volume de la vapeur correspondante à la pression dans la chaudière (art. 121), donnera la quantité d'eau nécessaire pour la vapeur par minute; d'où l'on déduira les dimensions de la chaudière (*Voyez* sect. III, art. 224 et 227). A la pression ordinaire de 0^{kil},14 par centimètre circulaire sur la soupape, le diviseur sera de 1500; la quantité d'eau d'injection sera 24 fois celle requise pour la vapeur (art. 284), et le diamètre du tuyau d'injection $\frac{1}{36}$ du diamètre du cylindre. Les soupapes du piston de la pompe à air seront aussi grandes que possible; le

clapet de décharge et le clapet du condenseur n'auront pas moins de surface. Pour les dimensions et la force du balancier et des autres parties, *voyez* sect. VII; et pour les moyens de régulariser et de conduire la machine, *voyez* sect. VIII.

Méthode pour déterminer la force d'une machine à double effet.

416. Représentons la force de la vapeur dans la chaudière par	1,000
En mettant de côté la perte provenant de la vapeur non condensée, les autres pertes seront :	
1° La force produisant le mouvement de la vapeur entrant dans le cylindre (art. 154)	0,007
2° Le refroidissement dans le cylindre (article 157) et dans les tuyaux (art. 148)	0,016
3° Le frottement du piston et les fuites (article 474).	0,125
4° La force nécessaire pour expulser la vapeur (art. 154).	0,007
5° La force nécessaire pour ouvrir et fermer les soupapes, élever l'eau d'injection et vaincre le frottement des axes . . .	0,063
6° La perte provenant de ce que la vapeur est interceptée avant la fin de la course	0,100
7° La force nécessaire pour mouvoir la pompe à air (art. 354).	<u>0,050</u>
TOTAL.	<u>0,368</u>
Différence.	632

La force de la vapeur dans la chaudière est généralement de 90 centimètres de mercure; la température de la vapeur non condensée de 50°, et sa force de 10 centimètres; ainsi on a $(90 \times 0,632) - 10 = 47^\circ$ ou 0^{kil},50 par centimètre circulaire pour la pression moyenne effective sur le piston ¹.

¹ Ce qui revient à 0^{kil},63 par centimètre carré.

417. RÈGLE. Multipliez la pression moyenne effective sur le piston par le carré du diamètre du cylindre en centimètres, et le produit par la vitesse en mètres par minute : le résultat sera l'effet utile de la machine, exprimé par le nombre de kilogrammes élevés par minute.

Pour avoir la force exprimée en chevaux, il suffira de diviser par 4500.

Exemple. Le diamètre du cylindre d'une machine à double effet étant de 60 centimètres, la longueur de la course de 1^m,5, le nombre de coups par minute de 22, et la force de la vapeur dans la chaudière de 90 centimètres de mercure ou de 14 centimètres au-dessus de la pression atmosphérique, on demande d'en calculer la force.

La vitesse est $2 \times 1,5 \times 22 = 66$ mètres par minute ou 1^m,1 par seconde, la pression moyenne sur le piston de 0^{kil},5 par centimètre circulaire; le poids élevé à 1 mètre par seconde sera $0,5 \times (60)^2 \times 66 = 118800$ kilogrammes, et $\frac{118800}{4500} = 26,4$ pour le nombre de chevaux. La force nominale de cette machine, d'après la manière de calculer de Watt, ne serait que de 20 chevaux; mais on trouvera que la force nominale et la force réelle s'accordent assez exactement, quand la vapeur agit par expansion (art. 422).

L'eau nécessaire pour cette machine (article 415) sera

$$\frac{1,1 \times (0^m,6)^2 \times 0,7854 \times 66}{1500} = 13^{\text{lit}},7,$$

par minute, ou 822 litres par heure (art. 190); ce qui donne pour la consommation de combustible

$$\frac{822}{7,6} = 108 \text{ kilogrammes de houille,}$$

par heure pour la machine,

$$\text{ou bien, } \frac{108}{26,4} = 4,1 \text{ kilogrammes de houille,}$$

par heure et par force de cheval ¹.

¹ Watt évalue à 5^{kil},95 la consommation de houille par force de cheval, mais sans doute quand la machine agit par expansion (Notes on Robison's *Mechanical Philosophy*, vol. II, p. 145).

Quand la machine est d'une force inférieure à 10 chevaux, la consommation de combustible par force de cheval est plus forte à peu près dans le rapport indiqué (art. 221).

418. Cette machine est applicable à tous les travaux qui conviennent à une machine stationnaire, et c'est seulement dans les cas où il est difficile de se procurer de l'eau que cette machine ne peut être employée. On l'a aussi appliquée dans les derniers temps aux bateaux à vapeur (*Voyez* sect. X). Quand la vapeur agit par expansion, on dépense moins de combustible, et cette économie doit entrer en grande considération dans toute application de la force de la vapeur.

419. *Machine à double effet agissant par expansion.* Le mouvement d'une machine à double effet agissant par expansion doit être régularisé par un volant, ou par tout autre moyen (*voyez* sect. VIII), sans quoi on ne pourrait obtenir l'effet d'une manière parfaite. Pour déterminer l'instant où la vapeur doit être interceptée, nous avons la proportion suivante :

La force totale de la vapeur dans la chaudière est à 1 comme 0,368 fois cette force (*voyez* art. 416), plus la résistance de la vapeur non condensée, est à la portion de la course pendant laquelle la vapeur doit entrer.

Ainsi, si la force dans la chaudière est de 90 centimètres de mercure, et la résistance de la vapeur non condensée de 10 centimètres, nous aurons

$$90 : (\overline{90 \times 0,368} + 10) :: 1 : 0,479 = \frac{1}{2,1}.$$

Ce dernier nombre exprime la portion de la course.

420. Pour trouver la pression moyenne sur le piston dans une machine à expansion, représentons par $\frac{1}{n}$ la partie de la course pendant laquelle la vapeur entre dans le cylindre; il faudra diviser 2,3 fois le logarithme de n par n et multiplier le quotient par la force de la vapeur dans la chaudière par centimètre circulaire; le résultat sera la force motrice moyenne du piston par centimètre circulaire.

Exemple. Supposons que la vapeur soit interceptée à $\frac{1}{2,1}$ de la course, alors

$$n = 2,1 \quad \text{et} \quad \log n = 0,322219;$$

par conséquent,

$$\frac{2,3 \times 0,322219}{2,1} = 0,354;$$

et comme la pression correspondante au point où la vapeur est interceptée est de 90 centimètres ou de $0^{ki},96$ par centimètre circulaire, nous aurons $0^{ki},96 \times 0,354 = 0^{ki},34$ par centimètre circulaire pour la pression moyenne.

421. On trouvera la vitesse comme il a été indiqué à l'art. 336 ou 343, et la quantité de vapeur sera la $n^{ième}$ partie de ce qu'elle est lorsque la machine marche à pleine pression. Ainsi, la quantité d'eau pour la vapeur ou d'eau alimentaire, et celle de combustible et d'eau d'injection, seront diminuées dans le même rapport eu égard aux dimensions du cylindre; mais les ouvertures de la vapeur, les pompes, la chaudière et les autres dimensions se détermineront par les règles posées (art. 415), afin que la machine puisse marcher à pleine pression ou par expansion, selon les circonstances.

422. En prenant les dimensions et la force de la vapeur comme dans la machine donnée en exemple dans l'art. 417, sa force, lorsque la vapeur agit par expansion, serait

$$0,34 \times (60^3) \times 66 = 80784$$

kilogrammes élevés à un mètre par seconde. En divisant par 4500, on trouve $\frac{80784}{4500} = 18$ pour la force de la machine en chevaux.

Lorsque la machine marchait à pleine pression, la consommation en combustible était de 108 kilogrammes par heure; on n'en dépensera dans ce cas-ci que $\frac{108}{2,1} = 51^{ki},4$.

La houille consommée par force de cheval sera de

* Cela équivaut à 7560 mètres cubes d'eau élevés à 1 mètre par hectolitre de houille, ou 94500 kilogrammes par kilogramme de houille.

$$\frac{51,4}{18} = 2^{\text{kit}},85.$$

L'avantage sera donc, dans le rapport de $\frac{2,85}{4,1} = \frac{7}{10}$ ¹. Dans les machines de faible dimension, cette quantité croît suivant le rapport indiqué dans le rapport (art. 221).

423. Le moyen d'intercepter la vapeur en donnant deux mouvements à la soupape à tiroir pendant la course, est indiqué dans la planche VII. La fig. 2 indique la position du tiroir pendant la descente du piston, lorsque la vapeur est interceptée, la communication D au condenseur demeurant ouverte. Les soupapes à tiroir ont l'inconvénient d'exiger une ouverture séparée pour introduire la vapeur, qui doit d'abord chasser l'air de la machine, ou, comme on dit, la purger d'air; mais, sous d'autres rapports, elles paraissent présenter le moyen le plus simple et le plus durable d'ouvrir et de fermer les communications.

Machines à deux cylindres.

424. Dans la machine de Hornblower, à deux cylindres, la vapeur agit dans l'un à pression constante, et dans l'autre par expansion. Comme machine à simple effet, elle est décidément inférieure sous tous les rapports au système de Watt et Boulton, si ce n'est que la force motrice est plus uniforme; elle a en effet de plus le frottement additionnel du petit piston; et c'est un fait singulier qu'une machine à simple effet de cette espèce soit plus compliquée qu'une machine à double effet. Comme l'on en a presque entièrement abandonné l'usage dans les mines, il n'est pas nécessaire de décrire ce système, que l'on concevra facilement en imaginant deux machines à simple effet agissant sur un balancier, et dont l'une fonctionne à pleine pression, l'autre recevant ensuite la vapeur, qui agit alors par expansion dans le se-

¹ Si l'on prend la moyenne entre 2,85 et 4,1, soit 3,48, on obtiendra la consommation ordinaire d'une machine qui éprouve une résistance variable, en la supposant des mieux construites.

cond cylindre pendant le coup suivant. Dans l'un et l'autre cylindre, la vapeur passe, pendant la montée, du dessus au dessous du piston. Le rapport entre la capacité du grand cylindre et celle du petit se détermine par la même règle que pour les machines à double effet de la même espèce (art. 426), et du reste, les proportions seront les mêmes que pour les machines à simple effet.

425. *Machine à double effet et à deux cylindres.* On comprendra très-aisément cette machine en supposant un mode simple d'introduire et de faire sortir la vapeur. Soit C le petit cylindre, planche VIII, fig. 3, et D le grand cylindre, S l'endroit où la vapeur entre dans les conduits. La vapeur pénètre dans le petit cylindre en *a* quand le piston descend, et celle qui est sous le piston suit le passage *b*, et le conduit *c*, entre dans le grand cylindre en *d*, pendant que la vapeur en D passe dans le condenseur par *e*.

Quand le mouvement est renversé par le jeu de la soupape à tiroir qui passe de l'autre côté des passages, alors des mouvements semblables s'opèrent dans la direction inverse, et la vapeur passe par *f* dans le conduit du condenseur. Ainsi l'appareil entier se réduit à une boîte à tiroir, dont la tige reçoit un seul mouvement à chaque course du piston, et quoiqu'on l'ait placée entre les cylindres pour plus de clarté, on peut la placer dans l'angle qu'ils forment l'un avec l'autre lorsqu'ils sont rapprochés.

426. *Proportions des machines à deux cylindres.* Le petit cylindre aura les mêmes dimensions que pour une machine sans condenseur, marchant avec la vapeur de même force élastique (art. 366). La perte de force sera la même, c'est-à-dire d'environ les quatre dixièmes de la pression de la vapeur dans la chaudière.

La perte de force du grand piston, en prenant pour unité la force totale, sera :

1° Pour le refroidissement dans le cylindre et les tuyaux.	0,016
2° Le frottement du piston.	0,125
3° La force nécessaire pour expulser la vapeur dans les passages.	0,007
4° La force nécessaire pour mettre la pompe à air en action.	0,050
	<hr/>
	0,198

Par conséquent, $0,6 \times 0,198 = 0,1188 =$ la portion de la force totale, laquelle ajoutée à la perte dans le petit cylindre, donne une perte totale de $0,1188 + 0,4 = 0,5188$, ou environ 0,52. Maintenant, si f représente la tension de la vapeur dans la chaudière, 10 centimètres celle de la vapeur non condensée, et n le nombre de fois que la capacité du grand cylindre excède celle du petit, nous aurons,

$$n = \frac{f}{0,52 f + 10}$$

Si, par exemple, la force de la vapeur dans la chaudière équivaut à 300 centimètres de mercure, on aura,

$$n = \frac{300}{0,52 \times 300 + 10} = 1,81;$$

c'est-à-dire que la capacité du grand cylindre doit être 1,81 fois celle du petit; si elle était plus grande, il y aurait nécessairement une perte d'effet.

427. On trouve facilement la force d'une machine à deux cylindres à l'aide de ce qui a été dit (art. 382), en substituant des constantes convenables. La règle pour trouver la pression moyenne, en supposant qu'elle soit rapportée en entier au petit piston, sera de multiplier 2,3 par le logarithme ordinaire du nombre de fois que le grand cylindre est plus grand que le petit, et par la force de la vapeur dans la chaudière, par centimètre circulaire. Ainsi la pression étant de 300 centimètres de mercure, la capacité du grand cylindre sera 1,81 fois celle du petit : on

aura donc

$$2,3 \times \log. 1,81 = 0,59;$$

et comme chaque centimètre de mercure équivaut à une pression de $0^{\text{kil}},0107$ par centimètre circulaire, on aura

$$300 \times 0,0107 = 3,21 \text{ kilog. par centim. circul.},$$

et
$$3,21 \times 0,59 = 1^{\text{kil}},90$$

pour la pression moyenne par centimètre circulaire du piston.

428. RÈGLE. La pression moyenne étant trouvée comme ci-dessus, qu'on la multiplie par le carré du diamètre du petit cylindre en centimètres et par la vitesse du petit piston en mètres par minute, le résultat donnera la force de la machine exprimée par le nombre de kilog. élevés à 1 mètre par minute.

Divisez par 4500, vous aurez la force en chevaux.

Exemple. Si la tension de la vapeur est de 300 centimètres de mercure, le diamètre du petit cylindre de $0^{\text{m}},28$ et la vitesse de son piston de 50 mètres par minute, la pression moyenne sera $1^{\text{kil}},90$, et le produit

$$1,90 \times 28^2 \times 50 = 74480$$

exprimera le nombre de kilogrammes élevés à un mètre par minute.

Le nombre de chevaux sera égal à $\frac{74480}{4500} = 16,5$.

429. Le volume de vapeur par minute sera égal à l'aire du petit cylindre en mètres multipliée par la vitesse; et l'on obtiendra la quantité d'eau en divisant par le volume de vapeur donné par un litre d'eau, quand la tension est égale à celle de la chaudière, et ajoutant $\frac{1}{10}$ pour la perte. Dans l'exemple ci-dessus, cette quantité d'eau par minute sera

$$\frac{1,1 \times 0,0616 \times 50}{480} = 0^{\text{kil}},0071 = 7,1 \text{ lit.},$$

ou 426 litres par heure. Divisant ce nombre par 7,6, le quotient $\frac{426}{7,6} = 56$ exprimera le nombre de kilogram. de houille col-

laute dépensés par heure ; et $\frac{56}{16,5} = 3^{\text{kit}},4$ la dépense de combustible par heure et par cheval. Si l'on compare ce résultat avec celui de l'art. 422, on verra qu'il n'y a pas avantage, sous le rapport de l'économie du combustible, à employer deux cylindres au lieu d'un seul.

430. Les effets obtenus par les machines d'espèces différentes viennent d'être réduits pour la première fois à des mesures déterminées, et leurs proportions déduites de principes scientifiques. J'ai cherché dans ces deux sections à fournir des notions utiles aux constructeurs, en me resserrant et me rendant le plus clair qu'il m'a été possible, sans négliger aucun des détails minutieux qui peuvent faire varier les effets des machines par des perfectionnements applicables à leur jeu ou à leur construction. On verra que la somme calculée de ces effets particuliers est très-près de la vérité, et l'on reconnaîtra les circonstances qui font augmenter ou diminuer chacun d'eux, soit immédiatement, soit en se reportant aux articles où le calcul en a été exposé. Le mécanicien qui apportera quelques soins dans la distinction des résultats réels fournis par la pratique d'avec des prétentions empiriques, se convaincra que la théorie et la pratique se donnent la main, l'une ne faisant que confirmer les déductions de l'autre. C'est un principe incontestable, que la pratique doit se proposer d'arriver au but par les moyens les plus économiques possibles ; l'utilité de la science consiste à nous aider dans le choix des moyens, de manière à nous faire arriver à des conclusions exactes, avec le minimum de dépenses en essais ; mais en même temps que l'on a égard à l'économie de force, il faut songer aux formes les mieux appropriées, aux bonnes proportions, à la perfection de la main-d'œuvre, et quelquefois même à la beauté des machines ; car une belle machine produira plus d'effet qu'une inférieure qui périrait faute de soins, puisque les soins d'entretien que l'on est naturellement porté à donner à de beaux ouvrages de ce genre peuvent produire une économie marquée dans les mêmes circonstances où une machine moins belle et sujette à être négligée ne tarderait pas à dépérir promptement.

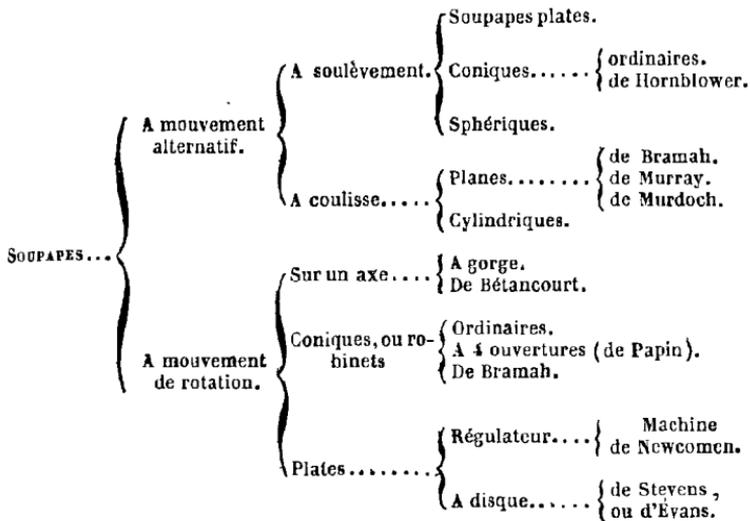
SEPTIÈME SECTION.

Des proportions et de la construction des diverses parties des machines à vapeur.

451. Nous avons jusqu'ici étudié les machines à vapeur dans leur ensemble; mais pour en mieux connaître la nature, il faut en étudier les diverses parties; c'est l'objet de cette section. Quelques-unes de ces parties doivent être considérées seulement sous le rapport de leur force, comme les balanciers, les tiges, les traverses, les arbres, etc.; d'autres, sous le rapport des mouvements qu'elles doivent produire, comme le parallélogramme, les excentriques, etc.; d'autres dépendent de la combinaison des parties mobiles et des soins d'exécution, comme les pistons, les soupapes, etc.; viennent ensuite les moyens de faire les joints, etc. D'après la dépendance qui existe entre ces diverses parties, il me semble convenable d'en parler dans l'ordre suivant : soupapes, pistons, boîtes à étoupes, moyen de manœuvrer les régulateurs, guides des pistons, parallélogrammes, forces des parties (telles que balanciers, manivelles, rayons de roues, tourillons, dents des roues; traverses et bâtis, arbres et pivots; tiges de pistons, bielles, tiges des parallélogrammes; cylindres, tuyaux et chaudières) et assemblage des tuyaux.

Des robinets et des soupapes.

432. Sous le titre de robinets et de soupapes il faut comprendre tous les moyens usités d'ouvrir et de fermer les passages de la vapeur. Il est de quelque utilité, pour discuter leur mérite respectif, de les classer, et le moyen le plus simple semble être le genre de mouvement qui sert à les ouvrir. D'après cette méthode, on peut les présenter dans l'ordre suivant :



433. Le but des soupapes ou des robinets étant d'ouvrir et de fermer les passages de la manière la plus parfaite, soit instantanément, soit progressivement, suivant le but que l'on se propose, il est évident que celles qui offrent le moins d'obstacle au passage de la vapeur et qui s'ouvrent avec le moins d'effort, sont les meilleures. Il convient donc de les examiner successivement dans leur ordre, et de faire connaître leurs usages et leurs qualités respectives.

434. Toutes les espèces de soupapes sont plus difficiles à manœuvrer en proportion que l'ouverture est plus grande. L'aire du passage d'une soupape ouverte doit être un peu plus grande que la moindre section du tuyau; en comparant ces aires, on calculera facilement les proportions des boîtes à soupapes ou des ouvertures par chaque espèce.

435. Quand les soupapes, les robinets ou les tiroirs doivent être mis en mouvement pour introduire la vapeur dans une machine, le jeu doit être aussi vif que possible, en sorte que le passage soit entièrement ouvert ou fermé au moment voulu et presque instantanément; car il est facile de comprendre qu'il y a une perte considérable de force résultant de la lenteur de la manœuvre pour ouvrir ou fermer les soupapes.

Soupapes à soulèvement.

436. La soupape commune à *clapet* est une des plus simples ; sa forme ordinaire consiste en une plaque de cuir un peu plus large que l'ouverture de la soupape, et dont un des côtés est fixé sur un joint pour servir de charnière; le cuir est renforcé de chaque côté par une plaque de métal; celle de dessous est plus étroite, celle de dessus plus large que le passage. La soupape doit s'ouvrir sous un angle d'environ 30° , pour laisser un libre passage, équivalent à son ouverture : la boîte doit avoir une fois et demie le diamètre de l'ouverture de la soupape.

L'application ordinaire qu'on en fait dans la machine à vapeur a pour objet la communication du condenseur à la pompe à air ; on lui donne le nom de soupape ou clapet de fond : elle sert aussi pour la soupape à air du condenseur ; mais à cause de la chaleur de l'eau, il faut remplacer le cuir par une pièce de métal rodée.

La soupape de fond G, fig. 1 et fig. 4, planche VII, est quelquefois suspendue par une charnière au bord supérieur du passage, et elle tombe sur un siège incliné, dont la pente est assez grande pour que le poids de la soupape suffise simplement à la fermer.

437. *La soupape à double clapet* est formée de deux soupapes demi-circulaires ; on s'en sert pour les chopines des pompes ; sa construction est semblable à celle de la soupape à simple clapet, et les clapets doubles doivent s'élever sous le même angle. Elles ont l'avantage d'être plus convenables pour les pistons de grands diamètres. Le piston de la pompe à air dans la machine à vapeur est muni de soupapes métalliques de cette espèce (*voyez* pl. VII, p. fig. 1 et fig. 4).

Pour se ménager une plus grande ouverture et moins de résistance dans le jeu des soupapes, on emploie quelquefois une espèce de soupape pyramidale consistant en quatre pièces triangulaires ; mais la construction en est compliquée, sans qu'il en résulte des avantages donnant une compensation suffisante.

438. On a souvent recommandé pour soupape, l'usage d'un disque métallique, particulièrement pour les soupapes de sûreté. Il exige un guide pour le maintenir dans son siège; le meilleur moyen de direction consiste en une tige qui glisse dans une ouverture pratiquée dans des traverses disposées au-dessus et au-dessous de la soupape. Le diamètre de la boîte doit être à celui de la soupape comme $\bar{3}$ est à 2; les bords doivent être rodés l'un sur l'autre à l'émeri jusqu'à ce qu'ils ne laissent plus échapper la vapeur. On trouve que ses avantages comme soupape de sûreté, consistent en ce qu'elle est moins sujette à prendre de l'adhérence, et je partage cette opinion; sous d'autres rapports, elle diffère peu de la soupape conique ¹.

439. La *soupape conique* est un disque métallique, dont le bord est taillé en biseau pour entrer dans un siège conique; on l'appelle quelquefois *poupée* ou *soupape en T*. Les soupapes à vapeur des machines de Watt étaient d'abord faites de la sorte. Dans une soupape de cette espèce, la boîte doit être d'un plus grand diamètre que la soupape dans le rapport de $\bar{3}$ à 2, elle ne doit pas s'élever à moins du quart du plus grand diamètre, quand elle est entièrement ouverte; mais ces deux proportions doivent être augmentées si la soupape est hors du centre de la boîte. Ces soupapes et leurs sièges sont souvent faits en laiton; mais le bronze est meilleur, le disque et son siège étant de même composition. Ceux-ci sont ajustés au tour aussi bien que possible; on les rode ensuite l'un dans l'autre avec de l'émeri en poudre fine, jusqu'à ce qu'ils joignent parfaitement.

Le meilleur angle pour ajuster la soupape dans son siège, est celui de 45° ; car alors la pression est contre-balancée par la réaction de la vapeur entre les parois: si on lui donnait moins

¹ Le phénomène observé par M. Clément Désormes relativement aux plaques attirées par un courant d'air, au lieu d'être repoussées par son impulsion, n'aura pas d'effet sensible sur la sortie de la vapeur par les soupapes de sûreté; car il paraît, d'après quelques expériences que j'ai tentées, qu'il faudrait que les disques fussent d'un très-grand diamètre pour donner lieu à un effet de cette nature: or, ce n'est pas le cas des soupapes de sûreté. L'exposition et l'application que M. Hachette a données de ce phénomène ont été publiées par M. Brande, dans sa nouvelle série du *Quarterly Journal of Science*, vol. II, p. 193.

de pente, la soupape aurait une tendance à rester fermée ; si on lui en donnait davantage, elle occuperait plus d'espace. Quand la soupape conique excède 12 à 15 centimètres de diamètre, elle exige une grande force pour la soulever contre la pression de la vapeur, ce qui est un inconvénient. Watt munit la tige de la soupape d'un piston qui se meut dans un cylindre de même diamètre du côté opposé du passage, et la vapeur agissant également sur la soupape et sur le piston, la résistance qu'on éprouve pour la soulever est beaucoup diminuée.

Quand la soupape doit agir d'elle-même, c'est-à-dire quand elle doit se mouvoir aussitôt que sa surface est soumise à une pression déterminée, le poids de la soupape doit être égal au carré du diamètre, multiplié par la pression en kilogrammes par centimètre circulaire.

440. On donne quelquefois au siège d'une soupape la forme d'une calotte sphérique, et la soupape elle-même reçoit alors cette forme ou celle d'une boule. Cette espèce, désignée sous le nom de *soupape à coupe*, a été fortement recommandée pour soupape de sûreté ; on espérait qu'en suspendant le poids sous cette soupape, elle serait constamment en mouvement dans le vase à vapeur de manière à empêcher l'adhérence (*voyez en U, planche XXI, fig. 1*). Sous d'autres rapports, la soupape à coupe semble inférieure à la soupape conique.

441. *Soupape de Hornblower*. La soupape ordinaire des régulateurs doit s'ouvrir fréquemment en surmontant à chaque fois la pression qui est en raison de sa surface ; pour éviter cet effort, Hornblower a inventé une soupape sur un principe différent. Cette soupape, fig. 4, planche VIII, est renfermée dans une boîte, et consiste en un court cylindre reposant sur deux sièges coniques, l'un à l'extérieur du cylindre, l'autre en occupant le fond. La soupape s'élève ou s'abaisse au moyen d'une tige passant dans une traverse au haut du cylindre ; elle est guidée par la tige même qui glisse dans une crapaudine au-dessous du siège inférieur. Si la pression de la vapeur au-dessus de la soupape est très-forte, tandis que le vide est fait au-dessous, la pression qui tend à tenir la soupape fermée s'exerce seulement sur l'aire

horizontale des deux sièges, au lieu d'agir sur toute la surface de la soupape ¹:

La réduction qu'on obtient ainsi dans l'étendue de la surface pressée est considérable dans les grandes soupapes ; le passage de la vapeur est très-direct : jusqu'au siège inférieur, la vapeur se dirige principalement de haut en bas à travers le corps de la soupape, et elle ne se trouve guère gênée que par la traverse du haut.

442. *Forme perfectionnée de la soupape de Hornblower* La difficulté évidente que présente cette construction de soupape, c'est de rendre les joints des deux sièges imperméables à la vapeur : mais si l'on fait glisser le cylindre dans une boîte à étoupe, ou dans une garniture métallique (*voyez fig. 1, planche VIII*), on écarte cette difficulté et l'on peut faire les soupapes de telle largeur qu'on veut sans qu'elles offrent d'autre résistance que la pression sur le siège et le frottement du cylindre. C'est une simple soupape conique renversée, dans laquelle le siège se meut au lieu du disque, et qui doit évidemment jouer dans une boîte imperméable à la vapeur.

Soupape à tiroir.

443. Les vannes à coulisse sont l'ancien type de ces soupapes ; mais on ne paraît pas avoir compris leurs avantages pour d'autres emplois que les constructions grossières de charpente ; en effet, on ne devait guère s'attendre que les surfaces métalliques pourraient glisser l'une sur l'autre d'une manière assez juste pour être imperméables et durables, à moins qu'elles ne fussent exécutées avec une précision parfaite et en métal très-dur.

Watt chercha le premier à s'en servir, mais sans succès ; ce n'est qu'environ trente ans après, que les procédés de construction furent assez perfectionnés pour qu'on pût faire usage de cette soupape.

¹ Le professeur Robison a reconnu les avantages théoriques de cette construction ; mais pourquoi a-t-on omis, dans la réimpression de ses ouvrages, la notice qu'il en avait donnée ?

444. *Soupape à tiroir de Bramah.* Cette soupape à tiroir est très-employée pour les conduites d'eau, les brasseries, les appareils à gaz et d'autres usages ; elle convient parfaitement pour les conduits de vapeur : elle consiste en une coulisse perpendiculaire au passage, mue par une tige traversant une boîte à étoupe.

La coulisse est rodée de manière à s'ajuster parfaitement sur la circonférence du passage par une de ses faces et elle est tenue fermée par un ressort ; on la met en mouvement à l'aide d'un manche pour les petites ouvertures, et pour les grandes à l'aide d'une crémaillère et d'un pignon.

445. La première idée de l'emploi des soupapes à tiroir pour agir en même temps sur plus d'une ouverture paraît avoir été appliquée à la machine pneumatique par Lavoisier, ou quelques-uns de ses collaborateurs ; et, à cette occasion, le docteur Robison observe qu'un disque à coulisse fait l'office de quatre robinets d'une manière aussi simple qu'élégante ; il ajoute toutefois que les meilleurs ouvriers de Londres pensaient qu'elle serait très-difficile à exécuter ¹. Murray appliqua ce même principe à la machine à vapeur, en 1799, au moyen d'une boîte à coulisse qui ouvrait et fermait à la fois quatre passages de la vapeur ; combinaison qui, d'après l'expression du docteur Robison, n'était pas moins remarquable par sa simplicité que par son élégance.

446. *Soupape à tiroir de Murray.* Les ouvertures viennent toutes aboutir à une boîte à vapeur dans laquelle une plus petite boîte se meut de haut en bas, de manière à ouvrir et fermer alternativement les passages. La fig. 5, planche VIII, représente une coupe de ce système. Le tiroir est mis en mouvement par la tige *o* passant dans une boîte à étoupe.

La vapeur venant de la chaudière arrive par *S* et passe en *a* pour se rendre au haut du cylindre, quand le tiroir est en bas, pendant que le passage *c* au condenseur est ouvert dans l'intérieur du tiroir ; de même, lorsque le tiroir est en haut, le passage

¹ Robison's *Mechan. philosophy*, art. *Pneumatics*.

b de la vapeur qui se rend au bas du cylindre est ouvert, et le passage *a* pour la vapeur qui vient du haut du cylindre pour se rendre par le conduit *c* au condenseur se trouve libre dans le même temps.

Un petit mouvement alternatif suffit évidemment pour le jeu de cette soupape. Le frottement causé par la pression de la vapeur contre la boîte mobile est considérable ; pour le réduire on ne doit pas chercher à trop diminuer les surfaces frottantes, mais à les choisir les plus dures possibles. Dans les bateaux à vapeur, on emploie le bronze ; mais lorsqu'il n'y a pas lieu de se servir d'eau salée, les pièces frottantes peuvent être d'acier trempé ; alors elles marchent très-bien et sont d'un bon usage.

447. *Tiroir de Murdoch.* Dans les soupapes que nous venons de décrire, il se fait une perte de vapeur en raison de ce que les passages s'ouvrent et se ferment à quelque distance de l'entrée de la vapeur dans le cylindre ; on a évité ce défaut dans les machines de Watt et de Boulton : on y a employé des soupapes semblables à celles de Murdoch, dans lesquelles la vapeur et le vide occupent une position inverse de celle de Murray. Dans les machines à long cylindre, on emploie deux tiroirs séparés qu'on met en mouvement à l'aide d'une tige de communication. Il serait en effet fort difficile d'ajuster assez bien un tiroir un peu long, pour que les surfaces de frottement soient en contact complet, et la moindre déviation de ces tiroirs, soit en haut, soit en bas du cylindre, cause des fuites considérables. Maudslay, dans les dernières machines qu'il a construites pour bateaux, a adopté le même système de tiroirs que Boulton et Watt (*voyez fig. 2, planche VI*).

448. Les soupapes à tiroir prennent beaucoup de faveur pour diverses applications, et même dans l'apparence extérieure la complication des machines à double effet est notablement diminuée par leur emploi ; l'invention d'un régulateur pour intercepter la vapeur à un point quelconque de la course est un objet assez important. M. Millington regarde avec raison comme un défaut l'absence d'un moyen d'obtenir cet effet, et ajoute qu'il est commun à la soupape à tiroir et aux robinets à quatre ouver-

tures¹ ; mais cette objection est détruite dans les deux cas, si l'on augmente de moitié l'étendue du mouvement des surfaces à coulisse. Dans ce but, la coulisse ou tiroir doit être plus court de toute l'étendue de l'ouverture, de manière qu'il ne puisse couvrir à la fois les deux ouvertures du cylindre (*voyez* fig. 1, 2 et 3, planche VII), et il doit se mouvoir en deux reprises, pendant la course, à l'aide d'une came qu'on puisse ajuster à volonté ; le premier mouvement arrête la vapeur, comme dans la fig. 2 ; le second ouvre le passage de communication avec le condenseur, et donne entrée à la vapeur à l'autre extrémité. Dans ce cas, soient F et D les passages au cylindre, S l'endroit où entre la vapeur, et E le passage au condenseur ; supposons que la vapeur ait été introduite dans la partie supérieure du cylindre par le passage F, fig. 1, et qu'on ait imprimé au tiroir son premier mouvement, fig. 2, de manière à couvrir F et à laisser encore ouverte la communication D avec le condenseur ; alors au mouvement suivant, fig. 3, le tiroir sera au bout de sa course, donnera accès à la vapeur en D, et ouvrira la communication avec le condenseur ; la vapeur entourera le tuyau E, et ne pourra augmenter sensiblement le frottement par la pression.

449. L'attention principale que l'on doit avoir en établissant une soupape à tiroir, c'est d'abrégier la durée du mouvement autant que possible, de manière à ne pas diminuer l'aire des passages. L'aire de la surface de frottement ne peut guère être moindre que huit fois celles des passages, qui seront eux-mêmes un vingt-cinquième de l'aire du cylindre (art. 154). Ainsi la pression sur le tiroir sera les huit vingt-cinquièmes de celle du piston ; en supposant que la pression maximum soit le double de la pression moyenne, et le frottement, un huitième de la pression, ce sera les deux vingt-cinquièmes de la force motrice, et cet effort aura lieu pour un cylindre court sur environ un cinquième de sa course. Dès lors la perte sera environ un soixante-deuxième de la force motrice de la machine : dans les cylindres longs, le rapport sera moindre.

¹ *Epitome of natural Philosophy*, p. 515.

450. *La soupape cylindrique ou à piston métallique*, semblable à un piston se mouvant dans un tube, a été employée par Édelcrantz pour soupape de sûreté ; mais une telle soupape doit être sujette à prendre de l'adhérence ou à laisser échapper la vapeur, puisqu'elle serait sujette à se rouiller ou à s'user. La soupape de Woolf pour régler la quantité de vapeur passant par une ouverture est fondée sur le même principe, et ne semble avoir reçu aucune application utile ¹. On a tenté de se servir de pistons métalliques comme soupapes à tiroir, et il n'est pas douteux qu'on ne puisse s'en servir pour cet usage ainsi que pour le dessus des soupapes plates. On doit chercher à les construire de manière qu'elles soient imperméables et s'usent également par leur jeu dans le cylindre. J'ai cherché à faire ressortir les avantages de ces soupapes à piston dans les planches VI et VIII ².

Soupapes à mouvement de rotation.

451. Les soupapes à axe diamétral sont les plus simples des soupapes qui ont un mouvement rotatif. Une soupape de ce genre consiste en un disque de métal porté sur un axe transversal au passage ; l'axe divise le disque en passant par son centre, et sort à l'extérieur du tuyau par une ouverture bien juste ; ces soupapes sont de la plus grande utilité lorsqu'on n'a pas besoin de fermeture parfaite, comme les soupapes à gorge, les soupapes de cheminées et autres. Bélidor a appliqué aux pompes les soupapes de ce genre en plaçant l'axe un peu à côté du centre ; cette modification rend les ajustements si difficiles qu'on a renoncé à

¹ *Philosophical Magazine*, vol. XVII, p. 164.

² Dans la fig. 4, pl. VI., j'ai indiqué un système de soupape à piston qui me semble jouir de quelques avantages. Un anneau de forme cylindrique à l'extérieur, et conique à l'intérieur, peut être coupé en deux ou plusieurs parties avec des joints à recouvrement, et ces parties peuvent être pressées, par l'action de la vapeur, sur une partie conique faite pour s'adapter à l'intérieur de l'anneau ; du côté opposé doit se trouver une plaque rodée pour s'ajuster à la surface de l'anneau. Entre cette plaque et la base du cône on insérerait une garniture élastique de chanvre, et l'on tiendrait le tout serré par des écrous tournant sur la tige taraudée des pistons. Les passages de la vapeur devraient être divisés de manière qu'aucune de ces ouvertures simples n'excédât un huitième de la circonférence.

leur usage. Cette difficulté subsistera toujours dans une soupape à double siège; autrement il serait aisé de simplifier la soupape de Bélidor ¹.

452. Bétancourt avait proposé une espèce de soupape tournant sur son axe pour une machine à double effet; toutefois cette soupape ne serait pas d'un long usage, et il ne paraît pas qu'on s'en soit servi ².

453. Les robinets sont si connus, qu'il est inutile de les décrire; sur une petite échelle, de tous les procédés pour ouvrir et fermer les tuyaux, celui-ci est certainement le plus sûr: ils ne réussissent pas aussi bien quand ils ont à se mouvoir constamment; mais, dans ce cas même, il est douteux qu'ils soient inférieurs aux autres moyens, et leur qualité dépend beaucoup de leur bonne exécution. Pour un robinet simple et ordinaire, le boisseau doit être presque cylindrique, lorsqu'il doit être exposé à une forte pression: la réduction du diamètre est d'environ un sixième de la longueur.

454. Dans certains cas, il est utile d'employer le robinet à deux passages, et dans d'autres on peut avoir besoin d'un robinet à trois passages, mais ceux qu'on emploie le plus communément dans les machines à vapeur sont du genre nommé *robinet à quatre ouvertures*: dans le fait, c'est une soupape tournante. On en distingue de deux espèces, l'une qui a été indiquée par Leupold ³, art. 12, et employée par Trevithick; l'autre inventée par Bramah.

455. *Le robinet à quatre ouvertures*, par son mouvement de rotation autour de son axe, ouvre alternativement la communication de la chaudière et du condenseur avec le haut et le bas du cylindre de la machine (*voyez fig. 1, pl. VI*). La simplicité de son action compense à un certain point l'inconvénient du frottement; mais il a le défaut de laisser perdre, à chaque coup de piston, la vapeur dans les tuyaux. Sa forme doit être à peu

¹ *Architecture hydraulique*, vol. II, p. 220.

² De Prony, *Nouvelle Architecture hydraulique*, vol. I, p. 572.

³ Ce robinet a été inventé par Papin, et appliqué à la machine de ce physicien, dont Leupold donne la description. (*Theatrum Machinarum.*) M.

près cylindrique ; sans cela, le frottement et sa tendance à s'user inégalement en seraient augmentés. Quand il a été rodé et ajusté exactement, la pression de la vapeur tend à tenir les surfaces en contact et à user le siège en lui donnant une forme elliptique, de sorte qu'il devient bientôt nécessaire de l'ajuster de nouveau.

456. Le robinet construit comme nous venons de le voir ne permet pas d'intercepter la vapeur à volonté à un point quelconque de la course, sans l'emploi d'autres soupapes ; mais en divisant les intervalles de telle manière que la partie pleine de chaque côté de l'ouverture par laquelle la vapeur passe au condenseur, soit double de cette même ouverture, le robinet pourra être mû en deux reprises, de sorte que le premier mouvement interceptera la vapeur, et laissera le passage libre au condenseur jusqu'à l'instant du second mouvement (*voyez* figures 6 et 7, planche VIII). Dans ce cas, le robinet doit avoir un mouvement alternatif, mais il faut que la disposition des surfaces soit telle, qu'elle empêche l'usure qui est si destructive dans les robinets de forme ordinaire.

457. *Robinet à quatre ouvertures de Bramah.* Dans un robinet ordinaire, la pression tout entière s'exerçant contre un des côtés du boisseau conique, le robinet s'use inégalement et le frottement est considérable ; pour éviter ces inconvénients, on établit le boisseau du robinet sur un axe cylindrique, et la vapeur pénètre par la base la plus large ; ce qui rend la pression sur le siège à peu près égale ; et si le robinet tourne constamment dans la même direction, l'usure est uniforme, malgré l'inégalité de la pression.

Ces robinets, sauf quelques modifications, ont été souvent employés par Maudslay dans de petites machines ; on voit pl. XVII un exemple de leur application à une machine portable, et les détails sur une plus grande échelle, pl. X, fig. 3, 4 et 5. Dans le plan, fig. 5, C est le cylindre, I le robinet à quatre ouvertures, et E le tuyau par lequel entre la vapeur. Le robinet est figuré avec toutes les ouvertures fermées. La fig. 4 au-dessus du plan représente une coupe par l'axe du robinet : la vapeur venant par le

tuyau E, passe par la base supérieure du robinet et arrive par l'ouverture G', soit en haut, soit au bas du cylindre, suivant que l'ouverture sur le côté du cône est tournée vers l'un ou l'autre de ces passages.

On comprendra facilement le moyen d'ouvrir et de fermer les passages, en cherchant ce qui doit arriver lorsqu'on tourne le robinet à droite ou à gauche de la position qu'il occupe dans le plan. Le passage de droite conduit au condenseur (qui est indiqué par la lettre F dans les deux coupes); l'ouverture du milieu communique avec le haut du cylindre; celle de gauche A avec le bas du cylindre. Si l'on tourne le robinet à droite, de manière que l'ouverture triangulaire par laquelle arrive la vapeur vienne se placer devant l'ouverture du milieu, alors la vapeur pourra pénétrer dans le haut du cylindre dont la partie inférieure communiquera avec le condenseur à travers le cône. Si l'on tourne le robinet à gauche de manière que le centre du passage triangulaire communique avec le passage au fond du cylindre, la vapeur suivra cette direction et le haut du cylindre communiquera avec le condenseur à travers le noyau.

Dans ce robinet, le mouvement est alternatif.

On prévient la perte de vapeur à la partie inférieure du cône par une garniture de chanvre autour de la partie cylindrique; quant à la partie supérieure, on emploie un ressort à boudin avec un godet à huile H et une vis à tête pour serrer au besoin.

La pression et le frottement de ce robinet ne seront pas plus grands que ceux d'un tiroir, s'il est également bien exécuté. On peut objecter la perte de vapeur qui a lieu dans les conduits, et il faut aussi observer qu'on ne peut arrêter la vapeur sans intercepter également le passage au condenseur. Toutefois ces inconvénients sont compensés à un certain point par l'emploi de la soupape de Field (*voyez* pl. XVII).

458. *Robinet à quatre ouvertures pouvant intercepter la vapeur à un point quelconque de la course du piston.*

On obtiendra cet effet en se servant d'un robinet assez grand pour qu'il y ait l'épaisseur de deux ouvertures entre deux passages voisins. Le diamètre sera augmenté seulement dans le rapport

de 10 à 8; la surface de frottement sera à peu près la même, et le cône sera plus également pressé dans son siège.

459. *Robinet à double passage.* Dans la pratique, l'emploi de deux robinets à deux passages est ce qu'il y a de plus simple. La simplicité apparente de l'emploi d'un seul robinet entraîne plus de sujétion et de soins, et après tout il remplit bien moins le but que deux petits robinets : il est aussi facile d'en mouvoir deux qu'un seul, lorsque les mouvements sont simultanés, et il est plus facile de les manœuvrer, lorsqu'il s'agit d'intercepter la vapeur à volonté.

460. *Soupapes plates ou à disque.* On concevra aisément la nature de ces soupapes, en imaginant deux disques rodés l'un sur l'autre, dont l'un peut tourner autour d'un axe qui traverse l'autre disque; ils sont percés d'ouvertures qui se correspondent dans une des positions du disque mobile, tandis qu'elles se trouvent fermées dans d'autres positions. C'est à ces soupapes, faites en acier trempé, que Perkins a eu recours pour ses machines à haute pression¹.

Quand ces soupapes sont exécutées avec exactitude et appliquées de manière que la pression soit à peu près la même sur tout le disque mobile, elles peuvent être d'un bon usage; elles permettent de réduire l'étendue du mouvement pour les ouvrir à un degré considérable, mais non sans diviser le passage en petites ouvertures.

461. *Régulateur.* La soupape à vapeur prend le nom de régulateur dans la machine atmosphérique : c'est une espèce de soupape plate rotative; mais elle est placée tout entière d'un seul côté de l'axe, et cela la rend plus difficile à fermer hermétiquement. La fig. 4, pl. XVIII, représente cette soupape d'après le plan de Smeaton : AB, dessous de l'ouverture; CD, coupe; P, disque ou plateau qui la recouvre, et qui est mis en mouvement à l'aide d'un manche appliqué en E.

¹ Ce système de soupape a été employé par Olivier Evans en Amérique, à qui, sans doute, son compatriote Perkins les avait empruntées, et elles ont été inventées, d'après le récit même du premier, par un jeune Américain nommé Stevens.

Des pistons.

462. La première condition qu'un piston doit remplir est de ne livrer aucune issue à la vapeur et de donner ce résultat avec le moins de frottement possible. On rend les pistons bien justes et bien étanchés en les munissant d'une garniture élastique de matière végétale ou animale ; mais cette dernière espèce de garniture ne peut servir pour la vapeur, parce que la chaleur la détruirait.

On fait aussi des pistons entièrement métalliques, construits de manière à jouir d'un certain degré d'élasticité. Après avoir donné quelques considérations communes à tous les pistons, nous les examinerons dans l'ordre suivant, en les divisant en deux classes.

PISTONS...	}	A garniture non métallique.	{	En cuir.....	{	Sur bois.	
						Sur métal.	
					De la machine atmosphérique.		
					En chanvre.....	{	Ordinaires.
						De Woolf.	
		A garniture métallique.	{	De Cartwright, 1797.			
				De Barton, 1816.			
				De Jessop, 1825.			
				De Perkins, 1825.			

463. Que la tige du piston soit tirée ou poussée, dans les deux cas le piston est sujet à se forcer, s'il se trouve la moindre inégalité dans le frottement ou dans la position du centre de la tige, et cet effet a lieu à moins que le piston ne soit d'une épaisseur en rapport avec son diamètre. Si ce n'était qu'un disque mince, il n'y aurait que sa liaison avec la tige qui l'empêcherait de tourner par l'effort de la plus légère résistance, lorsqu'il serait poussé ; mais à mesure que nous le faisons plus épais, cette épaisseur s'oppose de plus en plus à ce qu'il puisse se retourner ; il n'est pas difficile de trouver des proportions qui doivent mettre à l'abri de cet accident.

Supposons que la pression sur le piston AB mette en mouvement la tige CD, fig. 5, planche XVIII : alors pour que le piston

ait une marche assurée, le frottement qu'il éprouve à la circonférence, multiplié par la moitié du diamètre du piston, doit être égal à la pression que produit ce frottement multiplié par la moitié de l'épaisseur du piston; ainsi l'épaisseur est au diamètre comme le frottement est à la pression de la surface frottante.

Le frottement du cuivre jaune sur le fer est le huitième de la pression; ainsi l'épaisseur des pistons métalliques ne doit pas être moindre que le huitième du diamètre.

Le frottement de la garniture de chanvre sur le fer est environ le sixième de la pression; par conséquent l'épaisseur de la garniture de chanvre devra être le sixième du diamètre. La pratique varie extrêmement sur ce point; cependant la dimension moyenne ne s'éloigne pas trop de la règle que nous venons d'indiquer. Pour le cuir sur le fer, le frottement est plus grand: il est environ le cinquième de la pression¹. Quand le piston agit en tirant sur la tige, son épaisseur ne doit pas dépasser les quatre dixièmes de celle qui est nécessaire quand il agit par pression sur la même tige.

Il est assez évident que la partie moyenne du contour du piston contribue peu à assurer le mouvement quoiqu'elle augmente le frottement; cela conduit à une construction de piston dans laquelle la garniture n'occupe que le contour des deux bases *a* et *b* du piston et laisse libre la partie intermédiaire *A*, qui n'éprouve alors aucun effort.

464. Le piston commun est un double cône de bois, fig. 6, planche XVIII, garni de deux bandes de cuir fort, fixées avec des clous ou des cercles. Les joints du cuir ne sont pas liés par une couture, mais les deux bords sont juxtaposés aussi bien que possible et sans se correspondre l'un au-dessus de l'autre.

465. Si les pièces sont en métal, on devra fabriquer un plateau

¹ Bélidor, qui semble s'être le premier servi des pistons pleins, donne des proportions telles, que l'épaisseur est presque égale au diamètre. Avec de telles proportions, le frottement est beaucoup augmenté, comme cela doit avoir lieu dans toutes les parties qu'on veut rendre imperméables; on trouve ailleurs, dans les planches de ses ouvrages, une épaisseur moindre que le tiers. (*Architecture hydraulique*, vol. II, p. 117 et 225.)

circulaire B en cuivre, fig. 7, qui sera bien tourné pour s'ajuster au cylindre dans lequel le piston doit se mouvoir, de manière qu'il puisse glisser sans résistance sensible. Alors les disques supérieur et inférieur seront assez épais pour donner à l'ensemble l'épaisseur requise pour le piston, et ils seront renfermés dans des cuirs en forme de coupes CC et à rebords taillés en biseaux faisant un angle d'environ 45°.

Ces deux pistons, fig. 6 et 7, ont l'avantage de distribuer le frottement sur le bord supérieur et sur l'intérieur; et le bisellement du cuir fait que la pression du fluide tend à le développer et à l'appliquer contre la surface du corps de pompe. L'idée de biseler le cuir paraît avoir été primitivement employée par Smeaton dans le piston d'une pompe ordinaire; il appliqua ce principe de construction à la machine pneumatique en 1752.

Bramah en fit usage aussi dans diverses parties de ses presses hydrauliques, et il l'a trouvé très-avantageux pour les grandes pressions.

466. Le piston de la machine atmosphérique consiste en un plateau de fonte, de diamètre moindre environ d'un tiers de centimètre que celui du cylindre, et de 3 à 4 centimètres d'épaisseur, avec un rebord d'un décimètre de hauteur. On ajoute au-dessus du pourtour un anneau percé d'ouvertures, correspondant à celles du rebord, par lesquelles passent des boulons pour les serrer l'un sur l'autre, après qu'on y a inséré une garniture de chanvre ou d'étoupe imbibée de suif; afin de rendre la garniture plus imperméable, on entretient une couche d'eau sur le piston.

Smeaton a construit le piston des machines atmosphériques d'après un procédé bien supérieur qui rend la perte de vapeur par sa condensation beaucoup moindre; on connaît ce système, d'après la construction du piston de la machine de *Chase-Water*, dont le cylindre a 1^{m,1} de diamètre. Le fond du piston (*voyez* fig. 1, planche VIII) est fait de pièces de bois fixées à son plateau par des boulons dont la tête s'applique sur des rondelles de fer pour garantir le bois. L'emploi de cette matière, dans le cas où l'injection se fait dans le cylindre, présente un avantage bien facile à concevoir. Le plateau inférieur, en orme ou en hêtre,

avait de 5 à 6 centimètres d'épaisseur, et était formé de deux planches croisées ayant une rainure de deux centimètres sur les bords pour recevoir les pièces destinées à remplir les quatre angles restants ; ces pièces doivent être placées de manière que le fil du bois se dirige du centre à la circonférence. Quelques clous ou rivets pour serrer les planches croisées sont placés à leur intersection, et le tout étant cerclé d'une bande de fer de $2\frac{1}{2}$ centimètres d'épaisseur et de 6 centimètres de largeur, se trouve ainsi rendu imperméable. Le diamètre extérieur du cercle a un demi-centimètre de moins que le cylindre. Les rondelles de fer pour le dessous du piston doivent être placées dans des mortaises, de manière que les têtes de boulon ne saillent point ; le plateau de bois étant boulonné sur le plateau de fer, après qu'on avait intercalé une double épaisseur de flanelle et de goudron, et toutes les cavités qui pouvaient rester étant remplies par une autre couche de flanelle et de goudron de manière à ne laisser aucun vide entre le bois et le fer, les boulons étaient arrêtés avec soin, de manière que leurs joints fussent aussi imperméables. Le plateau en bois avait un bordage de sapin sans aubier et de l'épaisseur de 2 centimètres ; on le clouait sous le plateau en y insérant une simple couche de flanelle et de goudron pour supprimer tout vide intermédiaire ; cela fait, on replanissait exactement le parement de ce bordage.

467. *Le piston à garniture de chanvre* est maintenant le plus généralement employé pour les machines à vapeur. Voici comment d'ordinaire on le construit. On ajuste aussi bien que possible la base *b* du piston, fig. 1, planche IX, en lui laissant la facilité de se mouvoir dans le cylindre. La partie du piston qui est immédiatement au-dessus a de 2 à 5 centim., suivant la force de la machine, de moins que le cylindre pour recevoir la garniture ; celle-ci est formée de chanvre long non filé ou d'une corde molle ou tresse préparée à cet effet, qu'on tient aussi serrée qu'on peut. Cette garniture est comprimée par un plateau ou couvercle *C* que l'on place au-dessus du piston ; il est muni d'un rebord qui s'ajuste sur la pièce inférieure et complète les parois de la boîte pour la garniture, la compression étant produite par des vis SS. Les deux

parties du piston qui touchent la garniture sont un peu arrondies, afin que la compression qui s'exerce perpendiculairement repousse le chanvre contre les parois du cylindre et produise un contact aussi parfait que possible.

Quand la garniture usée par le frottement commence à ne plus joindre, les vis, qui sont plus ou moins nombreuses suivant le diamètre du piston, servent à la serrer de nouveau aussi longtemps que leur action peut s'étendre. Quand cela n'est plus possible, il faut enlever le dessus du piston et ajouter de la garniture. La tige est ordinairement attachée au plateau inférieur du piston; elle le traverse à l'aide d'une ouverture conique qu'elle remplit exactement, et on la retient en place au moyen d'un écrou ou d'une clavette.

On alimente le piston de suif fondu à l'aide d'un entonnoir placé sur le couvercle du cylindre et muni d'un robinet pour empêcher la vapeur de s'échapper.

468. *Piston de Woolf*. Dans le procédé de construction ordinaire, quand le piston, par un travail continu, commence à être trop petit et occasionne une perte de vapeur, il faut enlever le couvercle du cylindre pour serrer les écrous, même lorsqu'on n'a pas besoin de mettre une nouvelle garniture. Comme ce travail est pénible, le chauffeur s'évite la peine de le faire tant que la machine peut marcher : cette négligence donne lieu à une perte considérable de vapeur et de combustible. Le perfectionnement de Woolf a pour but de permettre à l'ouvrier de serrer le piston sans enlever le couvercle du cylindre, si ce n'est lorsqu'il faut mettre une garniture neuve. Voici comment il y parvient.

Sur la tête de chaque vis, on place une petite roue dentée qui puisse être mise en mouvement et par suite serrée, à l'aide d'une roue dentée centrale tournant autour de la tige du piston; si l'on fait agir une des petites roues, elle communique son mouvement à celle du centre, et celle-ci fait tourner toutes les autres. Celle qui doit donner son mouvement est garnie d'un carré qui vient se loger dans une cavité du couvercle du cylindre, lorsque le piston est en haut. Cette cavité est fermée avec une pièce bou-

lonnée que l'on appelle *capuchon* ou *bonnet*, et qu'on peut très-facilement enlever et remettre en place.

Un autre moyen, dont le principe est le même que le précédent, mais qui en diffère dans la construction, consiste, au lieu de plusieurs vis qui se serrent à l'aide du mouvement d'une seule, à n'employer qu'une seule vis qui fait partie de la tige du piston (planche IX, fig. 2). Sur cette vis est placée une roue *d* de diamètre convenable, et dont le centre est taraudé pour s'ajuster sur la tige du piston. On fait tourner la roue pour serrer le piston, au moyen d'un pignon *a*, qui est surmonté d'un carré venant se loger dans une cavité du cylindre comme ci-dessus; on empêche le plateau supérieur du piston de tourner avec la roue, à l'aide des clavettes *ee*, appelées chevilles d'arrêt.

Pistons métalliques.

469. *Piston de Cartwright.* L'idée d'employer un métal à la place d'une substance végétale élastique pour rendre les pistons imperméables formait un des objets de la patente obtenue par Cartwright en 1797. Cette idée consistait à remplacer la garniture par six ou un plus grand nombre de pièces métalliques qui ne sont autre chose que des segments d'anneaux *aa*, fig. 5, pl. IX, s'adaptant à la surface intérieure du cylindre; une seconde série *bb* croisait les joints de la première; les deux séries étaient pressées l'une contre l'autre et contre le cylindre par des ressorts en forme de V, et il résultait de l'emploi de ces deux séries, ainsi que de ce qu'on alternait les joints des anneaux, que les fuites par les joints pouvaient être rendues impossibles. Les deux systèmes étaient contenus entre deux plateaux auxquels la tige du piston était fixée (voyez la coupe, fig. 5).

Les deux anneaux extérieurs, en laiton, avaient exactement le diamètre du cylindre, et ils étaient coupés en plusieurs segments, comme on le voit en *aaa*. Ces anneaux étaient placés l'un sur l'autre à joints alternatifs. Les joints de l'anneau inférieur sont indiqués dans la figure par des lignes pointillées; les deux anneaux intérieurs étaient disposés de même et maintenus en place

par les deux plateaux auxquels la tige du piston était fixée; les segments étaient poussés du centre à la circonférence par des ressorts d'acier ayant la forme de la lettre V.

Les pistons de Cartwright n'ont pas bien réussi dans la pratique tant que les cylindres n'étaient pas bien alésés. Nicholson en expliqua clairement la cause peu après que cette invention devint publique ¹. Les pièces qui formaient le piston ayant une courbure déterminée, et ayant trop de force pour posséder aucune flexibilité sensible, ne pouvaient se prêter aux irrégularités de courbure qui se rencontraient le long du cylindre, comme le faisait la garniture plus élastique de chanvre. Il y a lieu de douter si la pression des anneaux ou segments, les uns contre les autres, n'était pas assez forte pour empêcher les ressorts de remplir leur but quand ils étaient employés de cette manière.

Le frottement des pistons qui tiennent également la vapeur, est moindre sans contredit dans ceux qui ont une garniture métallique (art. 463).

470. *Piston de Barton.* On regarde ce piston comme supérieur à celui de Cartwright (pl. VII, fig. 4). Il consiste en un anneau épais E, de cuivre ou de fonte, à peu près de même diamètre que le cylindre et divisé en trois ou un plus grand nombre de segments. Des triangles égaux, faisant fonction de coins, doivent servir à chasser en dehors les segments des anneaux de manière à élargir leur cercle. Les segments et les triangles sont maintenus entre deux plateaux, comme dans le piston que l'on vient de décrire. Les triangles sont constamment poussés vers la circonférence par des ressorts à boudin, et servent comme de coins pour presser les segments contre la surface du cylindre à mesure qu'ils s'usent. Les pointes des coins elles-mêmes s'émousent, et comme elles sont formées de même métal que les segments, elles font encore partie du piston. Un piston semblable, dans un cylindre bien alésé, peut durer plusieurs années sans exiger d'autre soin que d'être graissé; mais il est facile de voir que les coins et les segments ne pressent pas également; ainsi,

¹ *Philosophical Journal.*

dans cet état, ce piston n'est pas applicable aux hautes pressions, et il a d'ailleurs toutes les imperfections du piston de Cartwright. Il a été récemment amélioré par Barton, et je vais en donner la description détaillée dans cet état de perfectionnement. Le piston est représenté dans la figure 4, en plan et en coupe; il se compose d'un cylindre massif de fonte A, ayant une ouverture conique B, pour recevoir l'extrémité élargie de la tige du piston, à laquelle elle est fixée à l'aide d'une cheville D. Autour du piston on a pratiqué un espace ou rainure, destinée à recevoir quatre segments de cuivre jaune, de fonte ou d'acier fondu trempé, représentés par la lettre E, et qui tendent à s'écarter, à cause de l'action des quatre coins triangulaires G, de même métal que les segments, et pressés par des ressorts à boudin en acier trempé. Ces ressorts sont insérés par leurs extrémités dans des cavités cylindriques, pour les empêcher de se déranger, sans cependant gêner leur jeu. Pour le même motif, dans chaque ressort on place un goujon un peu plus petit que le ressort. Pour les pistons destinés aux machines à hautes pressions, on fait trois rainures aux pistons dans la partie extérieure des segments, fig. 5; celle du milieu *a* renferme de l'huile ou de la graisse pour lubrifier les surfaces frottantes; les rainures supérieure et inférieure *bb*, sont garnies d'anneaux d'acier trempé, ayant en un point, fig. 6, un joint libre à enfourchement; ces anneaux sont exactement enchâssés dans les rainures, et quand le piston pénètre dans le cylindre, leurs extrémités se joignent. Chaque anneau est assujéti dans sa rainure par une clavette qui l'empêche de tourner, et empêche que les joints viennent à se correspondre. Ces anneaux, ou plutôt ces ressorts circulaires, forment une addition importante, et sont d'un grand secours pour empêcher les fuites qui résulteraient de l'inégale expansion des segments et des coins; car la pointe du coin se mouvra en dehors dans la direction *nm*, tandis que les segments ne se mouvront que suivant *no*; en conséquence, ces pointes ne tarderaient pas à creuser le cylindre en rainures ou cannelures longitudinales, si elles n'étaient pas arrondies, et si l'on n'ajoutait pas les anneaux ou ressorts circulaires pour empêcher les fuites de vapeur.

Mais en combinant la dureté et l'élasticité, Barton a beaucoup fait pour rendre les pistons imperméables et durables : toutefois ces qualités dépendent beaucoup de l'habileté de l'ouvrier. Quand ils sont bien faits, par une personne qui comprend leur jeu, il n'y a pas de doute qu'ils peuvent être d'un bon service.

471. Au moyen de la construction indiquée dans la fig. 7, on peut éviter l'effet qui provient de l'inégale expansion des diverses parties du piston de Barton. Dans cette disposition, les pièces en forme de coin ne s'étendent pas jusqu'à la surface du cylindre, et pour se prémunir contre les ouvertures de chaque joint, on emploie deux séries de segments et de coins, comme on le voit dans la coupe : les joints de la deuxième série sont indiqués dans le plan par des lignes pointillées.

472. Il est important de remarquer que la vapeur elle-même presse les garnitures métalliques et tend à les rendre imperméables ; et il est essentiel pour la perfection de l'appareil que la vapeur puisse pénétrer dans l'intérieur du piston et que toutes les parties s'ajustent parfaitement dans les joints horizontaux. Supposons que la vapeur presse sur la surface supérieure A du piston, fig. 7, et que la partie inférieure B communique avec le condenseur ; la vapeur entre par les joints *e*, presse les segments contre la plaque inférieure, remplit l'intérieur de manière à pousser, conjointement avec les ressorts, les segments contre les parois du cylindre. De même quand la partie inférieure est ouverte à la vapeur et que la partie supérieure communique au condenseur, la vapeur pénètre en *f*, *f*, presse les segments contre le plateau supérieur et contre le cylindre. S'il n'en était ainsi, les ressorts ne pourraient presser avec assez de force pour que les joints tiennent la vapeur ; car un fluide ne peut être retenu par une force moindre que sa tension. Dans le cas dont il s'agit, la pression qui produit ce frottement est toujours plus grande que la pression de la vapeur sur la surface frottante de toute la quantité due à la pression des ressorts ¹.

¹ Quelques mécaniciens connaissent si peu la manière d'agir des pistons, qu'il n'est pas rare de leur entendre estimer le frottement du piston d'après celui qui a

473. *Piston de Jessop.* On doit à M. Jessop un moyen tout différent de faire servir un métal à rendre les pistons imperméables, moyen pour lequel il prit une patente en 1823. Il consiste en une garniture élastique de métal, qui entoure le piston sous forme de spirale. La fig. 8, planche IX, représente une coupe de piston de cette espèce ; AA est une spirale de métal qui, abandonnée à elle-même et hors du piston, prend la forme qu'indique la figure 9. Pour établir ce piston, on prépare une couche de chanvre BB, qui remplit le double but d'empêcher la vapeur de passer par les joints, et d'aider la pression des ressorts contre la surface du cylindre. Il faut de temps en temps ajouter un peu de chanvre pour remplacer la partie usée. L'action de la vapeur pour rendre le piston imperméable, s'exerce par la pression sur les plateaux supérieur et inférieur, comme dans les pistons ordinaires garnis de chanvre.

Ces pistons pressent et s'usent plus également que les autres espèces de pistons métalliques, quand ils sont faits avec le même soin, et ils ont bien réussi dans la pratique ¹.

474. *Du frottement des pistons.* Les surfaces frottantes du piston doivent presser contre le cylindre avec une force au moins égale à la tension de la vapeur qu'il empêche de passer ; autrement les surfaces se sépareraient et laisseraient échapper la vapeur. On a vu (art. 465) que l'épaisseur de la surface frottante devrait être égale à la fraction du diamètre qui exprime le frottement : soit donc f = le frottement quand la pression est l'unité ; e = l'épaisseur ; d = le diamètre, et p = la pression de la vapeur ; F = le frottement total ; dès lors le frottement sera égal à 3,1416 $depf$, ou puisque $e = fd$, on aura

$$F = 3,1416 pf'd ;$$

lieu dans un cylindre ouvert. On peut mettre sur la même ligne la méthode qui consiste à évaluer les frottements d'une machine par la force qu'elle exige pour marcher à vide, c'est-à-dire quand elle ne fait rien mouvoir. Le fait est que le frottement est en raison de l'effort supporté par les parties, et que cet effort est à peu près en proportion du travail exécuté.

¹ Perkins a aussi demandé une patente pour une disposition particulière des pièces d'un piston métallique, mais comme ce moyen est évidemment inférieur à ceux qu'on a décrits, il suffit de l'indiquer. (Voyez *Repertory of Patents*, vol. I. p. 224.)

il faudra ajouter un dixième pour le frottement de la tige du piston.

La force motrice étant

$$\frac{3,1416pd^2}{4};$$

par conséquent, la portion de la force motrice égale au frottement sera

$$\frac{4,4 \times 3,1416pd^2f^2}{41416pd^2} \times 4,4f^2.$$

Dans les machines à double effet avec piston métallique, on a

$$4,4f^2 = \frac{4,4}{8 \times 8} \times 0,069,$$

ou près de 7 p. % de la force totale.

Dans les machines à double effet avec piston à garniture de chanvre, le frottement sera

$$4,4f^2 = \frac{4,4}{6 \times 6} = 0,1222,$$

ou plus de 12 p. % de la force totale.

Dans les machines à simple effet avec piston à garniture de chanvre, on aura pour le frottement

$$0,4 + 4,4f^2 = \frac{1,76}{6 \times 6} = 0,049.$$

Dans les machines à haute pression, on suppose que le frottement est dans le même rapport ; mais la perte de vapeur par le piston étant, quant à la puissance, en raison inverse du diamètre du piston, j'ai admis que le frottement et les fuites absorbaient les deux dixièmes de la force, et cela se trouve conforme à l'observation que j'en ai faite dans deux circonstances où j'avais des moyens assez sûrs de comparer la puissance et les effets produits. Le calcul donne pour les fuites une quantité un peu plus grande (*voy.* la note de l'art. 384).

Collets des tiges de piston ou boîtes à étoupe.

475. Les collets des tiges de piston ou *boîtes à étoupe* sont des appareils destinés à rendre imperméable à tout fluide le passage d'une tige mobile. Ce moyen de communiquer le mouvement sans donner entrée à l'air doit avoir été depuis longtemps en usage ; nous le trouvons dans divers ouvrages sans indication de l'époque de son invention. Il ressemble tellement à la construction d'un piston, qu'il paraît presque inutile d'entrer dans quelques détails particuliers. Comme dans le piston, son effet est produit par l'élasticité, et l'on s'est servi de cuir, de chanvre, de coton, de liège et de métal pour remplir cet objet.

Quand la chaleur de la vapeur ne peut être nuisible, on peut employer le cuir. On s'en est servi sous forme de disques, présentant une ouverture pour la tige du piston et pressés par des vis. On l'a employé ensuite en forme de coupe, d'abord à l'établissement des pompes de York Buildings à Londres ¹. Smeaton s'en est aussi servi pour sa machine pneumatique ; il les a en outre appliqués aux tiges des pistons des machines soufflantes de Carron en Écosse ; et il décrit comment on forme ces coupes, en les taillant à l'emporte-pièce dans un cylindre de même diamètre que la tige du piston à laquelle on les destine ². Ce qui rend plus curieuse la boîte de Smeaton pour les cylindres soufflants, c'est qu'elle était établie dans un bloc de bois dur, et qu'il semble que les tiges avaient été tirées à la filière.

L'application de ce genre de garnitures aux pistons de la presse hydraulique par Bramah, a donné lieu de les éprouver sur une grande échelle et sous des pressions énormes.

476. La boîte à étoupe avec garniture de chanvre doit contenir la vapeur autour de la tige d'une manière à peu près semblable à celle du piston. Un collet percé d'une ouverture propre

¹ *Architecture hydraulique*, vol. II, p. 62. — *Description of the Pumps of York Buildings*. London.

² *Philosophic. Transactions*, vol. XLVII, p. 415. — *Smeaton's Reports*, vol. I, p. 360.

à recevoir exactement la tige, est fixé à vis sur le couvercle du cylindre, de manière à presser contre celle-ci la garniture qu'il renferme; le dessus est évidé en forme de godet, pour recevoir le suif qui sert à graisser la tige (*voy. pl. VI et VII*).

477. Cartwright a fait un essai pour les garnitures métalliques des tiges de piston. Depuis, Barton les a beaucoup perfectionnées. Cet objet est moins important que le piston, et doit engager à moins de dépenses; cependant, l'invention en est tellement ingénieuse, que nous allons la décrire. L'appareil que Barton substitua aux boîtes à étoupes est représenté par la figure 3, planche XVIII. D est la tige du piston, E une boîte avec un épaulement pour soutenir la plaque de fonte F, et une autre en G pour la plaque H. Le couvercle I de la boîte est fixé à l'aide de boulons, à la manière ordinaire, avec des feuilles de plomb dans les joints I, K, pour le rendre plus juste. Trois pièces principales de métal L embrassent la tige du piston D, et trois coins M remplissent l'intervalle qu'elles laissent entre elles. Deux cercles minces d'acier trempé N, N, solidement rivés à leurs points de jonction, relient fortement les angles arrondis de ces pièces. Ces angles servent à tenir les cercles en place. A chaque angle extérieur des pièces L sont deux ressorts à boudin, placés dans des trous cylindriques, ayant dans leur intérieur des goujons comme dans le piston; ces ressorts et les cercles élastiques pressent avec force les pièces L contre la tige du piston. Deux autres cercles d'acier *aa* sont logés dans deux rainures, et sont en contact avec la tige dont ils servent à serrer les joints encore plus parfaitement; ils sont fixés de la même manière que les anneaux du piston que nous avons décrit ci-dessus. La rainure du milieu R, placée entre les deux autres, est destinée à recevoir la graisse. La cavité circulaire SS, creusée dans le couvercle du cylindre, est destinée au même usage ¹.

En construisant cet appareil, on aura soin que les pièces L soient à faces parallèles; sans cela, elles s'useraient inégalement; et les ressorts seraient bientôt sans effet. Les pièces M ne doivent

¹ Gill's *Technical Repository*, vol. IV, p. 242.

pas appuyer sur la tige du piston ; et je ne pense pas que la botte tienne bien la vapeur, si l'on ne garnit de chanvre l'espace qui se trouve derrière les cercles NN.

Moyens d'ouvrir les soupapes, les robinets et les tiroirs.

478. Le mouvement est emprunté, soit aux parties tournantes de la machine, soit à celles qui ont un mouvement alternatif. Dans les machines qui n'en ont pas de la première espèce, le mouvement est donné aux soupapes par une tringle ou bielle qui est attachée au balancier de la machine, auprès de l'extrémité mise en mouvement par la tige du piston. Cette bielle est munie de taquets mobiles à volonté, qui viennent frapper les leviers des soupapes, pour ouvrir ou fermer celles-ci à des instants convenables de la montée ou de la descente du balancier. Ces leviers tournent sur leurs axes et font mouvoir les soupapes, les tiroirs ou les robinets. Le point important est que l'action soit bien régulière ; car l'effet d'une machine dépend surtout du soin avec lequel les passages sont ouverts ou fermés au moment convenable. Quand on se sert de soupapes, elles sont ordinairement ouvertes à l'aide de poids (*voy. pl. XI, fig. 5*). Un poids *w*, suffisant pour vaincre le frottement et ouvrir la soupape, agit sur un levier angulaire *a* mobile sur un axe, et qui ouvre la soupape dès qu'on le fait tourner. Ce poids est tenu en suspension par un cliquet à ressort *b*, pendant que la soupape est fermée ; et quand le cliquet se dégage à l'aide de la queue *c*, qui est mise en mouvement par le taquet *d*, la soupape s'ouvre. Si la soupape est un peu grande, elle exige un poids considérable *w*, pour s'ouvrir malgré la pression de la vapeur, et, dans ce cas, il faut avoir recours, soit à la soupape indiquée, art. 442, soit au moyen de Watt, pour se dégager de cette pression. On peut demander pourquoi l'on élève des poids pour ouvrir les soupapes, au lieu de se servir directement de la bielle : le seul motif qui fait agir ainsi, c'est que le poids *ouvre* la soupape plus rapidement, et que la perte de force qu'on éprouvait en *fermant* les ouvertures avec lenteur ne fut pas découverte aussi promptement. Cepen-

dant la perte absolue est à peu près la même, et dans a pratique, il devient de plus en plus ordinaire de les ouvrir directement.

La descente du poids qui ouvre une soupape se règle par un moyen fort ingénieux : ce poids descend dans un vase plein d'eau, ou bien il pousse un piston dans ce vase (*voyez* en C, fig. 5, pl. XI), tandis que l'ouverture par laquelle l'eau s'échappe en dessous peut être diminuée ou augmentée à volonté. Le poids agit donc avec toute sa force pour ouvrir la soupape ; mais aussitôt qu'il commence à se mouvoir, il est retardé par la résistance de l'eau jusqu'à ce qu'il s'arrête finalement. Pendant la montée, une soupape placée au fond du vase s'ouvre dans l'intérieur ; en conséquence, la machine n'a plus qu'à élever de nouveau le même poids.

Dans les machines destinées à élever l'eau, ce moyen d'ouvrir les soupapes a toujours été employé. La difficulté d'ouvrir les soupapes un peu grandes est probablement la cause de l'emploi de ce moyen ; et comme ce mécanisme est fort ingénieux, on en conserve l'usage. Mais je pense qu'il est à la fois plus simple et plus avantageux de communiquer le mouvement de la bielle à la soupape d'une manière directe, comme on le voit dans l'art. 482. Le taquet qui arrête la vapeur doit être susceptible de prendre une longue course, soit qu'on l'ajuste à la main, soit qu'il se règle de lui-même (*voyez* art. 554).

479. Dans une machine à volant, il vaut mieux placer une roue excentrique sur l'arbre du volant, laquelle, par sa révolution, imprime un mouvement de va-et-vient à une tige attachée à un cercle qui entoure l'excentrique, et donne ainsi le mouvement aux soupapes, aux robinets ou aux tiroirs. Cet appareil est représenté figure 2, planche XVII. N est la coupe de l'arbre du volant, et k l'excentrique fixé sur cet arbre et tournant avec lui ; un cercle de métal enveloppe l'excentrique de manière à lui permettre de tourner, et de ce cercle partent deux tringles i liées entre elles pour plus de solidité : ces tringles se terminent sur un levier coudé qui fait mouvoir la tige l, et par suite un autre levier qui, à l'aide d'une paire de roues d'angle, donne le mouvement au robinet de la machine sur son axe n, et le ramène de nouveau

est placé. Un excentrique a l'avantage de donner beaucoup de facilité pour les changements de mouvements, qui, se faisant d'une manière continue, ne donnent aucune secousse. Dans les grandes machines, on équilibre l'excentrique à l'aide d'un contre-poids, de sorte qu'il n'exerce qu'une légère pression sur l'axe (*voyez* pl. XXIII).

Soit r le rayon de l'excentrique, d la distance de son centre de mouvement; $r + d - (r - d) = 2d$ sera l'étendue du mouvement, ou le double de l'excentricité. Dans toute autre position, la distance horizontale sera $d \cos a$, a étant l'angle formé par la ligne des centres et l'horizontale. Quand les deux centres sont sur la même verticale, $a = 90^\circ$, et $\cos a = 0$; la distance est nulle, et cela correspond à la fin de la course. Nous savons, d'après la nature du cercle, que le cosinus croît rapidement en partant de l'angle de 90° ; mais lorsque le piston aura parcouru un sixième de sa course, le tiroir ou le robinet ne pourra être encore qu'à moitié ouvert, et, à moins que son mouvement ne soit plus grand qu'il n'est nécessaire pour l'ouvrir, il ne restera entièrement ouvert que pendant la neuvième partie de la course.

480. Les rouleaux excentriques pour élever les tiges des soupapes ont le même défaut, mais l'application en est ingénieuse. Concevez que l'arbre Y, fig. 1, pl. X, soit mis en mouvement par l'arbre de la manivelle d'une machine à double effet, et communique un mouvement de rotation à l'arbre Z, au moyen des roues 7, 8; alors, si l'on place sur Z deux roues excentriques 4, 4, sous deux tiges qui glissent verticalement dans des guides (*voyez* z, z, fig. 2), et munies de rouleaux de frottement 3, 3, la révolution de l'arbre Z fait élever et abaisser alternativement les tiges qui, au moyen des bras 9, 10, 11, 12, élèvent et abaissent les soupapes. Le levier ou manche 13 sert à ouvrir et à fermer les soupapes à la main lorsqu'on commence à travailler, etc.

On peut remarquer que cette construction ne permet pas d'intercepter la vapeur sans que la communication avec le condenseur ne soit fermée.

481. On a fait subir à l'excentrique un perfectionnement remarquable pour ouvrir et fermer les passages plus rapidement

en changeant la forme de la poulie de l'axe, de manière à la faire agir presque comme une came, et en plaçant sur la tringle de l'excentrique des galets ou pièces mobiles à volonté ; mais pourquoi ne pas lui donner la forme d'une came ou d'une série de dents, pour produire de la manière la plus convenable le mouvement désiré ? Supposons qu'on veuille intercepter la vapeur à un point quelconque de la course ; il devra y avoir deux mouvements, dont l'étendue de l'un sera double de celle de l'autre. Soient, fig. 1 et 2, pl. XI, AB l'étendue du premier mouvement, BG celle du second. Du centre D décrivant des cercles passant par ces points, prenez AE pour le moment de la fermeture du passage au condenseur, et AF celui de l'ouverture du passage de la vapeur ; alors, pour rendre le jeu plus facile, on décrira la courbe HIG de manière que chacune de ses parties soit une parabole, dont l'une aura son sommet en H et l'autre en G¹. Pour produire le second mouvement, une autre roue sera placée sur le même axe, derrière la première, avec une courbe IK. Si ces courbes ont leurs correspondantes en sens opposé, et qu'elles agissent sur des roulettes, le mouvement sera assuré et son amplitude limitée, et l'on pourra le changer au besoin de direction pour les machines de bateau ou de chariot ; car la position du tiroir étant changée à la main, la pression de la vapeur fera tourner la manivelle en sens contraire, et la roue à cames fera mouvoir les soupapes ou le robinet dans les directions convenables. Pour intercepter la vapeur à un instant déterminé de la course, selon la résistance ou le travail de la machine, la roue, avec la courbe IK, doit pouvoir glisser autour de son axe, et la courbe IK doit être ajustée de manière que l'on puisse faire varier l'instant où l'on arrête la vapeur depuis N jusqu'en O.

482. Lorsqu'on emploie des soupapes, leur propre poids et celui des tiges suffisent généralement pour les refermer. Dans ce cas, les tiges n'exigent pas d'être liées de manière à produire les deux mouvements ; mais, d'un autre côté, il faut, pour une ma-

¹ La meilleure courbe pour passer du repos au mouvement est la parabole. Voyez Emerson's *Mechanic*, vol. IV, p. 91.)

chine à expansion ¹, une tige séparée pour chaque soupape, et l'on placera avec avantage les roues dentées ou les cames au-dessous des tiges qu'elles doivent mettre en mouvement, comme l'axe Z, pl. X, fig. 1 et 2.

483. Pour appliquer ces mêmes principes aux machines à mouvement alternatif, soit AB, fig. 3 et 4, pl. XI, une bielle portant une courbe CD pour agir sur le rouleau C, qui, aussitôt que la bielle descend en C, fait glisser le châssis du rouleau, et fait tourner l'axe E de manière à abaisser la tige à coulisse à l'aide du bras F. La vapeur sera interceptée par HI pendant la descente, et par KL pendant la montée du piston.

484. Pour régler la durée de l'introduction de la vapeur, les pièces qui portent les courbes IH et KL sont divisées en deux parties, afin qu'on puisse les faire glisser l'une sur l'autre, au moyen d'une vis; et si la tige qui porte la vis glisse sur une roue manœuvrée par un modérateur ou autre mécanisme de ce genre, la machine se réglera d'elle-même (*voyez* art. 554).

485. Dans tous les cas, les arbres qui doivent être mus alternativement dans deux sens différents doivent être en équilibre, et l'effort de toutes les parties pesantes doit être compensé par des contre-poids agissant sur des leviers. L'encliquetage régulateur doit être d'une force proportionnée à l'effort qu'il faut faire pour ouvrir les soupapes, les robinets ou les tiroirs (*voyez* article 449).

Des guides des pistons.

486. Le mouvement de la tige du piston doit se faire en ligne

¹ Les mouvements des soupapes, des tiroirs et des robinets se trouvant incompatibles avec l'emploi de la force expansive ou de la détente de la vapeur dans les machines de la plupart des constructeurs, on peut dire que, Boulton et Watt exceptés, il en est très-peu qui aient tiré parti de cette grande source d'économie. Les propriétaires de machines s'attachent trop à avoir la plus grande force possible dans une machine de grandeur déterminée, et ils oublient que pour qu'une machine fonctionne en consommant le *minimum* de combustible, le cylindre doit en être beaucoup plus grand, à égalité d'effet. Dans l'estimation comparative de l'économie d'une machine, on ne doit pas considérer sa force nominale, mais l'effet produit pour un kilogramme de combustible.

droite dans la direction de sa longueur, et quand le point sur lequel il agit décrit une portion de cercle, la construction doit être telle que chaque partie prenne exactement le mouvement convenable. La tige du piston doit produire le mouvement circulaire, en rendant l'action la moins oblique possible; le moyen le plus simple est de conserver à la tige sa direction à l'aide de guides, et de la faire agir sur les parties qui ont un mouvement circulaire, à l'aide de bielles qu'on fixe à son extrémité. Afin de diminuer le frottement des guides, on ajoute des galets. On voit, pl. XVII, fig. 1, une combinaison de cette espèce, aussi simple qu'efficace. Un galet ou poulie F est attaché à la tige D du piston, et se meut dans la verticale, à l'aide des guides GG; le mouvement se transmet à la manivelle I par la bielle III. Quand le volant a une énergie suffisante, la perte de force dans cette combinaison est simplement le frottement produit par une action oblique, laquelle est d'autant moindre que la bielle est plus longue, pourvu que le poids de celle-ci n'augmente pas d'une manière notable¹.

Manivelles.

487. La manivelle est une des meilleures inventions pour changer un mouvement alternatif en un mouvement de rotation; il se présente trois cas :

1° La force motrice peut être uniforme et s'exercer en ligne droite;

2° La force peut être uniforme et s'exercer en ligne courbe;

3° Et dans chacun de ces cas, la force peut être variable.

La manivelle augmente la vitesse de la force motrice, et, dans la construction usitée, elle l'augmente dans le rapport de la circonférence du cercle au double du diamètre; mais ce rapport

¹ L'augmentation totale d'effort nécessaire pour changer le mouvement alternatif en mouvement de rotation ne peut doubler dans aucun cas le frottement sur l'axe de la manivelle; et comme le double de ce frottement ne s'élève jamais à la dixième partie de la force de la machine, on ne saurait espérer un égal degré d'économie et simplicité en employant directement la vapeur à un mouvement de rotation. (Voyez art. 515-517, et le tableau de l'art. 487).

peut varier : on concevra cela facilement en jetant les yeux sur la figure 8, planche XVIII. AB représentant la course de la tige du piston, la manivelle peut se trouver en un endroit quelconque de la lunule représentée par les lignes ponctuées. Si nous prenons la somme des forces qui agissent sur toute la circonférence, nous la trouvons exactement égale à celle qui agit sur la ligne droite, sauf le frottement additionnel.

Le tableau suivant a été calculé pour une force uniforme agissant en ligne droite; on a représenté par l'unité la force motrice en ligne droite, et le tableau indique la pression qu'elle produit dans la direction de la tangente au cercle, à chaque quart de circonférence et de 30 en 30 degrés. Cela permettra au lecteur de juger de l'effet d'une force variable. Quand le point d'application décrit une courbe, l'effet est moins régulier; mais il n'est pas assez différent ni assez important pour exiger des recherches particulières. On a ajouté la dernière colonne pour montrer l'augmentation d'effort sur l'axe au delà de celui qui aurait lieu si cet axe était mis en mouvement par des roues dentées ¹.

¹ Supposons que la force motrice se meuve suivant la ligne AB, et que l'extrémité D de la bielle se meuve autour d'un cercle. Soit a l'angle que forme la bielle avec la direction AB du mouvement, et c l'angle ou l'arc décrit à partir de E. La force dans la direction de la bielle sera $P \sec a$, P étant la force suivant la verticale; on aura la proportion

$$1 : \sin (c+a) :: P \sec a : P \sec a \times \sin (c+a),$$

dont le dernier terme est la force dans la direction FD de la tangente au cercle; mais

$$\sin (c+a) = \sin c \cos a + \sin a \cos c :$$

donc on aura

$$P(\sin c \cos a + \sin a \cos c) \sec a$$

pour l'expression de la force. Si la bielle a une longueur n fois plus grande que la manivelle, $\sin c = n \sin a$, et la force à un angle quelconque c sera représentée par

$$P \sin c \left(\frac{\cos c}{\sqrt{n^2 - \sin^2 c}} + 1 \right).$$

L'augmentation de pression sur l'axe ou arbre de la manivelle, et par consé-

Table des variations de la force de rotation lorsqu'une force constante agit sur la manivelle.

PARTIE de la course décrite, la course entière étant prise pour unité.	NOMBRE de degrés parcourus à partir de l'origine.	RAPPORT						EFFORT supporté par l'arbre, lorsque la bielle a six fois la longueur de la manivelle.
		De la longueur de la bielle à celle de la manivelle, cette dernière étant prise pour unité.						
		2.	3.	4.	5.	6.	7.	
0	0°	0	0	0	0	0	0	1,0
0,067	30	0,72	0,65	0,61	0,59	0,57	0,56	0,825
0,146	45	0,97	0,87	0,85	0,80	0,78	0,77	0,624
0,25	60	1,10	1,01	0,98	0,95	0,94	0,95	0,575
0,5	90	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,169
0,75	120	0,62	0,75	0,75	0,78	0,78	0,80	0,625
0,854	135	0,43	0,57	0,57	0,60	0,62	0,65	0,790
0,933	150	0,27	0,59	0,59	0,42	0,45	0,44	0,907
1,000	180	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,00

On a représenté la longueur de la manivelle par l'unité; mais ces tables s'appliquent à toute espèce de longueur de manivelle lorsque la bielle a 2, 3, 4, 5, 6 ou 7 fois sa longueur. Les colonnes au-dessous de ces nombres donnent la force qui correspond aux positions indiquées dans la première et la deuxième colonne.

quent le frottement sera proportionnel à

$$P \left(\cos c \mp \frac{\sin^2 c}{\sqrt{n^2 - \sin^2 c}} \right).$$

On doit employer le signe inférieur après que la tige est devenue tangente au cercle. Le frottement additionnel ne sera donc jamais plus grand que $\frac{Pd}{16r}$, où d représente le diamètre de l'arbre, et r le rayon de la manivelle, le frottement étant supposé le huitième de la pression.

On peut trouver le rapport ci-dessus en construisant la figure, car lorsque CG représente la pression, FD exprimera la force dans la direction de la manivelle, et CF sera l'effort supporté par l'axe.

Parallélogrammes.

488. Le dernier moyen de transmettre le mouvement d'une tige de piston au balancier qui nous reste à décrire s'appelle *parallélogramme*. La découverte en est due à Watt, qui donna une courte notice de ses essais sur ce sujet dans la *Mécanique philosophique* de Robison ; mais la théorie en a été plus particulièrement étudiée par M. de Prony. Je ne traiterai cette matière que très-brièvement, sous le rapport de la pratique seule, en me bornant à indiquer les meilleures proportions.

Il y a deux cas que j'examinerai séparément, pour plus de simplicité, mais qu'on emploie généralement à la fois dans la même machine.

489. *Premier cas.* Deux barres AB, CD, pl. XII, fig. 4, ayant un axe à l'une de leurs extrémités, autour duquel elles peuvent tourner, et l'autre extrémité étant attachée à une troisième barre BD, par une charnière, il existe un point E sur la barre de jonction, qui décrit à peu près une ligne droite. Le mouvement rectiligne pour la pompe à air s'obtient souvent de cette manière : comme ce mouvement n'est pas parfaitement rectiligne, il est bon de rechercher le point où il le devient le plus.

490. Dans des appareils régulateurs de cette espèce, il est très-important que l'effort sur les pièces ne change pas leur direction pendant le mouvement ; cette condition une fois remplie, on aura moins de difficulté à les construire, de manière qu'ils marchent avec régularité. Le balancier AB et la bride CD devront être à peu près dans une position horizontale vers le milieu de la course du piston, et afin que l'effort ne change pas leur direction, de manière à imprimer des secousses à leur axe, la barre BD ne devra pas dépasser la verticale à la fin de chaque course. Pour la limiter ainsi, nous supposerons que la barre, telle qu'elle est figurée par les lignes ponctuées, soit exactement verticale, ou qu'elle coïncide avec la direction de la tige qu'elle guide, à chaque fin de la course.

Lorsque $AB = DC$, le point E occupe le milieu de la longueur de la barre BD ¹.

491. RÈGLE. Quand AB et DC sont dans un tout autre rapport, par exemple, si $\frac{AB}{DC} = \frac{n}{m}$, alors du nombre n retranchez la moitié de la racine carrée de quatre fois son carré diminué de 1; ensuite, du nombre m retranchez aussi la racine de quatre fois son carré diminué de 1.

Divisez ensuite le premier résultat par la somme des deux, multipliez le quotient par la longueur BD, et vous obtiendrez la distance du point E au point B.

Exemple. Soit $\frac{AB}{CD} = \frac{2}{3}$; alors on aura

$$2 \times 2 \times 4 = 16 \quad \text{et} \quad 16 - 1 = 15,$$

dont la racine carrée est 3,873 : la moitié de ce nombre est 1,9365. Ensuite, $2 - 1,9365 = 0,0635$; ce qui donne le premier ré-

¹ Soient AB et CD les deux bras, BD la tige qui les réunit, et E le point où l'on doit suspendre la tige du piston, dont le mouvement aura lieu suivant *bd*. Posons

$$AB = ns, \quad DC = ms, \quad BD = l,$$

et soit s la longueur de course de la tige du piston, laquelle est égale à la corde de l'arc décrit par la barre AB. Appelons x le sinus versé de cet arc, et v le sinus versé de l'arc décrit par l'extrémité D de la bride, alors $ab = x + v$, somme de ces sinus versés,

et $x + v : x :: l : BE$;

d'où $BE = \frac{lx}{x + v}$.

Mais en vertu d'une propriété du cercle, nous avons

$$v = s(m - \sqrt{m^2 - 0,25}) \quad \text{et} \quad x = s(n - \sqrt{n^2 - 0,25});$$

ce qui donne, en substituant ces valeurs,

$$BE = \frac{l(n - \sqrt{n^2 - 0,25})}{(m - \sqrt{m^2 - 0,25}) + (n - \sqrt{n^2 - 0,25})}.$$

Lorsque $m = n$, ou $AB = CD$, on trouve

$$BE = \frac{1}{2} l.$$

sultat. D'un autre côté,

$$3 \times 3 \times 4 = 36 \quad \text{et} \quad 36 - 1 = 35,$$

qui a pour racine carrée 5,916, dont la moitié est 2,958. Enfin,

$$3 - 2,958 = 0,042 \quad \text{pour le second résultat ;}$$

ce qui donne

$$\frac{0,0635}{0,0635 + 0,042} = 0,602.$$

Ainsi la longueur de la barre BD, multipliée par la fraction 0,602, sera la distance du point E au point B, lorsque $\frac{AB}{CD} = \frac{2}{3}$; ou bien si le point E est donné, BE divisé par 0,602, exprimera la longueur BD de la barre ou la distance entre les deux points de jonction B et D. Les parallélogrammes des machines figurées dans les planches XIII et XXIII en présentent des exemples.

492. *Second cas.* A l'extrémité d'un balancier qui se meut autour du point A, fig. 5, pl. XII, se trouvent trois barres plus petites qui forment, avec une partie de la première, le parallélogramme BDGF ; une autre barre DC, qui se meut autour du centre C, est fixée à l'angle inférieur D du parallélogramme ou au plus éloigné du centre C, autour duquel la barre se meut. Si l'on suspend la tige du piston à l'autre angle inférieur G du parallélogramme, son mouvement sera à peu près rectiligne dans la direction GH.

Dans le but de donner aussi à l'effort la même direction pendant toute la course, je me déterminerais à préférer la construction qui donnerait aux barres BD et FG la position verticale aux deux extrémités de la course : ce n'est pourtant pas ce que l'on fait ; car on place, en général, la ligne de mouvement de la tige, de manière qu'elle divise en deux parties égales l'arc décrit par l'extrémité du balancier. Cette disposition augmente un peu la légère tendance du mouvement à dévier de la ligne droite, et produit cet effet dans deux points de la course, au lieu d'un, ce qui cause une action irrégulière ; mais la différence à cet égard

n'affecte pas le résultat des règles, quant à la longueur des brides, etc. Dans tous les cas, excepté dans celui où la bride DC et la barre parallèle DG sont de même longueur, la déviation croît en proportion de l'angle que décrit le balancier; ainsi, les balanciers qui auront des barres parallèles courtes seront limités dans l'étendue de leurs mouvements angulaires : ce mouvement ne devra pas dépasser, en général, 20 degrés, et c'est à peu près ce qui doit avoir lieu quand la distance de l'extrémité F du balancier au centre de mouvement A est à la longueur de la course Hf, comme 3 est à 2, et alors on trouvera la longueur de la bride par la règle suivante.

493. RÈGLE. Pour trouver la longueur de la bride quand la distance du centre de mouvement du balancier à son extrémité est à la moitié de la course du piston comme 3 est à 2, de trois fois la moitié de la course du piston retranchez trois fois la longueur de la barre parallèle, et multipliez la différence par la moitié de la longueur de la course; divisez le produit par 0,343146 fois la longueur de la barre parallèle, et le quotient ajouté à la longueur de la barre parallèle sera la longueur de la bride ¹.

¹ Soient $b =$ la longueur AF du balancier, en partant du centre du mouvement;

$c =$ la longueur de la barre parallèle DG;

$r =$ la longueur de la bride DC;

$v =$ le sinus versé de l'angle décrit par la bride;

$a =$ la moitié de l'angle décrit par le balancier;

Supposons que la bride puisse être horizontale lorsque le balancier est dans la position horizontale (cela ne peut avoir lieu qu'à peu près); alors

$$(b-c) \sin a = \sqrt{2rv - v^2} =$$

la moitié de la corde de l'arc décrit par l'extrémité D de la bride. Mais

$$v = c(1 - \cos a);$$

d'où, en substituant,

$$(b-c)^2 \sin^2 a = 2rc(1 - \cos a) - c^2(1 - \cos a)^2,$$

Lorsque la barre parallèle et la longueur de la course sont comme 2 est à 3, la bride sera égale à la barre parallèle.

Exemple. Soit la longueur de la course $fH = 2^m,4$, la moitié sera $1^m,2$; soit la longueur de la parallèle $DG = 0^m,9$, on aura

$$\begin{aligned} 3 \times 1^m,2 &= 2 \times 0,9 = 1,8, \\ 1,8 \times 1,2 &= 2,16. \end{aligned}$$

Ce nombre, divisé par $0,9 \times 0,343146 = 0,30883$, devient

$$\frac{2,16}{0,30883} = 6,994.$$

Ajoutant la longueur de la barre parallèle, qui est de $0^m,9$, nous aurons $7,894$ pour la longueur de la bride DC.

J'ai choisi pour exemple le cas d'une barre parallèle courte, pour faire voir combien, dans ce cas, la bride doit être longue.

et en réduisant,

$$r = \frac{(b^2 - 2bc)(1 - \cos^2 a)}{2c(1 - \cos a)} + c.$$

Lorsque $b = 2c$, le premier terme du second membre disparaît, et il reste $c = r$ c'est le seul cas où la longueur de r ne varie pas avec l'accroissement de l'angle. Si l'on représente par s la moitié de la longueur de la course, on aura

$$1 - \cos^2 a = \frac{s^2}{b^2},$$

et en substituant,

$$r = \frac{(b - 2c)s^2}{2bc(1 - \cos a)} + c.$$

C'est la formule qui convient lorsque l'angle est déterminé; mais lorsqu'il ne l'est pas, on a

$$r = \frac{(b - 2c)s^2}{2c(b - \sqrt{b^2 - s^2})} + c.$$

Si la longueur du balancier entre le centre du mouvement et le point F est une fois et demie la longueur de la course, on aura

$$r = \frac{(3s - 2c)s}{0,343146 \times c} + c.$$

La longueur des barres DB et GF est de 4 à 5 dixièmes de celle de la course, suivant la convenance et l'espace réservé à la machine ; mais plus on peut la faire longue, moins elle produit d'effort oblique dans le mouvement. La distance verticale entre le centre du mouvement du balancier et celui de la bride sera exactement égale à la longueur des barres de jonction.

494. RÈGLE II. Pour trouver la longueur de la bride quand on ne se donne pas de proportion entre la longueur de la course et le rayon du balancier, il faut d'abord, de la longueur du rayon de ce dernier, soustraire le double de la longueur de la barre parallèle, et multiplier la différence par le carré de la moitié de la longueur de la course ; ensuite, prendre la racine carrée de la différence entre le carré de la longueur du rayon du balancier et le carré de la moitié de la longueur de la course, soustraire cette racine carrée de la longueur du rayon du balancier, et multiplier la différence par deux fois la longueur de la barre parallèle. Divisez le premier nombre obtenu par le second, ajoutez au quotient la longueur de la barre parallèle, et vous aurez la longueur de la bride.

Exemple. Supposons que le rayon du balancier soit de 3^m,6, la longueur de la course de 1,8, la longueur de la barre parallèle de 1^m,5 : dans ce cas, la première opération donnera

$$3,6 - 2 \times 1,5 = 0,6,$$

qui, multiplié par le carré de la moitié de la longueur de la course, donne

$$0,9 \times 0,9 \times 0,6 = 0,486.$$

Pour la seconde opération, il faut, du carré de 3,6, retrancher le carré de 0,9 ; ce qui donne

$$12,96 - 0,81 = 12,15,$$

dont la racine carrée est 3,486,

$$\text{et } 3,6 - 3,486 = 0,114.$$

Multipliant par deux fois 1,5, on a

$$3 \times 0,114 = 0,342.$$

La longueur de la bride sera donc égale à

$$\frac{0,486}{0,342} + 1,5 = 1,421 + 1,5 = 1,921.$$

495. Les proportions du parallélogramme une fois déterminées par les règles précédentes, le point d'attache sur BD, où doit être fixée la tige de la pompe à air, s'obtiendra facilement en tirant une ligne de G en A, fig. 2 ; la tige sera attachée au point d'intersection E. On peut trouver sa distance au point B à l'aide de la proportion

$$AF : FG :: AB : BE = \frac{AB \times FG}{AF}.$$

Soit, par exemple, AF = 4 mètr., FG = 1 mètr. et AB = 2^m,2, on aura

$$BE = \frac{2,2 \times 1}{4} = 0^m,55.$$

Dans tout autre cas plus compliqué, tel que la machine de Woolf à deux cylindres, les points de liaison des tiges des pistons doivent être aussi sur la ligne AG, comme dans les exemples de la pl. XII ; ou bien, le point de suspension de la tige de la pompe à air ayant été déterminé par la règle (art. 491), le point pour la tige du piston s'obtiendra en faisant passer une ligne par les points A et E, fig. 4, pl. XII, et la prolongeant jusqu'au point G, par lequel doit passer la tige du piston. Menant GF parallèle au tirant BD, et GH parallèle au balancier, BE, GH seront les articulations du parallélogramme, et G le point auquel la tige du piston doit être suspendue. Pour la construction du parallélogramme des machines destinées aux bateaux, fig. 1, pl. XII, il conviendra d'employer la règle qui se rapporte au premier cas, comme cela résulte évidemment de la figure et de la conclusion de l'exemple (art. 491).

De la force des diverses parties des machines à vapeur.

496. Dans l'examen de cette branche importante de mon su-

jet, je me propose d'exposer les méthodes les plus simples que je pourrai trouver, et celles qui sont le plus facilement applicables dans la pratique. Le fondement de cette recherche doit être la force de la vapeur dans la chaudière, ou plutôt la plus grande force qu'elle puisse atteindre sans s'échapper par la soupape de sûreté. Quoiqu'il soit toujours à craindre que la soupape de sûreté ne soit pas dans un état parfait, nous pouvons nous précautionner contre cet inconvénient en supposant que la soupape soit chargée d'un poids double de celui qu'elle supporte réellement. Ainsi, le poids sur la soupape étant de $0^{\text{kil}},55$ par centimètre circulaire, on supposera qu'il est de $1^{\text{kil}},10$; et en y ajoutant la pression atmosphérique, qui est de $0^{\text{kil}},81$, on aura $1^{\text{kil}},91$ pour la force de la vapeur ou la pression qui peut faire rétrograder la machine.

497. Dans le cas des bateaux à vapeur, on doit tenir compte d'un plus grand excès de force, parce que les accidents sur mer ont des suites plus terribles. Une bonne machine doit être établie sur la règle suivante. La limite de la force de la vapeur doit être considérée comme étant le double de la charge, par centimètre circulaire de la soupape, augmentée de la pression atmosphérique. Ainsi, le poids sur la soupape de sûreté étant de $0^{\text{kil}},55$, par centimètre circulaire, la pression atmosphérique de $0^{\text{kil}},81$, la somme sera $1^{\text{kil}},36$, dont le double, ou $2^{\text{kil}},72$, donnera la valeur de la plus grande pression sur le piston, par centimètre circulaire.

Si les parties de la machine sont calculées pour résister à cette pression lorsque la machine est entraînée en sens inverse par un excès de résistance, elle n'a pas à en souffrir, excepté quand le moment d'impulsion d'un volant trop pesant rend nécessaire de se ménager une résistance contre la force impulsive.

498. Les données pour la résistance des matériaux consistent dans l'effort qu'ils supportent sans éprouver de dérangement permanent dans leurs parties; cet effort est environ un tiers de leur force de cohésion ¹.

¹ Voyez l'*Essai pratique sur la force du fer fondu*, par Tredgold, sect. V.

499. Le frottement d'une machine doit être ajouté à sa puissance lorsque l'on recherche la force des pièces, parce que lorsque la résistance à vaincre vient à changer le mouvement de la machine, elle doit aussi surmonter le frottement des parties intermédiaires ; mais quand la force de la vapeur est considérée comme double de la pression que détermine la soupape de sûreté, le frottement peut être négligé.

500. L'effort sur chaque partie mobile de la machine à vapeur se déduit aisément du nombre de révolutions ou de vibrations qu'elle fait pour chaque double course du piston ; l'effort est en raison inverse du nombre de révolutions ou de vibrations multipliées par le diamètre du cercle ou par la corde de l'arc décrit par le point sur lequel agit la force. Ainsi, si une roue a 2 mètres de diamètre, et fait trois révolutions pendant que le piston donne un coup, et si la longueur de la course est de 1^m,5, on aura $2 \times 3 : 1,5 ::$ la pression sur le piston : l'effort sur la

dent de la roue $= \frac{1,5}{6}$, ou le quart de la pression sur le pis-

ton. L'effort ainsi trouvé peut être considéré comme un poids appliqué au point où le mouvement s'opère. On peut de même considérer comme unité la période du mouvement de la partie agissante d'une machine, et par la comparaison des cordes des arcs décrits dans le même temps et des révolutions achevées dans le même intervalle, on trouvera l'effort en fonction de la force nécessaire pour vaincre la résistance au point où se fera l'action.

501. Lorsque la machine ne communique son action qu'en un seul point, la méthode à employer pour déterminer la force des parties qui la composent consiste à prendre la force de la machine comme la mesure de l'effort à chaque point, et à calculer chaque partie de telle sorte qu'elle puisse soutenir un changement inverse de mouvement ; mais si l'action de la machine se distribue sur divers attirails de mécanismes, alors sa puissance ne peut être la mesure de force qu'au point où les attirails s'embranchent ; et pour chaque attirail séparé, le plus grand effort

possible au point où l'action a lieu sera pris pour la mesure de la force de ses parties.

Comme il y a un grand avantage à raisonner par des formules générales, et à en déduire des règles accompagnées d'exemples, nous adopterons cette marche.

502. Soit D le diamètre du piston en centimètres, L la longueur de la course en mètres, et P le double de la force élastique de la vapeur dans la chaudière, en kilogrammes par centimètre circulaire

Soit aussi l la distance du centre du mouvement au centre de l'effort en mètres, d l'épaisseur ou le diamètre, e la largeur en centimètres, f la force de cohésion d'un centimètre carré au point où le métal commence à céder, et R le rayon d'une roue.

La pression sur le piston est D^2P en kilogrammes.

503. *Force des tiges lorsque l'effort agit dans le sens de la tension seule.* Il faut admettre, dans chaque cas de cette espèce, la possibilité d'une déviation de l'axe de la tige d'un sixième de son diamètre. Lorsqu'il en est ainsi, la résistance est représentée par

$$\frac{d^2 f}{2 \times 1,27}, \quad \text{ou à peu près } \frac{d^2 f}{2,5};$$

par conséquent,

$$D^2 P = \frac{d^2 f}{2,5}, \quad \text{d'où } d = D \left(\frac{2,5P}{f} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Pour le fer forgé, $f = 1550$; par conséquent,

$$d = \frac{D}{2,5} \sqrt{P}.$$

Cette règle s'applique aux tiges qui ne doivent subir qu'un effort de tension : telles sont les tiges de piston des machines à simple effet et les tiges des pompes.

* En mesures anglaises,

$$d = \frac{D}{84} \sqrt{P}.$$

Pour les tringles plates, cette formule devient

$$de = \frac{D^2P}{675} ;$$

de représentant en centimètres la largeur multipliée par l'épaisseur.

504. RÈGLE. Multipliez le diamètre du piston en centimètres par la racine carrée du double de la force élastique de la vapeur dans la chaudière en kilogrammes par centimètre circulaire ; le produit, divisé par 25, donne le diamètre de la tige en centimètres.

Exemple. Si la force de la vapeur est de 1^{kil},2 par centimètre circulaire, le diamètre du cylindre de 140 centimètres, la racine carrée de 2,40 est 1,54, et l'on a

$$d = \frac{140 \times 1,54}{25} = 9^{\text{cent}},3.$$

Pour la pression atmosphérique, cette épaisseur se réduit au seizième du diamètre.

505. *Force des tiges alternativement tirées et comprimées.* Dans la compression des tiges, la tendance à la rupture ou à la flexion augmente avec la courbure ; mais si la longueur ne dépasse pas trente-six fois le diamètre, on commettra une erreur très-faible en supposant dans tous les cas le même degré de déflexion ; et si nous tenons compte de la plus grande déviation possible, par suite d'un mauvais ajustement, c'est-à-dire de la moitié du diamètre de la tige, avec cette simplification, nous trouvons à peu près

* L'auteur donne, en mesures anglaises,

$$de = \frac{D^2P}{8400} ;$$

mais cette formule, pour être conséquente avec la précédente, devrait être

$$de = \frac{D^2P}{9000}.$$

$$D^2P = \frac{df}{8,75}, \quad \text{ou} \quad d = D \left(\frac{8,75P}{f} \right)^{\frac{1}{2}};$$

pour le fer forgé, $f = 1250$ kilog., et

$$d = \frac{D}{12} \sqrt{P};$$

pour la fonte, $f = 1150$, et

$$d = \frac{D}{11,5} \sqrt{P};$$

pour l'acier trempé, $f = 3500$, et

$$d = \frac{D}{20} \sqrt{P}.$$

Ces règles peuvent s'appliquer aux tiges des pistons des machines à double effet, aux tiges des parallélogrammes, à celles de la pompe à air et de la pompe foulante, et à quelques autres; et si l'on augmente P dans le rapport du rayon au sinus du plus grand angle que fait une bielle avec la direction de la force, on pourra l'appliquer aux bielles.

506. RÈGLE. Multipliez le diamètre du piston en centimètres par la racine carrée du double de la pression de la vapeur par centimètre circulaire, et, divisant le produit par 12 pour le fer forgé, vous obtiendrez le diamètre de la tige, exprimé en centimètres. Pour la fonte, le diviseur sera 11,5, au lieu de 12, et pour l'acier, ce sera 20.

1^{er} *Exemple*. La force de la vapeur étant de 1^{kil},2 par centimètre circulaire, et le diamètre du cylindre de 2 mètres, celui de la tige du piston, si elle est en fer forgé, sera

$$\frac{200 \sqrt{2,4}}{12} = 25^{\text{cent}},8.$$

2^o *Exemple*. La force de la vapeur étant de 4 atmosphères = 3^{kil},25 par centimètre circulaire, et le diamètre du cylindre

de 28 centimètres, la tige en fer du piston aura pour diamètre

$$\frac{28 \sqrt{6,5}}{12} = 5^{\text{cent}},95.$$

Si la tige est d'acier, le diamètre serait

$$\frac{28 \sqrt{6,5}}{20} = 3^{\text{cent}},57.$$

3° *Exemple.* La force de la vapeur étant de 1^{kil},2 par centimètre circulaire, et le diamètre du piston de 6 décimètres, le diamètre d'une bielle en fonte ne devra pas être moindre que

$$\frac{60 \sqrt{2,4}}{11,5} = 8 \text{ centimètres.}$$

Le milieu présente ordinairement plus de force dans le sens de la largeur, et l'on doit, dans tous les cas, augmenter le diamètre d'un dixième de plus que vers les extrémités.

507. Pour la tige de la pompe à air, on peut prendre la pression atmosphérique et le diamètre de la pompe à air, au lieu de la tension de la vapeur et du diamètre du cylindre. Les barres du parallélogramme doivent être les trois septièmes du diamètre de la tige du piston, excepté dans le cas des machines à vapeur pour les bateaux, lorsqu'il y a une pression latérale. Les bielles qui communiquent le mouvement des traverses au balancier et aux manivelles doivent avoir les sept dixièmes du diamètre de la tige du piston.

508. *De la force des balanciers, des manivelles, etc.* On peut admettre en principe qu'un balancier d'épaisseur uniforme ne peut pas avoir une épaisseur moindre que $\frac{1}{16}$ de sa hauteur sans être sujet à se déverser ; d'ailleurs, on ne pourrait se fier à la solidité d'une pièce coulée en fonte qui n'aurait pas en épaisseur le seizième de la hauteur. Dans le cas où la vitesse est la même que celle du piston ¹, on a

$$D^3Pl = 180 d^3e ; \searrow$$

¹ *Practical Essay on Strength of iron*, art. 116, ou la traduction.

et lorsque $16e = d$, et $l = nD$, on aura

$$d = D \left(\frac{16Pn}{180} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

Dans cette formule¹, $D =$ le diamètre du piston en centimètres, $d =$ la hauteur du balancier en centimètres, et son épaisseur est le seizième de sa hauteur ; n représente le nombre de fois que le diamètre est contenu dans la longueur comprise entre le centre du mouvement et le point où s'applique la force, et P est le double de la force de la vapeur dans la chaudière, exprimée en kilogrammes par centimètre circulaire. La hauteur aux extrémités sera moitié de celle au centre du mouvement ; l'épaisseur sera uniforme. On donne plus de force en faisant varier la section de manière à augmenter l'épaisseur sur les bords, à raison d'un neuvième de la hauteur, jusqu'à ce que la largeur de la partie rentrée en allant vers les extrémités soit réduite à un seizième de la largeur totale.

Pour le fer forgé, il faut mettre 204 à la place de 180, et pour le bois, il faut remplacer ce nombre par 54.

509. 1^{er} *Exemple. Balanciers.* Le balancier d'une machine doit avoir, depuis le point où agit le piston jusqu'au centre du mouvement, une longueur égale au triple du diamètre du cylindre. Supposons que la tension de la vapeur dans la chaudière soit égale à 1^{kil},2 par centimètre circulaire ; le double est 2^{kil},4. Le diamètre du piston étant de 60 centimètres, on aura pour l'épaisseur verticale

$$d = D \left(\frac{16Pn}{180} \right)^{\frac{1}{3}} = D \left(\frac{16 \times 2,4 \times 3}{180} \right)^{\frac{1}{3}} = 0,86 \times D = 51^{\text{cent}},6.$$

L'épaisseur du milieu sera de 3^{cent},2, et celle des bords sera égale à 5^{cent},7.

¹ En mesures anglaises, elle revient à

$$d = D \left(\frac{1,541n}{212} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

On trouverait pour le fer forgé $d = 0,83D$, et l'épaisseur serait le seizième de l'épaisseur verticale.

Pour le bois, on aurait $d = 0,83D$; mais l'épaisseur serait un quart de la largeur.

510. *Manivelles*. Le point de jonction d'une manivelle à l'arbre doit être plus fort que ce dernier, et la grosseur de la manivelle en ce point doit être 1,5 fois le diamètre de l'arbre. Ainsi, SD étant le diamètre, l'épaisseur de la manivelle sera de $1,5SD$; mais puisque (art. 508) $D^2Pl = 180d^2e$, nous aurons

$$e = \frac{Pl}{2,25S^2 \times 180} = \frac{Pl}{405S^2}.$$

2° *Exemple*. L'arbre d'une manivelle décrit un cercle d'un diamètre égal à $0,31$ de celui du cylindre; la tension de la vapeur dans la chaudière étant de $1^{kil},2$ par centimètre circulaire, ce qui revient à dire que $P = 2^{kil},4$, et le rayon de la manivelle étant de 66 centimètres, on demande la largeur de cette manivelle à son point de jonction avec l'arbre. On aura, dans le cas dont il s'agit,

$$e = \frac{Pl}{405S^2} = \frac{2,4 \times l}{405 \times (0,31)^2} = 0,006 \times l.$$

Or, $l = 66$ centimètres; donc $e = 4$ centimètres environ; et l'épaisseur sera

$$1,5 \times 0,31 \times 66 = 31 \text{ centimètres.}$$

511. *Rayons des roues*. Les rayons des roues ne doivent être examinés que sous le rapport de leur force; et si le contour est d'une force égale, la roue doit avoir six bras, dans tous les cas où elle est de grandeur suffisante pour qu'on ait recours aux règles pour trouver sa force. Avec cette condition, nous avons, en désignant le rayon par R ,

$$2D^2PR = 180 \times 6d^2e, \text{ ou } D^2PR = 3 \times 180d^2e.$$

Si les rayons ont un tiers de l'épaisseur de la roue, et qu'on leur donne l'excès de force nécessaire pour l'effort latéral, on

aura

$$\frac{D \cdot PR}{180} = d^2 e, \quad \text{ou} \quad d = D \sqrt{\frac{PR}{180e}}$$

Lorsque le rayon $R = 1$ et $P = 2^{\text{kil}},4 =$ le double de la pression de la vapeur dans la chaudière, on a

$$d = \frac{D}{\sqrt{75e}}$$

Ces dimensions se trouvent calculées dans la table de l'art. 513, avec les proportions des dents.

512. Il sera très-commode de présenter dans un tableau la forme des dents, avec une correction pour la courbure dans la détermination de leur largeur, correction qui ne se trouve pas dans la formule que j'ai donnée dans mon *Traité sur la Fonte*. La première colonne indique la pression en kilogram. exercée sur les dents; la deuxième, le nombre de chevaux auquel équivaut cette force, la vitesse étant de 1 mètre par seconde; la troisième colonne, l'intervalle entre les milieux des dents consécutives; la quatrième, l'épaisseur; la cinquième, la largeur; la sixième indique la largeur la plus grande du milieu du rayon, dans le sens du mouvement de la roue, lorsque le rayon est de 1 mètre. En multipliant les nombres de cette colonne par la racine carrée du rayon en mètres, on aura les dimensions qui conviennent à toute autre roue. La septième colonne donne l'épaisseur de la nervure qui fortifie le rayon, et la huitième, le diamètre du cylindre, quand la force de la vapeur dans la chaudière équivaut à une colonne de mercure de 90 centimètres, et que les dents se meuvent avec la même vitesse que le piston. Pour toute autre vitesse, on trouvera la pression sur les dents, comme l'indique l'article 500.

513. Table de la force, etc., des dents et des rayons des roues.

PRESSION sur les dents en kilogram.	FORCE en chevaux, la vitesse étant de 1 mètre par seconde	DENTS DES ROUES.			ROUES AVEC SIX RAYONS.		DIAMÈTRE du cylindre en c. mètr., pour ma- chine à basse pres- sion, les dents ayant même vi- tesse que le piston.
		Intervalle entre les milieux de deux dents consécutives, en c. mètr.	Épaisseur en c. mètr.	Largeur en c. mètr.	Largeur des rais en c. mètr. pour 1 mètr. de rayon.	Épaisseur du renflement en c. mètr.	
10	$\frac{1}{2}$	0,65	0,50	2,00	4,20	1,21	5,08
40	$\frac{1}{2}$	1,27	0,60	3,27	6,00	2,00	9,40
80	1	2,00	0,90	4,54	8,00	3,00	14,00
158	2	2,54	1,20	5,81	8,50	3,90	18,80
244	3	3,17	1,50	7,08	9,70	4,85	23,56
356	4	3,80	1,80	8,35	10,67	6,50	28,70
450	5	4,43	2,10	9,62	11,64	6,80	55,00
580	7	5,08	2,40	10,89	12,12	8,25	57,60
750	9	5,71	2,70	12,16	15,10	8,75	42,16
870	10	6,34	3,00	13,43	15,80	9,70	46,70
1100	13	6,97	3,50	14,70	14,50	10,67	51,55
1210	15	7,62	3,60	15,97	15,50	11,64	56,40
1500	18	8,25	3,90	17,24	16,00	12,60	60,96
1750	21	8,88	4,20	18,51	16,50	15,68	66,00
2200	24	9,51	4,50	19,78	17,00	14,06	70,15
2500	27	10,16	4,80	20,85	17,50	16,50	75,00
2660	31	10,79	5,10	22,12	18,00	17,00	80,00
2840	34	11,42	5,40	23,39	18,50	17,95	84,60
3220	38	12,05	5,70	24,66	19,00	19,00	88,90
3500	42	12,68	6,00	25,93	19,50	19,40	94,00

514. La force des tourillons du balancier se détermine par la formule $PD^2 = 64d^3$, qui se réduit à

$$d = \frac{D \sqrt{P}}{8}$$

Leur longueur ne sera pas moins des huit dixièmes du diamètre. Dans le cas d'une machine à basse pression, le double de la tension est de 2 kilogrammes par centimètre circulaire, c'est-à-dire que $P = 2$, et alors le diamètre des tourillons est d'environ

¹ Essai sur la Force du fer fondu, art. 159.

un sixième de celui du cylindre. Pour les tourillons des bielles, la portée étant double, l'effort se trouve réduit de moitié, et l'on aura

$$d = \frac{D \sqrt{P}}{11,5}.$$

Dans le cas de basse pression, $d = \frac{D}{8}$.

515. *Force des arbres tournants.* On suppose que les arbres sont soutenus de manière à rendre l'effort latéral le plus faible possible; dès lors, on ne doit considérer que la résistance à la torsion, et comme aucune partie de l'arbre ne doit être moindre que celle des collets ou des pivots, en laissant un sixième pour l'usure, on aura¹

$$RD^3P = 67d^3.$$

Lorsque l'arbre fait un tour pendant que le piston donne deux coups, et lorsque le rayon $R = nD$, on a pour le diamètre exprimé en centimètres

$$d = D \left(\frac{nP}{67} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

S'il fait N tours pendant que le piston donne deux coups, nous aurons (art. 500)

$$d = D \left(\frac{nP}{67N} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

Pour le fer forgé, le diviseur serait 76, au lieu de 67².

Exemple. Quel serait le diamètre d'un arbre en fonte si le rayon de la manivelle avait une longueur égale au diamètre du

¹ *Essai sur la Force du fer fondu*, art. 227, R étant exprimé en centimètres.

² En mesures anglaises, la formule est

$$d = D \left(\frac{nP}{960N} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

cylindre, la tension de la vapeur dans la chaudière étant de 1 kilogramme par centimètre circulaire, le diamètre du piston de 90 centimètres, et si l'arbre faisait une révolution pendant que le piston donnerait deux coups ? Dans ce cas, n et $N = 1$, et

$$d = D \left(\frac{P}{67} \right)^{\frac{1}{3}} = D \left(\frac{2}{67} \right)^{\frac{1}{3}};$$

ce qui donne

$$d = 0,31 D = 27^{\text{cent}},9.$$

De la force des tuyaux et des cylindres.

516. L'épaisseur des tuyaux et des cylindres métalliques se détermine en ayant égard à la perfection de la fonte plutôt qu'à la force; cependant il est essentiel d'indiquer les proportions qui conviennent à une force donnée, afin d'éviter toute méprise à cet égard.

Les données nécessaires sont, 1° l'effort de traction que peut supporter 1 centimètre carré de métal sans éprouver d'altération durable, à une température déterminée; 2° la pression de la vapeur par centimètre circulaire, en tenant compte d'un excédant pour le cas d'un accroissement imprévu; 3° le diamètre du cylindre. Je conseille de prendre le double de la force de la vapeur lorsqu'elle s'échappe de la chaudière pour la soupape de sûreté.

Nous pouvons considérer le cylindre comme présentant une égale résistance dans toute la longueur; dès lors, si l'on prend l'effort sur 1 centimètre de la longueur, cet effort sera égal au diamètre exprimé en centimètres, multiplié par la plus grande force sur 1 centimètre carré, et la résistance sera le double de l'épaisseur du cylindre multiplié par un quart de la limite de l'effort de traction du métal, la traction pouvant être répartie inégalement sur la partie résistante; on aura par conséquent la règle suivante :

517. RÈGLE. Trouver l'épaisseur de métal qu'il faut donner aux tuyaux ou aux cylindres pour soutenir un effort déterminé, en supposant que la température soit partout la même.

Multipliez 2,54 fois le diamètre intérieur du cylindre par la plus grande pression de la vapeur sur 1 centimètre circulaire ; divisez par l'effort de traction que peut supporter le métal sans altération : le résultat donnera l'épaisseur en centimètres.

Exemple. On veut déterminer l'épaisseur d'un cylindre de fonte ayant 150 centimètres de diamètre, la pression n'excédant pas 0^{kil},25 par centimètre circulaire en sus de la pression atmosphérique. Dans ce cas, le double de la force est de 2^{kil},1 par centimètre circulaire, et la résistance de la fonte étant de 1060 kilogrammes par centimètre carré, on aura pour l'épaisseur

$$\frac{2,54 \times 150 \times 2,1}{1060} = 0^{\text{cent}},75.$$

518. S'il n'y avait à considérer que la force directe, nous voyons qu'il suffit de donner au cylindre ou au tuyau une très-faible épaisseur ; mais la pression se trouve souvent considérablement augmentée par l'inégalité de dilatation. Si ε représente l'extension que peut supporter le métal sans altération, e son épaisseur, et d le diamètre du tuyau, nous aurons $\frac{2\varepsilon d}{e}$ pour la plus grande dilatation, dont un côté d'un tuyau puisse excéder l'autre, et qui serait ca , c étant l'excès de chaleur, et a l'allongement ou la dilatation pour un degré de température.

Pour la fonte en fer, on a

$$\varepsilon = \frac{1}{1200} \quad \text{et} \quad a = \frac{1}{56000} :$$

donc la plus grande augmentation de chaleur que puisse supporter le métal sans altération durable sera

$$c = \frac{56000 \times 2d}{1200e} = \frac{60d}{e}.$$

519. Nous supposons ici que la chaleur n'agit que sur un seul point ; mais en général, ou plutôt dans tous les cas, une portion très-grande de surface est directement affectée par la chaleur. Dans ce cas, l'effet de dilatation sera à peu près double, ou

donnera

$$c = \frac{30d}{e}.$$

Dans le cas des tuyaux et des cylindres, la plus grande différence de température n'excédera jamais 165°; et alors on a

$$\frac{165e}{30d} = \frac{5,5e}{d}$$

pour la force de cohésion que perd le cylindre dans le cas d'inégale dilatation.

En ajoutant cette expression à la première, nous aurons

$$e = \frac{2,54dp}{1060} + \frac{5,5e}{d};$$

d'où

$$e = \frac{dp}{420} \left(\frac{d}{d-5,5} \right)^1.$$

L'effet d'une dilatation irrégulière n'est sensible que dans les petits cylindres; dans le cas d'un cylindre de 150 centimètres de diamètre, on trouve que l'épaisseur serait de 0^{cent},75, et de 0^{cent},78 seulement, lorsqu'on introduit la correction pour la dilatation.

Pour les tuyaux ayant moins de 12 centimètres de diamètre, l'équation sera

$$e = \frac{dp}{420 (2,54 - 0,046d)}^2.$$

¹ En mesures anglaises,

$$e = \frac{dp}{6000} \left(\frac{d}{d-2,2} \right).$$

² En mesures anglaises,

$$e = \frac{dp}{6000 (1 - 0,046d)}.$$

M. Tredgold ne dit pas comment il déduit cette formule, qui ne semble pas une conséquence de la précédente.

M.

Dans les cylindres à vapeur, il s'y joint l'effet de l'usure, ainsi que d'autres causes d'efforts ; l'épaisseur doit au moins être double pour cette dernière cause, et être augmentée d'un centimètre, pour parer à l'usure du cylindre.

520. RÈGLE. Pour obtenir l'épaisseur d'un cylindre à vapeur, multipliez le quadruple de la force élastique de la vapeur en kilogrammes sur un centimètre circulaire, par le diamètre exprimé en centimètres, et divisez par 420. Le résultat sera multiplié par le diamètre, et divisé par le diamètre moins 5,5. Il faudra ajouter 1 centimètre pour l'usure.

1^{er} *Exemple.* On veut faire en fonte un cylindre de 60 centimètres, la tension de la vapeur ne devant pas excéder 0^{kil},25 par centimètre circulaire sur la soupape de sûreté, ou

$$0,8 + 0,25 = 1^{\text{kil}},05 \text{ pour la force élastique.}$$

On demande l'épaisseur du tuyau ; on aura

$$e = \frac{1,05 \times 4 \times 60}{420} = 0,60,$$

et

$$\frac{60}{60 - 5,5} \times 0,60 = 0,66.$$

Ajoutant 1 centimètre pour l'usure, l'épaisseur cherchée sera égale à 1^{cent},66.

2^e *Exemple.* On demande l'épaisseur d'un cylindre de fonte pour une machine à haute pression ayant 25 centimètres de diamètre, et la force de la vapeur étant de 3^{kil},5 par centimètre circulaire. On a dans ce cas

$$\frac{4 \times 3,5 \times 25}{420} = 0,8,$$

et

$$\frac{25 \times 0,8}{29 - 5,5} = 1 ;$$

à quoi ajoutant 1 centimètre, nous aurons

$$e = 2 \text{ centimètres}$$

pour l'épaisseur du cylindre.

521. *De la force des plaques pour résister à la pression de la vapeur ou à celle de tout autre fluide élastique.* La force d'une plaque est limitée par la courbure qu'elle prend sous la pression. Lorsque sa longueur l est égale à sa largeur b , la résistance est la même dans les deux sens ; mais il n'en est pas de même dans tout autre cas : la résistance dépend surtout de la courbure dans la direction la plus courte du support.

Il résulte des lois de la déflexion des corps que la résistance dans le sens de la longueur est représentée par $\frac{b^2}{l^2}$, et que $1 + \frac{b^2}{l^2}$ sera le coefficient par lequel il faudra multiplier la résistance dans la direction la plus courte, pour obtenir la résistance entière.

Lorsqu'une plaque est fixée par ses bords, la courbure diminue l'effort sur les parties résistantes, mais d'une faible quantité ; en se tendant dans sa position nouvelle, l'intérieur de la plaque est en partie comprimé, et la résistance à la tension ne s'étend guère qu'à un peu plus de la moitié de l'épaisseur, et varie comme la distance de la ligne neutre ; ainsi elle n'est que d'un quart de ef quand l'épaisseur n'est que d'un quart de centimètre, e étant l'épaisseur totale, et f la force de cohésion d'un centimètre carré. Pour les plaques rivées, on déduira $\frac{1}{3}$, et l'on aura

$$\frac{ef}{4} \times \frac{2}{3} = \frac{ef}{6} = \text{la résistance dans un sens,}$$

et $\left(1 + \frac{b^2}{l^2} \right) \frac{ef}{6} = \text{la résistance totale.}$

L'effort est proportionnel à la force qui s'exerce sur une partie donnée de la courbe, et qui se résout en une tendance à fendre la matière. z étant la portion de courbe, r le rayon de courbure ¹, on aura

$$z : r :: 1,27pz : x = 1,27pr = \text{l'effort,}$$

¹ La courbure est limitée par l'extension et la déflexion dans le sens de la

p étant la pression sur un centimètre circulaire : donc

$$1,27pr = \frac{ef}{6} \left(1 + \frac{b^2}{l^2} \right); \quad \text{d'où} \quad e = \frac{7,62pr}{f \left(1 + \frac{b^2}{l^2} \right)}.$$

Pour une plaque carrée ou circulaire, cette formule se change en celle-ci,

$$e = \frac{3,81pr}{f}.$$

Pour le fer forgé, quand on opère sous une basse pression, on a

$$e = 0,006r.$$

moindre dimension; et si nous supposons que l'action ait lieu entièrement par déflexion, nous aurons

$$e : 1 :: \frac{e}{2} : r = e \frac{e}{2}.$$

Par conséquent, dans ce cas,

$$\frac{1,27pe}{2e} = \frac{pf}{6} \left(1 + \frac{b^2}{l^2} \right); \quad \text{d'où} \quad p = \frac{\left(1 + \frac{b^2}{l^2} \right) f e}{3,81}.$$

Ainsi nous trouvons que la résistance d'une plaque est absolument indépendante de son épaisseur quand elle est ainsi tendue, mais que cette pression est limitée. Pour le fer forgé,

$$f = 1350 \quad \text{et} \quad e = \frac{1}{1400}; \quad \text{donc} \quad \frac{f e}{3,81} = 0,25,$$

et par conséquent le plus grand effort en kilogrammes, et par centimètre circulaire, qu'une plaque puisse supporter, sera représenté par

$$0,25 \left(1 + \frac{b^2}{l^2} \right).$$

Quand la plaque est carrée ou circulaire, on trouve 0kil,50 par centimètre circulaire, et 0kil,64 par centimètre carré. L'équation donne l'effort pour les autres proportions. Quand la longueur est très-grande, l'effort est de 0kil,25 par centimètre circulaire, et de 0kil,52 par centimètre carré.

Le cuivre supporte à peu près le même effort.

On tire de là cette conséquence importante, qu'on ne peut se servir avec sûreté de surfaces planes pour contenir de la vapeur à haute pression.

Les deux valeurs r et e sont exprimées en centimètres.

Lorsque la longueur est grande, comparativement à la largeur, ou que les joints des plaques ne sont pas disposés convenablement dans la même direction, prenez alors le diamètre, au lieu du rayon de courbure.

De l'excès de force propre à garantir la sûreté des chaudières.

522. La pression qui tend à rompre une chaudière est à peu près proportionnelle à la charge de la soupape de sûreté ; celle qui tend à l'écraser en la comprimant est égale à la pression atmosphérique. Dans le dernier cas, cet effort ne peut excéder cette pression ; dans le premier, l'excès de pression peut devenir considérable s'il y a quelque dérangement dans la soupape, et l'on doit prendre des précautions contre cet accident. Pour le prévenir, il est indispensable de donner un excès de force à la chaudière.

L'expérience, fondée sur les accidents qui ont eu lieu, fait admettre, en général, qu'il faut que la chaudière puisse supporter sans altération une pression égale à trois fois celle qui agit sur la soupape.

Cet excès de force paraît bien suffisant pour une chaudière ordinaire à basse pression. En effet, je pense qu'il suffirait de deux fois cette pression ; et, dans ce cas, il y aurait peu de chances d'accident si les soupapes étaient bien construites et tenues en bon état.

Cette augmentation de force serait insuffisante pour les chaudières à haute pression, parce qu'une chaudière ordinaire à basse pression contient dix fois le volume de la vapeur nécessaire pour une course du piston ; par conséquent, la vapeur peut s'accumuler pendant vingt coups de piston sans que la densité s'élève à trois fois celle qui est nécessaire pendant le travail, en supposant que la machine vint à être arrêtée par un accident de la soupape ; mais si la chaudière ne contenait que la quantité de vapeur nécessaire pour un coup, la pression deviendrait trois fois plus forte pendant que le piston ferait deux courses. Cette rapidité

d'augmentation de force ne laisse pas le temps d'examiner ni même d'ouvrir la soupape à propos, et le danger devient alors plus grand. Dans tous les cas, le temps pendant lequel la vapeur doit pouvoir s'accumuler ne doit pas être moindre que dans une chaudière ordinaire. D'ailleurs, pour une machine dans laquelle cet excès de force croîtrait si rapidement, la perte de vapeur à chaque variation de chaleur dans le foyer serait considérable, même dans le cas où la soupape agirait convenablement ; et, en conséquence, on est toujours tenté d'augmenter la charge de la soupape au delà du point convenable. Pour avoir dans toutes les circonstances le même degré de sûreté en cas d'arrêt de la machine, il faut que l'excès de force du métal soit en raison inverse de l'espace qui est réservé à la vapeur dans la chaudière.

Il est important encore d'examiner ce sujet sous le rapport du danger provenant de l'action inégale du feu, et dans ce cas l'excès de force ou de résistance devrait être en raison inverse de toute la capacité de la chaudière, exprimée en unités dynamiques.

Ainsi, en prenant la force de cheval pour unité de mesure, si une chaudière renferme 500 litres par chaque force de cheval, et qu'une autre en renferme 250 seulement, celle-ci devra avoir une force double de la première ; car des quantités égales de puissance exigent d'égales quantités de chaleur. L'effet de l'excès de chaleur pour augmenter la température et la force de la vapeur, est en raison inverse de la quantité d'eau sur laquelle l'action est produite. Par conséquent, le danger causé par cette augmentation de tension est en raison inverse de la quantité d'eau et de vapeur que contient la chaudière.

525. En supposant que l'excès de force ou de résistance nécessaire pour une chaudière renfermant 500 litres par force de cheval doive être deux fois celle qui est nécessaire sous la tension à laquelle la machine marche, on trouvera l'excès de force à donner à une chaudière qui renfermerait n litres par force de cheval à l'aide de la proportion

$$n : 500 :: 2 : x = \frac{1000}{n}.$$

La prudence exige en outre que l'on prenne en considération, dans les calculs de la force à donner à la chaudière, les effets d'une dilatation inégale, de l'impropriété des formes, de la déflexion et de l'usure.

D'autres causes que la force de la vapeur peuvent briser une chaudière, et il est bon de les signaler, afin de mettre en garde contre les circonstances qui les produisent.

Si le conduit de la fumée d'une chaudière part du foyer en s'élevant, et descend ensuite avant d'entrer dans la cheminée, il sera sujet, dans quelques cas, à se remplir de gaz inflammable, qui prend feu et fait explosion. L'effet de cette explosion peut comprimer la chaudière au point de la faire rompre.

On peut prévenir ce danger en disposant les conduits de la fumée de manière qu'il n'y ait pas de dépression jusqu'à la cheminée, et en construisant le registre de manière qu'il ne puisse fermer qu'imparfaitement le conduit de la fumée, et en se mouvant horizontalement, ou bien, s'il est vertical, en se mouvant de bas en haut de manière à fermer en dernier lieu le haut de l'ouverture.

Le gaz hydrogène se développe souvent dans la chaudière à vapeur, en raison de ce que l'eau est en contact avec une partie de métal chauffée au rouge, et il paraît se produire régulièrement lors de la formation de la vapeur à très-haute température. Je ne pense pas qu'il doive augmenter les chances d'explosion ; l'accident serait cependant beaucoup plus terrible s'il venait à avoir lieu ¹.

¹ Dans une lettre que j'ai reçue de M. Williams, maître de forges à Cyfarthfa, ce manufacturier attribue les effets désastreux d'un accident arrivé dans le voisinage à l'accumulation de l'hydrogène qui s'enflamma lorsque la chaudière eut fait explosion. Cette chaudière était de forme sphérique, comme les anciennes, de 6 mètres de diamètre, et l'épaisseur des plaques, au moment de la pose, était de 6 millimètres pour celles de dessus, et de 12 millimètres pour celles du fond. La charge sur la soupape de sûreté était de 2 kilogrammes par centimètre circulaire. Plusieurs personnes perdirent la vie dans cette explosion, et la chaudière fut lancée à la distance de 45 mètres, à un endroit élevé de 10 mètres au-dessus du niveau de la place qu'elle occupait.

Chaudières de tôle.

524. Après avoir déterminé la résistance des plaques d'une courbure quelconque, il est aisé d'appliquer ces règles aux chaudières rectangulaires. On peut remarquer qu'il est indifférent, pour la pression, que la courbe soit concave ou convexe, pourvu qu'elle soit arc-boutée comme un arceau sur ses appuis, ou qu'elle forme un cercle entier. Je doute de l'efficacité des appuis en usage, et je pense que la cause qui fait manquer les chaudières sur leurs sièges est due en grande partie aux efforts et aux mouvements des parties qui ont lieu à chaque variation de force ou de température.

Une chaudière rectangulaire pourra être considérée comme un cylindre ayant pour diamètre la plus grande diagonale de la section, et sa force de résistance sera (art. 521)

$$e = \frac{3,81pd}{f}.$$

En faisant $f = 1250$ kilogrammes pour le fer forgé, on a à peu près

$$e = \frac{pd}{350}.$$

L'excès de force nécessaire pour couvrir les risques étant $\frac{1000}{n}$, nous aurons (art. 523)

$$e = \frac{pd}{0,33n} = \frac{3pd}{n} {}^1;$$

et pour le cuivre, $f = 775$ kilogrammes : par conséquent,

$$e = \frac{pd}{0,2n} = \frac{5pd}{n} {}^2.$$

¹ En mesures anglaises,

$$e = \frac{pd}{120n}.$$

² En mesures anglaises,

$$e = \frac{pd}{72n}.$$

525. RÈGLE. Pour trouver la force à donner à la tôle du dessus des chaudières rectangulaires ou cylindriques, multipliez le triple de la charge sur la soupape de sûreté, en kilogrammes par centimètre circulaire, par la plus grande diagonale en centimètres de la section de la chaudière, et divisez ce produit par la capacité de la chaudière afférente à la force d'un cheval. Le résultat donnera l'épaisseur en centimètres. Pour le cuivre, il faut prendre le quintuple, au lieu du triple.

La tôle que l'on emploie pour les fonds de chaudières doit avoir une épaisseur suffisante pour compenser l'usure ; en général, cette épaisseur doit être une fois et demie celle du dessus de la chaudière.

1^{er} *Exemple.* Dans une chaudière rectangulaire, la plus grande diagonale étant de 2^m,4, et par conséquent équivalente à un rayon de courbure de 240 centimètres, le poids sur la soupape de sûreté de 0^{kil},25 par centimètre circulaire, et l'espace pour la vapeur de 450 décimètres cubes, on demande quelle épaisseur on doit donner à la tôle de fer qui doit former le dessus de la chaudière. Dans ce cas, on a

$$\frac{3 \times 0,25 \times 240}{450} = 0^{\text{cent}},4.$$

Les plaques du fond doivent avoir moitié en sus, ou 0^{cent},6 ; c'est à peu près l'épaisseur que donnent les meilleurs constructeurs.

526. 2^e *Exemple.* Si la chaudière est un cylindre de 150 centimètres de diamètre, et la pression sur la soupape de sûreté de 2^{kil},1, et que la chaudière ait une capacité de 560 décimètres cubes par chaque force de cheval de la machine, alors on a

$$\frac{5 \times 2,1 \times 150}{560} = 1^{\text{cent}},7.$$

Dans la pratique, la force des chaudières de cette espèce est simplement équivalente à la pression sous laquelle elles travaillent ; doit-on s'étonner s'il arrive quelquefois des accidents ?

La même règle s'applique aux conduits intérieurs, mais en

ajoutant quelque chose pour la détérioration que le feu occasionne.

527. *Des chaudières sphériques.* Les dimensions d'une chaudière sphérique étant les mêmes en tout sens, sa force sera (art. 521)

$$e = \frac{3,81pd}{2f}.$$

Pour le fer forgé, cette formule devient

$$e = \frac{pd}{0,66n} = \frac{3pd}{2n}{}^1;$$

et pour le cuivre,

$$e = \frac{pd}{0,4n} = \frac{5pd}{2n}{}^2.$$

RÈGLE. Pour les chaudières sphériques en tôle, multipliez le diamètre en centimètres par $\frac{3}{2}$ et par la pression sur la soupape de sûreté en kilogrammes par centimètre circulaire, et divisez par la capacité de la chaudière par force de cheval; pour le cuivre, prenez $\frac{5}{2}$, au lieu de $\frac{3}{2}$.

Exemple. Une chaudière sphérique de 6 mètres de diamètre renferme 560 décimètres cubes par force de cheval, la charge de la soupape étant 0^{kil},50, quelle sera son épaisseur? Le diamètre étant de 600 centimètres, on a

$$\frac{3 \times 0,05 \times 600}{2 \times 560} = 0^{\text{cent}},8.$$

(Voyez la note de l'article 525.)

¹ En mesures anglaises,

$$e = \frac{pd}{240n}.$$

² En mesures anglaises,

$$e = \frac{pd}{144n}.$$

Quand une chaudière cylindrique a ses fonds de forme sphérique, le rayon de courbure peut être égal au diamètre du cylindre, et alors les fonds seront aussi forts s'ils ont la même épaisseur de métal. Les fonds plats sont plus commodes à construire, et occupent moins d'espace en produisant le même effet.

Chaudières de fonte.

528. Les règles précédentes ne s'appliquent qu'aux chaudières en métaux ductiles, mais lorsqu'on les fait en matières cassantes, on doit avoir égard à l'effet de la dilatation inégale. Pour les chaudières cylindriques, l'équation est

$$e = \frac{2,54pd}{f} \times \frac{n}{1000} = \frac{pd}{0,42n} \text{ (art. 517 et 523),}$$

et l'on a indiqué (art. 519) ce qu'il fallait ajouter pour la dilatation.

Lorsqu'une chaudière est composée de tubes, il peut arriver qu'un tube, ayant 20 centimètres de diamètre ou plus, ait à l'un de ses côtés une température de 550° plus élevée qu'à l'autre ;

alors $\frac{550e}{3d} = \frac{18e}{d}$ = la perte de force : ce qui indique que,

dans ces circonstances, un tube se romprait effectivement, quelle que fût sa force de résistance. Si l'on fait $18e > d$ pour tous les cas où le quotient est l'unité ou plus grand que l'unité, l'inégalité de dilatation dépassera seule la résistance de la matière. Cela explique le fait connu, que des tubes se brisent sans aucun défaut apparent quand la vapeur est plus forte que de coutume.

De ces principes nous tirons la règle suivante pour les chaudières en fonte ; d étant le diamètre et p la force élastique de la vapeur, on a

$$e = \frac{pd}{0,42n},$$

pour l'épaisseur à donner en raison de la résistance. Si l'on y ajoute l'épaisseur pour parer à la perte de force qu'elle peut

éprouver pour cause d'inégale dilatation, on aura pour les bouilleurs au-dessus de 20 centimètres de diamètre ,

$$e = \frac{pd}{0,42n} \times \frac{18e}{d} ;$$

d'où

$$e = \frac{pd^2}{0,42n(d - 18)}$$

Pour les chaudières à tubes, ou en cylindres au-dessous de 20 centimètres de diamètre,

$$e = \frac{pd}{0,42n(2,54 - 0,116d)} = \frac{20,5pd}{n(22 - d)}$$

Dans l'un ou l'autre cas, il y a danger de rupture quand le diamètre est moindre que 18 centimètres dans le premier, et quand ce diamètre est plus grand que 22 dans le second. Si l'épaisseur est beaucoup plus grande que la règle ne l'indique, on augmente beaucoup le risque d'inégale dilatation; si elle est moindre, l'effet de la pression, joint à l'inégalité de la dilatation, peut encore faire rompre le tube.

529. RÈGLE. Pour avoir la force des tubes en fonte de plus de 20 centimètres de diamètre, multipliez le carré du diamètre par la pression en kilogrammes sur la soupape de sûreté; divisez le produit par 0,42 fois le nombre de décimètres cubes égal à la capacité de la chaudière par force de cheval, multipliée par la différence entre le diamètre et 18 centimètres; le résultat exprimera l'épaisseur en centimètres que l'on devra augmenter pour l'usure et le dépérissement, en raison du temps qu'on veut qu'elle serve.

1^{er} *Exemple.* Le diamètre intérieur d'un tube étant de 25 centimètres, la capacité de la chaudière de 280 litres ou décimètres cubes par force de cheval, le poids sur la soupape de 2^{kil},50 par centimètre circulaire, on demande l'épaisseur? On a dans ce cas

$$\frac{25 \times 25 \times 2,5}{0,42 \times 280(25 - 18)} = 1,9.$$

2° *Exemple.* Le diamètre intérieur d'un bouilleur de chaudière cylindrique en fonte étant de 90 centimètres et la force de la vapeur de 5 atmosphères, ou de 4 kilogrammes par centimètre circulaire sur la soupape, quelle sera l'épaisseur ? La capacité de la chaudière étant 450 décimètres cubes par force de cheval, on aura dans ce cas

$$\frac{90 \times 90 \times 4}{0,42 \times 450 (90 - 18)} = 2,4.$$

De l'assemblage des tuyaux et des autres parties des machines.

530. On serre ordinairement les joints avec des boulons qui traversent les bords; on met une substance élastique de nature durable entre ces bords, ou une composition de ciment, qui fait corps avec les surfaces d'assemblage.

Le ciment de fer est le meilleur. On le fait de la manière suivante: on mêle ensemble dans un mortier 2 parties de sel ammoniac, une de fleur de soufre et 16 de limaille de fonte provenant de la lime ou de l'alésoir. On doit tenir cette poudre sèche. Quand on a besoin du ciment, on prend une partie de cette poudre et 20 parties de fonte pure en limaille, et on les mêle avec soin en les broyant dans un mortier; on délaye ce composé avec de l'eau, jusqu'à consistance convenable, on l'applique dans les joints, et l'on serre ensuite les boulons. Ces diverses matières réagissent avec force les unes sur les autres ainsi que sur la surface des joints, et s'unissent de manière à ne former bientôt qu'un seul corps: les joints se trouvent réunis par une espèce de pyrite dont toutes les parties contractent la plus forte adhérence. Watt a trouvé que l'on améliorerait le ciment en y ajoutant un peu de la poudre qui se ramasse dans l'auge des meules à aiguïser.

531. Quelquefois il vaut mieux souder les joints avec un mélange de blanc de plomb et de minium, que l'on applique sur les deux faces d'une pièce de toile épaisse, de flanelle, ou d'une tresse de chanvre, auxquelles on donne la forme des parties à joindre et que l'on interpose entre elles avant de les boulonner. Cette manière de faire les joints est hermétique et durable; on l'emploie

en général pour les joints que l'on doit ouvrir de temps en temps et pour ceux qui doivent être refaits après le premier ajustage; et dans ce cas on doit augmenter la dose de blanc de plomb dans le mélange, parce qu'il coûte moins que le minium.

532. Il est un autre ciment dont se servent les chaudronniers en cuivre, pour les rivures et les joints des feuilles de cuivre dans les grandes chaudières. Ce ciment sert à mieux garantir l'imperméabilité des joints ainsi que des points de jonction des robinets; on l'obtient en mêlant de la chaux vive pulvérisée avec le sérum du sang ou du blanc d'œuf; on en fait une pâte que l'on applique aussitôt, car elle durcit si vite, qu'on ne pourrait plus s'en servir. Les chimistes connaissent depuis longtemps les propriétés de ce lut ou ciment, et il pourrait être utile dans une foule de circonstances dans lesquelles on ne s'en sert pas. Il est peu coûteux et dure longtemps.

533. On peut aussi former des joints imperméables à la vapeur en ajustant les parties avec soin en forme d'ouverture conique, et en les serrant avec des boulons d'un métal moins dilatable; on peut suivre le même procédé quand la pression de la vapeur tend à fermer le joint.

Lorsqu'il s'agit de joindre deux surfaces planes, il faut les ajuster avec soin, et introduire un anneau de fil de cuivre mince entre les plaques avant de les boulonner; la compression des boulons aplatit le fil de cuivre et le fait joindre si bien, qu'il empêche toute fuite de vapeur, même à une haute pression.

HUITIÈME SECTION.

Des moyens de régulariser l'action des machines à vapeur, de régler leur puissance, de mesurer leur effet utile et de les conduire.

534. L'action d'une machine à vapeur est variable; elle a donc besoin d'être régularisée, quand il faut un mouvement uniforme. On peut aussi avoir à surmonter, tantôt une petite résistance, tantôt une grande; c'est pourquoi on doit prévoir les moyens de régler la puissance. Nous avons également à considérer certaines méthodes qui peuvent servir pour évaluer l'effet utile d'une machine après qu'elle est établie, et enfin, la manière de diriger la production de la vapeur, et le travail de la machine.

Des moyens de régulariser l'action des machines à vapeur.

535. Un mouvement uniforme est désirable dans presque toutes les machines; car un mouvement désordonné les endommage beaucoup plus, ainsi que leur bâti, que ne le fait un mouvement régulier. La force de résistance de la machine doit être adaptée aux plus grands efforts qui puissent avoir lieu; mais la quantité de travail fait est équivalente seulement à l'action moyenne, et un mouvement irrégulier n'en produit pas plus qu'un mouvement moyen uniforme. Je me propose de décrire deux modes employés pour régulariser l'action d'une machine: l'un est obtenu au moyen d'un *volant*, l'autre par *contre-poids*.

536. *Du volant.* Un volant est une roue dont la jante ou contour doit être d'un grand poids, de manière à absorber le surplus de force à une certaine époque de l'action, et de le distribuer de nouveau quand la force est en défaut. Le professeur Leslie l'a justement comparée à un réservoir qui recueille des courants

intermittents et les renvoie en ruisseau régulier ¹. Pour régulariser un mouvement sujet à varier à chaque coup, comme celui d'une machine à vapeur, on emploie le volant. La masse pesante doit être proportionnée de manière à être en équilibre d'elle-même dans chaque position d'un axe lié à la machine et tournant avec une de ses parties.

Les proportions du volant doivent être déduites des lois du mouvement de rotation. Elles n'ont pas été très-clairement établies jusqu'ici, surtout par rapport à l'application. L'équation du docteur Jackson ² s'accorde très-bien avec ma méthode, en y ajoutant le temps et le rayon correspondant à la vitesse angulaire du cercle extérieur de la roue; et comparant avec la force de la gravité pour obtenir le coefficient; l'équation est

$$\frac{9,8Pdr t}{bx^2} = nv.$$

Dans cette équation, P désigne la quantité moyenne dont la force mouvante varie dans son intensité au-dessus de la résistance; *t*, le temps dans lequel cette variation a lieu; *v*, la vitesse, et *nv*, la plus grande variation; *d*, le bras de levier avec lequel agit la force P; *r*, le rayon correspondant à la vitesse *v*; enfin *b* le poids du volant agissant à la distance *x* de l'axe ³.

Il est évident que la masse du volant doit suffire à recevoir l'excès de force pendant le temps qu'il dure, et à le restituer à la machine dans un laps de temps égal, de manière à ce que la vitesse ne varie pas plus que de la *n^{ième}* partie. Ainsi le seul point qui dépende de l'expérience pratique est le montant de cette variation de vitesse. Il n'y a pas de difficulté sur ce point, car la pratique des divers constructeurs est tellement différente, que l'on peut se permettre une grande latitude.

¹ *Philosophie naturelle*, vol. I, p. 152.

² *Mécanique théorique*, art. 400-405.

³ Comme l'auteur ne donne pas la démonstration de sa formule, le lecteur qui désirerait plus de développement au sujet des volants pourra consulter l'*Architecture hydraulique* de Bélidor, tom. I, édition de M. Navier, et le *Traité des Machines* de M. Hachette, p. 219, deuxième édition.

Le poids de la jante du volant peut toujours être regardé comme réuni à l'extrémité du rayon; alors $x = r$, et l'équation devient

$$\frac{9,8Pdt}{br} = nv.$$

L'effet des rayons de la roue peut être négligé; car le problème n'exige ni ne comporte une solution très-exacte, à cause de l'incertitude relative à la variation précise de l'intensité de la force mouvante.

537. Il résulte de cette équation que, si le poids ou le diamètre de la jante est considérable, et, à plus forte raison, s'ils le sont tous deux, le volant peut acquérir une grande force vive par un petit accroissement de vitesse angulaire, ou perdre une quantité considérable de force vive par une petite diminution de cette vitesse. Il devient ainsi un réservoir pour le surplus d'énergie de la puissance, quand elle agit avec plus d'intensité, ou quand la résistance est moindre, et le conserve pour le besoin futur.

Sans cela, la machine pourrait être beaucoup accélérée, soit par la diminution de la résistance, soit par l'accroissement de la puissance. L'excès de force mouvante est en grande partie répandu sur le volant, dans lequel il produit une force vive proportionnelle avec une petite augmentation de vitesse. Ensuite, quand la résistance s'accroît, ou que la puissance diminue, la machine serait beaucoup retardée si la force vive accumulée dans le volant ne faisait continuer le mouvement avec une petite diminution de vitesse angulaire; et, toutes choses égales d'ailleurs, plus l'intervalle de la variation ou de la résistance inégale sera court, moins il y aura de changement de vitesse.

Plus la vitesse angulaire de l'axe du volant sera considérable, plus sera grande aussi l'énergie du volant pour régulariser l'action: car la variation de vitesse est en raison inverse de la vitesse de la jante.

Chaque partie d'une machine douée d'un mouvement, soit continu, soit oscillatoire, surtout quand elle est massive, agit évidemment comme un volant pour régulariser l'action de la machine.

La plupart de ces remarques ont été faites, sous une forme moins générale, par le docteur Robison¹ et par le docteur Jackson²; mais ils établissent aussi que si l'on a besoin de régulariser l'action d'une manière plus parfaite, on peut accroître le pouvoir du volant, en augmentant le diamètre plutôt que la masse, parce qu'ainsi on produit le même effet avec un poids moindre, et conséquemment, avec moins de frottement et une moindre pression transversale sur l'axe et les supports.

Ceci ne doit cependant être appliqué que dans petite étendue; car une masse de matière animée d'une vitesse immense et supportée par des rayons qui doivent être totalement incapables de résister à son impulsion, devient un accessoire très-dangereux pour une machine. Des rayons de fer fondu ne résisteraient pas à l'effort occasionné par l'arrêt subit d'un volant ayant une jante de même poids qu'eux, et mû avec une vitesse de 5^m,5 par seconde³. Aussi, les volants doivent être d'un diamètre limité.

538. Quand il est nécessaire d'excéder la vitesse de 4 mètres par seconde, on doit toujours employer des rayons de fer malléable; et une vitesse de 10 mètres par seconde à la circonférence est à peu près l'extrême limite que comporte un volant, même quand le cercle est en fer malléable. Pour une jante en fer fondu avec des rayons en fer malléable, je ne pense pas qu'il soit prudent d'excéder la vitesse de 5^m,5 par seconde.

Après ces éclaircissements, nous pouvons passer à la formation des règles déduites de l'équation,

$$b = \frac{9,8Ptd}{rnv}$$

Il est plus convenable de remplacer le poids du volant b par ses dimensions. Or, nous avons pour le fer fondu

$$b = 2 \times 5,1416ra \times 0^{\text{kil}},72 = 4,525ra,$$

a étant l'aire de la section de la jante en centimètres carrés, r le

¹ *Mechanical Philosophy*, vol. II, p. 250.

² *Mécanique théorique*, p. 227.

³ *Essai sur la force du fer fondu*, art. 261.

rayon moyen du volant en mètres, et prenant 7,2 pour la densité du fer fondu. Par cette substitution, l'équation devient

$$a = \frac{2,16Ptd}{r^2nv}.$$

Si le volant fait N révolutions par minute, dans le temps t il en fera $\frac{tN}{60}$, et par conséquent $v = \frac{6,2852tNr}{60}$; ce qui donne l'équation

$$a = \frac{20,8Pd}{r^3Nn}.$$

539. Il nous reste maintenant à considérer le degré de régularité que la machine exige. Ses propres parties ont déjà beaucoup d'effet, et celles qui agissent comme volants sont très-nombreuses, même dans les machines qui ont le plus besoin d'être régularisées par un volant. Moyennement, peut-être doit-on admettre dans la pratique une variation d'environ un dixième; si l'on adopte cette valeur pour n , la formule précédente devient

$$a = \frac{208Pd}{r^3N}.$$

540. 1^{er} Cas. *Machine à double effet avec manivelle.* Dans ce cas, la variation s'étend depuis la force totale de la vapeur jusqu'à zéro, à chaque quart de la course du piston. Ainsi, l'excès moyen est le quart de la plus grande force P sur le piston, et la formule devient alors

$$a = \frac{52Pd}{r^3N};$$

et comme il vaut mieux rester un peu au-dessus, à cause des inégalités de la fonte, nous adopterons

$$a = \frac{55Pd}{r^3N}.$$

RÈGLE. Multipliez 55 fois la pression sur le piston en kilo-

grammes par le rayon de la manivelle en mètres, divisez ce produit par le cube du rayon du volant en mètres et par le nombre de ses révolutions par minute, le quotient sera l'aire ou la section de la jante du volant en centimètres carrés.

Le nombre de forces de chevaux, multiplié par 90^{kil} , sera à peu près la plus grande pression sur le piston.

Exemple. Que la pression sur le piston soit de 1800 kilogrammes, le rayon de la manivelle de $0^{\text{m}},75$, le nombre de révolutions par minute 22, et le rayon du volant de $2^{\text{m}},75$, la section de la jante sera

$$a = \frac{55 \times 1800 \times 0,75}{(2,75)^3 \times 22} = \frac{74250}{457,53} = 162 \text{ cent. carrés ;}$$

ce qui équivaut à un carré de $12 \frac{3}{4}$ centimètres de côté.

541. 2^e Cas. *Machine à simple effet avec manivelle.* L'excès moyen est alors la moitié de la force mouvante ; ainsi, l'équation est

$$a = \frac{110Pd}{r^3N};$$

c'est-à-dire que la jante du volant doit être d'une aire double de celle qui convient à une machine à double effet avec un cylindre de mêmes dimensions, ou d'une puissance double ¹.

¹ Dans les machines atmosphériques à simple effet, on a appliqué au volant un poids calculé de manière que son effort pour faire tourner l'arbre fût exactement la moitié de celui de la vapeur, et on l'a placé de manière qu'il s'élevât pendant la descente du piston, et *vice versa*.

Pour déterminer la valeur de ce poids, nous avons la formule

$$m = \frac{Pd}{2r},$$

dans laquelle m désigne le poids, et P la pression moyenne sur le piston. On suppose le poids appliqué à la jante du volant, et la section de celle-ci doit être la même que pour une machine à double effet de la même puissance.

Ce système est décrit dans les *Essais* de Fenwick *sur la Mécanique pratique*, p. 39. Woolf a proposé de rendre uniforme le mouvement des machines à l'aide d'un piston jouant dans un cylindre ; mais ce moyen n'a pas d'autre effet que celui d'un contre-poids, tandis qu'il donne lieu à plus de frottement et de dépenses de construction. (*Voyez* Nicholson's *Philosophical Journal*, vol. VI, p. 218, et vol. VII, p. 134.)

542. *Des contre-poids.* On appelle *contre-poids* la charge ou le poids qu'il est nécessaire d'ajouter ou de soustraire pour déterminer le piston à s'élever avec la vitesse convenable. L'excès de force de la vapeur surmonte le frottement des parties, et le poids additionnel doit être suffisant pour produire l'ascension du piston et lui imprimer une vitesse double de celle de la machine, s'il s'accélérait librement pendant la durée totale de la course du piston. Soit M le poids total de la masse mise en mouvement, m le contre-poids, et l la longueur de la course du piston, on aura

$$\frac{19,6lm}{M + m} = 4v^2;$$

d'où
$$m = \frac{Mv^2}{4,9l - v^2}.$$

Mais nous avons (art. 542) $v^2 = 0,81l$, v étant la vitesse en mètres par seconde.

La formule devient

$$m = \frac{0,81M}{4,9 - 0,81} = 0,2M;$$

par conséquent le contre-poids doit être avec ces proportions le cinquième environ de la masse totale à mouvoir, en supposant celle-ci réunie à l'extrémité du balancier, et sa valeur déterminée par l'expérience. La résistance de l'eau dans les pompes réduira le mouvement accéléré à l'uniformité avec une vitesse finale moitié de celle qui aurait lieu sans cette résistance ¹.

Des moyens de régler la puissance des machines.

543. On doit fréquemment appliquer une machine à des

¹ Smeaton disposait ses machines de manière que le retour du piston eût lieu en moins de temps que l'aller. (*Rapports*, vol. II, p. 560.) Watt dit qu'on admet généralement que ce doit être l'inverse. (*Mechanical Philosophy*, vol. II, p. 90.) J'ai exposé (art. 540) les raisons pour rendre les deux temps égaux.

usagés tels que l'ouvrage à faire n'est pas constamment le même. Quand une partie du mécanisme est arrêtée ou mise en jeu subitement, si la force mouvante restait la même, il y aurait une altération dans la vitesse ; ce changement de vitesse serait, dans quelques cas, très-nuisible au travail de la machine, et causerait une perte considérable ; en outre, il y a toujours une vitesse qui fait agir la machine avec le plus grand avantage possible ; c'est pourquoi la variation de vitesse due à la cause précédente est toujours un désavantage et quelquefois devient extrêmement pernicieuse. Dans les filatures de coton, par exemple, où la puissance doit mouvoir les broches avec une vitesse donnée, s'il arrivait qu'on suspendit à la fois une grande partie du travail au point d'augmenter considérablement la vitesse, il y aurait une perte immédiate d'ouvrage, et un accroissement de déchet par la rupture des fils ; d'un autre côté, on perdrait beaucoup de temps et de main-d'œuvre, si la machine se mouvait trop lentement.

On observe un effet non moins mauvais dans les machines à élever l'eau, et dans d'autres genres de machines.

544. *Soupape à gorge*. La puissance d'une machine à vapeur se règle ordinairement en augmentant ou diminuant le passage pour la vapeur, ce qu'on fait généralement en admettant la vapeur dans le cylindre plus ou moins librement, au moyen de ce qu'on appelle une *soupape à gorge*. Cette soupape est formée par un disque métallique *a* (fig. 1, pl. X), ayant un axe fixé dans le sens de son diamètre. Ce disque est exactement adapté à l'ouverture d'un anneau métallique de quelque épaisseur, à travers lequel passe l'axe, et l'anneau est fixé entre les faces du joint d'assemblage du tuyau à vapeur voisin du cylindre. Une extrémité de l'axe porte un carré propre à recevoir un bras de levier *b*, au moyen duquel on peut tourner la soupape dans la direction convenable.

545. Dans quelques cas, les machines sont ainsi réglées à la main au gré de l'ouvrier ; mais quand il faut une vitesse régulière, on doit employer des moyens pour ouvrir et fermer la soupape sans aucune attention de la part de celui qui a soin de la machine. A cet effet, Watt après différentes tentatives, s'est

arrêté au pendule conique qu'il a appelé *gouverneur* ou *modérateur* (*voy.* art. 550).

Une soupape à axe diamétral de ce genre a beaucoup d'avantage sur toute autre forme de soupape pour un tuyau circulaire, parce qu'elle resserre l'ouverture sans être difficile à mouvoir et sans présenter plus que l'obstacle nécessaire ; mais ce n'est pas un moyen économique de varier la puissance d'une machine à vapeur.

546. *Moyen de régler la machine* en travaillant plus ou moins par l'expansion. On peut y parvenir en ajustant le mouvement des soupapes à vapeur de manière à ce qu'elles se ferment à une période plus ou moins avancée de la course du piston, selon que la machine a plus ou moins de travail à effectuer. Cette méthode s'emploie principalement quand on règle à la main (*voy.* art. 481 et pl. XI). Le régulateur spontané ou mécanique, tel qu'il est en usage, ne s'applique avantageusement qu'aux machines à soupapes, puisque les tiroirs et les robinets usités ne peuvent être ajustés autrement que pour fermer le passage du condenseur (*voyez* les art. 448 et 456).

547. *Soupape de Field*. M. Joshua Field a découvert un mode ingénieux d'intercepter la vapeur à une période quelconque de la course du piston. Il consiste en une soupape placée dans la situation ordinairement assignée à la soupape à gorge, c'est-à-dire près de l'endroit où la vapeur est admise dans le cylindre. Cette soupape doit être ouverte au commencement de la course pour donner un libre passage à la vapeur, et être fermée après que le piston a exécuté une partie de sa course, afin que le reste soit achevé par la force expansive de la vapeur. On peut faire ouvrir la soupape par une dent ou une came sur un rouleau, ou sur un des arbres tournants destinés au jeu des soupapes ; on peut la maintenir ouverte jusqu'à ce que l'arbre ait fait une partie de sa révolution, et enfin la fermer. Si le rouleau denté peut couler sur l'arbre, et si la forme de la dent est telle que la soupape se ferme plus tôt quand le rouleau est poussé dans une direction, et plus tard quand il est poussé dans la direction contraire, on peut alors régler l'époque où la soupape doit être ouverte, et par conséquent

régler la puissance de la machine. On peut le faire, soit à la main, soit en déterminant le rouleau denté à glisser par l'effet du modérateur. On en voit l'application dans la planche XVII à la machine portative de Maudslay, où ce moyen est dirigé par le modérateur. Il y fut d'abord appliqué par voie d'essai, ce qui explique le défaut de direction du passage de la vapeur et l'usage de la soupape à gorge ; l'économie de puissance qui en résulta, suivant l'expérience, s'éleva à près de 10 pour 100.

548. Quand les machines atmosphériques, condensant dans le cylindre, doivent agir sous des charges inférieures à leur puissance totale, on les règle en diminuant la quantité d'eau injectée, ou en fermant plus tôt le robinet d'injection ; mais dans presque toutes les machines à élever l'eau, qui sont réglées à la main, il est nécessaire d'employer des moyens pour avertir le chauffeur de l'excès de puissance lorsqu'il a lieu.

549. *Des balanciers à ressort.* Dans les machines munies d'un volant, il n'est pas nécessaire de prendre des précautions pour limiter le mouvement du balancier, parce que la longueur de la manivelle le fait d'elle-même, tandis que le volant continue à tourner de façon à prévenir tout effort excessif sur l'arbre de la manivelle. Mais quand on n'emploie pas de volant, comme dans les machines faisant mouvoir des pompes, on fixe une très-forte pièce de bois transversalement au-dessus du balancier et à chaque extrémité, comme on le voit dans la planche XIV ; chacune d'elles frappe contre deux ressorts de bois placés de chaque côté du balancier sur deux poutres longitudinales qui en supportent les tourillons, et que pour cette raison on appelle *poutrelles à ressort*. Pour empêcher le bruit, les ressorts sont couverts de liège à l'endroit où ils reçoivent le coup, et quand le choc devient trop vif, ils font sonner une cloche, qui fait connaître à l'ouvrier que la machine a besoin d'être réglée.

Du pendule conique ou modérateur.

550. Si deux ou un plus grand nombre de boules sont suspendues à un axe rotatif, de manière à tourner avec lui, elles

s'éleveront quand la vitesse augmentera, et s'abaisseront quand elle diminuera ; si l'on attache des bras aux tiges qui les suspendent, leur élévation et leur abaissement pourront faire mouvoir un levier, de façon à ouvrir ou fermer une soupape à chaque changement qui aura lieu dans la vitesse de la machine. Ce mécanisme peut donc être employé pour rendre la machine elle-même régulatrice de sa propre puissance.

Dans la construction de cet appareil, il faut considérer la position des boules correspondante à la vitesse moyenne, l'amplitude du mouvement, et le poids ainsi que la vitesse des boules.

Divers mécaniciens emploient différents moyens de combiner les parties de cet appareil. On en voit un dans la planche X, fig. 1, où g est l'axe tournant, f le point de suspension, jj les boules, ee les tiges qui les suspendent. Ces tiges sont liées aux bras ii , et par ce moyen élèvent ou abaissent la douille h , et avec elle le levier l , qui agit sur la soupape à gorge. Les fers à cheval kk sont deux repos pour recevoir les boules quand la machine n'est pas en mouvement ¹.

551. La distance verticale entre le point de suspension et le plan dans lequel tourne le centre des boules est égale à la longueur d'un pendule qui fait une oscillation complète dans le même temps que les boules font une révolution. La vitesse ordinaire de l'axe est de trente révolutions par seconde, et par conséquent la hauteur serait égale à la longueur du pendule à secondes, c'est-à-dire à $99^{\text{cent}},42$. Pour trouver la hauteur correspondante à un autre nombre de révolutions, il faudra diviser $99,42 \times 900$ ou 89478 par le carré de ce nombre ; ainsi pour vingt révolutions, la hauteur serait

$$\frac{89478}{400} = 223^{\text{cent}},69.$$

552. On peut déterminer l'amplitude en considérant le plus grand changement de vitesse que la machine puisse comporter

¹ Ils servent plutôt à tenir les boules suffisamment écartées de l'axe de rotation, de manière à rendre plus sensible l'effet de la force centrifuge qui est proportionnel à leur écartement. M.

sans nuire au travail. C'est à cette amplitude que le modérateur doit être capable d'intercepter complètement l'affluence de la vapeur au cylindre. Or, la plus grande variation n'excède pas généralement le dixième de la vitesse, c'est-à-dire le vingtième en deçà et au delà de la valeur moyenne, et l'amplitude du mouvement du plan de révolution sera, en ce cas, environ le cinquième de la hauteur du point de suspension au-dessus du plan de révolution à la vitesse moyenne ¹. Ainsi, en supposant la hauteur moyenne de 99^{cent},42 l'amplitude sera de 19^{cent},88 ².

Quand une soupape à gorge est dirigée par un modérateur, le passage de la vapeur doit être complètement ouvert à la vitesse usuelle de la machine, et resserré seulement quand la vitesse est en excès; autrement la vapeur serait toujours gênée dans son

¹ Soit v la vitesse moyenne, et supposons qu'elle s'accroisse jusqu'à

$$v + nv = v(1 + n);$$

la hauteur du plan de révolution, qui d'abord était h , deviendra

$$\frac{h}{(1 + n)^2}.$$

Ainsi le changement de vitesse sera au changement de hauteur dans le rapport de

$$1 + n \text{ à } (1 + n)^2,$$

et leurs accroissements seront entre eux

$$\therefore n : 2n + n^2, \text{ ou } \therefore 1 : 2 + n;$$

ce qui équivaut à peu près au rapport 1 : 2, quand n est une fraction très-petite.

Faute d'avoir considéré ce point, on a supposé que le modérateur n'était pas sensible aux changements de vitesse dans une machine délicate, et M. Proust a proposé d'employer une petite pompe pour élever l'eau dans un réservoir, d'où elle s'échapperait par une ouverture qu'on pourrait régler à volonté. Si la machine vient à se mouvoir plus vite qu'il ne convient, l'eau montera dans le réservoir, et élèvera un flotteur, qui fermera la soupape. (*Voyez le Magasin philosophique*, vol. LXII, p. 298.) Il est évident que cet appareil ne peut pas être plus sensible que le modérateur, tandis qu'il exige une grande attention pour le conserver en état de fonctionner.

² On a en effet

$$99,42 + 9,942 = 109,562$$

$$99,42 - 9,942 = 89,478$$

$$\text{Le cinquième de } 99,42 = 19,884.$$

passage, excepté quand la machine aurait à vaincre une résistance extraordinaire.

553. Les boules pèsent ordinairement de 12 à 36 kilogrammes chacune; leur effet dépend beaucoup, toutefois, des angles formés par les deux tiges. Dans la forme décrite, fig. 1, pl. X, la force est petite, mais l'étendue du mouvement est considérable, tandis que dans celle représentée fig. 3, pl. XVII, il y a plus de force et moins d'amplitude de mouvement. L'angle que les tiges des boules font avec l'axe doit être d'environ 30° quand elles sont au repos; et, pourvu que l'amplitude soit suffisante, l'angle que les bras ou tiges de jonction font avec l'axe peut être rendu aigu afin que l'intensité de l'effort en soit augmentée¹.

554. *Piston régulateur.* La vitesse d'une machine à élever l'eau peut être réglée au moyen d'un petit cylindre muni d'un piston, et communiquant avec le réservoir d'air du grand tuyau de conduite; quand la machine va trop vite, l'eau est refoulée dans la partie inférieure du petit cylindre et elle en élève le piston. Celui-ci est chargé d'un poids correspondant à la vitesse que doit prendre la machine, et en conséquence c'est seulement quand elle va trop vite que, le frottement croissant dans les tuyaux de conduite, la pression augmente aussi dans le réservoir d'air, et cette pression, communiquée par le petit tuyau au cylindre régulateur, détermine l'élévation du piston chargé. Le mouvement se transmet par un fil de métal à la soupape à gorge, de manière à la fermer et à diminuer la fourniture de vapeur. Dans l'autre cas, ou si la machine va trop lentement, la pression dans le réservoir d'air diminue, et le piston chargé descend et ouvre la soupape à gorge.

Afin d'empêcher la trop grande étendue du mouvement du piston, la charge est divisée en anneaux comme une chaîne, et à mesure que le piston monte, il soulève un plus grand nombre d'anneaux, ce qui augmente la charge; de même quand le piston descend, les anneaux en reposant à terre, diminuent la charge.

¹ On a fait plusieurs tentatives pour appliquer le modérateur aux machines employées sur les bateaux; mais il me semble que les mouvements en mer sont trop brusques pour que ce moyen régulateur puisse y être employé.

On pourrait appliquer un ressort pour produire un effet semblable.

555. Dans quelques cas, on a adopté un perfectionnement ultérieur, consistant à se servir de ce procédé pour ajuster les taquets au moyen desquels on intercepte la vapeur. A cet effet, le mouvement du petit piston est communiqué à une roue qui fait tourner une paire de roues d'angle, dont l'une est fixée sur le carré d'une tige à vis attachée à la bielle du régulateur. Quand le mouvement devient trop rapide, la tige tourne et fait mouvoir le taquet, de manière à intercepter plus tôt la vapeur, et réciproquement. Le carré de la tige glisse librement dans la roue placée dessus, sans être entraîné par elle, excepté quand cette roue est mue par le piston régulateur.

556. *De la cataracte.* La puissance d'une machine à élever l'eau peut aussi être réglée en augmentant ou diminuant l'intervalle entre ses pulsations successives; on y parvient en faisant dégager par les taquets de l'encliquetage un piston chargé qui descend dans un petit réservoir d'air, d'où il chasse l'air par un tuyau; et cet écoulement peut être réglé à volonté par un robinet; les soupapes ne peuvent s'ouvrir jusqu'à ce que le piston soit parvenu à la fin de sa course. Le réservoir d'air est un cylindre de 13 à 15 centimètres de diamètre et de 50 centimètres de longueur, ouvert au sommet et muni d'une soupape rentrante dans le fond, afin que l'air puisse monter sans éprouver de résistance inutile. Il est muni d'un tuyau partant du fond, d'un diamètre assez grand pour permettre à l'air de s'échapper quand la machine a toute sa vitesse, et garni d'un robinet pour régler le temps du dégagement. Dans cet état, on y adapte un piston bien juste dont la tige est liée à l'appareil qui ouvre les soupapes. Dans une machine à double effet, il faut deux réservoirs d'air.

Des moyens de constater l'état et la force des machines à vapeur.

557. On a imaginé certains instruments qui sont d'un grand usage pour constater l'état d'une machine. Ils doivent être tenus

en bon état, afin de pouvoir servir en tout temps. Watt a très-justement remarqué qu'il est de l'intérêt de chaque propriétaire de machine à veiller à ce que ces instruments, aussi bien que toutes les autres parties du mécanisme, soient tenus en bon ordre ¹.

Ces instruments se composent du manomètre pour la vapeur, du manomètre du condenseur et de l'indicateur.

558. *Manomètre pour la vapeur.* Le manomètre à vapeur 18, pl. X, fig. 1, est un tube de fer recourbé très-court, d'environ un centimètre de diamètre, dont l'une des extrémités est fixée dans la chaudière ou dans le tuyau à vapeur; la partie recourbée du tube contient une certaine quantité de mercure. La branche attachée à la chaudière ou au tuyau est entièrement ouverte à la vapeur qui, pressant sur la surface du mercure, l'élève dans l'autre branche du tube, dont l'extrémité supérieure est ouverte à l'air. La hauteur à laquelle parvient le mercure est mesurée sur une échelle 20, par la tige mince d'un léger flotteur posé sur la surface et qui montre l'excès de l'élasticité de la vapeur sur celle de l'atmosphère. L'échelle doit être ajustée de manière à permettre à l'air un libre accès sur le mercure des deux côtés.

L'échelle est ordinairement divisée en centimètres, dont chacun correspond à 2 centimètres de mercure et à une pression de 21^{gram},6 par centimètre circulaire, ou de 27^{gram},2 par centimètre carré. Si les divisions de l'échelle étaient de 4^{cent},7, et subdivisées en dixièmes, le manomètre indiquerait directement la pression en hectogrammes et décagrammes par centimètre circulaire. Quelquefois on divise l'échelle en demi-centimètres, et alors chaque division correspond à un centimètre de mercure.

On place quelquefois entre le mercure et la vapeur un robinet 19, que l'on peut ouvrir ou fermer à volonté.

Afin d'agrandir les divisions du manomètre, Watt faisait terminer son tuyau de verre dans un bain de mercure contenu dans une boîte de fer : tout se passe alors comme dans un baromètre ordinaire, la vapeur ayant un libre accès sur le mercure dans le bain.

¹ *Mechanical Philosophy*, by Robison, vol. II, p. 156.

55g. *Manomètre du condenseur.* Cet instrument ressemble à un baromètre; il se compose d'un tube de fer, en forme de siphon renversé 21, pl. X, fig. 1^{re}, dont une branche est de moitié environ plus courte que l'autre. A l'extrémité supérieure de la longue branche 24 est ajusté un tuyau qui communique avec le condenseur et auquel est adapté un robinet 22 pour ouvrir ou fermer la communication. Quand on a versé dans la branche la plus courte une quantité convenable de mercure, et que la communication avec l'atmosphère est ouverte aux deux extrémités, le mercure se met naturellement de niveau dans les deux branches. Un léger flotteur à tige mince est placé dans la petite branche à laquelle est attachée une échelle 25, qu'on divise ordinairement en centimètres; et comme, par le vide qui se forme dans le condenseur, le mercure monte autant dans la longue branche qu'il descend dans la petite, ces divisions équivalent à 2 cent. du baromètre ordinaire.

Le manomètre du condenseur doit indiquer ordinairement que la vapeur dans le condenseur peut soutenir une colonne de 5 à 8 centimètres de mercure. Tant que la tension n'excède pas 8 centimètres, la condensation peut être regardée comme très-bonne; une tension de 5 centimètres est à peu près ce que j'ai vu obtenir de mieux dans la pratique.

La différence entre la force élastique de la vapeur dans le condenseur et sa force dans la chaudière, telles que le manomètre les indique, ajoutée à la hauteur du baromètre dans le même temps, donne la force relative de la vapeur pour mouvoir la machine, quoiqu'il y ait encore plusieurs déductions à faire pour avoir la véritable force mouvante; néanmoins ces indications constatent l'état de deux parties très-importantes de la machine (*voyez* sections V et VI).

56o. *L'indicateur.* La force de la vapeur et le degré de vide du cylindre aux différentes périodes de l'action de la machine, ne peuvent pas être estimés par le manomètre du condenseur. Il était nécessaire pour cela de construire un instrument moins sujet à oscillation; celui que l'on emploie s'appelle l'*indicateur*, et répond assez bien au but proposé. Il consiste en un cylindre de 4

à 5 centimètres de diamètre, et de 20 centimètres de longueur, parfaitement calibré et auquel s'adapte exactement un piston solide pouvant glisser aisément à l'aide d'un corps gras. La tige du piston est guidée dans la direction de l'axe du cylindre de manière à ne jamais dévier ni causer trop de frottement dans son jeu. Dans la tubulure du fond de ce cylindre est un robinet B servant à fermer le tuyau de communication (pl. XIX, fig. 1 et 2). Le cylindre de l'indicateur C est fixé à vis contre un montant D qui supporte le châssis EE, de 50 centimètres sur 18, et dont les traverses supérieure et inférieure peuvent recevoir la tablette à coulisse K.

La tige G du piston est d'environ 1 centimètre $\frac{1}{2}$ de diamètre et 15 centimètres de longueur, et elle est guidée par la console H, boulonnée sur le montant D, à 15 centimètres environ au-dessus du sommet du cylindre C.

Un ressort à boudin I est attaché au piston en F et au guide en H. Il doit avoir 18 centimètres de longueur dans l'état de repos, et sa force doit être telle qu'il permette au piston F de descendre à environ 2 centimètres du fond du cylindre C, quand il est chargé de 1 kilogramme par centimètre carré de son aire, et le ressort doit être susceptible d'être comprimé jusqu'à n'occuper que 4 centimètres.

Le panneau ou tablette K glisse dans les rainures du châssis EE, et doit avoir 18 centimètres en carré; l'on doit fixer à une certaine hauteur sur la tige G du piston un petit curseur de cuivre L à l'aide d'une vis de pression. De l'autre côté est fixé un bout de crayon avec un petit ressort pour le pousser contre la surface du panneau K, que fait glisser un poids N, attaché à une corde passant sur une poulie. La corde opposée O est tellement attachée à une partie convenable du parallélogramme de la machine, que le panneau K parcourt un espace d'environ 15 centim. à chaque demi-pulsation de la machine.

OPÉRATION. En ouvrant le robinet B, il s'établit une communication directe entre le cylindre de la machine et celui de l'indicateur. Quand la force de la vapeur dans le cylindre est supérieure à la pression de l'atmosphère, le piston F monte; quand

elle est inférieure, il s'abaisse. L'indicateur s'élèvera donc quand la soupape à vapeur sera ouverte, et il parviendra à une hauteur proportionnée à la force de la vapeur dans le cylindre pendant la durée de la course de la machine. Quand la soupape de sortie s'ouvre, il s'abaisse, et par la rapidité et l'étendue de sa descente, fait connaître l'état du vide dans le condenseur. Pendant le mouvement du piston F, le panneau à coulisse se meut horizontalement, et le crayon L trace sur le panneau K ou sur un papier placé dessus, une courbe PQRS semblable à celle qu'on voit sur une plus grande échelle dans la fig. 9, pl. XVIII. Dans ces figures, la courbe PQ est décrite pendant la descente du piston; en Q, la condensation a lieu, et l'indicateur est forcé à descendre par la pression de l'atmosphère, jusqu'à ce que celle-ci soit contrebalancée par la résistance du ressort et de la vapeur dans le cylindre. La ligne RS est décrite pendant l'ascension du piston de la machine, et la ligne SP pendant l'entrée d'une nouvelle quantité de vapeur par la soupape supérieure.

L'aire PQRS est proportionnelle à la force de la vapeur sur le piston pendant la durée de sa course; mais il n'en faut pas conclure qu'au maximum de cette aire correspond le maximum d'action de la vapeur à combustible égal; car, si la vapeur agit par expansion, l'aire décrite ressemblera à la figure PCqrs, la vapeur étant interceptée en C, et une quantité donnée de vapeur exercera une plus grande puissance. Dans la même machine faisant différentes quantités d'ouvrages, les courbes présenteront deux cas, les lignes pleines correspondant au cas où l'on emploie pour régulateur la soupape à gorge, et les lignes ponctuées à celui où l'on règle la machine en interceptant la vapeur avant la fin de la course.

561. Si p est le nombre d'hectogrammes par centimètre circulaire du piston de l'indicateur, qui le fait descendre de d centimètres, et que m soit la longueur de la ligne ab , mesurée en centimètres, sur la figure tracée par l'indicateur, la pression exercée par la vapeur en hectogrammes par centimètre circulaire sera déterminée par la proportion

$$d : m :: p : x = \frac{mp}{d},$$

pour l'instant de la descente du piston correspondant au point *a*.

Si, par exemple, l'expérience a appris que 15 hectogrammes par centimètre circulaire font descendre le piston de 2^{cent},5, on aura

$$\frac{mp}{d} = \frac{m \times 1,5}{2,5} = 0,6m ;$$

ainsi chaque centimètre de l'indicateur correspondra à 0^{hect},6 par centimètre circulaire.

Si la distance que le curseur ou curvo-trace parcourt horizontalement est divisée en parties égales, et qu'à chaque point de division on prenne la distance verticale entre les lignes PQ et RS, et qu'on divise la somme de ces distances moins la moitié de la distance PS, par le nombre de divisions, le quotient donnera la moyenne distance verticale que parcourt le piston de l'indicateur. Appelant *m* cette moyenne, $\frac{mp}{d}$ sera la pression moyenne

sur le piston en hectogrammes par centimètre circulaire ¹.

562. *Moyen de mesurer l'effet utile d'une machine.* Les méthodes précédentes donnent seulement l'état des parties ; mais l'effet utile dépend de la bonne harmonie de l'ensemble, et le frottement offre le moyen le plus simple et le plus convenable de le mesurer ².

Si un frein est placé sur l'arbre d'une machine d'un diamètre connu et s'il est serré par une force produisant un degré connu de frottement, qui soit exactement égal à l'effet de la machine allant avec sa vitesse accoutumée ; alors il est clair que, si l'on détermine le frottement produit par cette pression, la puissance dynamique de la machine sera égale à ce frottement multiplié par la vitesse de la surface frottante.

Pour appliquer cette idée, soit AB (fig. 1, pl. XX), un levier

¹ L'indicateur paraît avoir été inventé par Watt. (*Mechan. Philosophy*, by Robison, vol. II, p. 156.) L'application du curvo-trace est due à Field.

² Ce procédé convient aux cas où le travail fait n'est pas lui-même susceptible d'une mesure exacte, ce qui arrive dans presque toutes les machines motrices ; mais la puissance des machines à élever l'eau se calcule aisément.

muni d'une bande ou frein embrassant la surface cylindrique de l'arbre ou poulie C, et supposons qu'il soit serré par un écrou en B (le levier étant arrêté par l'obstacle fixe D), jusqu'à ce que le frottement soit égal à la puissance de la machine, tout autre travail de celle-ci étant suspendu. Alors, pendant que la machine est encore en mouvement, ajoutons en F un poids tel que le levier soit retenu dans une position horizontale.

Pour calculer la puissance de la machine, il faut multiplier la longueur FC du levier en mètres, par le nombre de révolutions de l'arbre C par minute, par le poids E en kilogrammes, et par le double du rapport de la circonférence au diamètre 6,2832; le résultat sera le nombre de kilogrammes élevés à un mètre par minute, et en le divisant par 4500, on aura le nombre de chevaux ¹.

Par exemple, que l'arbre C fasse 25 révolutions par minute, que la longueur du levier soit de 3 mètres, et que le poids nécessaire pour le retenir dans la position horizontale soit de 109 kilogrammes; on aura

$$6,2832 \times 3 \times 109 \times 25 = 51365 \text{ kilogrammes,}$$

élevés à un mètre par minute, ce qui équivaut à peu près à 11 $\frac{1}{2}$ fois la force d'un cheval.

L'expérience est si aisée à faire, et le résultat donne un indice si exact des qualités d'une machine, que je recommande fortement ce procédé à l'attention de ceux qui désirent avoir de bonnes machines ².

¹ Soient l le bras du levier avec lequel agit le poids P, r le rayon de la roue C, f le frottement, v la vitesse, et n le nombre de révolutions de la roue par minute; alors la puissance est fv , et

$$f = \frac{lP}{r}.$$

Or,

$$v = 2\pi rn; \text{ donc } fv = 2\pi lPn.$$

Telle est l'expression de la puissance en kilogrammes élevés à 1 mètre par minute, l étant exprimé en mètres, et P en kilogrammes.

² Ce procédé présente néanmoins des inconvénients qui en rendent l'emploi incommode, surtout pour l'essai des grandes machines. Le frottement du frein de-

563. Le *compteur*. Pour évaluer l'économie de combustible qui résulte de l'état des machines de Watt, on attache au balancier un appareil propre à faire connaître le nombre de coups de la machine en un temps donné ; on l'appelle le *compteur* : il consiste en un système de roues dentées semblables à celles d'une horloge, et disposées de façon que chaque coup de la machine fait passer une dent de la première roue. Un index montre combien il y a eu de coups dans l'intervalle des observations. Le *compteur* est renfermé à clef dans une boîte, pour le préserver de toute altération ou fraude pendant l'absence de l'observateur. Si la boîte est attachée à l'axe du balancier, l'inclinaison du balancier déterminera le pendule à osciller à chaque coup de la machine, et fera passer ainsi chaque fois une dent du compteur. La boîte peut aussi être fixée aux supports du balancier, et alors à chaque coup une petite détente fait mouvoir une dent. Le *compteur* est encore usité dans le Cornouailles, afin que les inspecteurs puissent faire un rapport mensuel sur l'effet des machines, et il est utile dans différents cas où l'on désire obtenir une réduction dans la consommation de combustible.

vient alors insuffisant pour fournir la résistance convenable, et si l'on cherche à l'augmenter en serrant la vis de pression, les parties s'échauffent tellement, qu'il est impossible de continuer l'épreuve. Il est d'ailleurs difficile de maintenir uniforme l'intensité du frottement et de la résistance qu'il produit, ainsi que de proportionner à chaque instant le poids qui sert à la mesurer : on peut toutefois remédier en partie à ce dernier défaut, en employant, au lieu de poids, un dynamomètre ou peson à ressort et à cadran, qui montre d'un coup d'œil les valeurs variables de la résistance et l'effort de la machine.

Mais il est des moyens plus précis et plus commodes pour mesurer les effets dynamiques, que l'on doit à MM. Molard, White, Welter et Lavelaye, et qui sont fondés sur les mesures des pressions, au lieu du frottement. Le lecteur pourra en voir les descriptions et les dessins dans le *Bulletin de la Société d'Encouragement* de Paris, numéro de juillet 1827, et dans le *Dictionnaire technologique*, vol. XII, p. 457, ou le *Traité des Machines* de M. Hachette, 3^e édition, 1828.

Quant au dynamomètre à frein, on trouvera des détails très-étendus dans le *Rapport sur la Machine à vapeur du Gros-Cailrou*, par M. de Prony, qui a fait avec cet instrument de nombreuses expériences. M.

De la conduite ou manœuvre des machines à vapeur.

564. L'attention doit d'abord se diriger sur les qualités du combustible et de l'eau. Le combustible, de quelque espèce qu'il soit, doit être sec, séparé de toute terre, divisé en petites parties, etc. Les morceaux de charbon ne doivent pas être plus gros qu'un œuf, et il faut qu'ils contiennent le moins possible de pyrites. Le bois doit être en bûches qui n'aient pas plus de 30 centimètres de longueur, ni de 6 à 8 centimètres de diamètre. L'eau doit être, autant que possible, pure et douce.

Toutes les eaux naturelles contiennent une certaine quantité de matières étrangères, provenant des couches des terrains qu'elles traversent. Les eaux des sources les plus pures coulent dans des lits de gravier, ou dans des roches siliceuses ou argileuses, et elles contiennent pour la plupart une petite quantité de matière saline, qui est principalement du sel marin. Dans les pays calcaires, l'eau contient généralement une plus grande quantité de matière en solution, très-fréquemment de la chaux, ou du sulfate et du carbonate de chaux, qui constituent ce qu'on appelle les *eaux dures*¹. Les eaux des mines sont encore plus impures ; souvent elles contiennent des terres, des acides, des alcalis et des sels. Aussi, l'eau dans son état naturel est fréquemment impropre pour le service des machines à vapeur.

Il n'y a presque pas d'autre méthode praticable pour améliorer l'eau, que de l'exposer longtemps à l'air libre dans des bassins. Un moyen plus efficace consiste à faire servir plusieurs fois de suite la même eau, en ajoutant seulement ce qui est nécessaire pour compenser les pertes ; mais cela même exige un plus grand réservoir pour donner à l'eau le temps de se refroidir. L'eau de rivière trouble peut être clarifiée au moyen de la filtration à travers du sable ou du gravier.

Pour prévenir l'adhérence des sédiments que forment les eaux

¹ Le savon ne se dissout pas aisément et ne mousse pas bien dans les eaux dures ; au contraire, il est décomposé en partie, et il forme de légers flocons insolubles dans l'eau.

impures au fond des chaudières, on a coutume d'y jeter des pommes de terre écrasées, de la drèche ou toute autre substance farineuse, qu'on renouvelle fréquemment.

565. Pour les machines des bateaux à vapeur, on est obligé d'employer l'eau de mer, qui dépose du sel aussitôt qu'elle est saturée. On peut prévenir ce dépôt en laissant constamment échapper de la chaudière une petite quantité d'eau chaude. 100 parties d'eau de mer contiennent, en poids, 3 parties de matières salines, et l'eau est saturée quand elle en contient 36 parties : supposons que la chaudière contienne 100 parties d'eau, et qu'on en emploie la quantité s pour former la vapeur, en laissant écouler la portion u ; désignons par a le nombre de parties de sel contenues dans l'eau au degré de saturation qu'on voudra atteindre : la quantité de sel déposée et la quantité écoulée avec l'eau seront égales, si l'on a l'équation

$$3(s + u) = au,$$

qui donne

$$u = \frac{3s}{a - 3}.$$

Fig. 1. La table suivante donne les degrés de saturation et les températures auxquelles ont lieu les dépôts dans 1000 parties d'eau de mer soumises à l'évaporation, d'après les expériences de M. Faraday.

QUANTITÉ d'eau de mer.	TEMPÉRATURE d'ébullition.	QUANTITÉ de sel contenu dans 100 parties d'eau.	NATURE du dépôt.
1000	101° centig.	3	Nul.
299	102,7	10	Sulfate de chaux.
102	109	29,5	Sel marin.

En supposant $a = 50$, on aura $u = \frac{5}{9}$; ainsi l'eau dans la chaudière n'acquerra pas un plus haut degré de saturation, quand on laissera s'écouler un neuvième de la quantité employée pour la formation de la vapeur. Or, comme l'ébullition de l'eau n'exige qu'environ le sixième de la quantité de chaleur nécessaire pour sa conversion en vapeur, la perte de chaleur due à cette disposition sera

$$\frac{1}{9 \times 6} = \frac{1}{54} {}^1.$$

566. *De la manœuvre d'une machine à condensation.* On suppose la machine en repos, le cylindre refroidi, le condenseur en partie rempli d'eau, et le piston au sommet. Quand l'eau commence à bouillir dans la chaudière, la vapeur entre par les soupapes, ou par les tiroirs et par le tuyau de communication dont les tiroirs nécessitent l'emploi; elle remplit bientôt le cylindre et les tuyaux; le robinet d'injection étant fermé, elle déplace graduellement l'eau dans le condenseur², et ensuite l'air, en les poussant contre la soupape. Quand tout l'air est chassé,

¹ MM. Maudslay et Field ont imaginé une combinaison ingénieuse pour éviter cette perte. Avant de faire entrer l'eau d'alimentation dans la chaudière, ils lui font parcourir l'intérieur d'un tuyau placé concentriquement dans un autre qui sert à évacuer l'eau chaude saturée. La perte d'effet devient alors très-petite, même à un degré de saturation beaucoup moindre. Pour prévenir le dépôt de sulfate de chaux, il faut faire $a = 10$; alors la quantité d'eau écoulée est les trois septièmes de celle employée à former la vapeur, et l'on perd un quatorzième de l'effet du combustible. Il peut être nécessaire de rappeler ici que le sulfate de chaux ne paraît pas exister dans l'eau de mer jusqu'à ce qu'il se soit opéré, par l'évaporation, un changement dans ses principes constituants. Il faut 36 parties de sel pour saturer 100 parties d'eau à 108° centigrades; mais il paraît que le dépôt a lieu avec 50 pour 100 de sel seulement, à la température de 109°.

² Le meilleur moyen serait d'employer un robinet pour faire écouler l'eau du condenseur, en le plaçant assez bas pour que le condenseur fût vidé complètement; aiors, aussitôt que la vapeur arriverait au robinet, on le fermerait jusqu'à ce qu'il devint certain que le cylindre est aussi chaud que la vapeur peut le rendre. On ouvrirait alors de nouveau le robinet, pour le fermer quand la vapeur aurait passé

excepté celui mêlé avec la vapeur, ce qu'on connaît par le bruit aigu qui se produit à l'issue de la soupape, on doit laisser continuer ce bruit, pendant assez longtemps pour laisser passer par la soupape au moins autant de vapeur qu'il en faut pour remplir la machine. Alors on intercepte l'entrée de vapeur, excepté au-dessus du piston, et l'on ouvre le robinet d'injection : si le mouvement ne commence pas, on doit fermer ce robinet et renouveler la purge d'air de la machine en introduisant encore de la vapeur. Si la machine est garnie d'une chemise ou enveloppe, on doit la vider d'eau et d'air, et la remplir de vapeur avant de commencer l'opération pour purger d'air la machine.

Les machines sans condensation n'exigent rien de plus que d'être échauffées et vidées d'eau, et les machines atmosphériques condensant dans le cylindre n'ont besoin que d'être vidées d'air.

567. *De la conduite du feu.* Le point principal est d'obtenir une formation de vapeur aussi régulière que possible. On doit s'efforcer d'entretenir un feu clair et bien nourri, et pour cela on doit éviter de laisser les scories s'accumuler sur la grille. On doit briser chaque charbon qui ne passerait pas dans un anneau d'environ 6 centimètres de diamètre. Le charbon doit être fréquemment jeté, par petites quantités et également sur la surface du foyer ; ou bien, on peut adopter le moyen décrit dans l'article 249 : mais dans les travaux importants, il faut employer le procédé de Brunton (article 250).

568. Il faut avoir grand soin de maintenir la machine et la chaudière propres et en bon état, et pour cela une attention soutenue est plus efficace qu'un travail double, mais irrégulier. Dans un ouvrage de ce genre, ce qui est bien fait est doublement fait, et le zèle le plus fougueux est extrêmement inférieur à une assiduité constante ; car l'un détruit les objets sur lesquels il s'exerce, l'autre les conserve et les améliore.

pendant quelques secondes : par là, elle se trouverait confinée au-dessus du piston, et l'on ouvrirait le robinet d'injection au commencement du mouvement si l'opération avait été bien conduite

410 RÉGULARISATION ET CONDUITE DES MACHINES.

Il faut employer les meilleures espèces d'huiles et de suif ; le suif est préféré pour graisser le piston. Quand les cylindres sont neufs, une légère addition de mine de plomb très-douce et en poudre fine perfectionne l'effet du suif. Une petite quantité de cire paraît aussi rendre l'huile d'un service plus avantageux.

NEUVIÈME SECTION.

De l'application des machines à vapeur à différents usages.

569. L'immense variété des objets auxquels on peut appliquer la puissance de la vapeur, exige que nous bornions notre attention aux plus importants d'entre eux. Ce sont : l'élévation de l'eau, les machines motrices pour l'usage des mines, des manufactures et de l'agriculture, et le roulage ou les transports par terre. L'application des machines à la navigation et aux chemins de fer est assez distincte et assez importante pour exiger des sections spéciales (*voyez sections X et XI*).

De l'élévation de l'eau.

570. On se sert généralement, pour élever l'eau, de pompes foulantes ou aspirantes. La course d'une pompe ne doit pas excéder 2 à 3 mètres ; autrement, l'air qui se dégage de l'eau, les fuites par la chopine ou le piston, et le défaut de pression sur le fluide qui monte après ce dernier, surpassent l'effet utile de l'écoulement par les soupapes. La vitesse du piston doit être tout au plus égale à 54 fois la racine carrée de la longueur de la course par minute (art. 542).

571. Eu égard aux fuites par les soupapes et au dégagement de l'air, la quantité d'eau que peut donner à chaque course du piston une pompe en bon état, est en mètres cubes

$$a = 0,95ld^2 \times 0,7854 = 0,75ld^2,$$

l étant la longueur de la course, et d le diamètre de la pompe exprimé en mètres ; en substituant, au lieu de l , la moitié de la vitesse, on aura le nombre de mètres cubes par minute. Si le dia-

mètre de la pompe est exprimé en centimètres, la formule ci-dessus sera $a = 0,000075ld^2$.

572. La puissance nécessaire pour élever l'eau à une hauteur donnée, se trouve en donnant exactement la hauteur en mètres depuis la surface de l'eau jusqu'au point de décharge, et ajoutant un demi-mètre pour chaque jeu de pompe, à cause de la force nécessaire pour donner à l'eau la vitesse convenable; il faut aussi ajouter un vingtième de la hauteur pour le frottement du piston. Appelant h cette hauteur totale, la charge en kilogrammes sera $0,07854hd^2$.

Il suit de là que, si P est la moyenne pression effective sur le piston en kilogrammes par centimètre circulaire, le diamètre du piston à vapeur, en centimètres, sera ¹

$$D = d \left(\frac{0,07854h}{P} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

¹ Pour trouver la formule générale du diamètre lorsqu'on suppose la vitesse variant en raison sous-double de la longueur du cylindre, et celle-ci constamment égale à deux fois le diamètre, on aura, en désignant par a le volume d'eau à élever,

$$d^2 = \frac{2a}{0,000075V} \quad \text{et} \quad d^2 = \frac{D^2P}{0,07854h},$$

et en égalant ces deux valeurs,

$$\frac{D^2P}{0,07854h} = \frac{2a}{0,000075V};$$

mais, par hypothèse,

$$V = 54\sqrt{l} \quad \text{et} \quad l = \frac{2D}{100}.$$

En substituant, nous trouvons

$$D = \left(\frac{275ah}{P} \right)^{\frac{2}{5}}.$$

La même formule, en mesures anglaises, est

$$D = \left(\frac{5,5ah}{P} \right)^{\frac{2}{5}}.$$

Comme 54 mètres par minute est une très-bonne vitesse pour une machine à élever l'eau, si on l'adopte et qu'on désigne par Q le nombre de mètres cubes d'eau élevés par minute, on aura

$$d = \left(\frac{Q}{0,000075 \times 27} \right)^{\frac{1}{2}} = (494Q)^{\frac{1}{2}};$$

et mettant pour d cette valeur dans celle de D , il vient

$$D = \left(\frac{38,8hQ}{P} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Exemple. Supposons qu'on cherche à élever 2^m,24 cubes d'eau par minute au moyen d'une machine à simple effet, la moyenne pression effective de la vapeur sur le piston étant de 0^{kil},722 par centimètre circulaire, et la hauteur de 272 mètres, distribuée en six jeux de pompe, alors on aura

$$h = 272 + 3 + 13,6 = 288,6;$$

et l'on trouve pour le diamètre du cylindre

$$D = \left(\frac{588 \times 288,6 \times 2,24}{0,772} \right)^{\frac{1}{2}} = 182 \text{ centimètres,}$$

et pour le diamètre de la pompe

$$D = (494 \times 2,24)^{\frac{1}{2}} = 33^{\text{cent}},2,$$

la vitesse étant de 54 mètres par minute.

Pour avoir égard aux causes accidentelles de perte, on doit augmenter d'un vingtième chacun de ces deux diamètres.

Épuisement des mines.

573. L'épuisement des eaux des mines est, en Angleterre, un objet de la plus grande importance. Ce sont les mines qui fournissent l'aliment nécessaire à l'emploi de la puissance de la vapeur, ainsi qu'une grande partie des matériaux sur lesquels

s'exerce cette puissance. Pour les personnes qui s'occupent habituellement des mines, il est rarement nécessaire d'établir les principes qui doivent les diriger dans le choix des machines. L'absolue nécessité d'un système économique d'épuisement est généralement sentie, et c'est par la comparaison des dépenses annuelles, et non par celle des effets d'une quantité donnée de chaleur, qu'on doit estimer cette économie.

Une machine pour les mines doit être d'une construction simple, durable et facile à réparer. Quand le charbon n'est pas cher, les moyens les plus simples sont les plus économiques.

574. Les modes d'épuisement des mines dépendent de la nature des contrées où elles sont situées. Dans un pays montagneux, on peut percer un souterrain ou galerie horizontale depuis la partie la plus basse de la mine jusqu'à la vallée la plus voisine, et ouvrir ainsi une issue à l'eau : c'est seulement quand ce moyen est impraticable qu'on élève l'eau à l'aide de machines, et même alors on ne l'élève pas plus haut que l'endroit où l'on peut pratiquer une galerie ; mais il arrive fréquemment que la configuration du terrain ne permet pas d'autre ressource que celle d'élever l'eau directement jusqu'à la surface du sol. Par exemple, dans les bassins houillers des comtés de Northumberland et de Durham, quelques-uns des puits ont plus de 180 mètres de profondeur ; il y en a même de 270 mètres, sans aucun moyen de construire des galeries d'écoulement. Il faut donc de très-puissantes machines, et en dernier lieu, on y a établi principalement des machines à double effet dont quelques-unes sont d'une force supérieure à celle de 100 chevaux. La plus grande que j'aie vue était située sur la rive sud de la Tyne ; sa force était de 160 chevaux, et elle était susceptible d'aller jusqu'à 200. Dans le Cornouailles, il y a quelques machines encore plus grandes ; mais quand le cylindre d'une machine doit avoir plus de 150 centimètres de diamètre, on trouvera toujours beaucoup d'avantage à employer de préférence deux machines d'une force sous-double.

575. Quand on emploie des machines à double effet pour élever l'eau, généralement une partie du système des pompes est conduite par l'extrémité extérieure du balancier, et une autre

par des traverses diagonales partant du haut de la tige du piston. Dans les cas où l'on n'a pas cru devoir partager les pompes en deux séries, l'ascension du piston a été employée à élever un poids égal à la pression de la moitié de la colonne d'eau dans les pompes ; mais, dans ces cas, une machine à simple effet serait préférable.

576. Le tableau suivant donnera quelque idée du travail fait par une quantité donnée de combustible, et de la nature des machines les plus estimées dans le Cornouailles. Les résultats ne peuvent être regardés comme exacts que par la compensation réciproque des différentes erreurs qu'entraîne le mode d'estimation ; car le poids de la colonne d'eau est moindre que la résistance, et le compteur indique seulement le nombre de coups de piston, et non la quantité actuelle d'eau élevée.

Extrait d'un rapport concernant six machines despot

Nota. Les six machines

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
MINES	DIAMÈTRE	CHARGE	LONGUEUR	NOMBRE	NOMBRE	HAUTEUR	DIAMÈTRE
	du cylindre.	par centimètre carré sur le piston.	de la course dans le cylindre.	de coups par minute.	de jeux de pompes.	de la colonne d'eau élevée par chaque jeu de pompes.	de cylindre.
	C. mètr.	Kilogram.	Mètres.			Mètres.	C. mètr.
Wheal Hope.....	153	0,59	2,75	5,5	1 1 1	85,70 20,74 20,74	58 50,5 27,9
Wheal Vor.....	203	0,94	3,05	5,56	5 4 1 1	247,66 80,52 21,96 21,65	58 40,0 24 25,1
Mines consolidées.....	228	0,66	3,03	8,12	1 1 6	10,98 27,45 265,82	50,5 50,5 40,6
Dolcath.....	177	0,705	2,67	6,3	1 5 1 3 1	3,66 170,19 6,71 119,25 28,57	20 28,8 50,5 29,2 55
Ting-Tang.....	160	0,94	2,56	6,1	2 4 1 1 1	71,57 149,14 57,52 21,04 21,96	22,8 55,7 50,7 21,8 2,5
Binner Down.....	177	0,43	3,05	8,6	1 1 1	5,18 42,7 74,42	25,4 22,8 45

¹ L'hectolitre de bonne houille, telle que celle de Newcastle ou de Saint-Étienne, pèse moyennement 80 kilogrammes.

² Il doit y avoir erreur dans les données de cette ligne, car le calcul donne 7349, au lieu de 11467.

Les mécaniciens nommés dans ce tableau * sont ceux qui sont chargés de tracer le plan des machines, et de surveiller leur exécution ainsi que leur établissement, et ils sont payés en raison de l'effet dynamique que produisent les machines. Ils les suivent ensuite dans leur action, et en dirigent tous les renouvellements et toutes les réparations nécessaires, moyennant des salaires fixes. Les principaux constructeurs des machines pour les mines de Cornouailles, sont MM. Trevenan, Carne et Wood, MM. Harvey et compagnie, MM. Fox et compagnie, et MM. Price et compagnie.

577. La profondeur du puits des pompes d'une mine est divisée en plusieurs levées ou reprises successives, qui ne doivent pas avoir, s'il est possible, plus de 45 à 55 mètres, avec une bêche ou réservoir à chaque reprise de pompe, et par conséquent, l'eau s'élève successivement d'une bêche à l'autre, ou d'étage en étage. Les pompes ont rarement plus de 40 centimètres de diamètre, et l'on se trouvera toujours mieux d'employer une série additionnelle que d'excéder cette dimension.

* Dans l'année 1811, beaucoup de propriétaires des mines considérables d'étain et de cuivre du comté de Cornouailles résolurent de faire estimer le travail exécuté par leurs diverses machines à vapeur, parce qu'on soupçonnait que quelques-unes ne donnaient pas un résultat proportionné à la consommation de combustible. Pour plus de certitude d'arriver au but, il fut décidé qu'un compteur serait attaché à chaque machine (art. 563), et que toutes seraient placées sous la direction d'un même ingénieur ou d'un mécanicien recommandable, qui ferait connaître tous les mois les particularités suivantes :

1° Le nom de la mine ; 2° les dimensions du cylindre à vapeur, et si la machine était à simple ou à double effet ; 3° la charge par unité d'aire dans le cylindre ; 4° la longueur de la course dans le cylindre ; 5° le nombre de coups par minute ; 6° le nombre de jeux de pompes ; 7° la profondeur d'où chacun élevait l'eau ; 8° le diamètre des pompes et la durée du travail ; 9° la consommation de charbon ; 10° le nombre de coups de piston dans le temps donné ; 11° la longueur de la course dans la pompe ; 12° la charge ; 13° le poids élevé d'une unité de longueur par mesure de charbon, et enfin une colonne d'observations et des noms des mécaniciens.

La surveillance générale fut confiée à MM. Thomas et John Lean, auxquels les divers propriétaires et les ingénieurs ordinaires des mines respectives procurèrent toutes les facilités et tous les secours qui étaient en leur pouvoir. Le premier rapport mensuel eut lieu pour le mois d'août 1811. (*Voyez le Magasin philosophique*, vol. XLVI, p. 116.)

578. Les machines les mieux disposées pour l'économie du combustible sont décrites dans les articles 411 et 419, et les plus simples, dans les articles 393 et 400. Comme il arrive fréquemment qu'une machine doit être transportée de place en place, on voit dans la planche XIII une machine supportée par des châssis de fer fondu que l'on peut démonter à volonté.

579. Pour extraire le minerai et le charbon, on emploie une machine à double effet de la force de 20 à 30 chevaux. Les dimensions du cylindre doivent être telles, que la puissance soit égale à la résistance, quand l'effort est le plus grand possible. Aussi, ces machines exigent-elles une plus grande quantité de combustible pour élever la même quantité de matière à une hauteur donnée, et il y a aussi beaucoup de perte d'effet par suite des arrêts de la machine, des changements de mouvement, etc. Le maximum d'effet dans une machine de ce genre, appliquée à ce travail irrégulier, consiste à peu près en ce qu'un kilogramme de charbon en élève 21000 de minerai. Le poids de matière enlevé à chaque fois est de 150 à 350 kilogrammes. Le poids d'une corde servant à monter les tonnes est d'environ 0,011 c³ kilogr. par mètre courant, *c* étant la circonférence en centimètres. Le plus grand effort sur une corde ne doit pas excéder 1200 fois le poids d'un mètre de la corde. L'effort qu'elle exerce sur la machine doit être contre-balancé en faisant enrouler la corde sur un tambour conique en spirale ¹, comme la fusée d'une montre, ce qui réduit la dépense de la machine et la consommation de combustible. Les machines doivent agir par expansion (art. 419), et être régularisées par un volant (art. 450); leur jeu sera réglé par un modérateur (art. 550).

Quand il est nécessaire d'établir un plan incliné dans la mine, on emploie, pour amener les charbons jusqu'au puits, une petite machine à haute pression, du genre de celles décrites dans l'article 371.

580. On emploie aussi des machines pour briser le minerai

¹ Voyez l'*Encyclopédie méthodique, Dictionnaire de Chimie et de Métallurgie*, deuxième partie, planche XX, ou le procédé de Gilpin (*Transactions de la Société des Arts*, vol. XXV, p. 76.)

au moyen de pilons ou bocards, procédé qui paraît susceptible de beaucoup d'améliorations. On se sert de machines à double effet pour élever les pilons à l'aide de cames ; et comme la puissance de la machine est à peu près constante, l'espace parcouru par le pilon doit commencer à croître suivant la loi relative à une force constante ; autrement le mouvement serait irrégulier, et la perte de puissance considérable. Le poids d'un pilon est ordinairement d'environ 46 kilogrammes, et la hauteur à laquelle on l'élève d'à peu près 60 centimètres ; il ne faut pas élever moins des deux tiers des pilons en même temps.

Établissement de pompes pour le service des villes.

581. Les mêmes formules s'appliquent aux systèmes des pompes hydrauliques, comme aux autres moyens d'élever l'eau quand elle monte perpendiculairement ; mais comme l'ascension de l'eau a lieu rarement de la sorte, il faut, au lieu d'ajouter 0^m,5 pour chaque élévation partielle (art. 572), augmenter la hauteur verticale de la quantité

$$\frac{v^2L}{5d}$$

v étant la vitesse en mètres par seconde, L la longueur du tuyau en mètres, et d son diamètre en centimètres ; il faut aussi ajouter un dixième de la hauteur pour le frottement du piston, et procéder d'ailleurs comme dans l'article cité.

582. L'approvisionnement d'eau pour une ville doit être de 280 litres par jour pour chaque maison, et cette quantité, pour une maison de grandeur moyenne, ne dépasse pas ce qu'exige le bien-être et la propreté des habitants. Elle revient à 56 litres par personne, en Angleterre. Dans cette évaluation, je ne comprends pas ce qui est nécessaire pour l'arrosage des rues, pour les brasseries, les usines et autres usages divers. Tous ces objets exigent environ 56 litres de plus par jour pour chaque personne pendant l'été, de sorte que le maximum d'eau à fournir est de 112 litres par personne et par jour. Dans les villes petites et ouvertes, il ne faut qu'une moindre quantité d'eau ; mais même dans ce cas, on

doit compter sur 70 litres ¹. En élevant l'eau par des pompes foulantes, le réservoir d'air doit toujours être dans la direction du mouvement du fluide, et non latéralement ; un manque d'attention à cet égard cause des secousses qui desserrent les joints, brisent les manivelles et détruisent le mécanisme. Les machines à double effet munies de volants sont les plus économiques pour les lieux où le combustible est cher (art. 419), et celles à simple effet quand il est à bas prix (art. 411 et 400) (voyez les planches XIV et XV).

Des machines motrices à l'usage des manufactures.

583. *Usines à fer.* Dans ce genre de fabrication, la machine à vapeur est appliquée aux machines soufflantes, aux marteaux de forge, aux cylindres forgeurs, aux laminoirs, aux fenderies, ainsi qu'à divers autres usages.

584. *Machines soufflantes.* L'objet de ces machines est de fournir de l'oxygène aux fourneaux, soit pour fondre les minerais, soit pour les réduire à l'état métallique ; dès lors, pour que l'effet soit constant ou à peu près, à quantité égale de combustible, il faut que la quantité d'oxygène fournie soit constante. Mais dans

¹ Le tableau suivant est extrait principalement de la *Philosophie naturelle* de Leslie, avec quelques additions et une évaluation plus exacte de la fourniture des eaux dans Rome (ancienne).

VILLES.	POPULATION.	QUANTITÉ D'EAU FOURNIE	
		Par jour.	Par individu.
Londres.....	1,225,694	110,400 mètr. c.	90 litres.
Édimbourg.....	138,255	2,283	16,5
Rome (moderne).....	156,000	150,220	1105
Rome (ancienne).....	1,200,000	500,000	250
Paris (*).....	713,765	8,515	12
Plymouth.....	21,570	950	44

(*) Le canal de l'Ouerc est destiné à amener dans Paris 80,000 mètres cubes d'eau par jour, c'est-à-dire environ 100 litres par habitant.

un volume fixe d'air sec, il y a environ dix pour cent de moins d'oxygène à 30° qu'à zéro, et douze pour cent de moins quand l'air à 30° est saturé de vapeur, à cause de la dilatation : par conséquent, si le service d'un fourneau exige en hiver 42,000 litres d'air par minute, il en faudra en été 45,500 pour obtenir le même effet ; et l'on devra gagner la différence, partie en agrandissant l'ouverture, partie en augmentant l'intensité du courant.

On produit ordinairement le courant en comprimant l'air jusqu'à ce qu'il soutienne une colonne de 10 à 16 centimèt. de mercure (ou de 0^{kil}, 11 à 0^{kil}, 17 par centimètre circulaire), suivant que l'exige la qualité de la houille à brûler ; généralement on adopte la moyenne entre ces quantités. Le volume d'air fourni varie de 84,000 litres à 33,600 par minute.

Si le piston du cylindre d'une machine soufflante a une vitesse de v mètres par minute, que p soit la force de compression en kilogrammes par centimètre circulaire, et d le diamètre du cylindre en centimètres, alors, en supposant que le frottement oblige d'augmenter la puissance dans le rapport de 1 à 1,25, nous aurons $1,25dpv^3$ pour la puissance évaluée en kilogrammes élevés à un mètre par minute quand la pompe soufflante est à double effet, et la moitié de cette quantité quand elle n'opère qu'à simple effet*. Le volume du réservoir d'air régulateur devrait être proportionné d'après le principe exposé (art. 211), et les ouvertures ou les passages de l'air doivent être environ le vingtième de l'aire du cylindre. La quantité d'air introduite dans le réservoir sera d'environ un cinquième moindre que la capacité du cylindre, l'air étant pris à la densité de l'atmosphère, et cette diminution aura lieu tant à cause des fuites par les soupapes qu'en raison de la raréfaction qui doit s'établir dans le cylindre pour que l'air atmosphérique puisse y entrer avec la vitesse convenable.

Pour cet objet, aussi bien que pour tous les autres que présentent les usines à fer, on trouvera préférable d'employer les ma-

* Cette règle n'est qu'approximative ; mais elle est assez exacte pour les faibles degrés de pression. Pour une pression un peu forte, il faut appliquer les principes de la note de l'art. 377.

chines à double effet et à condensation, construites de manière à agir, soit par expansion, soit à pleine pression (*voyez* art. 421).

585. *Filatures de coton.* Les machines à vapeur les mieux adaptées aux filatures de coton sont celles à double effet agissant par expansion. La pression moyenne sur le piston d'une machine de ce genre et à basse pression, quand elle agit avec le plus grand avantage possible, est d'à peu près $0^{\text{kil}},54$ par centimètre circulaire (art. 420), et l'on peut compter que chaque 2 centimètres circulaires du piston conduisent une broche de continue avec les machines préparatoires. Quant à la filature par mull-jenny, y compris les machines préparatoires, on fera le calcul en ajoutant 15 au nombre qui désigne le numéro du fil, et multipliant la somme par 0,26; le résultat exprimera le nombre de broches correspondant à un pouce circulaire (anglais) du piston ¹. Par exemple, si le numéro est 40, on a alors

$$40 + 15 = 55 \quad \text{et} \quad 0,26 \times 55 = 14 \text{ broches.}$$

Il est un peu plus exact d'exprimer en chevaux la force de la machine, et pour cela on peut dire que la force d'un cheval conduit 100 broches de continue avec les machines préparatoires. En ajoutant 15 au numéro de la filature par mull-jenny et multipliant la somme par 8, le résultat sera le nombre de broches

¹ Le numérotage du fil suivi en Angleterre est différent du système adopté en France. Dans le premier pays, le numéro indique le nombre d'écheveaux contenus dans une livre de fil, et chaque écheveau paraît être de 120 yards (110 mètres). Une broche donne par jour, terme moyen, 2 écheveaux ou 220 mètres, et le déchet à la filature est d'environ un dixième.

Le numérotage métrique du fil adopté en France est fondé sur cette base, que l'écheveau est de 1000 mètres, et que le numéro désigne le nombre d'écheveaux contenus dans un demi-kilogramme.

D'après ces données il est facile de faire la transformation de la règle exposée dans le texte, pour l'appliquer aux mesures métriques.

Ajoutez 0,6 au $\frac{10}{3}$ du numéro du fil, et la somme donnera le nombre de broches correspondant à un centimètre circulaire du piston.

Par exemple, pour le fil n° 10, on aura

$$0,6 + \frac{10}{3} = 5,9,$$

ou à peu près 4 broches par centimètre circulaire.

M.

équivalent à la force d'un cheval, y compris les machines préparatoires¹.

La force d'un cheval conduira 12 métiers à tisser avec les machines préparatoires².

L'ouvrage d'un jour, en supposant 11 heures de travail, doit se faire avec environ 40 kilogrammes de bonne houille grasse par force de cheval.

586. *Papeteries*. Les machines à vapeur sont aussi très-usitées dans les papeteries ; car dans les endroits où les cours d'eau fournissent un moteur régulier, ils sont devenus d'une cherté équivalente à celle de la machine à vapeur, tandis que celle-ci possède des avantages qui lui sont particuliers.

Un moulin à piles exige une force motrice d'environ 7 chevaux. Les nouvelles machines pour la fabrication du papier exigent de deux fois à deux fois et demie la force d'un cheval. Il faut une force de $3\frac{1}{2}$ chevaux pour préparer 1000 kilogrammes de vieux cordages par semaine, la machine travaillant 10 heures par jour³.

Des machines motrices pour les usages agricoles.

587. Il y a peu de travaux dans une ferme qui admettent l'emploi de la puissance de la vapeur avec économie ; mais quand on l'emploie, il est avantageux de la faire servir à autant d'usages que possible.

Les travaux auxquels les machines à vapeur peuvent être appliquées sont le battage et le vannage des grains, les hache-paille, le broyage des os pour engrais et la mouture des grains destinés à engraisser le bétail ou aux usages domestiques.

¹ Pour le numérotage métrique, cette règle revient à celle-ci :

Ajoutez 1,8 au numéro, et multipliez la somme par $\frac{200}{3}$, le produit exprimera le nombre des broches par force de cheval.

Pour le n° 10, on aura

$$(10 + 1,8) \times \frac{200}{3} = 787 \text{ broches.} \quad \text{M.}$$

² Brunton's *Compendium of Mechanics*, p. 109.

³ Fenwick's *Essays*, third edition, p. 62.

La chaudière peut servir en outre à préparer à la vapeur la nourriture des bestiaux. Je ne vois pas d'autres objets d'application à considérer ¹, excepté les dessèchements dans les pays marécageux et l'arrosage dans les autres. C'est au propriétaire à examiner si l'usage de la machine à vapeur compensera ou non les frais et les bénéfices ².

588. *Battage*. Les machines à battre le grain qui doivent être dirigées par la puissance de la vapeur sont de la force de 4 à 6 chevaux, et les proportions ordinaires sont :

Pour les rouleaux alimentaires, 35 à 36 $\frac{1}{2}$ révolutions par minute, et 8 centimètres de diamètre;

Pour les cylindres ou volants à râeaux, 30 révolutions par minute, et 1 mètre de diamètre;

Pour le tambour, 500 révolutions par minute, et 1 mètre de diamètre.

Le tambour est muni de quatre batteurs garnis de tôle épaisse; un volant ou châssis cylindrique portant à sa circonférence quatre séries de dents de 12 centimètres de long forme le volant ratisseur ³.

¹ Dernièrement M. Heath-Coat, à Tiveston, a cherché à appliquer la vapeur au labour des terres. La première charrue à vapeur qu'il a construite pour le défrichement des marais ou landes, a été employée pendant plusieurs mois dans les friches de Bolton-le-Moore, et a, dit-on, parfaitement réussi. M.

² Avec une machine à simple effet (art. 409), un hectolitre de charbon élève à un mètre 4800 mètres cubes d'eau. Pour toute autre hauteur, il faudra diviser 4800 par la hauteur en mètres; il suffit d'une machine de la force d'un cheval, travaillant 11 heures et demie par jour, pour produire cet effet journallement. La dépense sera d'environ 200 fr. par an et par force de cheval, pour intérêt et frais de renouvellement ou de réparations de la machine. La consommation de combustible sera de 46 litres ou 58 kilogr. de charbon par jour et par force de cheval. Un homme et un enfant suffiront pour surveiller une machine de la force de 10 à 12 chevaux, et pour faire une partie de la distribution de l'eau. La quantité d'eau nécessaire pour arroser un hectare est de 56 mètres cubes par jour, et par conséquent une machine de la force de 10 chevaux arrosera 225 hectares, si l'eau est élevée à 3 mètres. Les frais excéderont rarement 30 fr. par hectare, pour une irrigation qui durerait six mois de l'année. Dans des terrains propices, l'opération serait très-avantageuse, surtout si l'on découvre, comme il y a lieu de l'espérer, des moyens plus parfaits d'appliquer l'eau à l'arrosage.

³ Les gerbes étendues sur la table alimentaire doivent avancer de manière à

La largeur de la machine, ou la longueur des rouleaux pour recevoir le grain, est limitée par la largeur à laquelle l'ouvrier peut donner ses soins, c'est-à-dire environ 12 à 15 décimètres. La quantité de blé battu par une machine de 12 décimètres de largeur varie, suivant la qualité, de 4 à 8 hectolitres par heure, et, quant à l'avoine, sa quantité est de 5 à 10 hectolitres par heure.

La puissance nécessaire est de 13,500 kilogrammes élevés à un mètre par minute pour battre le grain, et de 18,000 kilogrammes élevés à un mètre par minute pour le vanner¹. Des machines d'une autre dimension agissent à peu près en proportion de leur largeur. Ceci suppose que la machine est bien construite et tenue en bon état.

L'espèce de machine propre à l'usage des fermes est la machine à double effet (art. 414 et 419), avec régulateur à tiroir, et construite de la manière la plus simple².

589. *Moulins à blé*. La force moyenne nécessaire pour moudre et apprêter un hectolitre de blé par heure, est de 12,150 kilogrammes élevés à un mètre par minute, et la meilleure vitesse pour la circonférence de la meule est de 7 mètres par seconde. Avec cette vitesse, une paire de meules de 1^m,5 moudra de 1^{hect},4 à 1^{hect},7 par heure, suivant leur qualité et l'état du grain. On doit employer pour ce genre d'ouvrage la machine à double effet et à expansion : quand elle travaille le plus avantageusement possible à une basse pression, elle doit moudre 10 hectolitres de blé pour chaque hectolitre de houille, et moyennement la mouture doit être de 9 hectolitres pour cette quantité de charbon³. La même espèce

recevoir six coups de batteur par 5 centimètres de longueur. Les coups sont donnés avec une vitesse d'environ 16 à 17 mètres par seconde, c'est-à-dire que le batteur doit se mouvoir avec une vitesse de 1000 mètres par minute. Ces conditions étant remplies, le mécanicien pourra d'ailleurs disposer le reste de la machine comme il lui plaira.

¹ Ces nombres correspondent respectivement à des forces de 3 et de 4 chevaux.

² Lorsqu'on emploie la machine à vapeur aux irrigations, on peut y adapter aussi une machine à battre le grain si les localités sont favorables ; mais, dans ce cas, la machine motrice doit être à double effet.

³ En effet, la consommation de 3 kilogr. de houille par heure représente la

de machine, avec de la vapeur à haute pression, fera naturellement plus d'ouvrage pour une quantité double de combustible (voyez art. 419 et 422).

De l'application de la force de la vapeur aux voitures.

590. L'application d'un agent mécanique au mouvement des voitures est un sujet qui a excité de bonne heure l'attention des hommes spéculatifs. Emerson a décrit dans sa Mécanique quelques-uns de leurs projets, et il donne à ce sujet un exemple de calcul (ex. 20, page 194) qui paraît être très-peu compris. L'objet de ce calcul est de déterminer la force nécessaire pour mouvoir un chariot ; mais, dans le fait, il détermine simplement la relation des forces, la puissance étant la même, soit qu'elle agisse en dedans ou en dehors du chariot, pourvu qu'elle n'en augmente pas le poids. Mais la force, ou plutôt ses organes ne sauraient agir sans ajouter au poids à traîner. Dans les chariots à vapeur, la masse totale de la machine avec sa chaudière, son combustible et son eau, doivent être transportés aussi bien que la charge. Afin de rendre la machine aussi simple et aussi légère que possible, et d'éviter le poids de l'eau et la complication de l'appareil à condenser, on emploie toujours la vapeur à haute pression.

L'idée d'employer la vapeur comme force mouvante de voitures a été beaucoup ridiculisée, et l'on doit avouer que ce n'était pas sans raison pour quelques-uns des projets qui ont été proposés. L'expérience a prouvé que, sur les chemins de fer, cette application est très-praticable, et qu'elle n'entraîne pas plus d'accidents qu'aucun autre des emplois variés de la force de la vapeur ¹.

force d'un cheval (art. 419-422), et un hectolitre de houille étant équivalent à 27 fois cette quantité, représentera la force de 27 chevaux ; ce qui donne la proportion

12150 ; 1 :: 4500 × 27 ; x = 10 hectolit. de mouture
par hectolitre de houille.

M.

¹ Sur les chemins ordinaires, il y a plusieurs circonstances qui empêchent l'application de la force de la vapeur. Les ondulations du chemin exigent qu'on se pourvoie d'une puissance capable de monter la pente la plus rapide, ce qui néces-

591. *De l'application de la force de la vapeur aux chemins de fer.* La puissance de la vapeur peut être appliquée, soit au moyen de machines fixes, soit à l'aide de machines locomobiles ou de chariots à vapeur.

Les machines fixes ont été appliquées seulement au cas de plans inclinés, et leur construction n'exige aucune disposition particulière de plus que dans les machines motrices ordinaires. On emploie généralement à cet effet des machines à basse pression, et elles sont évidemment les plus sûres et les plus économiques, à moins que la localité ne fournisse pas de l'eau en quantité suffisante pour les alimenter.

Le mouvement de la machine doit être régularisé par un volant, et réglé par une soupape à gorge.

Pour proportionner la force de la machine à l'effet que l'on veut produire, l'aire du piston en centimètres, multipliée par la pression effective en kilogrammes sur chaque centimètre du piston, doit être égale à la résistance des chariots, augmentée du frottement de la corde ou chaîne de traction et de celui de la machine.

Si A est la charge dans la montée et D la charge dans la descente, que q désigne la résistance provenant du frottement de l'axe, et i l'angle d'inclinaison, la résistance des chariots ascendants et descendants sera

site une énorme addition au poids de la machine; de sorte que la machine elle-même consommerait sur une route ordinaire la moitié de la force qu'elle engendre. On peut réduire la résistance de ces chemins en se servant de roues plus grandes, car elle vient surtout de ce que les roues s'enfoncent dans le sol; de plus grandes roues donnent une plus grande surface, sans augmenter la dépression du sol, tandis que des roues à larges jantes, mais petites, ne donnent que peu ou point d'avantage. (Voyez mon *Traité des Chemins de fer*, p. 65.)

On peut prouver qu'il n'y a pas de pieds qui exigent moins de force que de simples roues. Un animal est construit pour se mouvoir à travers les obstacles, et quand nous tentons d'imiter les belles dispositions de la nature, nous ne devons jamais perdre de vue leur objet; c'est leur parfaite correspondance avec le but et la simplicité des moyens d'exécution qui excitent notre admiration; et plus nous étudions les applications des forces que la nature nous présente, plus nous sentons l'avantage de connaître les premiers principes qui président à l'action des puissances naturelles.

$$A(q \mp \sin i) = D(q - \sin i) = (A - D) \sin i \mp (A \mp D) q.$$

Le poids de la corde ou de la chaîne et des parties mobiles de la machine étant C, le frottement et la roideur de la corde peuvent être représentés par CS ; par suite, si d est le diamètre du piston, et p la pression par centimètre circulaire, nous aurons

$$qd^2 = (A - D) \sin i \mp q(A \mp D) \mp CS.$$

On tire aisément de là le diamètre du cylindre. Dans tous les cas, si R est le rayon des roues du chariot, r celui des essieux, et f le frottement quand la pression est 1, on a

$$q = \frac{rf}{R}.$$

De même on a

$$S = \frac{xf}{X},$$

X étant le diamètre des poulies et x celui des axes.

Quand la route est horizontale, on a $\sin i = 0$, et par conséquent,

$$pd^2 = q(A \mp D) \mp CS;$$

quand elle est verticale, $\sin i = 1$, et l'on a

$$pd^2 = A - D \mp S(A \mp D \mp C).$$

Dans ces équations, on suppose que le piston de la machine et la charge se meuvent avec la même vitesse. Si les chariots ont une vitesse qui soit n fois celle du piston, alors il faudra multiplier par n le carré du diamètre.

592. *Chariots à vapeur.* Les machines des chariots à vapeur sont à double effet et sans condensation, du genre de celles décrites dans l'article 572. Elles ont généralement deux cylindres. Si p désigne la pression moyenne effective sur le piston, d le diamètre des cylindres et v la vitesse en mètres par minute; si i est l'angle d'inclinaison de la route, q le frottement de tous les

axes, P le poids des chariots et de leurs charges, V leur vitesse en mètres par minute, et M le poids de la machine; alors on aura dans la montée

$$V (P + M) (q + \sin i) = 2pvd^2,$$

et dans la descente,

$$V (P + M) (q - \sin i) = 2pvd^2.$$

Pour que la machine ne glisse pas dans la montée, il faudra qu'on ait l'équation

$$P = M \left(\frac{0,08 \cos i - \sin i}{q + \sin i} \right);$$

et pour qu'elle ne glisse pas dans la descente, on devra avoir

$$P = M \left(\frac{0,08 \cos i + \sin i}{q - \sin i} \right).$$

Dans l'un ou l'autre cas, on a

$$q = \frac{r}{8R},$$

r étant le rayon de l'essieu, et R celui de la roue.

Les machines devront agir par expansion quand elles se mouvront avec la vitesse ordinaire, sur une route d'une inclinaison moyenne, et avoir la faculté d'agir à pleine pression sur les rampes les plus roides (voyez section V, art. 371-380, et la section XI).

Un chariot à vapeur est représenté dans la pl. XXIV, et il est décrit dans la légende qui s'y rapporte, avec un nouveau projet de roues elliptiques propres à régulariser la vitesse de ces voitures.

Pour plus de développements, on peut consulter mon *Traité des chemins de fer*, ou la traduction française. (Paris, 1826, Bachelier).

DIXIÈME SECTION.

De la navigation par la vapeur.

593. Pour sentir l'importance de l'application de la vapeur au mouvement des navires, il suffit aujourd'hui de considérer l'extension rapide que prend ce mode de navigation sur tous les points du globe où le commerce est considérable ; l'usage n'en est limité que par l'état encore imparfait de ce nouveau système. Si nous voulions borner nos recherches à la simple application d'une machine à vapeur à un navire déjà construit, notre travail serait très-court et facile à compléter ; mais la construction des navires eux-mêmes est un sujet susceptible de perfectionnement ; et comme nous pensons qu'il est au pouvoir de la science d'indiquer les moyens de perfectionnement, nous devons soumettre au lecteur le résultat de nos travaux.

Les formes des navires, considérées relativement à la stabilité, à la capacité, à la vitesse et à la force ;

Les genres de navires propres à divers usages ;

La résistance et les modes d'impulsion ;

La nature des machines qui conviennent aux navires et la force de leurs parties ;

L'espèce de combustible, et la manière de l'employer pour obtenir le plus grand effet possible :

Tels sont les importants objets que nous nous proposons d'examiner, chacun séparément.

Ces recherches sont également applicables à la navigation commerciale et à la marine de l'État ; mais il y a encore une autre partie du sujet sur laquelle il serait désirable de diriger l'attention.

Dans le cas de guerre, les bateaux à vapeur deviendront un moyen d'attaque ; c'est pourquoi il faut considérer jusqu'à quel

point ils peuvent devenir un moyen de défense, le pouvoir de résister étant la meilleure garantie contre un mode d'agression qui priverait l'Angleterre de plusieurs avantages de sa situation insulaire. Ainsi la construction de chaloupes canonnières pour la défense des rivières, de la navigation fluviale et des havres serait un sujet important de recherches, si les limites de cet ouvrage ne nous l'interdisaient.

Des formes des navires considérées relativement à la stabilité, à la capacité, à la vitesse et à la force.

594. En considérant les propriétés d'un navire, l'ordre de notre sujet exige que nous traitions d'abord de la *stabilité* ou de la force que possède un corps flottant pour résister à tout changement de position ; en second lieu, des formes compatibles avec la stabilité, qui offrent la moindre résistance, et qui par conséquent soient les plus convenables pour la vitesse ; troisièmement, des différentes manières de faire mouvoir les navires, et enfin de la construction envisagée sous le rapport de la solidité.

De la stabilité des navires.

595. Une sphère parfaite flottant sur un fluide n'a pas de stabilité, excepté celle qui tient au frottement du fluide contre ses parois. Si l'on ajoute un petit poids en quelque point de sa surface, ce point descend immédiatement jusqu'à ce qu'il soit tout à fait au-dessous. Un corps d'une telle forme ne saurait être employé comme navire. Il est évident, néanmoins, que lorsqu'on a ajouté un poids et qu'il est parvenu au point le plus bas, la sphère acquiert un degré de stabilité dépendant du rapport de ce poids au sien propre. Ainsi l'on peut augmenter la stabilité en disposant convenablement la charge du corps flottant.

La stabilité est aussi déterminée par la forme du corps flottant ; un sphéroïde, par exemple, est dans un état d'équilibre stable quand son grand axe est horizontal, et un prisme triangulaire résiste avec beaucoup d'énergie à tout changement de position, à

cause de sa forme particulière ; il en est de même d'un prisme rectangulaire mince.

596. On distingue la stabilité dans le sens *longitudinal* et celle dans le sens *latéral* ; il faut les considérer séparément, et quand chacune d'elles est la plus grande possible, leur effet total est un maximum.

597. Pour la navigation des rivières, les moyens d'obtenir la stabilité ne paraissent pas être de beaucoup d'importance ; mais pour la navigation maritime, la stabilité doit être telle, que le navire prenne le moins de mouvement possible par l'action des forces perturbatrices. Il est donc nécessaire de considérer que la mer n'est pas une surface horizontale en repos, et que c'est au moment où la stabilité est très-importante pour un navire, qu'il survient le plus haut degré d'inégalité dans la surface mobile qui le porte.

598. *Stabilité longitudinale.* Un navire en repos serait agité le moins possible par le mouvement de la mer, si ses murailles à la flottaison étaient verticales et si l'avant et l'arrière avaient la même forme ; mais dans la marche, c'est un avantage que les formes se projettent au-dessus de l'eau, tant à l'avant qu'à l'arrière, pour empêcher le navire de plonger la proue dans la lame qui arrive ou d'enfoncer la poupe dans le creux de celle qui fuit. La quantité de mouvement n'est pas augmentée par cette construction, pourvu que les formes produisent des effets semblables et que le degré d'inclinaison soit proportionné à la vitesse que le navire doit prendre. Il est également évident que le navire aura d'autant plus d'aisance dans ses mouvements longitudinaux, que ses extrémités se rétréciront graduellement davantage. Si le navire s'incline par l'action d'une force latérale, les mouvements longitudinaux seront d'autant plus faciles que la section transversale se rapprochera davantage de la forme d'un solide de révolution.

599. *Stabilité latérale.* La seule inégalité de la surface de la mer produit un mouvement latéral considérable, si les flancs du navire ne sont pas sensiblement verticaux ; ainsi, dans les bâtiments destinés à la mer, la stabilité latérale ne saurait être obtenue.

nue par la forme du navire à la surface de l'eau. Le point essentiel est ensuite que la stabilité soit la même dans toute la longueur du navire.

Pour faciliter cette recherche, nous pouvons considérer le navire comme une masse homogène de même densité que l'eau, avec des surfaces verticales ou courbes à la flottaison ; nous pouvons le supposer d'une forme parabolique ayant pour équation $y^n = px$, où y désignera, tantôt l'ordonnée parallèle à la demi-largeur b , tantôt celle du tirant d'eau d , car ces deux suppositions nous permettent de comparer des formes très-opposées.

600. Les ordonnées étant d'abord prises parallèles à la ligne qui mesure le tirant d'eau, nous aurons pour la différence des moments des parties paraboliques, en désignant par i l'angle que fait le corps avec sa position, quand BD (fig. 3, pl. XIX) coïncide avec la ligne d'eau :

ydx ($\frac{1}{2} b - x + y \sin i$) — ydx ($\frac{1}{2} b - x - y \sin i$), qui a pour intégrale,

$$\frac{ny^2x \sin i}{n + 2}.$$

La stabilité est égale à la différence entre cette quantité et le moment du double de l'aire du triangle BCb . Ce moment est

$$\frac{2b^3 \sin i}{8 \times 3} = \frac{b^3 \sin i}{12}.$$

donc la stabilité a pour expression

$$\frac{b \sin i}{12} \left(b^3 - \frac{6nd^2}{n + 2} \right).$$

La capacité du navire est

$$\frac{nbd}{n + 1}.$$

601. Si le terme négatif est moindre que b^3 , le corps n'a pas de stabilité ; d'où l'on voit qu'il faut une certaine relation entre la largeur et la profondeur pour rendre un navire stable. En sub-

slituant pour d^2 sa valeur, l'expression de la stabilité devient

$$\frac{b^3 \sin i}{12} \left(1 - \frac{Gnp^2 b^{\frac{2}{n} - 2n}}{n + 2} \right).$$

602. Si la forme du navire est triangulaire, on a $n = 1$; et désignant par S la stabilité, et par A l'aire de la section, on a

$$S = \frac{b \sin i}{12} (b^2 - 2d^2) \quad \text{et} \quad A = \frac{bd}{2}.$$

603. Si la forme du navire est une parabole ordinaire, on a $n = 2$, et par conséquent,

$$S = \frac{b \sin i}{12} (b^2 - 3d^2) \quad \text{et} \quad A = \frac{2bd}{3}.$$

604. Si c'est une parabole cubique, alors $n = 3$, et

$$S = \frac{b \sin i}{12} (b^2 - 3,6d^2) \quad \text{et} \quad A = \frac{3bd}{4}.$$

605. Si c'est une parabole du cinquième ordre, alors $n = 5$, et

$$S = \frac{b \sin i}{12} (b^2 - 4,3d^2) \quad \text{et} \quad A = \frac{5bd}{6}.$$

Ce cas est représenté dans la planche XIX, fig. 3.

606. La stabilité et la capacité croissent l'une et l'autre à mesure que l'exposant n devient plus grand, mais alors la stabilité exige plus de largeur en proportion de la profondeur.

607. En supposant maintenant que les ordonnées soient parallèles à la largeur, nous avons, pour la différence des moments des parties paraboliques,

$yd x [y + (d - x) \sin i] - yd x [y - (d - x) \sin i]$,
dont l'intégrale est

$$\frac{2yd^2 n \sin i}{n^2 + 5n + 2}.$$

L'expression de la stabilité est alors

$$\frac{b^3 \sin i}{12} - \frac{2xnd^2 \sin i}{n^2 + 5n + 2} = \frac{b \sin i}{12} \left(b^2 - \frac{12nd^2}{n^2 + 5n + 2} \right).$$

L'aire du navire est, comme auparavant,

$$\frac{nb d}{n + 1},$$

et dans le cas du triangle on obtient le même résultat.

608. Mais si la forme du navire est une parabole ordinaire, alors $n = 2$, et

$$S = \frac{b \sin i}{12} (b^2 - 2d^2), \quad \text{et} \quad A = \frac{2bd}{3}.$$

609. Si c'est une parabole du cinquième ordre, comme dans la pl. XIX, fig. 4, alors $n = 5$, et

$$S = \frac{b \sin i}{12} (b^2 - 1,43d^2), \quad \text{et} \quad A = \frac{5bd}{6}.$$

610. Cette espèce de figure peut être aisément tracée avec toutes les variétés de forme, et elle a évidemment un avantage décidé, quant à la stabilité. Il est d'ailleurs si aisé de calculer la capacité dans ce cas, et de décrire la courbe par ordonnées, qu'on doit la préférer aux figures elliptiques que des savants étrangers ont choisies pour type de calcul ¹. La largeur devrait être en chaque point proportionnelle à la profondeur, pour rendre la stabilité égale dans toute la longueur du navire ou pour que le navire ne souffrît pas d'effort inégal par un changement de position ².

¹ Quant aux moyens de décrire les courbes de ce genre, voyez mes *Principes de l'Art du Charpentier*, sect. I, art. 58.

² Quant aux autres méthodes de calcul, voyez l'*Hydrodynamique* de Bossut, tom. I, chap. XIII et XIV, ou le *Traité de Mécanique* de M. Poisson, tom. II, p. 589.

De la résistance des navires.

611. La résistance d'un navire mû dans un fluide croît depuis le commencement du mouvement jusqu'à ce qu'elle devienne égale à la force mouvante, et alors le mouvement devient uniforme. C'est la résistance à ce mouvement uniforme que nous avons seulement à considérer.

Afin de faciliter nos premières recherches, bornons-nous d'abord au cas d'un navire prismatique, à extrémités planes, et se mouvant dans la direction de sa longueur.

612. La résistance d'un tel prisme serait à peu près égale à la colonne d'eau qui donnerait au fluide, dans un canal de même longueur et d'une fois et demie la section de la partie plongée, la même vitesse que celle du prisme.

Car, soit AB (fig. 2, pl. XX) cette colonne, alors la résistance au courant en D doit être égale à la résistance au mouvement en C, la section étant la même ; autrement le mouvement s'accélé-rerait. Mais le fluide s'élève en C, et s'abaisse en D, jusqu'à ce que la différence soit égale à la colonne due à la vitesse du bateau ; et le courant en D doit suffire à la fois à remplir le vide avec une vitesse équivalente à la vitesse du bateau, et à fournir une résistance égale à la pression de l'avant. Cela arrivera quand la colonne d'eau correspondante à la vitesse sera les deux tiers de AB. Si donc v est la vitesse, et qu'on fasse $AE = h$, et $BE = x =$ la colonne d'eau équivalente au frottement, on aura l'équation

$$v^2 = \frac{19,6 (h - x)}{1,5},$$

où 19,6, à une petite fraction près, est le coefficient convenable au mouvement d'un fluide regardé comme dépourvu de frottement ou de cohésion. On tire de cette équation

$$x = h - \frac{1,5v^2}{19,6}.$$

615. Maintenant, si c est le périmètre de la section en contact avec le fluide, a son aire, l la longueur du navire, et F le frottement correspondant à l'unité de surface, nous avons

$$x = \frac{lcFv^2}{a},$$

la colonne d'eau équivalente au frottement étant en raison directe du carré de la vitesse et en raison inverse de l'aire, et le frottement étant proportionnel à la surface du fluide mis en mouvement, ou à la surface frottante du navire.

Ces deux valeurs de x devant être égales, nous aurons donc

$$h = \frac{1,5v^2}{19,6} = \frac{lcFv^2}{a};$$

d'où l'on tire

$$h = \frac{1,5v^2}{19,6} + \frac{lcFv^2}{a}.$$

Mais la résistance étant ordinairement évaluée en kilogrammes, nous avons pour l'eau de mer, $19ha =$ cette résistance $= v^2 (52,5 \times 1,6a + lcF) = R$: et la puissance nécessaire étant proportionnelle à la force de résistance et à la vitesse, cette puissance sera $v^3 (78,8a + lcF)$ kilogrammes élevés à un mètre par seconde, v étant exprimé en mètres par seconde, et F en kilogrammes¹.

614. Pour l'eau douce, il faut mettre 76,2 au lieu de 78,8;

¹ Cette démonstration tend à prouver que la résistance qu'éprouve un navire est égale à la somme des résistances dues à l'impulsion directe et au frottement, ce qui est assez évident; mais ce qui l'est moins, c'est la valeur que l'auteur attribue à chacune de ces résistances. Le coefficient 78,8 de la résistance directe est beaucoup trop fort, puisque les expériences de Bossut et d'Alembert, et celles de la Société d'Architecture navale de Londres, ne donnent que 50 à 60 kilogrammes pour la résistance de 1 mètre carré de surface animée d'une vitesse de 1 mètre. Le coefficient du frottement, qui revient à 0,168, serait au contraire trop faible, puisque les mêmes expériences donnent environ 0,216; mais cette valeur doit varier considérablement, suivant que le navire est en bois ou en fer, ou qu'il est doublé de cuivre, et, dans tous les cas, suivant le plus ou moins de netteté de sa

mais cette correction est inutile dans la pratique. Le coefficient F a été trouvé, d'après l'expérience, égal à 0,168 kilog.

615. Si le navire a une simple proue angulaire, et un arrière de même forme, que a soit l'angle formé par la proue avec la direction de son mouvement, et e l'angle de l'arrière ; alors la pression sur sa surface dépend de la vitesse de cette surface dans un sens perpendiculaire. Cette vitesse est à l'avant $v \sin a$, et à l'arrière $v \sin e$, et par conséquent

$$R = v^2 \left(\frac{52,5 \times 2a \sin^2 a + a \sin^2 e}{2} + lcF \right).$$

L'effet de cette pression dans la direction du mouvement du navire, est en raison du sinus de a à la proue ; mais la quantité de fluide nécessaire pour remplir le vide à l'arrière est constante pour le même angle ; donc

$$R = v^2 \left(\frac{52,5 \times 2a \sin^3 a + a \sin^2 e}{2} + lcF \right) ;$$

et la puissance, exprimée en kilogrammes élevés à un mètre par seconde, sera

$$v^3 \left(\frac{52,5 \times 2a \sin^3 a + a \sin^2 e}{2} + lcF \right).$$

carène. Voici au reste quelques-uns des résultats obtenus par la Société d'Architecture navale.

Vitesse en mètres par seconde	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Vitesse en kilomètres par heure.....	1,8	3,6	5,4	7,2	9,0	10,8
Frottement par mètre carré.....	kilogram. 0,064	0,216	0,427	0,715	1,062	1,419
Résistance directe d'un mèt. carré de surface.	15	60	155	239	572	533

M.

30

Ceci donne la résistance quand le navire est en forme de coin aux deux extrémités, ou de la forme d'une pyramide régulière, a étant l'angle de la face oblique de la pyramide avec la longueur du navire. Il en est encore de même quand le navire se termine en cône ¹.

616. Si la section est un triangle, et que les extrémités soient des pyramides triangulaires, c étant l'angle que forme le côté du triangle avec la face supérieure, et q désignant le produit de $\sin a$ par $\sin c$, la résistance, en kilogrammes élevés à un mètre, sera

$$v^3 \left[\frac{52,5 \times a (2q^3 + q^2)}{2} + 0,1687c \right].$$

La résistance d'un navire de cette forme est moindre que celle d'un solide à surface courbe convexe ², mais aussi sa capacité est plus petite, et sa stabilité dépendant de la forme à la flottaison, il sera sujet au roulis. On ne saurait combiner une grande capacité avec une faible résistance.

617. Si la ligne de flottaison est composée d'arcs de cercle, que le fond soit plat, et le rayon m fois la demi-largeur du navire, que z soit la longueur de la partie curviligne, r le rayon, et

¹ Ces formules, quoique plus compliquées que celles qu'on donne ordinairement pour exprimer la résistance des fluides, ne paraissent pas représenter encore exactement les phénomènes; elles sont fondées, en effet, sur des principes qui ne sont pas entièrement d'accord avec l'expérience, telle que la loi de proportionnalité de la résistance directe et du frottement au carré des vitesses, ainsi qu'on peut le voir par le tableau de la note précédente. Il en est de même de la proportionnalité des résistances obliques au carré ou au cube des sinus d'inclinaison. Dans le fait, ces formules donnent le même degré de résistance pour un navire terminé en forme de coin, de pyramide ou de cône; tandis que la résistance doit évidemment décroître en passant de la figure prismatique à la figure pyramidale, et de celle-ci à la figure conique. M.

² Ceci est encore contraire à l'expérience, qui fait connaître que les surfaces obliques ou peu arrondies éprouvent moins de résistance que les surfaces planes; de sorte que le solide de moindre résistance a une surface convexe: c'est ce qu'on peut voir, du reste, *à priori*, puisque le liquide ne peut se détourner de sa direction qu'en suivant une ligne courbe plus ou moins prononcée, selon le degré d'obliquité de la surface résistante. M.

d la profondeur qui est uniforme ; alors

$$3z = r \left(\frac{1}{4} \sqrt{2m} - \sqrt{2m - m^2} \right) :$$

et la puissance nécessaire pour maintenir le navire en mouvement avec la vitesse v , est, en kilogrammes élevés à un mètre par seconde,

$$52,5v^3d \left[\frac{3z - r(1-m)(3-4m)\sqrt{2m}}{4} + \frac{r[2-2(1-m)(1-m)^2+3m]}{3} + \frac{0,0032lc}{d} \right].$$

618. Dans les bateaux pour les canaux, $m = \frac{1}{8} = 0,125$, c'est-à-dire que le rayon est quatre fois la largeur, et par conséquent la puissance est

$$52,5v^3 (0,55bd + 0,0052lc).$$

Si le rayon est égal à la largeur, alors $m = 0,5$, et la puissance est

$$52,5v^3 (0,74bd + 0,0032lc) {}^1.$$

619. M. Bevan a fait quelques expériences avec un bateau de canal de la forme ci-dessus décrite, et il m'en a communiqué les résultats, afin de pouvoir comparer la théorie avec la pratique.

La longueur du bateau était de 21^m,22, sa largeur de 2^m,08, son tirant d'eau, lors de l'expérience, de 0^m,27 ; le fond était plat, et les côtés étaient parallèles jusqu'à environ 4 mètres de chaque extrémité ; mais les extrémités étaient courbées en arcs de cercle décrits d'un rayon égal à huit fois la demi-largeur du bateau. La surface totale en contact avec l'eau était de 50 mètres carrés, et le poids était de 9000 kilogrammes. Substituant ces nombres dans la formule de l'article précédent, nous aurons, pour la résistance,

$$52,5v^3 (0,27 \times 2,08 \times 0,55 + 0,0032 \times 50) = 1,87v^3.$$

¹ Toutes les formules ci-dessus, si on les exprime en mesures anglaises, ne diffèrent qu'en ce que le coefficient 52,5 y est réduit à l'unité. M.

Tableau comparatif de la formule avec l'expérience.

VITESSE		RÉSISTANCE EN KILOGRAMMES	
En mètres par seconde.	En kilomètres par heure.	Par l'expérience.	Par le calcul.
0,5	1,08	"	1,68
0,4	1,44	2,76	2,99
0,6	2,16	6,34	6,73
0,9	3,22	12,68	15,15
1,11	4	"	23,04
1,31	4,72	25,56	32,09

L'accord est assez approché pour la pratique ¹.

620. L'aire du fond du bateau étant 39 mètres carrés, un tonneau de charge (1000 kilogr.) le fera plonger de 2^{cent},56. L'accroissement de la section transversale plongée, lorsqu'on ajoute un tonneau à la charge, est donc de

$$\frac{2,08 \times 2,56}{100} = 0^m,53,$$

et l'accroissement de surface plongée est de 1^{mct car},12. L'addition de chaque tonneau doit donc augmenter la résistance d'environ 1^{kil},44, la vitesse étant de 4 kilomètres par heure. Ainsi, la charge en tonneaux, multipliée par 1,44, et augmentée de 23 kilogrammes pour la résistance du bateau vide, donnera la force nécessaire pour le tirer. Si, par exemple, la charge est de 20 tonneaux, la force de traction sera

$$20 \times 1,44 + 23 = 52 \text{ kilogrammes.}$$

¹ Les excédants assez considérables des résultats du calcul sur ceux de l'expérience confirment ce que nous avons observé relativement à l'excès de valeur attribué au coefficient de la résistance (art. 613, note). M.

621. Les formes usitées pour les navires sont généralement des surfaces courbes à double courbure. Nous pouvons les considérer comme divisées en triangles curvilignes ou fuseaux, ayant leurs bases à la section transversale et convergeant vers un point commun de la flottaison. Une solution fondée sur cette supposition est tout à fait suffisante pour la pratique. Soit r le rayon de courbure du fuseau, c sa largeur à la base, et a' sa distance à l'axe. Alors la différentielle de l'aire du fuseau projeté sur la section sera

$$c dx = \frac{c x dx}{a'},$$

et celle de la résistance provenant de la pression sera

$$52,5 v^2 c \left(1 - \frac{x}{a'}\right) dx \left(\frac{2 \sin^3 a + \sin^2 a}{1}\right).$$

En adoptant l'équation approximative, $y^2 = 2rx$, nous avons

$$dx = \frac{y dy}{r} \quad \text{et} \quad \frac{y}{r} = \sin a;$$

par conséquent, la différentielle de la résistance devient

$$52,5 v^2 c \left(\frac{y^4}{r^4} + \frac{y^3}{2r^3} - \frac{y^5}{2r^5 a} - \frac{y^5}{4r^4 a} \right) dy.$$

L'intégrale de cette expression, ou la résistance directe elle-même, est donc

$$52,5 \frac{v^2 c y^4}{r^3} \left(\frac{y}{5r} + \frac{1}{8} - \frac{y^3}{14r^2 a} - \frac{y^2}{24ra} \right) + C.$$

Substituant, au lieu de y , sa valeur $\sqrt{2rx}$, faisant $b = 2x$, $x = a = \frac{r}{n}$, et déterminant la constante c par la comparaison avec des cas particuliers, on trouve définitivement, pour la

valeur de la résistance en kilogrammes,

$$52,5v^2c \left[\frac{b}{n} \left(\frac{0,1617}{\sqrt{n}} + 0,0833 \right) + 0,0032(l + 0,29b\sqrt{1+2n}) \right].$$

622. Prenant maintenant pour le rayon une valeur telle que l'arc décrit s'accorde à peu près avec la forme du navire, on trouvera la résistance avec une assez grande exactitude, même dans les formes les plus compliquées. Dans les cas où la courbe est un arc de cercle, la formule sera très-approchée de la réalité. Afin de faciliter ces calculs, je joins ici une table avec quelques exemples pour en éclaircir l'application.

RAYONS DE COURBURE en demi-largeurs.	FORMULES DONNANT LA RÉSISTANCE pour les différents rayons de courbure.
1	$52,5v^2c [0,245b + 0,0052 (l + 0,5b)]$
1 $\frac{2}{4}$	$52,5v^2c [0,188b + 0,0052 (l + 0,545b)]$
2 $\frac{2}{4}$	$52,5v^2c [0,120b + 0,0052 (l + 0,58b)]$
2	$52,5v^2c [0,101b + 0,0052 (l + 0,616b)]$
2 $\frac{1}{4}$	$52,5v^2c [0,086b + 0,0052 (l + 0,65b)]$
2 $\frac{1}{4}$	$52,5v^2c [0,075b + 0,0052 (l + 0,71b)]$
5	$52,5v^2c [0,067b + 0,0052 (l + 0,74b)]$
4	$52,5v^2c [0,060b + 0,0052 (l + 0,77b)]$
5	$52,5v^2c [0,041b + 0,0052 (l + 0,87b)]$
5	$52,5v^2c [0,052b + 0,0052 (l + 0,955b)]$
6	$52,5v^2c [0,025b + 0,0052 (l + 1,05b)]$
7	$52,5v^2c [0,021b + 0,0052 (l + 1,15b)]$
8	$52,5v^2c [0,018b + 0,0052 (l + 1,2b)]$

Dans cette table, b est la largeur du navire à la surface de l'eau; l , la longueur de la partie parallèle; c , le périmètre de la section du maître-couple au-dessous de la flottaison, et v , la vitesse en mètres par seconde. Pour trouver la puissance, il faut encore multiplier la résistance, calculée d'après ces formules, par la vitesse; ou bien, si, dans la table précédente, on met le cube de la vitesse au lieu de son carré, le résultat exprimera la puissance en kilogrammes élevés à un mètre par seconde.

623. Soit à déterminer, par exemple, la résistance d'un navire dont la largeur est de 6^m,7, la longueur de la partie parallèle de 24 mètres, le périmètre de la section du maître-couple de 9^m,45, la vitesse étant de 3 mètres par seconde, et le rayon de courbure égal à quatre demi-largeurs. Dans ce cas, nous devons, d'après la table, employer la formule

$$52,5v^2c [0,041b + 0,0032 (l + 0,87b)],$$

qui, en substituant les valeurs précédentes, donnera pour la résistance du navire

$$52,5 \times 3^2 \times 9,45 (0,041 \times 6,7) + 0,0032 (24 + 0,87 \times 67) \\ = 1655 \text{ kilogrammes.}$$

En multipliant ce résultat par la vitesse, nous aurons pour la puissance $3 \times 1655 = 4965$ kilogrammes élevés à 1 mètre par seconde. Comme la force d'un cheval est équivalente à 75 kilogrammes élevés à 1 mètre par seconde, la puissance évaluée en chevaux est donc

$$\frac{4965}{75} = 66,2 \text{ chevaux.}$$

La puissance étant proportionnelle au cube de la vitesse, il est facile de la déterminer pour toute autre vitesse demandée ¹.

¹ Si la vitesse était donnée en milles marins par heure, on la réduirait en mètres par seconde, en la multipliant par 0,54.

Si elle était donnée en kilomètres par heure, il faudrait la diviser par 3,6.

On pourrait aussi, et même plus commodément, faire usage directement de la formule, en remplaçant le coefficient 52,5 par 8,25, dans le premier cas, et 1,15 dans le second, lorsqu'on veut obtenir la force, en raison du cube de la vitesse et en kilogrammes.

L'auteur aurait dû dire qu'il s'agit ici seulement de la force utilisée, et non de la force employée à bord des navires, laquelle, à cause des pertes d'effet, est beaucoup plus considérable que celle qui fait simplement équilibre à la résistance.

M.

Des mécanismes pour faire mouvoir les navires à vapeur.

624. La plupart des avantages de la puissance de la vapeur dépendant de la manière dont elle est appliquée au mouvement des navires, une courte revue des différents moyens employés pour cela nous permettra de juger si c'est réellement le plus efficace et le plus commode qui ait été adopté.

Le moyen le plus simple et le plus ancien d'appliquer aux navires une force motrice, c'est un système de rames; la manière de les combiner a été portée à un haut degré de perfection. Les rames cependant ne sont pas très-propres au mouvement d'un grand bâtiment; elles occupent un trop grand espace et elles exigent pour être mues un mécanisme trop compliqué.

Le second moyen dans l'ordre de simplicité, et peut-être aussi dans l'ordre chronologique, consiste à employer une roue semblable à une roue hydraulique avec des aubes ou palettes, de chaque côté du navire. C'est le mode qui est aujourd'hui généralement adopté.

En troisième lieu, on a proposé une ingénieuse combinaison de pièces mobiles, constamment placées sous l'eau, qui se replient sur elles-mêmes quand elles sont mues en avant, et s'étendent quand elles frappent en arrière, comme des pattes d'oie.

Quatrièmement, on a imaginé des plans inclinés placés à l'arrière du navire et mus d'un mouvement alternatif.

Cinquièmement, Daniel Bernouilli a proposé, en 1752, un mode qui consiste en des plans plongés dans l'eau, parallèles aux flancs du navire, tournant dans un collet et se mouvant dans un plan perpendiculaire à la quille.

Sixièmement, on a proposé une vis semblable à la vis d'Archimède et agissant dans un cylindre entièrement plongé dans l'eau ¹.

¹ Ce moyen a été proposé par M. Scoot d'Ormiston (*Ann. of Philos.*, vol. XI,

Septièmement, on peut encore employer deux vis agissant en sens opposés et sans cylindre qui les enveloppe ¹.

Huitièmement, enfin, Daniel Bernouilli, et plus tard M. Linaker, ont proposé une pompe pour élever l'eau et la refouler à l'arrière du navire ².

Tels sont les divers mécanismes qui ont été proposés avec de nombreuses variantes, la plupart inférieures aux procédés primitifs. Nous nous proposons d'en considérer quelques-uns parmi les meilleurs. Notre choix doit pourtant être limité, parce que nous devons nous borner à ceux qui présentent une puissance suffisante et sont d'une application commode sans être sujets à se déranger ni à être endommagés par la violence des flots.

625. Ces moyens peuvent être divisés en deux classes, savoir : 1^o ceux où l'action est continue ; 2^o ceux où l'action est intermittente. A la première classe appartiennent les second, sixième et septième mécanismes ; à l'autre classe, le premier, le troisième, le quatrième, le cinquième et le sixième.

Lorsque l'action est continue, l'aire des surfaces agissantes, multipliée par leur résistance, doit être égale à l'aire du navire multipliée par la résistance décomposée suivant la même direction. Il s'ensuit que tous les procédés où l'action est discontinuée exigent une plus grande aire que ceux où elle est continue. Aussi, à moins qu'il n'y ait sous quelque autre rapport un avantage manifeste, cette circonstance doit nous déterminer à adopter de préférence les mécanismes de la première classe, et dans ce nombre seulement le second, le sixième et le septième. La plu-

p. 458), et, un siècle auparavant, par Duquet (*Mach. de l'Acad.*, t. V, n^o 358).
M.

¹ Ce moyen a été essayé en partie par M. Whytock (*Journal philosophique* de Brewster, vol. II, p. 59). Le colonel Beaufoy prétend qu'il a été importé de la Chine. M. Lyttleton en a fait l'expérience, sur une grande échelle, dans le Groenland-Dock. Il a fixé à l'étambot d'un bateau pilote de Virginie une grande hélice de cuivre, qui, par un treuil que deux ou trois hommes faisaient tourner, prenait un mouvement de rotation. L'effet fut beaucoup moindre qu'on ne l'avait espéré, car, malgré que le bateau fut complètement vide et que les hommes fissent de grands efforts, la vitesse qu'il acquit n'excédait pas 3^{kil},2 par heure.

² Buchanan, *On propelling vessels by steam*, p. 40.

part des autres exigeraient un mécanisme compliqué et incommode dans la pratique. La première classe se réduit même à deux procédés, car les deux vis hydrauliques opposées sans cylindre donnent à peu près le même résultat qu'une seule avec un cylindre; et ce moyen, quoiqu'il n'ait pas été pratiqué, mérite l'attention, à cause de la propriété qu'il a d'agir entièrement sous l'eau dans une direction parallèle au mouvement du navire et aussi loin du centre de résistance qu'on le juge nécessaire pour la stabilité. Je ne saurais admettre qu'une seule expérience suffise pour condamner un principe très-utile, simplement à cause d'un défaut d'attention aux proportions et au mode d'action convenable.

De la vis hydraulique ou vis d'Archimède.

626. La partie active de l'appareil est une surface hélicoïde tournant autour d'un axe cylindrique: afin que toute la surface participe à l'impulsion, chacun de ses points doit tourner assez rapidement pour que sa vitesse dans la direction de l'axe surpasse celle du navire. Si l'angle de l'hélice avec l'axe est constant, il est évident que lorsqu'il y a plus d'un pas de vis, le reste ajoute peu à l'effet, peut-être moins que l'équivalent du frottement.

Soit $BAC = \alpha$ (fig. 3, pl. XX), l'angle que forme l'hélice avec la ligne AB perpendiculaire à l'axe. Pendant que le navire se meut de C en B , un point de la surface doit se mouvoir de B en A ; autrement la vis retarderait le navire, et pour qu'elle agisse efficacement, elle doit avoir une vitesse plus grande. Mais la vitesse v du navire est à celle d'un point de la surface quand l'effet n'est pas produit, comme $BC : AB$, ou

$$BC : AB :: v : \frac{AB \cdot v}{BC} = \frac{v}{\tan \alpha}.$$

Ainsi la vitesse actuelle effective est

$$V = \frac{v}{\tan \alpha} = \frac{V \tan \alpha - v}{\tan \alpha}.$$

Soit x le rayon variable du cylindre, alors la longueur de l'hélice est

$$\frac{2\pi x}{\cos a},$$

et la différentielle de son aire est

$$\frac{2\pi x}{\cos a} dx.$$

La différentielle de sa résistance quand le navire est en repos est donc

$$r \frac{\pi (V \operatorname{tang} a - v)^2 (2 \sin^3 a + \sin^2 a) x}{\cos a \operatorname{tang}^2 a} dx;$$

et quand il est en mouvement, elle croît dans le rapport de $\frac{V \operatorname{tang} a - v}{\operatorname{tang} a}$ à v : elle est donc alors

$$\pi v r (V \operatorname{tang} a - v) (2 \sin^2 a + \sin a) x dx.$$

L'intégrale de cette expression, et par conséquent la résistance est

$$\frac{1}{2} \pi v x^2 r (V \operatorname{tang} a - v) (2 \sin^2 a + \sin a).$$

Cette résistance est à l'effet nécessaire pour pousser le navire comme 1 est à $\operatorname{tang} a$; ainsi la force d'impulsion est

$$\frac{1}{2} \pi v x^2 r (V \operatorname{tang} a - v) (2 \sin^2 a + \sin a) \operatorname{tang} a;$$

et l'effet, qui doit être égal à la résistance du navire, est par conséquent

$$\frac{1}{2} \pi v x^2 r (V \operatorname{tang} a - v) (2 \sin^2 a + \sin a) \operatorname{tang} a.$$

Cette expression est un maximum quand $v^2 (V \operatorname{tang} a - v)$

* Nous avons remplacé par r le coefficient de la résistance 52,5 que, dans les formules en mesures anglaises, l'auteur réduit à l'unité. M.

est un maximum; ce qui a lieu lorsque $V = \frac{3v}{2 \operatorname{tang} a}$, et alors l'effet devient

$$\frac{1}{4} \pi x^2 v^3 r (2 \sin^2 a + \sin a) \operatorname{tang} a.$$

Mais la force nécessaire pour le produire doit être

$$\frac{3\pi x^2 v^3 r (2 \sin^2 a + \sin a)}{8}.$$

par conséquent quand $\operatorname{tang} a = 1$, la puissance est à l'effet comme 3 est à 2, ainsi qu'il arrive dans les roues hydrauliques à palettes; mais si $\operatorname{tang} a = 1,5$, la puissance sera égale à l'effet. Au contraire si $\operatorname{tang} a = 0,5$, ou si l'angle CAB est d'environ 26° , la puissance * est à l'effet comme 3 est à 1.

* Ce calcul et les conclusions qui l'accompagnent sont nécessairement inexacts, puisque l'auteur considère comme constant l'angle a , tandis que cet angle diminue évidemment en allant de l'axe à la circonférence de l'hélice. Si en effet on désigne par l la longueur du pas de celle-ci, on aura

$$\operatorname{tang} a = \frac{l}{2\pi x}.$$

Ainsi l'angle a étant une fonction de x , on ne doit pas prendre les différentielles, ou les intégrales des expressions ci-dessus, sans différencier ou intégrer aussi par rapport à a , ou du moins sans substituer la valeur de cet angle.

Avec cette modification, la valeur de la différentielle de la résistance serait

$$\frac{rv}{2} (lV - 2\pi vx) \left[\frac{2l}{l^2 + (2\pi x)^2} + \frac{1}{\sqrt{l^2 + (2\pi x)^2}} \right] dx.$$

L'intégrale de cette quantité et la détermination de son *maximum* conduiraient à des résultats différents de ceux du texte; mais nous ne suivrons pas ces calculs compliqués, attendu que le simple raisonnement suffit pour montrer l'impropriété du système d'hélice, fig. 3.

En effet, la vitesse des filets hélicoïdes allant en croissant de l'axe à la circonférence, la vitesse qui convient aux uns pour le *maximum* d'effet ne peut pas convenir aux autres, et il arriverait même dans ce système que la partie de l'hélice la moins rapide retarderait la marche, loin de lui être utile. D'un autre côté, si l'on veut éviter ces inconvénients, en évitant l'intérieur de l'hélice de manière à n'avoir qu'une bande hélicoïde dont tous les filets aient sensiblement la même vitesse, on se trouve conduit à en augmenter considérablement le diamètre, ainsi que les difficultés de construction et d'installation à bord des bateaux. M.

Il suffirait d'un peu plus d'un pas de l'hélice pour produire cet effet, et un second pas de vis sous le même angle aurait très-peu d'influence, parce que l'eau aurait déjà acquis toute la vitesse que l'hélice pourrait lui communiquer. Si l'on prolongeait la surface hélicoïde, ce devrait être sous un angle décroissant.

627. Le point essentiel pour la pratique est de déterminer l'étendue des surfaces correspondantes à cet effet, et c'est ce que nous allons considérer. En supposant l'angle CAB de 60° , alors $\tan a = 1,732$, et $\sin a = 0,866$. L'effet est donc

$$52,5 \times \frac{1,732}{4} \pi x^2 [2 \times (0,866)^2 + 0,866] = 38,4x^2.$$

Mais πx^2 est l'aire de la base du cylindre ; ainsi chaque mètre de surface de la base du cylindre agira avec une force de $38^{ki},4$ à raison de 1 mètre par seconde. La longueur du cylindre serait $2\pi x \tan a = 10,8$ fois son rayon, ou $5,4$ fois son diamètre. La force nécessaire pour produire l'effet que nous venons de calculer serait

$$52,5 \times \frac{3\pi x^2 [2 \times (0,866)^2 + 0,866]}{8} = 46,5x^2,$$

ou $46^{ki},5$ pour chaque mètre de l'aire de la base du cylindre, la vitesse étant de 1 mètre par seconde.

Quand l'angle a est de 40° , la force effective est seulement de 23 kilogram. par mètre, et la puissance qui la produit de $33^{ki},6$. La puissance décroît donc à peu près proportionnellement à la longueur.

Ces calculs suffisent pour montrer que ce mécanisme peut être fort avantageusement employé, l'action ayant lieu sous l'eau et la saillie latérale n'étant pas aussi grande que celle d'une roue à aubes, tandis que la douceur et l'uniformité du mouvement sont des circonstances très-favorables. On peut objecter d'un autre côté la difficulté de la communication du mouvement et la résistance qu'offrent les parties de l'appareil qu'on y emploie ; je me contenterai donc, pour le moment, de recommander ce procédé à l'attention de mes lecteurs.

Des roues à aubes ou roues à palettes.

628. Nous devons maintenant chercher à déterminer l'effet des roues à aubes. L'espèce la plus commune consiste en un système de planches fixées aux rayons d'une roue. Ces rayons sont aussi minces que le comporte leur force, et ils sont liés entre eux par un ou plusieurs cercles de fer très-minces. Les palettes sont quelquefois construites de manière à pouvoir glisser sur les rayons afin qu'on puisse diminuer ou augmenter la profondeur de la partie plongée dans l'eau, suivant que le navire tire plus ou moins.

629. Pour calculer la force de cet appareil, soit V la vitesse de la partie extérieure de la roue et r son rayon ; alors la vitesse, à la distance $r - x$ du centre, sera $\frac{V(r-x)}{r}$. Si v est la vitesse du navire, la résistance de l'eau, qui est équivalente à la force mouvante du bateau, sera, par mètre carré de son aire,

$$78,8 \left[\frac{V(r-x)}{r} - v \right]^2,$$

ou bien

$$\frac{78,8 [V(r-x) - rv]^2}{r^2}.$$

Mais pendant que l'aube agit sur l'eau, le navire avance et l'eau recule seulement avec la vitesse due à la différence entre les vitesses de la roue et du navire : donc, la quantité d'eau mise en mouvement est d'autant plus grande que la vitesse du navire surpasse davantage l'excès de vitesse de l'aube. C'est pourquoi, d'après la proportion

$$\frac{V(r-x) - rv}{r} : v :: \frac{78,8 [V(r-x) - rv]^2}{r^2} ; \frac{78,8 v [V(r-x) - rv]}{r},$$

en désignant par b la largeur de l'aube, on aura pour la diffé-

entielle de la puissance effective ¹,

$$\frac{78,8v^2 (Vr - Vx - rv)b}{r} dx.$$

L'intégrale de cette expression est

$$\frac{78,8v^2 b (Vrx - \frac{1}{2} Vx^2 - rvx)}{r}.$$

Si la hauteur de l'aube est *h*, on aura pour la puissance réelle, qui doit être égale à la résistance du navire,

$$\frac{78,8v^2 bh (Vr - \frac{1}{2} Vh - rv)}{r}.$$

Avant de pouvoir trouver la puissance de la machine, on doit estimer la perte due à l'obliquité d'action. Mais nous pouvons procéder d'abord à la détermination de la meilleure vitesse pour les roues plongées dans une eau tranquille.

650. N'ayons pas égard aux coefficients constants de la formule, $\frac{78,8bh}{r}$. Si nous y supposons *v* variable, la fonction dérivée étant égale à zéro pour la recherche du maximum, nous

¹ La quantité d'eau mise en mouvement par les aubes en raison de leur vitesse est déjà un des éléments de la loi de proportionnalité de la résistance aux carrés des vitesses. Il est donc défectueux de l'introduire de nouveau dans l'expression de cette résistance, qui doit demeurer égale à

$$78,8 \frac{[V(r-x) - rv]^2}{r^2}.$$

Mais aussi l'intégrale qui en résulte n'étant pas susceptible de *maximum*, la détermination de l'art. 650 devient illusoire, de même que les conséquences que l'auteur en déduit (art. 651 et suiv.). Il est évident, en effet, que la force de résistance des aubes doit croître indéfiniment à mesure qu'on augmente leur vitesse ou leur surface. En établissant le calcul sur ce principe, on trouve que la vitesse des aubes, loin d'être un multiple déterminé de la vitesse du bateau, doit dépasser le moins possible celle-ci, et que le *maximum* d'effet, s'il pouvait avoir lieu, s'obtiendrait en augmentant de plus en plus la surface des aubes.

J'ai cherché à rendre sensibles à la vue même ces résultats du calcul, ainsi que les autres lois du mouvement des bateaux, en les figurant par des courbes. (*Voyez l'Essai sur les bateaux à vapeur*, etc., in-4^o. Paris, 1828.) M.

trouverons l'équation

$$2\sqrt{rv} - Vh - 3rv^2 = 0,$$

qui donne

$$V = \frac{3rv}{2r - h} \quad \text{et} \quad v = \frac{V(2r - h)}{3r}.$$

L'excès de vitesse du bord extérieur de l'aube dépend donc en partie du rapport de sa hauteur avec le rayon ; et plus la hauteur est grande, plus doit être petit cet excès de vitesse ¹.

631. Si l'on substitue cette valeur de V dans la formule pour l'aire des aubes, on trouve que leur effet, qui doit être équivalent à la résistance du navire, est $39,4v^3bh$. On peut aisément faire la comparaison, au moyen des formules pour la résistance des navires (art. 622). La puissance nécessaire pour produire l'effet, est

$$\frac{3r}{2r - h} (39,4v^3bh) = \frac{118,2rv^3bh}{2r - h}.$$

Il faut une puissance un peu plus grande, à cause de la perte qui a lieu par l'obliquité d'action. La puissance convenable se trouvera avec une exactitude suffisante pour cet objet, en multipliant la valeur précédente par

$$\sqrt{\frac{2r - \frac{2}{3}h}{2r - h}};$$

car le centre de gravité a (fig. 4, pl. XX), de la partie plongée ABD, peut être considéré comme le point actuel d'application de toute la force, au lieu de la distribuer sur l'étendue entière du segment. La direction de cette résultante est EF, perpendiculaire à la droite aC qui joint le centre de gravité de la partie plongée au centre de la roue. Cette direction détermine la perte due à

¹ Cette proposition est très-vraie ; mais la formule d'où elle est déduite semble dire le contraire ; ce qui confirmerait l'observation de la note ci-dessus sur l'inexactitude de ce calcul. M.

l'obliquité d'action, car la puissance est à l'effet :: AH ; AD, ce qui équivaut à très-peu près au rapport donné ci-dessus.

Un exemple éclaircira cette règle. Supposons le rayon de la roue de 2^m,4, et la hauteur des aubes de 0^m,6, alors

$$\sqrt{\frac{2r - \frac{2}{3}h}{2r - h}} = \sqrt{\frac{4,8 - 0,4}{4,8 - 0,6}} = 1,024 \text{ environ.}$$

Cette correction, qui n'excède pas un quarantième de la force totale, peut être négligée. La direction moyenne de l'action est plus importante pour le mouvement que cette perte de puissance.

632. Nous avons supposé que les aubes avaient partout la même largeur ; mais il est possible que cette forme ne soit pas la meilleure. Supposons donc maintenant que le quatrième terme de la proportion

$$h^n : b :: x^n : \frac{bx^n}{h^n}$$

soit la largeur de l'aube correspondante à la hauteur x ; en la substituant pour b , la différentielle de la puissance sera

$$\frac{78,8v^2b(Vr - Vx - vr)x^n}{rh^n} dx.$$

Intégrant, il vient

$$\frac{78,8v^2b}{rh^n} \left(\frac{Vrx^{n+1}}{n+1} - \frac{Vx^{n+2}}{n+2} - \frac{rvx^{n+1}}{n+1} \right),$$

et, faisant $x = h$, on trouve

$$\frac{78,8v^2bh}{r} \left[\frac{r(V-v)}{n+1} - \frac{Vh}{n+2} \right].$$

Si $n = 0$, la forme de la palette devient un rectangle, et l'on retombe sur le résultat obtenu ci-dessus.

633. Si $n = 1$, la palette a la forme d'un triangle, et le résultat

est moindre que pour un rectangle, la vitesse et l'aire restant les mêmes.

634. Si $n = \frac{1}{2}$, la forme de la palette devient parabolique, et l'on trouve

$$\frac{78,8v^2bh [10r(V-v) - 6Vh]}{15r}$$

Il y a ici quelque chose de gagné, puisqu'on a une résistance égale avec une moindre largeur; par cette forme, la résistance qu'éprouve l'aube est moindre quand elle frappe l'eau obliquement comme en A, fig. 5, pl. XX, et elle croît à mesure que son action devient plus directe. La vitesse pour le maximum d'effet est à la vitesse du navire, comme

$$3r : 2r - 1,2h ;$$

on a donc

$$2r - 1,2h : 3r :: v : V ; \text{ d'où } V = \frac{3rv}{2r - 1,2d}$$

La vitesse V est moindre que pour des aubes rectangulaires. En substituant cette valeur de V dans la formule exprimant la puissance des aubes, il vient

$$26,3v^3bh :$$

telle est donc la force des aubes paraboliques, d'une hauteur h et d'une largeur b .

Si le bord extérieur avait une courbure plus prononcée que celle de la parabole ordinaire à son sommet, l'effet diminuerait encore. Je laisse au lecteur à examiner ce point. Les lignes ADEF (fig. 5) montrent les dimensions d'une palette rectangulaire capable de produire le même effet. Elle frappe l'eau à la fois de toute sa largeur, comme en G; l'aube parabolique la frappe un peu plus tôt, et acquiert par degrés toute sa prise d'eau.

635. La meilleure manière de poser les aubes paraît être de les placer dans un plan passant par l'axe, comme le représente

la fig. 5. Placées dans un autre plan, elles doivent frapper plus obliquement le fluide à leur entrée, et en enlever une grande quantité quand elles le quittent.

Dans la direction de la hauteur de l'aube, il est évident que la forme devrait être telle, que la résistance au mouvement de l'aube fût la plus grande possible, et la pression postérieure la plus petite possible. Ces conditions paraissent être bien remplies, en faisant de l'aube une surface plane dans la direction de l'axe. On a employé des aubes courbes, dont la surface concave frappait le fluide, et peut-être avec très-peu d'accroissement de puissance. Quant au projet de poser les aubes autrement qu'à angle droit avec la direction du navire, c'est évidemment un défaut ; car la résistance au mouvement devient moindre quand la surface frappe l'eau obliquement, et plus cette résistance est grande, plus est grand aussi l'effet de la force d'impulsion du navire.

636. Il est à désirer que l'action des aubes soit aussi uniforme et aussi continue que possible ; mais en s'efforçant de rendre cette action égale, il ne faut augmenter le nombre des aubes que le moins possible, parce que la construction devient plus dispendieuse, et que la réaction de l'eau, qui n'a pas assez le temps de se loger entre elles, en est diminuée. Si nous supposons que AE (fig. 6, pl. XX) soit le niveau de l'eau en repos, la disposition la plus favorable avec le plus petit nombre d'aubes paraît être de faire en sorte qu'une aube se trouve en A à l'entrée, quand la suivante est en B dans une position verticale, et une autre en E à la sortie de l'eau. Si l'on employait un moindre nombre d'aubes ou palettes, il y aurait un court intervalle pendant lequel aucune d'elles n'agirait complètement. On obtiendrait une action encore plus uniforme, en divisant l'arc plongé en trois parties égales ; mais je ne pense pas que l'avantage vailût le surcroît de dépense ; c'est pourquoi, je donnerai des formules générales pour une proportion quelconque, et des règles particulières pour le cas seulement où il y a trois aubes plongées à la fois.

637. Quant à la question de déterminer le rayon de la roue

ou la hauteur des aubes, lorsque le nombre de celles-ci est donné, ce problème devient facile, en supposant les conditions précédentes. Car, soit $BC = r$ le rayon de la roue, $BD = x$ la hauteur des aubes, n leur nombre, et a le nombre des parties dans lesquelles est divisé l'arc plongé ; alors l'angle ABC est égal à

$$\frac{a \times 180^\circ}{n},$$

puisqu'il correspond à la moitié de l'arc plongé ; et la distance CD entre le centre de la roue et la surface de l'eau est égale à

$$r \cos \frac{a \times 180^\circ}{n}.$$

Comme, d'un autre côté, $CD = r - x$, nous aurons l'équation

$$r \cos \left(\frac{a \times 180^\circ}{n} \right) = r - x;$$

d'où l'on tire

$$x = r \left(1 - \cos \frac{a \times 180^\circ}{n} \right) \quad \text{et} \quad r = \frac{x}{1 - \cos \frac{a \times 180^\circ}{n}}$$

De ces formules, dérivent les règles suivantes pour le cas où il y a trois aubes plongées.

638. RÈGLE I. Trouver le rayon de la roue, étant donnés la hauteur des aubes et leur nombre.

Divisez 540 par le nombre des aubes, ce qui donnera le nombre de degrés de la moitié de l'arc plongé. En retranchant de l'unité le cosinus de l'angle correspondant, et divisant par le reste la hauteur des aubes, on aura le rayon de la roue.

Dans le cas inverse, le rayon de la roue multiplié par ce reste donnera la hauteur des aubes.

639. RÈGLE II. Trouver le nombre des aubes, étant donnés la hauteur de celles-ci et le rayon de la roue.

Divisez la hauteur par le rayon, et retranchez le quotient de l'unité. Cherchez l'angle correspondant à ce reste pris pour cosinus, et 540 divisé par le nombre de degrés de cet angle donnera le nombre d'aubes cherché.

Si le rayon de la roue est de 2^m,4, et la hauteur des aubes de 0^m,6, alors

$$1 - \frac{0,6}{2,4} = 0,75;$$

c'est le cosinus de 41°4'; et par conséquent le nombre des aubes est

$$\frac{540^\circ}{41^\circ 4'}, \text{ c'est-à-dire } 13.$$

640. Les dimensions de la roue dépendent principalement de la manière dont le mouvement est communiqué par la machine. La roue doit être assez grande pour avoir à sa circonférence la vitesse convenable; et quand on peut employer de très-grandes roues, elles offrent quelques avantages: elles doivent nécessairement être plus étroites; elles frappent le fluide dans une direction plus favorable, et s'en dégagent beaucoup mieux. Leurs aubes ayant sur l'eau une action plus directe, la font beaucoup moins rejaillir tout autour; le poids de la roue la rend aussi plus efficace, et en fait une espèce de volant ou de régulateur des forces qui agissent sur elle. D'un autre côté, il y a quelques graves objections pratiques à l'emploi de très-grandes roues à bord des bâtiments de mer; elles donnent une plus grande prise aux lames contre le mécanisme; elles sont encombrantes et difformes, et elles élèvent le centre d'action trop au-dessus de la flottaison.

641. Quand les roues sont mues directement par l'arbre de la manivelle, le rayon est déterminé par la vitesse de la machine. Supposons que cette vitesse soit de n coups de piston par minute. Alors la circonférence de la roue étant $2\pi r$, sa vitesse par minute sera $2\pi rn$. Comme cette vitesse doit être à celle du navire dans le

rapport ¹ de 3 à 2, on aura

$$2\pi rn = \frac{3}{2} v \times \frac{1000}{60} = 25v,$$

v exprimant le nombre de kilomètres que le navire fait par heure. On déduit de cette équation

$$n = \frac{4v}{r} \quad \text{et} \quad r = \frac{4v}{n}.$$

Ainsi la vitesse du navire par heure, multipliée par 4, est égale au rayon de la roue multiplié par le nombre de coups par minute.

Au moyen de cette règle extrêmement simple, on peut savoir de suite si la roue est ou n'est pas trop grande, quand on emploie le mouvement transmis immédiatement de la manivelle; et c'est ce mode de transmission que l'on doit préférer, plutôt qu'un engrenage intermédiaire, toutes les fois qu'il n'y a pas d'autres difficultés que les dimensions de la roue.

Des modifications des roues à aubes.

642. On a essayé ou projeté différents moyens pour remédier à certains défauts supposés des roues à aubes. On a beaucoup exagéré la perte de force due à l'obliquité d'action, et la plupart des tentatives ont eu pour objet de la faire disparaître en tout ou en partie.

Les moyens proposés sont de deux sortes.

Dans l'une, le mouvement de la roue produit un changement graduel de position dans les aubes; on a oublié complètement que par la perte de vitesse qui en résulte, la diminution de force est comme le carré, tandis que celle due au changement de direction est seulement comme la première puissance.

M. Oldham, de la banque d'Irlande, a proposé un de ces sys-

¹ On peut obtenir ce rapport plus exactement au moyen de l'art. 630.

tèmes d'aubes pivotantes [†] pour éviter les inconvénients des aubes fixes employées ordinairement ; il assure que l'action violente des aubes des roues ordinaires contre les lames d'une mer houleuse disparaît entièrement par l'usage des aubes pivotantes , qui entrent dans l'eau et en sortent avec douceur et aisance. Il est seulement à regretter qu'une telle facilité ne puisse être obtenue sans une perte considérable et continue d'effet dynamique.

L'autre moyen consiste à imprimer aux aubes une évolution subite en deux points de leur révolution , à l'aide de cliquets pourvus d'un mécanisme convenable. Cette méthode est préférable quand les roues doivent agir à de grandes profondeurs dans l'eau ; mais de telles roues auraient besoin d'être si solidement et fortement construites , qu'il paraît peu probable que le mécanisme puisse être maintenu en bon état.

Le mode qui semble le plus plausible , c'est d'avoir de chaque côté du navire une paire de roues sur lesquelles agissent deux chaînes sans fin portant des aubes. A mesure que la chaîne circule dans une direction , les aubes sont plongées dans l'eau , et en sortent dans la direction opposée ; les deux roues autour desquelles elles passent étant en partie sous l'eau. L'impulsion totale donnée par ces aubes depuis la partie inférieure d'une roue jusqu'à celle de l'autre paraîtrait devoir être directe et efficace ; et, en effet, on rapporte que le résultat a été satisfaisant , autant qu'on en peut juger par une expérience faite sur une petite échelle. Buchanan dit cependant que ce procédé a été essayé sur le canal du duc de Bridgewater, où il n'a pas donné de résultat favorable ; comme il n'en assigne pas la raison , nous devons chercher directement si cette disposition est susceptible d'avoir plus ou moins d'effet que les roues à aubes ordinaires.

Si une roue est munie d'un nombre d'aubes suffisant pour mettre en mouvement la totalité du fluide opposé à l'aire de

[†] M. Duquet avait essayé à Marseille, dès l'année 1694, des aubes de cette espèce qui semblèrent donner de bons résultats, au moins comparativement avec des rames. (*Vojez le Recueil des Machines approuvées par l'Académie*, t. I, p. 173.)

l'aube, il est évident qu'un prolongement quelconque de la ligne d'action des aubes équivaldra seulement au frottement du courant mis en mouvement par la première impulsion ; et cet effet est trop petit pour qu'on doive chercher à l'obtenir par une disposition aussi compliquée et qu'il serait difficile, d'ailleurs, de rendre durable ; ainsi, cette construction imparfaite ne mérite aucune préférence.

De la force d'assemblage des bâtiments.

643. Ce n'est qu'en 1818 que l'on a commencé à construire des navires à vapeur pour des voyages maritimes réguliers, et plus on a eu d'expérience, plus on a augmenté la force des navires. Un navire doit être considéré comme un bâti ou charpente un peu flexible, et sa force doit être déterminée de telle manière que le plus grand effort possible agissant dans les circonstances les plus désavantageuses, ne puisse altérer l'élasticité naturelle de ses parties, ni troubler leur liaison. Faute de regarder la membrure comme un tout, on a souvent fait usage de mauvais modes de construction ou de liaison. Il faut aussi considérer un navire dans le cas où la pression hydrostatique contribue le moins possible à le soutenir.

Les efforts se réduisent à ceux qui auraient lieu dans un grand balancier creux dont on aurait à trouver l'axe neutre, et alors il est facile de mesurer la force de résistance ¹. Quand l'intervalle des membres ou les mailles sont remplies d'une manière convenable, la force se trouve augmentée ; et peut-être pourrait-on obtenir cet accroissement avec moins de matériaux et une moindre addition au poids du navire ; mais l'avantage de ne pas laisser de cavité est encore d'une plus grande importance pour la durée et la propreté du navire ².

644. Quant au bois, le sapin a l'avantage de la légèreté, et dans les pièces droites il est plus fort qu'un pareil poids de chêne ;

¹ Voyez mes *Principes élémentaires de l'art du Charpentier*, sect. I et II, et mon *Traité de la force du fer*, art. 85, a.

² Voyez les *Transactions Philosophiques*, pour 1820.

mais, pour les pièces courbes, on préfère des bois plus durs et ayant plus de cohésion latérale.

De l'application des voiles.

645. On a trouvé que les voiles peuvent se combiner avantageusement avec la puissance de la vapeur, toutes les fois que la direction n'est pas dans quatre rumb de celle du vent.

Mais quand la force du vent devient considérable, et la mer houleuse, les roues tournent souvent sans toucher l'eau dans les creux des vagues, et acquièrent un grand accroissement de vitesse, lequel, aussitôt qu'elles rencontrent de nouveau la vague, se réduit au-dessous de la vitesse moyenne. Pour rendre ces changements moins brusques, il faut diminuer la fourniture de vapeur, et par conséquent la force de la machine.

646. Il paraît impossible d'employer assez de voilure pour donner à un navire à vapeur l'avantage de pouvoir servir efficacement comme bâtiment à voiles, en cas de dérangement de la machine ou de manque de combustible. L'objet propre des voiles, dans un navire à vapeur, est d'épargner le combustible quand on peut utiliser le vent ¹, et pour le faire avec économie, les machines doivent agir par expansion (*voyez* l'art. 419) ; ainsi, la disposition de la machine doit être telle, qu'elle puisse travailler à pleine pression par un temps calme. Cette condition nous permet de fixer la puissance de la machine d'après celle qui est nécessaire en temps calme, et si le navire a suffisamment de voiles pour maintenir sa vitesse avec environ la moitié de la force des machines, quand le vent est favorable, ce sera tout ce qu'on pourra désirer. Il faut avoir la plus grande attention à maintenir le centre d'effort sur les voiles aussi bas que possible, et à les ar-

¹ On pense communément que l'effet des voiles devrait être employé concurremment avec la force de la vapeur, pour donner une plus grande vitesse ; mais cela n'est pas désirable, excepté pour les bateaux de poste et autres semblables, parce qu'une immense étendue de voile donne seulement une très-petite force, quand le navire se meut avec une grande vitesse ; ainsi, l'économie conduit à épargner le combustible, plutôt qu'à augmenter la vitesse.

ranger de manière que le navire donne la bande le moins possible, c'est-à-dire que l'angle d'inclinaison ne soit pas considérable, afin que les roues ne plongent pas inégalement.

647. La vitesse qu'il ne paraît pas convenable de dépasser dans une eau tranquille, est de 3 mètres par seconde, c'est-à-dire 11 kilomètres par heure. Avec cette vitesse, quand le vent est d'une force telle que le navire peut encore sans danger porter toute sa voilure, l'effet direct équivaut seulement à la force d'un cheval, à raison de 27 mètres carrés de voiles ¹.

648. Un vent favorable contribue aussi à la marche du navire, en donnant un mouvement progressif aux lames de la mer; un vent contraire oppose une certaine résistance, et il en est de même d'un courant. Si v est la vitesse avec laquelle un navire est poussé dans une eau tranquille par la force P , et que la vitesse du courant soit $\mp nv$, en prenant le signe supérieur quand elle concourt avec celle du navire, alors on aura la proportion

$$v^3 : P :: v (v \mp nv)^2 : P (1 \mp n^2),$$

dont le quatrième terme $P (1 \mp n^2)$ est la force qu'exige le navire ².

Si le courant agit dans la direction du mouvement du navire, et que la vitesse soit la moitié de celle de ce dernier dans une eau tranquille, alors $n = 0,5$ et la force est

$$P (1 - 0,5)^2 = 0,25 P;$$

c'est-à-dire que le navire exige seulement le quart de la force.

¹ Pour trouver l'effet du vent dans toute autre direction, et avec toute autre vitesse, soit V la vitesse du vent en mètres par seconde, a l'angle que fait sa direction avec celle du mouvement du navire, v la vitesse du navire en mètres par seconde, et b l'angle que fait la normale à la voile avec la direction du mouvement du navire : on aura à très-peu près

$$\frac{[V \cos (a + b) - v \cos b]^2}{250 \cos b}$$

pour le nombre de mètres carrés de voiles équivalent à la force d'un cheval, en supposant celles-ci de 75 kilogrammes élevés à un mètre par seconde.

² Cette règle est erronée; car, tandis que la résistance varie en raison du carré de la vitesse relative $(v \mp nv)^2$, la vitesse des aubes doit augmenter ou diminuer

S'il va contre le courant, et que la vitesse de celui-ci soit la même que précédemment, alors la force est

$$P(1 + 0,5)^3 = 2,25P ;$$

c'est-à-dire que le navire exige une force $2 \frac{1}{4}$ fois plus grande pour conserver sa vitesse.

649. Mais, en remontant un courant, il doit y avoir une différence dans la vitesse, et il y en a aussi généralement en descendant. Si u est la vitesse du courant et mv celle avec laquelle le navire se meut dans le courant, on a

$$v^3 = mv(mv \pm u)^2, \quad \text{ou} \quad v^2 = m(mv \pm u)^2.$$

La valeur de m tirée de cette équation ¹ serait très-compli-

en raison simple de cette vitesse ; la puissance doit donc varier en raison composée de ces deux éléments, c'est-à-dire comme $(v \mp nu)^3$; elle deviendra donc

$$P(1 \mp n)^3,$$

au lieu de

$$P(1 \mp n)^2$$

que suppose l'auteur.

En prenant les exemples du paragraphe suivant, on aurait pour la valeur de la force dans le sens du courant

$$P(1 - n)^3 = P(1 - 0,5)^3 = 0,125P,$$

et pour remonter le courant

$$P(1 + 0,5)^3 = 3,375P.$$

M.

¹ Cette formule a le même défaut que la précédente, et elle doit être rectifiée, par les mêmes motifs, ainsi qu'il suit :

$$v^3 = (mv \pm u)^2,$$

d'où l'on tire

$$mv = v \pm u.$$

Au reste, l'auteur arrive en définitive à ce dernier résultat, mais en faisant une seconde supposition non moins inexacte, et qui consiste à regarder la vitesse des

quée ; mais en supposant que la force des roues soit constante, on a

$$v^2 = (mv \pm u)^2; \text{ d'où } v \pm u = mv,$$

en prenant le signe supérieur quand le navire va dans le sens du courant.

Supposons, par exemple, que la vitesse du navire dans une eau tranquille soit de 8 kilomètres par heure, et celle du courant de 3 kilomètres ; alors en descendant dans le sens du courant, on a

$$v + u = 8 + 3 = 11 \text{ kilomètres,}$$

et en le remontant,

$$v - u = 8 - 3 = 5 \text{ kilomètres.}$$

Si la vitesse des aubes change, la force ne sera pas constante ; et si elle ne change pas, ce rapport ne peut pas se maintenir exact.

Règle pour la force des machines employées sur les bateaux.

650. La force de ces machines peut être calculée de la manière suivante. Soient p la pression moyenne sur le piston en kilogrammes, d son diamètre en centimètres, v sa vitesse en mètres par minute, et n le nombre de chevaux équivalent à sa force ; on aura

$$n = \frac{pvd^2}{4500}.$$

aubes comme variable et la force de la machine comme constante, ce qui est contradictoire.

Les formules du texte conviennent à un autre cas de la navigation ; c'est celui du *touage*, dans lequel les navires sont tirés par une force motrice, placée à bord ou à terre, et agissant à l'aide de chaînes et de points fixes. (Voyez la théorie et les expériences relatives à ce système dans l'*Essai sur les bateaux à vapeur* déjà cité.)

M.

Si l est la longueur de la course du piston en mètres, alors $v = A\sqrt{l}$, A désignant le coefficient trouvé dans l'art. 536 ; d'où

$$n = \frac{pAd^2\sqrt{l}}{4560} \text{ et } d = \left(\frac{4500n}{pA\sqrt{l}}\right)^{\frac{1}{2}}.$$

En logarithmes on aura

$$\log d = \frac{1}{2}(\log 4500 + \log n - \log p - \log A - \frac{1}{2} \log l).$$

Pour la vapeur à basse pression agissant avec toute sa force pendant la course entière, nous avons $A = 57$ (art. 537), et $p = 0,5$ (art. 416). Ainsi, dans ce cas, la formule devient

$$\log d = \frac{1}{2}(\log n + 1,19837 - \frac{1}{2} \log l);$$

on aura de même

$$\log n = 2 \log d + \frac{1}{2} \log l - 1,19837.$$

651. Si le diamètre du piston en centimètres est exprimé par m fois la longueur de la course en mètres, on a

$$\log d = \frac{2}{5}(\log n + 1,19837 + \frac{1}{2} \log m).$$

Dans les proportions les plus usuelles, on a $m = 75$, c'est-à-dire que la longueur de la course du piston est les quatre tiers du diamètre : donc,

$$\log d = \frac{2}{5}(\log n + 3,07343).$$

Exemple. Si la résistance est équivalente à la force de 100 chevaux, obtenue avec deux machines de 50 chevaux chacune,

le log. de	50 =	1,69897
		3,07343
		4,77240
multipliant par		2
		9,54480
et divisant par 5, on trouve	log $d =$	1,90896,
dont le nombre correspondant est 31.		

Ainsi, le diamètre du piston est de 81 centimètres, et la longueur de la course $81 \times \frac{4}{3} = 108$ centimètres.

Des proportions des machines pour les navires.

652. En procédant maintenant au calcul des proportions, et à l'établissement des conditions qui doivent présider à la disposition des parties d'une machine pour un bâtiment, nous nous trouverons présenter les meilleures explications possibles de l'usage des règles précédentes.

653. *La résistance du navire* doit être calculée d'après la vitesse. Sans prétendre fixer absolument la vitesse la plus avantageuse, je la supposerai de 3 mètres par seconde, ou de 11 kilomètres par heure dans une eau tranquille, ce qui équivaldrait à $14 \frac{2}{3}$ kilomètres par heure, si l'on ajoutait le secours des voiles. Supposons que la longueur de la partie parallèle du navire soit de 22 mètres, que le rayon de courbure des extrémités soit de 6 demi-largeurs, que la largeur à la section du maître couple soit de 8 mètres, et le périmètre de la partie de cette section plongée dans l'eau, de $11^m,6$. Alors, la vitesse étant de 3 mètres par seconde, nous avons par la table (art. 622), pour la valeur de la résistance, évaluée en kilogrammes élevés à un mètre par seconde,

$$52,5 \times 3^3 \times 11,6 [0,025 \times 8 + 0,0032^1 (22 + 1,05 \times 8)] \\ = 3^3 \times 18,8 = 5076 \text{ kilogrammes}$$

élevés à un mètre par seconde ; ce qui revient en force de chevaux à

$$\frac{5076}{75} = 67 \frac{2}{3}.$$

¹ Le coefficient $52,5 \times 0,168$ (voyez art. 614) est très-probablement trop grand. Il est pris d'après les expériences de la *Société pour le perfectionnement de l'Architecture navale*, et il s'accorde avec les expériences plus récentes du colonel Beaufoy. Mais je suis très-convaincu que quand l'eau est en mouvement, le frottement est moindre ; seulement, il reste à déterminer sa valeur exacte.

654. Si maintenant on devait fixer l'aire et la vitesse des aubes d'après la vitesse assignée ci-dessus au navire, elles ne pourraient pas agir avec avantage, soit contre le vent, soit contre le courant. D'ailleurs, il y a en mer, dans l'emploi de grandes aubes, un désavantage qui est plus considérable que la perte provenant de ce qu'on s'écarte du maximum ; c'est pourquoi je recommanderais de construire les aubes pour une vitesse plus grande d'environ $0^m,3$ par seconde que le taux calculé. Conséquemment (art. 651), $(5,3)^3 \times 39,4 \times bh =$ la puissance des aubes ; et comme la résistance est 5076, nous aurons pour l'aire des aubes

$$bh = \frac{5076}{(3,5)^3 \times 39,4} \times 3^m,58.$$

Supposons que le rayon des roues soit de quatre fois la hauteur des aubes ; alors, par la seconde équation de l'article 651, nous avons

$$\frac{118,2r \times (3,5)^3 \times bh}{2r - h} = \frac{472,8 \times (3,5)^3 \times 3,58}{7}$$

$$= 8700 \text{ kil. élevés à 1 mètre ;}$$

d'où l'on tire pour la force en chevaux

$$\frac{8700}{75} = 116.$$

655. Puisque le navire exige une force de 116 chevaux, si l'on emploie deux machines, chacune devra équivaloir à 58 chevaux ; et, par la règle de l'article 651, nous trouverons, d'après cela, que le diamètre du piston doit être égal à 93 centimètres. La longueur de la course devant être les quatre tiers du diamètre, sera $2^m,24$, et par conséquent, le nombre de coups par minute (art. 356) sera $25 \frac{1}{2}$. Alors, d'après la formule de l'article 641 corrigée par la hauteur de l'aube ¹, nous trouverons pour le

¹ Si dans la formule

$$v = \frac{3rv}{2r - h}$$

rayon des roues, quand la vitesse du navire est de $5^m,3$ par seconde, ou de $11^{kil},88$ par heure,

$$r = \frac{32}{7} \times \frac{v}{25,5} = \frac{32 \times 11,88}{7 \times 25,5} = 2^m,12.$$

Divisant ce rayon par 4, on trouve $0^m,53$ pour la hauteur des aubes.

Mais afin de réduire la largeur de la roue, il est préférable de donner $0^m,6$ de hauteur, et $2^m,19$ de rayon ; les aubes auront alors une aire de $0,6 \times 3$ mètres carrés pour chaque roue, ce qui fait $3^m,6$ carrés pour les deux, et la largeur de la roue sera de 3 mètres ¹.

Les autres proportions des machines se trouveront par la règle générale (art. 415), excepté que la vapeur est produite par une quantité d'eau un peu plus petite en raison de ce qu'elle est formée par l'eau de mer, à une plus haute température (voyez l'art. 90) ; mais ce n'est que de 2 pour 100 de moins, et la consommation de combustible n'en est pas sensiblement altérée ; il y

on suppose que le rayon $r = 4h$, on aura

$$v = \frac{3 \times 4}{8 - 1} v = \frac{12}{7} v,$$

au lieu de

$$v = \frac{3}{2} v;$$

ce qui donne, par la proportion

$$\frac{2}{3} : \frac{12}{7} :: 4 : x = \frac{32}{7},$$

le coefficient du texte.

¹ Les proportions d'un tel bâtiment sont à peu près celles qui appartiennent au navire le *James-Watt*, comme je m'en suis assuré. Dans les tableaux suivants, je donne les meilleurs renseignements que j'aie pu me procurer sur ce bâtiment, afin de pouvoir comparer le calcul avec l'observation. Mais la vitesse dans une eau tranquille est très-difficile à constater ; c'est, très-probablement, la vitesse que ce bâtiment prenait dans une rivière, sans déduction de celle du courant.

a aussi un léger avantage, à cause que la tension de la vapeur est moindre dans le condenseur que lorsqu'on emploie de l'eau pure (*voyez* le tableau de l'art. 94). Par conséquent, on peut supprimer sans perte la bêche d'eau froide qui renferme le condenseur. Les machines doivent être disposées pour agir par expansion, et réglées à la main (*voyez* les art. 419 et 481); on trouvera la force des parties par les règles des art. 496-527; le service de l'eau est traité, art. 565, et le parallélogramme, art. 468-495.

. 656. Je pense qu'il serait désirable d'essayer quel effet pourrait produire un degré d'élasticité considérable procuré aux bras des aubes, et de donner à celles-ci la forme représentée dans la fig. 5, pl. XX (art. 634). Les roues des navires me paraissent, en général, être placées trop vers l'avant, de manière qu'elles tendent constamment à relever la proue; ce qui donne lieu à une action défavorable. Pour avoir une marche assurée, tout bâtiment doit s'appuyer avec force sur la direction de la route qu'il doit suivre; et que cette remarque soit aussi vraie dans la pratique que dans la théorie, c'est ce qu'on peut induire de ce fait que, dans le système actuel de construction, on trouve un avantage à employer les voiles pour donner de l'assiette au navire et assurer la ligne de sillage. Dans les remorqueurs¹, on peut user de ce moyen avec un avantage encore plus marqué; et, dans tous les cas, l'emplacement convenable des roues paraît être derrière le centre de gravité du bâtiment.

On voit la construction des chaudières dans la pl. XXI, et la machine dans les pl. XXII et XXIII.

Les tableaux suivants ont été dressés principalement d'après les documents imprimés dans les rapports sur les paquebots à vapeur de Holyhead, par le comité nommé par la chambre des communes, et ils fourniront les moyens de comparer la pratique de différents constructeurs².

¹ La force nécessaire pour remorquer un navire peut être calculée par les formules de l'art. 622.

² On trouvera dans l'*Essai sur les bateaux à vapeur*, déjà mentionné, l'état détaillé de presque tous les navires de ce genre construits en Amérique, en Angleterre, en France et dans les autres contrées de l'Europe, avec leurs dimensions leurs vitesses observées, etc.

657. *Tableau des navires à vapeur.*

NOM DES CONSTRUCTEURS DES MACHINES.		MAUDSLAY EILS ET FIELD, A LONDRES.							
NOM DU NAVIRE.	Les Dées.	L'Entreprise	Le Commerce.	Le Bours d'Amstord.	L'Ingénieur de Londres.	L'Éclair.	L'Ariéquin.	L'Jeanbôd.	Les Croiseur.
Nom du constructeur du navire.	50m,81	7m,93	6m,81	7m,88	Brent.	38m,43	6m,40	5m,49	5m,19
Longueur du vent.	9m,15	4m,27	3m,05	2m,44	7m,32	6m,81	2m,34	2m,14	1m,91
Largeur (plus grande).	3m,05	4m,57	5m,49	4m,88	3m,52	4m,95	3m,96	3m,82	3m,31
Tirant d'eau.	6m,10	2m,13	2m,13	2m,14	1m,82	4m,37	2m,14	1m,83	1m,61
Diamètre des roues à aubes.	3m,05	20kil,5			1m,98	2m,74			
Vitesse de l'extrémité des roues à aubes en kilom. par heure.									
Hauteur des aubes.									
Tonnage enregistré, en tonneaux de 1000 kilogrammes.	710 ton.	507 ton.	406 ton.	507 ton.	320 ton.	300 ton.	285 ton.	163 ton.	98 ton.
Puissance totale des machines en chevaux.	200 chev.	120 chev.	140 chev.	130 chev.	70 chev.	109 chev.	80 chev.	60 chev.	50 chev.
Consomm. de charbon par heure.	2	2	3	2	285 kilog.	2	2	2	2
Nombre des machines.									
Diamètre des cylindres des ma- chines.	135 cent.	109 cent.	114 cent.	108 cent.	91 cent.	102 cent.	91 cent.	81 cent.	75 cent.
Longueur de la course du piston.	152 cent.	24	137 cent.	122 cent.	76 cent.	122 cent.	107 cent.	91 cent.	91 cent.
Nombre de coups par minute.	20	24	22	25	28	25	28	30	32
Diamètre de la pompe à air.									
Destination du navire	La marine royale.	Indes orientales.	Liverpool et Dublin.	Amstord. et Londres.	Paquebot de Margate.	La marine royale.	Paquebot de la poste.	Paquebot de la poste.	Paquebot de la poste.
Date de la construction.	1827	1823	1826	1826	1818	1824	1824	1826	1827
Puissance des machines, en che- vaux, calculée pour la meilleure vitesse et la pression totale.	272	160	197	160	88	137	104	76	68

558. *Tableau des navires à vapeur.*

NOM DES CONSTRUCTEURS DES MACHINES.	BOULTON ET WATT, A SOHO, PRÈS BIRMINGHAM.						RENTON ET GLO, A LIVER.
	<i>Le Soho.</i>	<i>La James Watt.</i>	<i>La Cité d'Edim.</i>	<i>Le Shannon.</i>	<i>Le Souverain Georges IV.</i>	<i>La Cabillonie.</i>		Le Méteorb.
NOM DU NAVIRE	<i>Le Soho.</i>	<i>La James Watt.</i>	<i>La Cité d'Edim.</i>	<i>Le Shannon.</i>	<i>Le Souverain Georges IV.</i>	<i>La Cabillonie.</i>	<i>Le Héros.</i>
Nom des constructeurs des navires.	.....	Wood et compagnie	Wigram.	Fletcher et fils.	Evans.	Wood et compagnie	Bancham.
Longueur du pont.	50m,23	43 met.	44 met.	55 met.	38 met.	30 met.	
Largeur (plus grande).	8m,23	7m,82	7m,72	14m,4	6m,66	4m,57	6m,10
Tirant d'eau.	.....	3m,05	.....	.....	2m,59	1m,37	.....
Diamètre des roues à aubes	4m,78	5m,49	5m,49	.....	4m,88	.....	1m,98
Largeur des roues à aubes	2m,44	2m,74	2m,44	.....	2m,44	.....	4m,27
Vitesse de l'extrémité des roues à aubes, en kilomètre, par heure.	23kil,45	19kil,32	19kil,37	.....	.....	.....	2m,44
Hauteur des aubes.	0m,61	0m,61	0m,61	.....	.....	.....	24kil,15
Tonnage enregistré; en tonnes de 1000 kilogrammes.	518 ton.	455 ton.	406 ton.	521 ton.	213 ton.	102 ton.	0m,46
Puissance des machines, en chev.	120 chev.	130 chev.	80 chev.	160 chev.	80 chev.	28 chev.	236 tonneaux.
Vitesse par heure dans un eau calme.	.....	16kilom.	.....	.....	13kilom,7	13kilom,7	30 chev.
Consom. de charbon par heure.	.....	.....	.....	.....	400 kilog.	.....	18kilom,5
Nombre des machines.	.....	.....	.....	.....	.....	.....	1000 kilog.
Diamet. des cylind. des machines.	107 cent.	99 cent.	99 cent.	.....	.....	.....	.....
Longueur de la course du piston.	122 cent.	107 cent.	107 cent.	.....	.....	.....	.....
Nombre de coups par minute.	26	27 1/2	27 1/2	.....	.....	.....	.....
Diamètre de la pompe à air.	58 cent.	53 cent.	50 cent.	.....	.....	.....	.....
Destination du navire.	Transport des passag.	Transport des passag.	Transport des passag.	Transport des passag. et 210 ton. de fret.	Transport des passag.	.....	Paquetot de Margate.
Date de la construction.	1823	1821	1821	1825	1821	.....	1821
Puissance des machines, calculée d'après la meilleure vitesse et la pression totale.	151 chev.	122 chev.	104 chev.	.....	.....	1815	.....

650. *Tableau des navires à vapeur.*

NOM DES CONSTRUCTEURS DES RACHISES.	NAPLES, A GLASGOW.			FAWCETT ET LITTLEDALE, A LIVERPOOL.				
	<i>Lo Rovum- Uni.</i>	<i>Lo Majestueux.</i>	<i>Lo Superbe.</i>	<i>Lo Talbot.</i>	<i>Lo Seint- Patrick.</i>	<i>L'Alison.</i>	<i>Lo Duc de Lancastre.</i>	<i>La Cambria</i>
NOM DU NAVIRE.								
NOM des constructeurs des navires.		Scott et compagnie.	Scott et compagnie.	Wood et compagnie	Mottershead et Hayes.			
Longueur du pont.	53 mètr.			28 mètr.	40 mètr.	32 mètr.	31 mètr.	28 mètr.
Largeur (plus grande).	13m,35			5m,46	6m,56	5m,74	5m,18	5m,34
Tirant d'eau.					4m,17	2m,50	2m,30	2m,34
Diamètre des roues à aubes.								
Largeur des roues à aubes.								
Vitesse de la circonférence des roues à aubes.								
Hauteur des aubes.								
Tonnage enregistré en tonneaux de 1009 kilogrammes.	1015 ton.	355 ton.	245 ton.	142 ton.	233 ton.	105 ton.	95 ton.	88 ton.
Puissance des machines en chev.	200 chev.	100 chev.	70 chev.	60 chev.	109 chev.	60 chev.	50 chev.	50 chev.
Vitesse par heure dans une eau calme.								
Consomm. de charbon par heure.	1000 kilogr.		14 kilom.,5 637 kilog. houille d'Ecosse.	355 kilog. houille d'Ecosse.				
Nombre des machines.	2	2	2	2	2	2	2	2
Diamèt. des cylindr. des machines.								
Longueur de la course du piston.								
Nombre de coups par minute.		28			107 cent.	81 cent.		75 cent.
Diamètre de la pompe à air.					107 cent.	84 cent.		75 cent.
Destination du navire.	Paquetbot d'Edimb., 175 passag.			Paquetbot de la poste.				
Date de la construction.	1836	1816	1820	1819	1822	1822	1822	1822
Puissance des machines, calculée d'après la meilleure vitesse et la pression totale.					142 chev.	37 chev.		67 chev.

La consommation de charbon est celle qui a lieu quand la machine agit à pleine pression, et y compris toutes pertes pour délais, déchets, etc. Cette quantité est celle qui, multipliée par le nombre d'heures qu'exige le passage, donnerait la consommation de chaque voyage. Dans les meilleures machines, cette consommation varie depuis 5 jusqu'à 7 kilogrammes de charbon de Newcastle, par heure, et par force de cheval, et dans les machines moins bonnes elle peut aller jusqu'à 9 kilogrammes.

Quand la quantité de houille consommée revient à moins de 5^{kil},5 par heure et par cheval (force nominale), on peut la considérer comme un résultat d'expérience, et dans ce cas, l'économie du combustible provient en partie des soins plus assidus que le chauffeur donne au service du foyer, et des précautions que l'on prend pour éviter les pertes et profiter de tout l'effet utile.

La dernière colonne du troisième tableau (art. 664) donnera assez exactement la consommation par heure et par cheval, pour des machines appliquées aux navires, et dont la force nominale serait prise dans la première colonne du même tableau.

La vitesse des navires à vapeur paraît, terme moyen, d'environ 16 kilomètres par heure. Leur force pour tenir tête au vent est fort peu considérable, parce que le vent imprime une telle vitesse à la surface de l'eau, que les aubes agissent avec moins de force à mesure que la vitesse de l'eau approche d'être égale à la différence entre celle des aubes et celle du navire; et quand il y aura égalité, le navire commencera à rétrograder. On suppose aussi avec beaucoup de raison que l'action du vent lui-même tend fortement à retarder le mouvement d'un navire quand il lui est directement opposé; car si un navire de la force de 100 chevaux présente au-dessus de la flottaison une surface de 50 mètres carrés ¹ et que la vitesse du vent soit de 15 mètres par seconde ², alors, par la formule ³ de l'article 647 (note), on trouvera que la

¹ Cette estimation a été faite sur un navire en activité de service, et réduite en raison des surfaces courbes.

² C'est une vitesse qui n'empêche pas les navires de faire route.

³ Cette formule donne dans ce cas

$$\frac{15^2 \times 50}{250} = 45 \text{ chevaux;}$$

et si l'on tient compte de la vitesse du navire, supposée de 5 mètres, la vitesse re-

résistance présentée par le vent au mouvement du navire quand il est en repos, équivaut à la force de 45 chevaux. Comme, avec quelque vitesse que le navire se meuve contre le vent, cette vitesse doit être ajoutée à celle de ce dernier, il paraît que la force utile d'impulsion pour la marche est extrêmement réduite par l'effet d'une telle surface au-dessus de l'eau.

Les seuls navires du tableau (art. 657) dont les dimensions nous permettent de calculer approximativement leur vitesse sont *l'Éclair* et *le Dee* ; et, malgré la grande force des machines du *Dee*, je pense que la vitesse dans une eau tranquille doit être d'un dix-huitième moindre que celle de *l'Éclair* dans les mêmes circonstances : il faudrait, pour les rendre égales, que les machines du *Dee* fussent de la force de 230 chevaux. *Le Dee* s'élève sur l'eau sous un angle d'environ 50° avec la ligne d'eau, formant de chaque côté une saillie d'environ $1\frac{1}{2}$ mètre, comme dans les bateaux destinés au transport des passagers.

660. On a beaucoup parlé des navires à vapeur des Américains ; et ces bâtiments, quant à ce qui concerne leur excellente construction, l'élégance et la commodité de leurs aménagements, paraissent supérieurs à ceux qu'on fait en Angleterre. Cependant leurs meilleures machines ne paraissent pas supérieures aux machines anglaises, si même elles leur sont égales, attendu que les récits exagérés auxquels plusieurs ont donné lieu portent en eux-mêmes la preuve de leur inexactitude.

La plus parfaite dont j'aie eu connaissance est celle du *Chancelier Livingston*, construit par Fulton pour la navigation de l'Hudson, de New-York à Albany. C'est un des plus grands navires à vapeur américains.

La quille a 47 mètres de longueur, le pont 50 mètres ; sa

lative du vent devient 18 mètres, et la résistance qu'il occasionne est égale à

$$\frac{18^3}{15^2} \times 45 = 65 \text{ chevaux.}$$

Il faudrait donc que le navire eût, dans ce cas, un supplément de force de 65 chevaux pour pouvoir conserver sa vitesse primitive. M.

largeur est de 10 mètres ; il tire environ 2 mètres d'eau, et jauge 550 tonneaux.

La cabine principale a $16\frac{1}{2}$ mètres de long et 2 de haut ; la chambre des dames, qui est au delà, est longue de 11 mètres ; la cabine de l'avant est longue de 9 mètres et haute de 2. La cabine principale renferme 38 lits, celle des dames 24, et celle de l'avant 56 ; il y en a 2 dans la chambre du capitaine, sur le pont ; 3 dans celle des mécaniciens et des pilotes ; 6 dans le gaillard d'avant, et 6 pour les chauffeurs, les cuisiniers, etc. ; en tout, 135.

La machine est de la force de 75 chevaux ; le diamètre du cylindre est de 1 mètre ; la longueur de la course du piston, de $1\frac{1}{2}$ mètre ; la chaudière a $8\frac{1}{2}$ mètres de longueur, $3\frac{1}{2}$ mètres de largeur, et 2 tuyaux de cheminée.

Les roues à aubes ont 5 mètres de diamètre, et les aubes $1^m,78$ de longueur ; il y a 2 volants, dont chacun a 4 mètres de diamètre. Le mécanisme s'élève de $1^m,37$ au-dessus du pont.

On dit que la vitesse du navire est d'environ 14 kilomètres par heure. Avec un bon vent et une marée favorable, elle peut aller jusqu'à 19 kilomètres par heure ; mais avec un vent et une marée contraires, elle ne va qu'à 9 kilomètres.

Comme, dans les machines à basse pression, on estime la force nominale d'après le plus grand effet que le cylindre peut produire, on s'est imaginé que ce navire était mû par une puissance moindre qu'un navire anglais de même grandeur.

La source de l'erreur provient des méthodes défectueuses qu'on a adoptées pour la mesure du tonnage enregistré ou officiel des bâtiments, comme on le verra art. 661.

Je suis redevable à M. Edward Deas Thomson, récemment arrivé d'Amérique, de la notice suivante, sur un des derniers et des meilleurs bateaux construits aux États-Unis.

« *L'Amérique du nord (north America)*, construit par Kemble et compagnie, à New-York, sous la direction de M. Stevens, armateur.

DIMENSIONS.

Longueur du pont.	54 ^m 3
Creux (mesuré du dessous du maître bau à la quille).	2,75
Largeur (aux façons).	8,8
Largeur extrême au-dessus de la flottaison.	17,7
Tirant d'eau.	1,38
Diamètre des roues à aubes.	6,40
Hauteur des aubes.	0,6
Deux machines dont les cylindres ont un diamètre de.	1,14
Longueur de la course des pistons.	2,44
m bre de coups par minute.	22 à 25.

« La pression habituelle de la vapeur est de 23 centimètres de mercure au-dessus de l'atmosphère, et la pression extrême de 35 centimètres. Les deux machines consomment deux cordes de bois par heure. Le trajet de New-York à Albany est d'environ 258 kilomètres, et il s'effectue, terme moyen, en 12 heures ; les machines consomment dans ce temps 25 cordes de bois. Les chaudières sont placées en avant des roues à aubes, et les machines en arrière. »

Je trouve (d'après l'Essai de Marcus Bull sur les combustibles, Philadelphie, 1827) qu'une corde de bois pèse environ 1735 kilogrammes, et comme les machines sont de la force de 85 chevaux, cela donne une consommation de 20^{kit},4 de bois par heure et par cheval. Le rapport de l'effet calorifique de la houille à celui de bois étant $\frac{35,8}{13,1}$, d'après le tableau de l'article 190, on aura pour la consommation équivalente en houille grasse

$$20,4 \times \frac{13,1}{35,8} = 7^{\text{kit}},4.$$

Moyen d'évaluer le tonnage d'un navire à vapeur.

661. Il faut prendre la largeur du navire au maître couple, soit au-dessus, soit au-dessous de la préceinte; et sa longueur horizontale de dehors en dehors, depuis l'étambot jusqu'à l'étrave sous le beaupré. Appelant L cette longueur, l la largeur et l' la longueur de la chambre de la machine, la valeur du tonnage T est (en tonneaux de 1000 kilogrammes)

$$T = \left(\frac{L - l' - \frac{3}{5} l}{5,45} \right) l = 0,19 \left(L - l' - \frac{3}{5} l \right) l^2.$$

Exemple. Si la largeur est de 10 mètres, la longueur 50 mètres, et la longueur de la chambre de la machine 15 mètres, le tonnage sera

$$T = 0,19 (50 - 15 - 6) \times 10^2 = 550 \text{ tonneaux,}$$

Le tonnage nominal est le même quel que soit le tirant d'eau d'un navire, et aussi quelle que puisse être sa forme. C'est une tâche pénible pour un Anglais que de montrer combien sont trompeurs les moyens adoptés par son gouvernement² pour me-

¹ La même formule, en mesures anglaises, est

$$T = \frac{L - l' - \frac{3}{5} l}{188} \times l^2.$$

² D'après l'ordonnance du 8 août 1821, le tonnage des bateaux à vapeur est mesuré en France de la manière suivante :

La longueur est prise de tête en tête, conformément à la loi du 1^{er} janvier 1794.

On retranche la longueur de l'espace occupé par la machine et par son approvisionnement en combustible.

On mesure la largeur du navire de dehors en dehors sur le pont, à chacune des deux extrémités de l'espace occupé par les machines, en ne tenant aucun compte

surer la capacité des navires; cependant la science exige non-seulement que l'erreur soit constatée, mais aussi qu'elle soit corrigée.

des galeries et roues à aubes; on ajoute ces deux largeurs, et l'on prend la moitié de leur somme.

Le produit de cette largeur moyenne par la longueur réduite est multiplié par le creux mesuré à la pompe de secours du navire.

Le produit total est divisé par 94, et le quotient donne le tonnage légal du bâtiment.

C'est ce qu'on peut exprimer plus brièvement, en se servant de la notation ci-dessus par la formule

$$T = \frac{(L - l') cl}{94},$$

où c désigne le creux.

L'ordonnance ne dit pas s'il faut faire usage des mesures anciennes ou des mesures métriques, ce qui conduirait à des résultats fort différents; mais, malgré la date récente de ce règlement, il est certain qu'on a entendu employer les mesures anciennes.

Exprimée en nouvelles mesures, la formule devient

$$T = 0,3 (L - l') cl.$$

Elle ne diffère de la précédente qu'en ce qu'il faut prendre les trois dixièmes du produit au lieu du 94; elle indique en outre que le tonnage total, y compris l'espace réservé à la machine, ne forme que les trois dixièmes du parallépipède circonscrit, supposé de la même densité que l'eau.

Quoique la règle de jaugeage ordonnée en France ne présente pas la même absurdité que la règle anglaise, elle n'est pas cependant sans défaut. Elle a l'inconvénient de donner le même tonnage, quelle que soit la forme du navire, soit à fond plat, soit à carène aiguë, de sorte que, si elle était exacte pour les unes, elle serait nécessairement défectueuse pour les autres. Généralement, le résultat sera trop faible pour les navires qui, comme les bateaux à vapeur, sont à fond plat et présentent plus de capacité à égalité de dimensions extérieures.

S'il est pénible à un Anglais de relever les fautes de son gouvernement, un Français trouvera plus regrettable que le droit de réglementer en ce point, comme en beaucoup d'autres, soit encore confié, chez les deux nations les plus civilisées, à des gouvernants moins éclairés que les gouvernés*.

* Une ordonnance royale récente (novembre 1837) prescrit d'exprimer en mètres les trois dimensions principales servant à l'évaluation du tonnage, et elle établit que le tonnage légal des bâtiments à voiles sera égal au produit de ces trois dimensions divisé par le nombre constant 3,8.

Appliquée aux bateaux à vapeur, cette règle nouvelle donne la formule

$$\frac{(L - l') cl}{3,8}.$$

Elle fournit des résultats plus faibles d'un septième que la précédente, et elle n'est pas plus exacte quant aux diverses formes des navires, puisqu'on n'y tient pas compte de cette variété de formes.

M.

ONZIÈME SECTION.

Des machines locomotives.

662. Le premier exemple d'une force locomobile empruntée à la vapeur a été réalisé en grand par Fulton, il y a trente ans, lorsque ce célèbre et persévérant inventeur lança son bateau mécanique sur les eaux de l'Hudson. De là aux machines locomotives sur routes de terre, il semblait n'y avoir qu'un pas ; cependant cette application non moins utile que celle des bateaux à vapeur, et plus brillante peut-être, n'a pu être pratiquée avec succès que depuis huit ans ; elle s'est développée depuis avec une promptitude peu commune dans les inventions mécaniques, en même temps que les chemins de fer étendaient leur ramification dans les contrées des deux mondes. Par cette double combinaison de chemins unis, servis par des moteurs aussi rapides qu'infatigables, on verra presque les distances s'anéantir, les villes et les peuples se rapprocher, les échanges de produits et d'idées se multiplier, et la civilisation marcher au pas de course.

663. Les machines locomotives peuvent être d'une application universelle, parce que partout on peut leur ouvrir des voies de fer ou des chemins d'un parcours facile. Il n'en est pas de même des bateaux à vapeur qui, jusqu'à présent, ont été confinés au service des eaux naturelles, telles que les rivières et les mers, et qui n'ont pu encore naviguer dans les voies artificielles des navires : ce qui en a restreint l'usage à quelques contrées favorisées ou aux villes du littoral.

664. La vitesse des bateaux à vapeur est bornée par la résistance du fluide qu'il faut constamment surmonter ; et comme cette résistance croît en raison du carré de la vitesse, on obtient bientôt un maximum (16 à 18 kilom. par heure) au delà duquel

toute addition de force motrice ne fait qu'augmenter la dépense sans accroître sensiblement la célérité de la marche.

Dans les machines locomotives cette limitation n'existe pas, la résistance ne croît pas avec la vitesse ; la même force impulsive suffit pour tous les degrés de rapidité, sauf toutefois la faible influence de l'air atmosphérique, et l'on peut dire même que l'on pourrait atteindre une vitesse indéfinie sous le point de vue mécanique, si des motifs de prudence et de sécurité ne faisaient une loi de modérer cette vitesse dans l'intérêt des voyageurs.

665. Les machines locomotives, plus simples que les bateaux à vapeur, ne sont cependant venues qu'après ceux-ci : c'est qu'il a fallu auparavant créer et perfectionner les chemins de fer, tandis que la nature avait ouvert elle-même la voie aux bateaux sur les fleuves et les mers ; c'est qu'il a fallu en outre créer, pour ainsi dire, un nouveau système de machines à vapeur, puissant dans un petit espace, très-actif avec un petit foyer, et d'une grande énergie de vaporisation avec une petite chaudière et peu de combustible.

Dans les bateaux à vapeur, on a pu employer les machines ordinaires sur de grandes dimensions, avec de vastes appareils de vaporisation, alimentés facilement avec les eaux affluentes, et pourvus d'immenses approvisionnements de combustible.

666. Le problème des machines locomotives a occupé presque tous les inventeurs qui se sont livrés au perfectionnement ou aux applications des machines à vapeur ; dès 1770, Watt avait porté ses vues sur cette question, mais il ne paraît pas qu'il ait fait des essais sérieux. En 1775, Cugnot construisit à Paris une machine de ce genre, qui subsiste encore au Conservatoire des Arts et Métiers, mais qui paraît trop grossièrement faite pour avoir obtenu le moindre succès.

La première expérience qui ait réussi paraît être celle que tentèrent, en 1802, deux ingénieurs de Cornouailles, Trevithick et Vivian, sur une route ordinaire : c'était une machine à haute pression, à chaudière cylindrique horizontale, portée sur quatre roues, et ayant un foyer intérieur.

Comme la vapeur y était employée à une pression alors inu-

sitée (5 kilogr. par centimètre carré), les inventeurs eurent recours à des moyens de sûreté qu'on a appliqués depuis, même aux machines à basse pression : c'était une seconde soupape à charge invariable et renfermée hors de la portée du chauffeur qui ne pouvait la surcharger ; c'était encore une rondelle métallique bouchant une ouverture pratiquée dans la paroi de la chaudière au-dessous du niveau de l'eau, et qui devait fondre dans le cas où ce niveau serait accidentellement descendu trop bas ; c'était enfin un tube ou manomètre à colonne de mercure, le long duquel la vapeur trop comprimée se fût ouvert au besoin une issue, en chassant le fluide métallique par l'extrémité supérieure.

Les cylindres de cette machine, au nombre de deux, étaient verticaux, et la vapeur qui en sortait, après avoir fonctionné, était renvoyée dans le réservoir d'eau froide pour chauffer un peu celle-ci avant son introduction dans la chaudière.

667. Il ne paraît pas que les inventeurs aient donné suite à cet essai ; mais en 1804, ils furent plus heureux en appliquant leur machine au chemin de fer de Merthyr Tydwil, dans le pays de Galles. Cette fois les deux cylindres étaient horizontaux, et le mouvement était communiqué par des bielles aux quatre roues, dont les essieux étaient liés par des engrenages ; un volant était employé pour régulariser le mouvement. La machine remorqua sur une longueur de 9 milles (14400^m) une charge de 10 tonnes de fer, avec une vitesse de 5 milles (8 kilomètres) par heure.

668. Dans l'état d'imperfection où étaient alors les chemins de fer, et surtout les machines, on s'imaginait qu'une des grandes difficultés du mouvement provenait du défaut d'adhérence des roues sur les rails : aussi Trevithick et Vivian proposèrent divers moyens pour remédier à ce vice imaginaire, tels que de rendre les jantes raboteuses par des entailles ou des dentelures transversales, ou par des clous et pointes saillantes.

669. Dans le même but, M. Blenkinsop projeta et exécuta en 1811, aux environs de Leeds, un chemin de fer à crémaillères, dont les dents engrenaient dans celles des roues de la machine locomotive. Ce chemin existe encore dans sa forme pri-

mitive, et les machines à roues d'engrenage continuent à porter la houille des mines de Middleton sur le marché de Leeds.

670. L'année suivante, MM. Chapman essayèrent, pour faire marcher leur machine, un procédé semblable à celui du *touage* des bateaux. À cet effet, ils tendaient le long de l'axe du chemin un câble ou une chaîne arrêtés à un point fixe et qui venait s'enrouler autour d'une poulie placée sous la machine, de façon que la poulie recevant de celle-ci un mouvement de rotation, tendait à enrouler successivement le reste de la chaîne et entraînait ainsi dans sa marche tout l'appareil moteur. Le frottement et la complication de ce moyen ne permirent pas de l'employer avec succès.

671. En 1814, M. Stephenson établit, pour le chemin de fer de Killingworth, près Newcastle, une machine locomotive simplifiée, sans engrenage, et dont il assura la marche, même pour de grandes charges, en liant les roues de devant à celles de derrière, au moyen de bielles de communication. Ce moyen, qui est encore employé lorsqu'il s'agit de traîner de forts convois, exige une égalité rigoureuse dans le diamètre des 4 roues, afin que celles-ci, faisant le même nombre de tours, parcourent le même espace sans glissement ou frottement quelconque.

L'usage des machines locomotives commença à se répandre dans les chemins de fer de Newcastle, et notamment sur celui de Darlington à Stockton, ouvert en 1825. Mais ces machines, toujours construites grossièrement, n'étaient appliquées qu'au transport de la houille; elles n'obtenaient qu'une vitesse de 2 à 3 lieues à l'heure, avec des charges de 15 à 20 tonnes, et il n'avait pas été question encore de les employer au transport des voyageurs.

672. En 1829, M. Séguin aîné, concessionnaire-directeur du chemin de fer de Saint-Étienne à Lyon, et chargé en cette qualité de confectionner le matériel nécessaire à cette entreprise, eut le premier l'occasion d'introduire en France l'usage des machines locomotives; il s'occupa avec succès de leur perfectionnement, et il eut l'heureuse idée, adoptée depuis par tous les constructeurs, de substituer, aux anciennes chaudières à foyer et à

simple conduit intérieur, une multitude de tubes de petit diamètre; et, au lieu de procéder comme Perkins, pour ses chaudières tubulaires qui étaient chauffées à l'intérieur, tandis que l'eau circulait dans les tubes, M. Séguin imagina d'agir en sens inverse, c'est-à-dire de faire circuler la flamme dans les petits tubes, tandis que ceux-ci étaient plongés dans l'eau à échauffer. Par ce moyen il augmenta prodigieusement la surface de chauffe dans un petit espace; et cependant l'eau continuant à affluer librement autour des tubes, il évita l'inconvénient des chaudières de Perkins, dont les tubes se vidaient d'eau par le refoulement de la vapeur produite et se calcinaient promptement¹.

673. Vers la fin de la même année, la compagnie du chemin de fer de Liverpool à Manchester, à la veille de terminer sa grande entreprise, provoqua une révolution complète dans le système des machines locomotives, à la suite d'un concours solennel qu'elle ouvrit pour le perfectionnement de ces moteurs. Dans les expériences qui eurent lieu pour apprécier le mérite des machines présentées par divers concurrents, on atteignit des vitesses inespérées et qui avaient paru jusqu'alors fabuleuses. La machine de MM. Stephenson, exécutée dans les ateliers de Newcastle, avec la perfection qu'on obtient d'une main-d'œuvre expérimentée, fut celle qui remporta le prix, et cette machine a depuis servi de base à toutes les améliorations de détail qu'on a introduites dans le système de construction.

674. Indépendamment de la grande vitesse obtenue au moyen de ces machines, les nouvelles dispositions ont permis aussi de réaliser une importante économie dans la consommation du combustible. On en jugera par le tableau suivant, qui donne le résultat des premières machines établies sur le chemin de Liverpool, et où l'on a rapporté la consommation de coke faite par chaque machine, en l'évaluant par tonne transportée et par kilomètre.

¹ M. Séguin introduisit encore un autre perfectionnement très-efficace dans les machines locomotives, ce fut l'usage d'un ventilateur pour activer le tirage de l'air dans le foyer, et augmenter ainsi la quantité de vapeur produite. Ce moyen a été remplacé plus simplement par l'action d'un jet de vapeur dans la cheminée.

NOMS des machines.	VITESSE MOYENNE en kilomètres par heure.	COKE COSOMMÉ par tonne et par kilomètre.
No 1. La Fusée.	22.4	0,68
2. Le Sans-Pareil.	24. »	0,70
3. Le Phénix.	19.2	0,40
4. La Flèche.	16.2	0,55

Dans les machines récemment construites, le double perfectionnement a été poussé encore plus loin, et l'on a obtenu une réduction nouvelle de consommation de combustible en même temps qu'une augmentation notable dans la vitesse, comme nous le verrons dans les articles suivants.

Description des machines locomotives (pl. XXV, fig. 2 à 8).

675. Ces machines se composent de deux appareils distincts, bien qu'ils soient habituellement réunis sur le même train : 1^o l'appareil de production de vapeur ; 2^o le mécanisme moteur. Dans quelques machines construites récemment, sur de grandes dimensions, on les a même isolés en les faisant porter chacun sur un train spécial.

676. *De l'appareil de vaporisation.* Cet appareil est formé d'une chaudière cylindrique horizontale B, terminée à chaque extrémité A, C, par un coffre ou compartiment de dimension un peu plus grande que le corps de la chaudière. Dans le premier de ces coffres A se trouve le foyer F, avec la grille G et le cendrier H au-dessous. Ce foyer est environné d'eau au moyen de la double enveloppe EE, qui forme le compartiment et qui contient, entre ses parois extérieures et intérieures, le liquide en communication avec la chaudière. Cette disposition présente l'avantage d'augmenter notablement la surface de chauffe pour la vaporisation, en même temps que de prolonger la durée de

l'enveloppe du foyer, qui, sans la présence de l'eau dans toute l'étendue de ses parois, serait promptement calcinée et mise hors de service. Cette surface de chauffe du coffre peut varier de 3 à 5 mètres carrés, suivant les dimensions adoptées.

La chaudière cylindrique B est unie au coffre par une paroi commune D, E, et elle est traversée dans toute sa longueur par un assemblage de tubes parallèles I, I, au nombre de cent environ, qui s'ajustent exactement sur les deux fonds du cylindre au moyen de viroles rivées sur les extrémités. Ces tubes servent de passage à l'air brûlé qui du foyer F passe à la cheminée, et donnent un accroissement de surface de chauffe très-important, eu égard à leur nombre et à l'étendue de leur superficie développée. Leur diamètre peut varier de 4 à 5 centimètres, et leur surface, exposée au feu, peut aller de 20 à 40 mètres, suivant que leur nombre s'élève de 65 à 160, et leur longueur de 2^m à 2^m,50.

Le dernier coffre C, également lié avec la chaudière, forme l'origine de la cheminée K qui s'élève au-dessus; les parois en sont simples, et celle de devant est fermée par une porte L, qu'on ouvre à volonté pour visiter l'intérieur du compartiment avec les pièces qu'il renferme.

La cheminée K est peu élevée et ne produirait qu'un faible tirage si son effet n'était augmenté par le jet ascensionnel de la vapeur V à sa sortie du cylindre, de manière à produire une espèce de trompe analogue à celles des souffleries hydrauliques.

677. — La chaudière est alimentée d'eau au moyen de deux pompes P, P, qui aspirent le liquide du réservoir placé à la suite de la machine et qui le refoulent dans l'intérieur; le niveau doit y être maintenu à peu près constant et toujours au-dessus des tubes I, I, sans quoi ces derniers seraient sujets à brûler. Pour vérifier la hauteur de l'eau, le machiniste a sous les yeux un tube de cristal dont les deux bouts communiquent avec la chaudière, l'un au-dessous du niveau de l'eau, et l'autre au-dessus, de sorte que l'eau s'y place d'une manière apparente au même niveau qu'elle occupe dans la chaudière.

678. L'appareil est pourvu de deux soupapes de sûreté, l'une

S à pression constante et qui limite la tension de la vapeur à un maximum déterminé, en demeurant hors de la portée du machiniste ; l'autre S' à pression variable et dont l'action produite par un ressort est modifiée, à volonté, par le conducteur, dans tous les degrés de force inférieurs à la pression que détermine la première. L'usage a fait fixer jusqu'à présent cette pression à 4 kil. par centimètre carré, en sus de la pression atmosphérique, c'est-à-dire que dans la chaudière la tension de la vapeur est limitée à 5 kil. ou à 5 atmosphères ; mais habituellement le service des machines s'effectue avec une pression de 4 à 4 $\frac{1}{2}$, telle qu'elle est déterminée et indiquée par la soupape à ressort S' au moyen d'un indicateur gradué *t*.

679. *Du mécanisme des machines locomotives.* — L'appareil se compose de deux cylindres horizontaux R, R, placés au-dessous du coffre C de la cheminée, et qui renvoient la vapeur de la chaudière au moyen d'un gros tube TT, qui l'amène de la partie supérieure ; de deux pistons *p* et de leurs tiges ; de 2 bielles correspondantes *b, b*, et d'un arbre à deux manivelles *a, a*, qui sert en même temps d'essieu à une paire de roues O, O ; l'autre paire de roues A, A demeure libre avec son essieu ; mais lorsque le diamètre des roues de devant et de derrière est exactement le même, on peut lier les deux essieux par des bielles *b, b'* qui alors sont placées latéralement et extérieurement sur deux manivelles *m, m'*, et permettent de commander à la fois le mouvement dans les quatre roues.

680. La prise de vapeur se fait au point culminant Z de la chaudière, sous une espèce de coupole Y, afin d'éviter l'afflux de l'eau bouillante qui pourrait être entraînée par l'effervescence tumultueuse de la vapeur. Dans le coude du même tube est placé un robinet ou régulateur X, dont la poignée *n* est à portée du machiniste pour régler à volonté l'affluence de la vapeur.

Le jeu de la vapeur dans les cylindres s'effectue au moyen de régulateurs à tiroirs, *t, t*, manœuvrés par des tiges et des excentriques correspondants placés sur l'arbre à manivelles. Ces pièces sont disposées de manière que le machiniste peut à volonté suspendre leur action, ou la transformer en sens inverse et faire

ainsi rétrograder la machine, ou enfin en rendre le jeu indépendant de celui de la machine, et régler alors à la main les mouvements du mécanisme, toutes conditions qu'il est important de pouvoir remplir instantanément pour la sécurité du service des convois.

681. Les arbres coudés sur lesquels agit la bielle de transmission de mouvement sont plus sujets à rompre que les arbres droits. Comme les accidents qui résultent de cette rupture sont assez graves pour de grandes vitesses, quelques constructeurs préfèrent employer des essieux droits auxquels ils transmettent le mouvement à l'aide de manivelles disposées à leurs extrémités; dans ce cas, les cylindres à vapeur sont placés nécessairement de chaque côté de la chaudière et en dehors des roues. Un autre constructeur, M. Jackson, a cherché à atténuer l'inconvénient des essieux coudés, en les soutenant sur quatre collets au lieu de deux, de sorte qu'en cas de rupture à la manivelle, les deux tronçons d'essieux retenus par leurs collets maintiennent les roues en place et préviennent ainsi la verse du train de la machine.

Les roues de machines locomotives exigent une grande solidité; on les a d'abord construites en bois avec moyeux et jantes en fonte, le tout cerclé fortement dans une ou deux bandes de fer. M. Stephenson en a établi tout en fer et fonte, avec rayons en fer creux; ce système, plus durable et plus solide que le précédent, paraît être maintenant généralement préféré.

682. A chaque machine est attaché un train d'approvisionnement dit *tender*, destiné à porter la provision d'eau et de combustible nécessaires à chaque voyage ou au moins à chaque relais. Le réservoir d'eau est en tôle et d'une contenance d'environ 3 mètres cubes; ce volume d'eau est suffisant pour un trajet de 24 à 30 kilomètres; et même, lorsque le convoi traîné par la machine est peu considérable, la même provision peut fournir le double de cette distance.

685 *Tableau des dimensions des meilleures machines du chemin de fer de Liverpool.*

NOMS des machines.	DIAMÈTRE des cylindres.	COURSE du piston.	DIAMÈTRE de la chaudière.	LONGUEUR de la chaudière et des tubes.	NOMBRE des tubes.	DIAMÈTRE des tubes.	SURFACE de chauffe		AIRE de la grille du foyer.	CAPACITÉ du coffre pour le coke.	DIAMÈTRE de la cheminée.
							dans le coffre.	dans les tubes.			
	Centim.		Mèt.	Mèt.		mm.	Mèt. c.	Mèt. c.	Mèt. c.	Mèt. cub.	Mèt.
Samson.....	56	41	1.07	2.14	140	41	5.54	58.73	0.70	0.51	0.52
Jupiter.....	28	41	0.84	1.98	79	41	5.35	21.07	0.57	0.51	0.50
Goliath.....	56	41	1.07	2.14	132	41	3.74	37.81	0.70	0.51	0.52
Vulcain.....	28	41	0.91	1.98	107	41	3.20	28.55	0.60	0.22	0.54
Fury.....	28	41	0.91	1.98	107	41	3.06	28.56	0.57	0.25	0.54
Victory.....	28	41	0.91	2.06	97	41	3.49	25.87	0.58	0.35	0.52
Atlas.....	30	41	0.91	2.40	65	41	5.50	20.24	0.85	0.37	0.50
Vesta.....	28	41	0.84	2.13	86	41	4.27	23.79	0.66	0.35	0.29
Liver.....	28	41	0.91	1.98	97	41	5.69	26.58	0.75	0.55	0.54
Ajax.....	28	46	0.84	2.05	65	51	3.05	21.19	0.56	0.24	0.54
Leeds.....	28	41	0.91	1.98	107	41	3.21	28.56	0.57	0.25	0.54
Firefly.....	28	46	0.91	2.59	110	41	4.08	55.68	0.66	0.41	0.54

684. Ces machines ont des roues d'un diamètre qui varie de 1^m, 37 à 1^m, 53, et leur poids est de 8 à 12 tonnes. La pression la plus ordinaire à laquelle les machines travaillent est de $4\frac{1}{2}$ atmosphères ou de $3\frac{1}{2}$ kil. par centimètre carré sur la soupape de sûreté. A cette pression elles peuvent vaporiser 1800 kil. d'eau par heure, ou un demi-litre par seconde; mais ce produit est variable en raison de la vitesse, comme nous le verrons plus loin.

La surface exposée directement au feu dans le coffre donne plus de vapeur par mètre carré que celle des tubes dans lesquels la chaleur est moins intense. Le rapport serait d'environ 3 à 1, d'après quelques expériences qui auraient besoin d'être répétées.

De la résistance des wagons et machines sur les chemins de fer.

685. Il a été fait de nombreuses expériences pour déterminer le frottement et la résistance qu'éprouvent les véhicules dans leur mouvement sur les chemins de fer. Sur les anciennes voies de cette espèce et avec des wagons imparfaits, cette résistance dépassait un centième, ou 10 kilogrammes par tonne. Le perfectionnement de ces lignes obtenu par la substitution des rails en fer à ceux de fonte et par une plus grande précision apportée à la jonction des rails et à leur mise en place, l'emploi d'essieux et de boîtes plus soignées et mieux enduites avaient réduit cette résistance à 5 millièmes; enfin, par l'emploi des ressorts de suspension et surtout par la position des boîtes reportées en dehors des roues, sur des tourillons ou fusées d'essieux d'un diamètre beaucoup plus petit que le corps de ces essieux, ces nouvelles améliorations ont permis de réduire encore le frottement à $3\frac{1}{2}$ millièmes. Nous ne parlons pas d'autres résultats qui promettent des réductions ultérieures, tels que ceux obtenus avec des essieux tournant sur galets et qui réduisent le frottement à 2 millièmes, parce que ces moyens ne sont pas encore appliqués en grand sur les lignes de chemins de fer.

Quoi qu'il en soit, et en adoptant le taux de $3\frac{1}{2}$ millièmes, pour la valeur de la résistance, on voit qu'un convoi du poids

de 80 tonnes ou 80000 kilogrammes n'exige qu'un effet de traction de

$$80000 \times 0,0035, \text{ ou de } 280 \text{ kilog.}$$

Toutefois, et pour avoir égard aux causes de résistance provenant particulièrement du frottement des pièces des machines, ainsi qu'à d'autres causes accidentelles, il sera convenable, dans le calcul des forces de traction, d'augmenter un peu la valeur de la résistance donnée par les expériences, et nous la porterons par cette considération à 4 millièmes; ainsi, un convoi de 80000, composé d'un certain nombre de wagons ou voitures et de la machine motrice, produira dans la marche une résistance moyenne de 320 kilogrammes et exigera une force de traction équivalente.

686. Outre la résistance provenant du frottement, il en existe une autre qui devient sensible lorsque les convois marchent avec de grandes vitesses : c'est la résistance de l'air, qui s'exerce surtout avec énergie sur la première voiture du convoi. Cette résistance paraît être proportionnelle à la surface directe exposée au choc de l'air, et au carré de la vitesse; des expériences ont fait connaître qu'elle est d'environ un huitième de kilogramme pour un mètre carré de surface, se mouvant avec la vitesse d'un mètre par seconde. Or, la machine locomotive qui forme la tête d'un convoi, présente moyennement une surface réduite de 3 mètres carrés, en y comprenant ses roues et sa cheminée; ce qui donnerait les nombres suivants, pour la résistance due à cette cause dans les vitesses correspondantes.

VITESSE par seconde.	RÉSISTANCE de l'air.	VITESSE par seconde.	RÉSISTANCE de l'air.	VITESSE par seconde.	RÉSISTANCE de l'air.
1 ^m	$\frac{3}{8}$ kil.	6 ^m	13.5kil.	18 ^m	121.5kil.
2	1.5	8	24.0	20	150
3	3.7	10	57.5	24	216
4	6.0	12	54.0	30	538
5	9.4	15	84.4	56	486

687. Les résistances ci-dessus ont lieu sur un chemin incliné comme sur un chemin horizontal, quel que soit d'ailleurs le taux de la pente. L'inclinaison du chemin présente de nouvelles circonstances, qui tantôt contrarient le mouvement et tantôt le favorisent, suivant que le convoi doit remonter des rampes ou qu'il a à descendre des pentes. Cet effet, dans un sens et dans l'autre, est proportionnel au taux de l'inclinaison, et il s'ajoute aux précédentes résistances passives, ou bien il les atténue et les détruit même, si la pente est assez prononcée.

688. Pour faire la somme des trois natures d'influence que nous venons de signaler, désignons par P le poids total du convoi dont la vitesse est V , par A la surface exposée au choc de l'air sur la 1^{re} voiture, et par i le taux de l'inclinaison du chemin sur l'unité de longueur, nous aurons pour l'expression de la résistance

$$0,004P \pm \frac{AV^2}{8} \pm iP, \quad \text{ou} \quad (0,004 \pm i)P \pm \frac{AV^2}{8},$$

dans laquelle les signes positif ou négatif se rapportent à une rampe ou à une pente.

689. Lorsque le chemin est descendant et que le taux de l'inclinaison dépasse 4 millièmes, le convoi prend de lui-même un mouvement progressif par l'effet de sa propre pesanteur ; mais à mesure qu'il s'accélère, la résistance de l'air s'accroît et peut parvenir à mettre un terme à cette accélération, au moins dans les pentes modérées.

On déterminera le maximum de vitesse dont le convoi est susceptible, en égalant à zéro l'expression de la résistance : ce qui

$$\text{donne } (0,004 - i)P \pm \frac{AV^2}{8} = 0, \text{ d'où } V = \sqrt{\frac{(0,004 - i)8P}{A}}.$$

Prenons par exemple les pentes de 5 et 6 millièmes, et calculons la vitesse pour les trois cas principaux qui peuvent se présenter :

- 1° Une machine seule avec son tender, du poids de 16000 k.
 2° avec un convoi de voyageurs, 40000 k.
 3° avec un convoi de marchandises, 80000 k.

POIDS des CONVOIS.	VITESSE MAXIMA.			OBSERVATIONS.
	A la pente de 4 millièmes.	A la pente de 5 millièmes.	A la pente de 6 millièmes.	
16000	0	6 ^m 5	9 ^m 25	Le convoi est supposé soumis à l'action seule de la pesanteur, sans rien emprunter à la force de la machine.
40000	0	10.5	14.6	
80000	0	14.6	20.6	

On voit que ces vitesses n'ont rien d'exagéré, puisqu'on les produit habituellement sur les autres parties non descendantes des chemins de fer, en employant à cet effet la force motrice des machines locomotives.

690. On peut retourner le problème, et se demander quelle serait la pente nécessaire pour produire une vitesse donnée. Ce cas est résolu par l'expression

$$i = 4 + \frac{1000 AV^2}{8P}.$$

Supposons qu'on veuille obtenir la plus forte vitesse du tableau ci-dessus, ou $V = 20^m,6$, avec le convoi 16000 k. de la seule machine locomotive, on a

$$i = 4 + \frac{1000 \times 3 \times 20,6^2}{8 \times 16000} = 4 + 10 = 14 \text{ millièmes.}$$

Calcul de la force et de la vitesse des machines.

691. La force des machines dépend en premier lieu de la quantité de vapeur que l'appareil peut produire, et ensuite de l'emploi plus ou moins complet que l'on fait de la vapeur pro-

duite. D'après les expériences de M. de Pambour, rapportées dans le tableau ci-après, la quantité de vapeur formée dans les appareils usités sur le chemin de fer de Liverpool, a varié de 1200^{kil} à 2000, suivant la dimension des chaudières, et suivant les vitesses imprimées au train. Ces expériences font voir que la quantité de vapeur produite s'accroît en même temps que la vitesse, par suite de l'accroissement du tirage occasionné par le jet de vapeur dans la cheminée ; mais ces expériences n'ont pas été dirigées de manière à faire connaître exactement la loi de cet accroissement.

Cependant il est indispensable dans le calcul de l'effet des machines de tenir compte de cette circonstance toute spéciale aux machines locomotives. Pour y avoir égard, autant que l'insuffisance des expériences le permettra, nous considérerons que le *tirage* ou l'affluence de l'air dans le foyer, et par suite l'activité de la combustion, est déterminé par deux causes : 1^o la force ascensionnelle de l'air chaud due à la hauteur de la cheminée, comme dans les machines fixes ; 2^o l'impulsion du jet de vapeur, déterminant dans la cheminée une accélération de vitesse et de tirage : le premier effet est constant, et pourrait être déterminé une fois pour toutes, en constatant la quantité d'eau vaporisée dans la chaudière, la machine restant à l'état de repos ; le second effet doit croître avec la vitesse du jet de vapeur ou de la machine elle-même. Ainsi la force de vaporisation d'une machine locomotive en marche peut être représentée par une expression de la forme

$$m + nV,$$

dans laquelle V est la vitesse, et m , n sont deux constantes à déterminer par l'expérience.

692. En attendant des observations plus précises, nous ferons usage de celles de M. de Pambour, en écartant toutefois celles où les résultats sont évidemment altérés par l'emploi de l'eau déjà très-chaude pour l'alimentation.

On trouve alors que la force de vaporisation ou la quantité de vapeur produite par heure est assez bien représentée par l'ex-

pression

$$12 + \frac{10}{3} V,$$

pour chaque mètre carré de surface de chauffe, en ne tenant compte de celle des tubes que pour un tiers (art. 634).

Si S désigne cette surface de chauffe pour une machine donnée, la force de vaporisation de cette machine sera

$$S \left(12 + \frac{10}{3} V \right).$$

Quand $V = 0$ ou que la machine est à l'état de repos, la vaporisation se réduit à $12 S$, ou au tiers environ de ce qu'on obtient dans un appareil ordinaire; cette diminution s'explique très-bien par le faible tirage que produit la cheminée d'une machine locomotive réduite à 2 mètres de hauteur, au lieu de 15 à 20^m qu'ont les cheminées des appareils fixes, et encore par le peu de longueur des conduits de l'air chaud qui laissent ainsi échapper dans la cheminée une grande quantité de la chaleur produite.

Quoi qu'il en soit, voici le tableau comparatif des effets des appareils expérimentés et des effets calculés.

693. Tableau de la puissance de vaporisation de six machines du chemin de fer de Liverpool.

NOMS des machines.	POIDS des convois.	PRESSION moyenne de la vapeur.	TEMPÉRATURE de l'eau d'alimentation.	VITESSE MOYENNE de la machine par heure.	VAPORISATION totale par heure.	SUREAU de chauffe		VAPORISATION	
						réduite.	mèt. car.	par mètre carré, expériment.	calculée.
Vulcan.....	40	3.8	à peine tiède.	57	mèt. cub. 1.640	mèt. car. 12.7	kilog. 129	kilog. 155	
Atlas.....	199	3.8	froide.	16	1.140	12.0	95	65	
<i>Id.</i>	150	3.7	<i>id.</i>	24	1.568	12.0	114	92	
<i>Id.</i>	41	2.1	<i>id.</i>	25	1.517	12.0	110	95	
Fury.....	57	4.0	<i>id.</i>	51.6	1.473	12.6	117	117	
<i>Id.</i>	30	4.0	<i>id.</i>	50	1.558	12.6	124	122	
Firefly.....	42	3.1	presque froide.	28.5	1.670	15.3	109	107	
<i>Id.</i>	42	3.4	tiède.	54.5	1.978	15.3	129	126	
Vesta.....	34	3.6	très-chaude.	45.8	1.727	12.2	141	138	
Leeds.....	30	3.8	à peine tiède.	50	1.714	12.7	135	112	
<i>Id.</i>	38	3.4	très-chaude.	55.4	1.795	12.7	141	140	
Moyenne.....	69	3.5		50.4	1.580	12.7	122	115	

694. On pourra calculer, au moyen de la formule, les effets de vaporisation des chaudières, pour d'autres dimensions et pour d'autres vitesses, en ayant égard à l'étendue des surfaces de chauffe, comme il a été dit ; c'est-à-dire, en réduisant au tiers la superficie réelle des tubes.

Voici, par exemple, ce calcul effectué pour des appareils présentant des surfaces de chauffe réduites de 10 à 18 mètres carrés et pour les vitesses usuelles indiquées au tableau.

Surface de chauffe des appareils.	QUANTITÉ D'EAU VAPORISÉE PAR HEURE AUX VITESSES DE							
	16 km.	20 km.	24 km.	28 km.	32 km.	36 km.	40 km.	48 km.
Mét. carrés.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.
10	653	787	920	1053	1187	1520	1453	1720
12,5	817	985	1150	1317	1488	1650	1817	2150
15	980	1180	1380	1580	1780	1980	2180	2550
18	996	1416	1636	1896	2156	2176	2616	3096

695. Il est facile de transformer la quantité d'eau vaporisée, en un volume correspondant de vapeur pour une pression donnée : soit p cette pression, exprimée en kilog. par centimètre carré, e le poids d'eau vaporisé, E le volume de l'eau réduite en vapeur ; on aura •

$$E = \frac{2100}{p + 0,20} e.$$

Nous avons trouvé précédemment que le poids d'eau vaporisé par la chaudière était représenté par

$$e = S \left(12 + \frac{10}{3} V \right).$$

En substituant cette valeur, le volume de vapeur produite par

heure deviendra

$$E = 2100 S \frac{12 + \frac{3}{10} V}{p + 0,20},$$

et le même produit par seconde sera (étant exprimé en litres)

$$E = \frac{2100}{3600} S \frac{12 + \frac{3}{10} V \times 3,6}{p + 0,20} = 7S \frac{1 + V}{p + 0,20},$$

et en mètres cubes

$$E = 0,007 S \frac{1 + V}{p + 0,20}.$$

Le volume de vapeur dépensé par les cylindres en une seconde sera représenté par l'aire du piston multipliée par l'espace parcouru. Soit d le diamètre du piston, l la longueur de la course, D le diamètre des roues; l'aire des deux pistons sera

$$\frac{\pi d^2}{2},$$

et leur vitesse moyenne

$$\frac{2l}{\pi D} V;$$

d'où le volume de vapeur dépensé par seconde,

$$\frac{\pi d^2}{2} \times \frac{2l}{\pi D} V = \frac{ld^2}{D} V.$$

Ces deux volumes de vapeur produite et de vapeur dépensée devraient être égaux; mais comme il se perd beaucoup de vapeur, soit par la soupape de sûreté, soit par les imperfections des joints et des pistons, il faudra augmenter d'environ un dixième la dépense calculée des cylindres et la porter par conséquent à

$$1,1 \frac{ld^2}{D} V;$$

en égalant maintenant ces deux volumes, on aura

$$0,007S \frac{1 + V}{p + 0,20} = \frac{1 \cdot 1ld^2}{D} V,$$

d'où l'on tire

$$p = \frac{0,0064DS(1 + V)}{ld^2V} - 0,20 = \frac{0,0064DS}{ld^2} \left(1 + \frac{1}{V}\right) - 0,20,$$

pour la valeur de la pression sur chaque centimètre carré des pistons.

La pression totale sur l'aire des deux pistons est

$$10000 \frac{\pi d^2}{2} p;$$

mais cette pression est en partie contrariée par la pression atmosphérique et par la résistance de la vapeur sortante dans la cheminée ; ce qui réduit la pression effective à environ $\frac{3}{4}(p-1)$ par centimètre carré, et la pression totale à

$$10000 \frac{3}{8} \pi d^2 (p - 1).$$

Substituant pour p sa valeur trouvée ci-dessus, on trouve définitivement pour la valeur de la pression utile ou de la force accélératrice de la machine,

$$10000 \frac{3\pi d^2}{8} \left[\frac{0,0064 DS}{ld^2} \left(1 + \frac{1}{V}\right) - 1 \cdot 20 \right],$$

ou

$$\frac{24\pi DS}{l} \left(1 + \frac{1}{V}\right) - 4500\pi d^2.$$

Nous avons vu précédemment que la résistance à surmonter par le convoi était exprimée par

$$(0,004 \pm \epsilon) P + \frac{AV^2}{8}.$$

Cette valeur étant rapportée à la circonférence des roues, pour

la ramener à l'effort exercé sur le piston, il faut la multiplier par le rapport de la vitesse de ce dernier à celle des roues ou par

$\frac{\pi D}{2l}$, ce qui donne

$$\frac{\pi D}{2l} \left[(0,004 \pm z) P + \frac{AV^2}{8} \right];$$

Lorsque la machine atteint le mouvement uniforme, la résistance devient égale à la puissance, et l'on a l'égalité

$$\frac{\pi D}{2l} \left[(0,004 \pm z) P + \frac{AV^2}{8} \right] = \frac{24\pi DS}{l} \left(1 + \frac{1}{V} \right) - 4500\pi d^2,$$

$$\text{ou } (0,004 \pm z) P + \frac{AV^2}{8} = 48 S \left(1 + \frac{1}{V} \right) - \frac{9000lD^2}{D};$$

ce qui donne enfin pour la valeur de P ou du convoi traîné

$$P = \frac{l}{0,004 \pm z} \left[48 S \left(1 + \frac{1}{V} \right) - \frac{AV^2}{8} - \frac{9000lD^2}{D} \right].$$

Cette relation entre les volumes P, S, V et z, ou entre le poids traîné, la surface de vaporisation, la vitesse du convoi et la pente du chemin, permet de déterminer l'une de ces quantités, lorsque les autres sont données.

696. Prenons pour exemple une machine locomotive, à peu près semblable aux machines les plus usitées sur le chemin de fer de Liverpool, et pour laquelle on aurait :

La surface de chauffe. . . . S = 12.5 mètres carrés.

Le diamètre du piston. . . . d = 0^m.28

La course *id.* l = 0.41

Le diamètre des roues D = 1.50

La surface de la machine ex-

posée au choc de l'air. . . . A = 3^m.

On trouvera pour la valeur de P en fonction de la vitesse seu-

lement

$$P = \frac{1}{0,004 \pm i} \left(600 + \frac{600}{V} - \frac{3}{8} V^2 - 193 \right),$$

$$\text{ou } P = \frac{1}{0,004 \pm i} \left(407 + \frac{600}{V} - \frac{3}{8} V^2 \right).$$

697. La première conclusion qu'on peut tirer de cette formule, c'est que la charge traînée sera d'autant plus forte que la vitesse sera moindre ; toutefois cette relation a nécessairement un terme au delà duquel la formule n'est plus applicable ; cette charge maximum est limitée par les deux circonstances suivantes : c'est que la pression de la vapeur dans la chaudière et les cylindres ne peut être poussée au delà d'un certain degré, sans compromettre la sûreté de l'appareil ; c'est que la masse traînée ne peut dépasser un certain poids, sans que les roues de la machine ne viennent à glisser sur les rails ; ce qui arrête le mouvement progressif.

698. Pour déterminer la limite due à la première cause, rappelons-nous que la pression usuelle effective dans les appareils usités, est de 3 à 4^{kil} par centimètre carré, et que par conséquent la tension de la vapeur dans la chaudière, que nous avons désignée par p , ne dépasse pas 4 à 5^{kil} ; à ce dernier terme même, la seconde soupape de sûreté est disposée pour donner une pleine issue à la vapeur, et celle-ci cesse alors nécessairement d'augmenter de pression.

Ainsi, la plus forte valeur qu'on puisse donner à p (art. 695) est celle de

$$p = 5,$$

ou, en substituant

$$0,0064 \frac{DS}{ld^2} \left(1 + \frac{1}{V} \right) - 0,20 = 5,$$

et, après réduction,

$$\frac{DS}{ld^2} \left(1 + \frac{1}{V} \right) = 812 \cdot 5.$$

Pour appliquer cette condition à la machine prise pour exemple, mettons à la place de $\frac{DS}{ld^2}$ les valeurs numériques $\frac{12.5 \times 1.50}{0,41 \times 0,28^2}$ ou 583, on aura

$$1 + \frac{1}{V} = \frac{812.5}{583} = 1.4,$$

d'où
$$V = \frac{1}{0.4} = 2^m.50;$$

ce qui détermine la moindre vitesse que puisse prendre la machine, et par suite sa plus forte charge.

699. La limitation provenant du défaut d'adhérence des roues sur les rails, n'est pas aussi facile à déterminer, puisqu'elle dépend de l'état du chemin qui est plus ou moins glissant, suivant qu'il est humide ou sec, du poids plus ou moins fort de la machine, et enfin de la partie de ce poids qui porte sur les roues agissantes.

Si l'on admet que, dans le cas le plus défavorable, l'adhérence sur les rails ou le frottement du fer sur fer soit de $\frac{1}{20}$ de la pression, que le poids de la machine soit de 8000^{kil}, et qu'enfin les quatre roues soient commandées à la fois, l'expression de la valeur de l'adhérence sera

$$\frac{8000}{20} \text{ ou } 400^{\text{kil}}.$$

La charge traînée sur chemin de niveau ne pourra donc dépasser, dans ce cas,

$$\frac{400}{0,004} = 100000^{\text{kil}} \text{ ou } 100 \text{ tonnes.}$$

Par les temps secs, l'adhérence est plus forte et s'élève jusqu'à $\frac{1}{10}$ et même $\frac{1}{8}$ de la pression ; alors la charge traînée peut être portée à 200 et 250 tonnes, machine comprise, pourvu d'ailleurs que les autres conditions du mouvement soient remplies et que l'état du chemin ne vienne pas à se dégrader.

700. Enfin la vitesse elle-même atteint une limite, lorsque après avoir diminué la charge autant que possible, il ne reste plus que le poids seul de la machine et de son tender pour tout convoi ; ces deux poids réunis ne sont pas moindres de 12 tonnes, et la vitesse qui correspond à cette valeur minimum de P, est un maximum qu'on ne peut dépasser. Heureusement cette limite est assez reculée pour qu'on n'ait pas même cherché encore à l'atteindre dans la pratique.

Après ces explications, nous allons donner dans les tableaux ci-après l'application du calcul, en restreignant les résultats dans les termes seulement où la formule est applicable.

701. *Tableau des charges que peut traîner une machine locomotive, pareille à celle d'une dimension moyenne sur le chemin de Liverpool.*

Taux des rampes du chemin.	VITESSE EN MÈTRES PAR SECONDE.									
	2 ^m ,5	5 ^m	7.5	10	12.5	15	18	20	25	30
Niveau.	161 t	130 t	116 t	107 t	99 t	91 t	81 t	72 t	49 t	22 t
0.001	129	104	95	86	79	75	65	58	59	18
0.002	107	87	77	71	66	61	54	48	55	15
0.003	92	74	66	61	56	52	46	41	28	15
0.004	80	65	58	53	49	45	40	56	25	»
0.005	72	58	52	47	44	40	56	52	22	»
0.006	64	52	46	43	40	36	52	29	20	»
0.007	58	47	42	39	36	33	29	26	18	»
0.008	54	45	39	36	33	30	27	24	16	»
0.009	50	40	36	33	30	28	25	22	15	»
0.010	46	37	33	31	28	26	24	21	14	»
0.015	32	27	24	23	21	19	17	15	»	»
0.020	27	22	19	18	17	15	15,5	12	»	»
0.025	22	18	16	15	14	12	»	»	»	»
0.030	19	15	13	12	»	»	»	»	»	»
0.035	16	13	»	»	»	»	»	»	»	»
0.040	14	12	»	»	»	»	»	»	»	»
Vitesse en kilom. par heure.	9	18	27	36	45	54	65	72	90	108

702. *Tableau des effets dynamiques ou du travail des machines locomotives de diverses dimensions sur chemin de fer horizontal.*

SURFACE réduite de chauffe.	DIAMÈTRE du cylindre.	VITESSE EN MÈTRES PAR SECONDE.						
		2 ^m ,5	5 ^m	10 ^m	15 ^m	20 ^m	25 ^m	30 ^m
12 ^m ,5	0 ^m ,28	161 t	130 t	107 t	91 t	72 t	49 t	22 t
15	0,28	203	165	140	122	105	80	55
15	0,30	196	158	135	115	96	71	46
18	0,35	226	182	155	134	114	90	64
Vitesse par heure en kilomètres.		9	18	36	54	72	90	108

703. En examinant les résultats donnés par ce tableau, on voit que la charge ou les convois vont en diminuant à mesure que les vitesses augmentent, mais qu'ils diminuent dans un rapport moindre, de sorte que la machine augmente en puissance mécanique par l'accroissement même de vitesse.

Toutefois les poids indiqués dans ces tableaux représentent le convoi total, machine comprise, et non le poids utile transporté. Il convient, pour déterminer la vitesse la plus avantageuse, de défalquer des nombres ci-dessus, le poids même de la machine et de son tender, c'est-à-dire 12 tonnes pour les machines de petite dimension, et 15 à 18 tonnes pour les autres.

On composera ainsi le tableau suivant, dans lequel on a ajouté l'effet utile en 1" en tonnes transportées à 1 kilomètre.

704. Tableau de l'effet utile des machines locomotives sur chemin de fer horizontal.

SURFACE réduite de chauffe.	DIAMÈTRE du cylindre.		VITESSE EN MÈTRES PAR SECONDE.						
			2 ^m ,5	5 ^m	10 ^m	15 ^m	20 ^m	25 ^m	30 ^m
			t.	t.	t.	t.	t.	t.	t.
12 ^m "	0 ^m ,28	Charge utile . .	149	128	95	79	60	57	10
		Effet utile en 1'' . .	372	540	950	1185	1200	925	506
15	0,28	Charge utile . .	188	150	128	107	88	65	58
		Effet en 1'' . .	470	750	1280	1625	1760	1625	1146
15	0,30	Charge utile . .	181	143	118	150	81	56	51
		Effet en 1'' . .	452	715	1180	1500	1620	1400	936
18	0,35	Charge utile . .	208	164	155	116	96	72	46
		Effet en 1'' . .	520	820	1350	1740	1920	1800	1380
Vitesse en kilom. par heure.			9	18	36	54	72	90	108

D'après ce tableau, on voit que l'effet utile maximum sera obtenu à la vitesse de 20^m environ ; cet effet décroît ensuite rapidement, surtout pour les petites machines, ce qui explique l'avantage qu'on trouve à employer de fortes machines lorsqu'on veut agir avec de grandes vitesses.

On obtiendra exactement la valeur de la vitesse correspondante à l'effet maximum, en égalant à zéro la différentielle de PV (art. 696), ce qui donne

$$407 - \frac{9}{8} V^2 = 0, \text{ d'où } V = 19^m$$

pour les machines de la première espèce.

705. Mais le problème le plus important ne consiste pas à tirer d'une machine donnée le plus grand effet, sans avoir égard à la dépense de combustible ; on verra par le tableau suivant qu'on n'obtient cette augmentation d'effet à de grandes vitesses que par une augmentation encore plus considérable dans la consommation du combustible ; et qu'ainsi la considération économique

conduit à diminuer la vitesse et à augmenter les charges, indépendamment de l'avantage de prolonger bien plus longtemps la durée des machines.

Ce tableau est formé au moyen des expériences de M. de Pam-bour, sur le chemin de Liverpool, et nous y avons ajouté les deux avant-dernières colonnes, afin de rendre plus sensible l'influence de la vitesse sur la consommation, ainsi que nous l'avions déjà remarqué pour la formation de la vapeur.

Par exemple, la machine Atlas a varié dans sa consommation de coke par heure, depuis 211^k jusqu'à 304, c'est-à-dire dans le rapport de 2 à 3, suivant les charges et suivant les vitesses. La consommation de combustible de la même machine, considérée par kilomètre et par tonne, a varié de 0^c,08 à 0^c,23, c'est-à-dire de 1 à 3, et le premier résultat a été obtenu, comme de raison, dans le cas de faibles vitesses et de fortes charges.

Tableau de la consommation de combustible des machines locomotives sur le chemin de Liverpool.

NOMS des machines.	CHARGE du trainée.	DURÉE		PRESSION effective moyenne.	VITESSE moyenne par seconde.	COKE DE 1 ^{re} QUAL.		EAU vaporisée par kil. de coke.	COKE consommé par kilom. et par tonne.
		du trajet de 47,5 kilom.	h. m.			consommé			
						pour le trajet.	par heure.		
Atlas . .	193	3. 2	3. 8	4. 4	724	233	5. 2	0. 08	
Id. . .	125	1. 48	3. 7	7. 3	500	278	"	0. 08	
Id. . .	124. 5	1. 38	3. 7	6. 7	535	282	4. 9	0. 09	
Id. . .	121	1. 31	4. 3	8. 7	507	335	"	0. 09	
Id. . .	119. 5	1. 41	3. 7	7. 8	515	306	"	0. 09	
Id. . .	116	1. 50	3. 7	7. 2	501	276	"	0. 09	
Id. . .	96	1. 25	3. 8	9. 3	490	335	"	0. 11	
Id. . .	66	1. 27	3. 8	9. 1	439	317	"	0. 15	
Id. . .	36	1. 34	2. 1	6. 9	400	211	6. 2	0. 20	
Id. . .	26	1. 26	3. 8	9. 2	327	228	"	0. 23	
Vesta. .	94	1. 42	3. 7	7. 7	415	244	"	0. 09	
Id. . .	29	1. 5 $\frac{1}{2}$	3. 6	12. 0	331	321	5. 4	0. 22	
Vulcan. .	39	1. 37	3. 8	8. 1	486	301	"	0. 10	
Id. . .	35	1. 17	3. 8	10. 2	501	235	"	0. 16	
Leeds. .	85	1. 35	3. 8	8. 3	407	267	6. 5	0. 10	
Id. . .	32. 5	1. 17 $\frac{1}{2}$	3. 1	10. 2	313	232	7. 2	0. 17	
Fury. .	52	1. 30	3. 2	8. 8	266	244	6	0. 13	
Id. . .	44. 5	1. 35	4. 1	8. 2	338	214	7. 3	0. 14	
Jupiter. .	34	1. 12	3. 7	11. 0	336	280	"	0. 21	
Id. . .	31	1. 12	3. 7	11. 0	380	316	"	0. 26	
Firefly. .	37	1. 35	3. 1	8. 3	400	253	7	0. 23	
Id. . .	37	1. 18	3. 4	10. 2	395	304	6. 8	0. 22	

706. *Des moyens de surmonter les rampes des chemins de fer.* On a vu par le tableau (art. 701) quelle influence fâcheuse exercent les plus légères rampes d'un chemin, et comment on est obligé de réduire la charge des convois. Cet inconvénient est surtout grave pour les chemins de fer qui ont à transporter des masses de marchandises, tandis que la disposition contraire, c'est-à-dire celle des pentes descendantes, leur est infiniment favorable.

Lorsque les rampes sont douces et d'une faible longueur, la vitesse acquise du convoi permet de les franchir, sans qu'on soit obligé d'exagérer la pression de la vapeur, ni de ralentir sensiblement la vitesse.

707. Lorsque au contraire ces rampes sont prononcées, ou qu'elles règnent sur une grande étendue, la machine ne peut plus remonter la charge qu'elle menait sur le niveau, et l'on est obligé de recourir à des moyens spéciaux.

1° On dédouble le convoi ; la machine remonte d'abord une moitié, et puis revient sur ses pas pour prendre l'autre moitié.

Il en résulte une perte de temps préjudiciable à la célérité.

2° On dispose au bas du plan incliné une machine auxiliaire destinée à servir de renfort ; à cet effet celle-ci est tenue constamment allumée et en train d'agir, de sorte qu'on peut la placer à l'arrière de tout convoi qui arrive, et qui a besoin d'un accroissement d'impulsion pour remonter le plan incliné.

Cette machine de renfort donne lieu nécessairement à un excédant de dépense assez notable.

3° On place au sommet du plan incliné une machine à vapeur stationnaire destinée à remonter, au moyen d'un treuil et d'un câble, le convoi qui arrive au pied, et qui peut encore être aidé dans son ascension par la machine locomotive.

Ce moyen est encore assez dispendieux et occasionne une perte de temps pour la manœuvre des convois au pied et au sommet du plan incliné.

4° M. Blenkinsop a essayé, sur le chemin de Middleton, et, depuis, bien des personnes ont proposé de garnir les rails de cré-

maillères, ou de les former de matières raboteuses pour augmenter l'adhérence des roues dans les rampes.

Mais ce moyen est illusoire, en ce que, s'il prévient le glissement, il ne procure pas à la machine l'accroissement de force qui devient nécessaire dans ce cas pour surmonter une résistance croissante.

5° Pour produire ce dernier effet, il faudrait pouvoir diminuer le diamètre des roues motrices, lorsqu'on arrive à une rampe, et par là on se procurerait un excédant de force aux dépens de la vitesse du convoi. Or, comme on ne peut changer les roues des machines, on est conduit à avoir sur le même train des roues doubles à demeure sur le même essieu, et une seconde ligne de rails dentés et assez élevés au-dessus du sol pour porter les petites roues.

On peut aussi donner une forme dentelée aux moyeux des roues ordinaires, et faire agir alors ces moyeux comme pignons sur des rails-crémaillères placés à une hauteur suffisante.

6° Ce système d'engrenage, quoique assez simple, peut donner lieu cependant à des ruptures de dents et à des réparations fréquentes. On pourrait le remplacer par l'usage d'un câble de remorque à point fixe, sur lequel le convoi se halerait au moyen d'une poulie à gorge placée sur le moyeu des roues motrices et d'un plus petit diamètre, afin de diminuer la vitesse, comme ci-dessus.

Dans ces deux derniers cas (5° et 6°), les roues motrices doivent cesser de porter sur les rails ordinaires, et le poids de la machine doit être soutenu, pour le premier cas, sur les rails-crémaillères, et pour le second sur des rails unis établis à la hauteur convenable.

708. Quoiqu'il en soit du mérite de ces divers procédés, toujours est-il certain qu'il y aura avantage de s'en dispenser, lorsqu'on pourra tracer les chemins de fer de manière à éviter les rampes prononcées, lesquelles, quoi qu'on fasse, occasionneront nécessairement des excédants de dépense et des retards dans le service. Lorsqu'elles seront inévitables, on pourra encore en atténuer les inconvénients en divisant, s'il est possible, la ligne de

parcours en longues parties horizontales d'un service facile, et en quelques parties ascendantes d'une longueur bornée, pour lesquelles on aura recours, ou à des machines locomotives d'une plus grande puissance, ou à l'un des moyens ci-dessus; c'est le parti qu'a adopté M. Brunel fils pour le chemin de fer de Londres à Bristol.

709. Les inconvénients des rampes sont moins graves pour la conduite des convois de voyageurs, parce que ces convois sont toujours moins chargés que les trains de marchandises. En effet, des convois de 500 voyageurs, tels qu'on en voit habituellement sur les chemins de fer fréquentés, ne représentent, à raison de 80 kil. par individu, que 24 tonnes qui, ajoutées au poids des voitures, donnent en tout une charge de 54 tonnes; ce qui permet encore de remonter des rampes de 5 à 6 millièmes avec la vitesse de 5 mètres par seconde.

710. La quantité d'ouvrage obtenu des machines locomotives dans un temps donné, s'est augmentée progressivement par suite d'améliorations introduites dans la construction et le service de ces machines. On aura une idée de leurs effets par le tableau suivant, qui se rapporte aux machines du chemin de Liverpool.

ANNÉES.	Distance totale parcourue par dix machines.	DISTANCE MOYENNE parcourue par chaque machine,	
		par année.	par semaine.
	kilom.	kilom.	kilom.
1831	295982	29598	611
1832	311761	31176	610
1855	354258	35424	704
1854	450190	45019	865

Le même progrès s'est réalisé pour les vitesses des convois de

voyageurs. Dans les premières années, le chemin n'était parcouru d'une extrémité à l'autre qu'en une heure et demie, c'est-à-dire à la vitesse de 32 kilomètres par heure ; maintenant ce trajet se fait habituellement en une heure, ou à la vitesse moyenne de 48 kilomètres ; et l'on cite même quelques cas extraordinaires où il aurait été effectué en moitié moins de temps, c'est-à-dire avec la rapidité de près de 100 kilomètres par heure.

TABLES

RELATIVES

AUX PROPRIÉTÉS DE LA VAPEUR,

AINSI QU'AUX PROPORTIONS

ET AUX EFFETS DYNAMIQUES

DE DIVERS SYSTÈMES DE MACHINES A VAPEUR.

711. TABLE I. Des propriétés de la vapeur

1.	2.	3.	4.	5.	6.
FORCE TOTALE DE LA VAPEUR.			EXCÈS DE CETTE FORCE sur la pression atmosphérique		TEMPÉRATURE du thermomètre centigrade.
En atmosphères.	En centimètres de mercure.	En kilogrammes par centimètre circulaire.	en kilogr. par centimètre circulaire.	en kilogr. par centimètre carré.	
$\frac{1}{100}$	0,47	0,005	— 0,806	— 1,027	0°
$\frac{1}{50}$	1,41	0,015	— 0,797	— 1,014	15
$\frac{1}{25}$	2,55	0,027	— 0,785	— 0,999	24,2
$\frac{1}{10}$	3,17	0,054	— 0,758	— 0,964	36,5
$\frac{1}{5}$	7,60	0,081	— 0,751	— 0,950	44,2
$\frac{1}{2}$	10,13	0,108	— 0,704	— 0,896	50
$\frac{1}{1}$	19	0,203	— 0,609	— 0,775	63,8
	58	0,406	— 0,406	— 0,517	80,9
	57	0,609	— 0,205	— 0,258	91,7
1,00	76	0,812	0,000	0,000	100
1,18	90 (*)	0,961	0,205	0,258	105
1,5	114	1,218	0,406	0,517	112
1,75	133	1,420	0,609	0,775	117
2	152	1,623	0,811	1,033	121,4
2,5	190	2,029	1,218	1,550	128,8
3	228	2,435	1,623	2,067	135,1
3,5	266	2,841	2,029	2,583	140,6
4	304	3,246	2,435	3,100	145,4
5	380	4,058	3,246	4,153	153,8
6	456	4,870	4,058	5,167	160,8
7	532	5,681	4,870	6,200	167
8	608	6,493	5,681	7,253	172,4
9	684	7,304	6,493	8,267	177,5
10	760	8,116	7,304	9,500	181,8
20	1520	16,252	15,420	19,635	215,2
30	2280	24,547	23,535	31,000	255,4
40	3040	32,863	31,651	41,500	248,5
50	3800	40,579	39,767	51,667	260,3

(*) C'est la force élastique ordinaire

La manière d'obtenir les cinq premières colonnes est évidente : dans la quatrième et la cinquième, sixième colonne est calculée d'après l'article 89 (note); la septième, et par suite la huitième et l'article 156, en tenant compte de la contraction de l'orifice, et la onzième colonne se calcule

¹ Voyez, dans la note de l'article 78, les motifs qui doivent faire regarder les nombres de cette

l'eau à différents degrés de force élastique.

7.	8.	9.	10.	11.
VOLUME en mètres cubes, celui de l'eau étant 1.	POIDS d'un mètre cube en grammes.	PESANTEUR spécifique, celle de l'air étant 1.	VITESSE dans le vide en mètres par seconde.	CALORIQUE nécessaire pour la formation de la vapeur, l'eau étant prise à 15 degrés.
198720	5,00	0,0041	410	545
71639	13,96	0,0115	420	560
40840	24,58	0,0203	427	570
21138	47,51	0,0391	435	582
14454	60,19	0,0572	441	590
11068	90,56	0,0747	445	595
6142	162,81	0,1347	457	609
5229	309,69	0,2564	465	626
2218	450,85	0,3733	472	637
1702	584,49	0,4849	478	645
1452	684,07	0,5617	480	650
1172	853,25	0,7064	485	657
1017	995,02	0,8222	488	662
900	1111,11	1,0108	491	667
756	1358,69	1,1249	496	674
621	1610,50	1,3355	500	680
540	1851,85	1,5333	503	686
478	2092,05	1,7322	506	690
390	2564,10	2,1270	511	699
331	3021,11	2,5014	515	706
288	3472,22	2,8749	518	712
255	3921,56	3,2469	522	718
229	4366,82	3,6157	525	723
209	4784,75	3,9617	527	727
211	9009,00	7,4592	545	759
78	12820,51	10,6153	556	779
60	16666,67	13,8000	564	794
49	20408,16	16,8980	570	806

pour la vapeur à basse pression.

ce signe — indique que la force de la vapeur est moindre que la pression de l'atmosphère; la dixième, d'après l'article 121 (note); la dixième, d'après la formule donnée dans la note de l'article 190.

bonne comme erronés.

M.

712. TABLE II.

Des proportions des machines à vapeur à simple effet, équivalentes à différents nombres de chevaux, la force d'un cheval étant de 4500 kilogrammes élevés à 1 mètre par minute, et la force élastique de la vapeur dans la chaudière étant de 90 centimètres de mercure.

MACHINES				
OU LA VAPEUR AGIT PAR EXPANSION.				
Nombre de chevaux.	Diamètre du piston en centimètres.	Pression moyenne sur le piston en kilogrammes, au taux de 0 kil.,39 par centimètre circulaire.	Vitesse du piston en mètres par minute.	Longueur de la course en mètres.
10	67	1750	53	1,54
15	78,5	2700	56	1,57
20	88,5	3050	59	1,77
25	97	3660	61,5	1,94
30	104,5	4250	63,5	2,09
35	111	4800	65,5	2,22
40	117	5520	67,5	2,34
45	122,5	5860	69	2,45
50	127	6500	71	2,54
55	132	6800	73	2,64
60	137	7511	74	2,74
65	141,5	7800	75	2,83
70	146	8300	76	2,92
75	150	8800	77	2,95
80	154	9280	78	3,08
85	158	9720	78,5	3,16
90	161	10111	80	3,22
100	168	11003	82	3,56
120	181	12800	84,5	5,62
140	192	14401	87,5	3,84
160	203	16100	89	4,06
180	213	17700	91,5	4,26
200	222	19200	94	4,44
210	225	19800	95	4,50

Suite de la Table II.

MACHINES OU LA VAPEUR AGIT PAR EXPANSION.				QUAND LA VAPEUR agit à pleine pression pen- dant toute la course du piston.	
Nombre de chevaux.	Nombre de coups par minute.	Quantité d'eau fournie par heure à la chaudière en hectolitres.	Nombre de kilogram- mes de charbon con- sommé par heure.	Nombre de chevaux.	Nombre de kilogram- mes de charbon con- sommé par heure.
10	19	5,13	52	11,2	69
15	18	4,38	74,5	16,8	100
20	16	6,50	96,5	22,5	129
25	16	7,54	116	28	155
30	15	9,42	139	33,5	186
35	14	11,04	161	39,2	215
40	14	12,59	182	45	243
45	14	14,15	204	50,5	272
50	14	15,70	226	56	303
55	14	17,52	250	62	333
60	13	18,90	272	67	362
65	13	20,40	294	73	392
70	13	22,07	318	78	426
75	12	23,57	340	84	455
80	12	25,09	363	89	486
85	12	26,74	385	95	516
90	12	28,50	408	101	544
100	12	31,41	453	112	602
120	11	37,64	540	134	725
140	11	44,00	656	157	843
160	11	50,57	726	179	969
180	10	56,60	815	201	1087
200	10	62,82	905	224	1200
210	10	65,96	950	235	1260

713. TABLE III.

Des proportions des machines à vapeur à double effet, équivalentes à différents nombres de chevaux, la force d'un cheval étant de 4500 kilog., élevés à 1 mètre par minute, et la force élastique de la vapeur étant de 90 centimètres de mercure.

MACHINES				
OU LA VAPEUR AGIT PAR EXPANSION.				
NOMBRE de chevaux.	Diamètre du piston en centi- mètres.	Pression moyenne sur le piston en kilo- grammes, au taux de $\frac{1}{3}$ kilog. par centimètre circulaire.	Vitesse du pis- ton en mètres par minute.	Longueur de la course en mètres.
1	20	133	34	0,40
2	26,0	225	40	0,52
3	30,5	310	43,5	0,61
4	34,0	400	45	0,69
5	38,0	480	47	0,76
6	40,5	537	50	0,81
7	43,0	615	51	0,86
8	45,5	688	52	0,91
9	47,5	750	54	0,95
10	49,5	815	55	0,99
12	53,5	950	57	1,07
14	56,5	1060	58	1,13
16	60,0	1200	60	1,20
18	63,0	1320	61	1,26
20	65,5	1450	63	1,31
22	68,0	1510	64	1,36
24	70,5	1640	66	1,41
26	72,5	1750	67	1,45
28	75,0	1875	67	1,50
30	77,0	1980	68	1,54
32	79,0	2080	69	1,58
34	81,0	2187	70	1,62
36	82,5	2260	71	1,65
38	84,5	2380	72	1,69
40	86,5	2500	72	1,73
42	88,0	2580	73	1,76
44	89,5	2670	74	1,79
46	91,5	2790	74	1,83
48	93,0	2880	75	1,86
50	95,6	2970	76	1,89
52	96,0	3072	76	1,92
54	97,5	3160	77	1,95
56	98,5	3254	78	1,97

Suite de la Table III.

MACHINES OU LA VAPEUR AGIT PAR EXPANSION.				QUAND LA VAPEUR agit à pleine pression pendant toute la course du piston.	
Nombre de chevaux.	Nombre de coups par minute.	Quantité d'eau fournie par heure à la chaudière en hectolitres.	Nombre de kilogrammes de charbon consommé par heure.	Nombre de chevaux.	Nombre de kilogrammes de charbon consommé par heure.
1	44	0,226	6,8	1,46	14,2
2	58,5	0,445	10,4	2,95	20,7
3	35	0,67	15,8	4,4	29
4	33	0,88	17,2	5,9	36
5	31	1,11	20,4	7,4	43
6	51	1,33	24	8,85	50
7	29,5	1,56	27	10,3	57
8	28,5	1,79	50	11,8	63
9	28,5	2,00	33	13,3	69
10	27,75	2,21	36	14,6	74
12	26,5	2,66	43	17,7	88
14	25,5	3,12	49	20,7	104
16	25	3,57	55	23,6	116
18	24,25	4,00	61	26,5	128
20	24	4,45	67	29,5	141
22	23,5	4,90	74	32,5	154
24	23,5	5,35	80	35,5	158
26	23	5,79	86	38,4	179
28	22,5	6,24	92	41,3	195
30	22	6,67	98	44,2	204
32	21,75	7,12	104	47,3	217
34	21,5	7,58	110	50	231
36	21,5	8,03	116	55	242
38	21,25	8,43	122	56	254
40	20,75	8,91	128	59	269
42	20,75	9,36	135	62	282
44	20,5	9,79	141	65	295
46	20,25	10,27	147	67,5	308
48	20	10,70	153	70,5	321
50	19,75	11,15	160	73,5	335
52	19,75	11,55	166	76,4	348
54	19,75	12,03	173	79,3	361
56	19,75	12,49	179	82,2	375

Suite de la Table III.

MACHINES				
OU LA VAPEUR AGIT PAR EXPANSION.				
Nombre de chevaux.	Diamètre du piston en centimètres.	Pression moyenne sur le piston en kilogrammes au taux de $\frac{1}{5}$ kil. par centimètre circulaire.	Vitesse du piston en mètres par minute.	Longueur de la course en mètres.
58	100	3333	78	2,00
60	101,5	3434	79	2,05
62	103	3536	79	2,06
64	104	3605	80	2,08
66	105,5	3710	80	2,11
68	107	3816	80	2,14
70	108	3887	81	2,16
72	109	3960	81,5	2,18
74	110,5	4070	82	2,21
76	111,5	4144	82,5	2,24
78	113	4256	82,5	2,26
80	114	4332	83	2,28
85	116,5	4524	84,5	2,33
90	119,5	4771	86	2,59
95	122	4961	86	2,44
100	124,5	5167	87	2,49
105	127	5366	88	2,54
110	129,5	5590	89	2,59
115	131	5720	90	2,62
120	134	5985	90,5	2,68
125	136	6165	91	2,72
130	138	6348	91	2,76
135	140,5	6580	92,5	2,81
140	142,5	6768	93	2,85
145	144,5	6960	93,5	2,89
150	146,5	7160	94	2,93
155	148,5	7350	95	2,97
160	150	7500	96	3,00
175	156	8112	97	3,12
180	157,5	8269	98	3,15
200	165	9074	99	3,30

Suite de la Table III.

MACHINES OU LA VAPEUR AGIT PAR EXPANSION.				QUAND LA VAPEUR agit à pression totale pendant la course en- tière du piston.	
Nombre de chevaux.	Nombre de coups par minute.	Quantité d'eau fournie par heure à la chaudière en hectolitres.	Nombre de kilogrammes de charbon consommé par heure.	Nombre de chevaux.	Nombre de kilogrammes de charbon consommé par heure.
58	19,5	12,88	185	85,1	585
60	19,5	15,54	192	88,1	402
62	19	13,79	198	91	415
64	19	14,25	205	95,9	429
66	19	14,70	211	96,8	442
68	18,75	15,15	218	99,7	455
70	18,75	15,61	224	102,7	469
72	18,75	16,06	231	105,6	482
74	18,5	16,49	235	108,5	496
76	18,5	16,25	244	111,4	509
78	18,25	17,45	251	114,3	522
80	18,25	17,74	255	117,5	535
85	18	18,87	271	124,6	569
90	18	20,01	288	131,9	602
95	17,5	20,12	503	159,2	656
100	17,5	22,26	319	146	670
105	17,25	23,90	355	155,3	703
110	17,25	24,41	351	161,6	757
115	17	25,52	366	167,9	770
120	17	26,62	382	173,2	804
125	16,75	27,73	398	182,5	857
130	16,5	28,77	414	189,8	870
135	16,5	29,89	442	197,1	904
140	16,25	31,08	447	204,4	957
145	16,25	32,19	465	211,7	971
150	16	35,20	478	219	1004
155	16	34,40	494	226,3	1058
160	16	35,54	511	233,6	1071
175	15,5	36,57	526	240,9	1104
180	15,5	37,78	542	248,4	1158
200	15	42,40	658	292	1539

TABLES ADDITIONNELLES.

De la force élastique de la vapeur et de la pression correspondante sur l'unité de surface.

714. L'auteur n'ayant pas donné de tables générales de la force de la vapeur, il a paru utile d'y suppléer par les deux tables suivantes, qui ont été calculées au moyen de la formule corrigée (art. 86, note), et qui représentent assez fidèlement les données de l'expérience.

La première s'étend de 0° à 650°, point où la vapeur aurait au moins la même densité que l'eau, et où, par conséquent, celle-ci pourrait se vaporiser sans augmenter de volume, si d'ailleurs on pouvait la contenir à des pressions si élevées.

La seconde table donne la force élastique de degré en degré et pour les températures les plus habituelles, c'est-à-dire de 100 à 125°.

Les trois dernières colonnes ont été déduites de la seconde, en supposant la pression moyenne d'une atmosphère équivalente à 76 cent. de mercure, ou $10 \frac{2}{3}$ mèl. d'eau.

Ces deux tables sont suivies de celle dressée par l'Académie des Sciences, et qui devait trouver place ici à la fois comme terme de comparaison et comme mesure officielle adoptée par le gouvernement.

M.

715. A. Table de la force élastique de la vapeur, calculée de 5 en 5°, depuis 0° jusqu'à 130°, et continuée jusqu'à 650°.

TEMPÉRATURE.	FORCE ÉLASTIQUE en centimètres de mercure.	PRESSION en atmosphères.	PRESSION par centimètre carré.	PRESSION par centimètre circulaire.
0°	0,47	0,006	0,006	0,004
5	0,69	0,009	0,009	0,007
10	1,00	0,013	0,013	0,010
12	1,15	0,015	0,015	0,012
15	1,41	0,018	0,019	0,015
20	1,94	0,025	0,026	0,020
25	2,65	0,035	0,036	0,028
30	3,55	0,046	0,048	0,038
35	4,69	0,062	0,064	0,049
40	6,15	0,080	0,083	0,065
45	7,91	0,104	0,107	0,084
50	10,11	0,132	0,137	0,108
55	12,74	0,167	0,173	0,136
60	16,05	0,21	0,22	0,17
65	19,96	0,26	0,27	0,21
70	24,63	0,35	0,34	0,26
75	30,20	0,40	0,41	0,32
80	36,77	0,48	0,50	0,39
85	44,67	0,59	0,60	0,47
90	53,50	0,70	0,72	0,57
95	64,00	0,84	0,87	0,68
100	76,16	1	1,03	0,81
	En mètres.			
100	0,76	1	1,03	0,81
105	0,90	1,19	1,20	0,95
110	1,06	1,40	1,44	1,15
115	1,25	1,65	1,70	1,34
120	1,46	1,92	1,98	1,56
125	1,70	2,24	2,51	1,82
130	1,97	2,60	2,67	2,10
140	2,62	3,45	3,56	2,78
150	3,43	4,52	4,66	3,66
160	4,46	5,86	6,06	4,76
175	6,47	8,5	8,7	6,8
200	11,47	15,2	15,5	12,2
225	19,35	25,4	26,2	20,6
250	31,24	41,1	42,4	35,3
275	48,71	64,1	66,2	52,0
500	72,26	102	98,2	77,2
350	156,5	205	212	167
400	304,5	400	414	325
450	555,2	730	755	595
500	958,5	1260	1505	1024
550	1580	2079	2148	1688
600	2508	3500	3410	2679
650	3850	5065	5256	4114

716. B. *Table de la force de la vapeur, calculée de degré en degré, entre les températures 100° et 125°.*

TEMPÉRATURE.	FORCE ÉLASTIQUE	PRESSION	PRESSION	PRESSION
	en centimètres de mercure.	en atmosphères.	par centim. carré.	par centim. circul.
100°	76,16	1,00	1,05	0,81
101	78,80	1,05	1,07	0,84
102	81,55	1,07	1,11	0,87
103	84,54	1,11	1,14	0,90
104	87,21	1,15	1,18	0,95
105	90,18	1,19	1,22	0,96
106	95,25	1,25	1,27	0,99
107	96,56	1,27	1,31	1,03
108	99,58	1,51	1,55	1,06
109	102,9	1,55	1,40	1,10
110	106,5	1,40	1,44	1,14
111	109,8	1,44	1,49	1,18
112	115,4	1,49	1,54	1,21
115	117,1	1,54	1,59	1,25
114	120,8	1,59	1,64	1,29
115	124,4	1,64	1,70	1,55
116	128,7	1,69	1,75	1,57
117	132,8	1,75	1,81	1,42
118	137,0	1,81	1,86	1,46
119	141,5	1,86	1,92	1,51
120	145,8	1,92	1,98	1,56
121	150,5	1,98	2,05	1,61
122	155,0	2,04	2,11	1,66
123	159,8	2,10	2,17	1,71
124	164,7	2,16	2,24	1,76
125	169,7	2,24	2,51	1,82

M.

C. Table de la force élastique de la vapeur, dressée par l'Académie des Sciences.

717. J'ai ajouté à cette table la cinquième colonne, afin qu'on soit à même de comparer les résultats trouvés par l'Académie avec ceux qu'on déduit de la formule corrigée de l'art. 86 (note). Cette formule donne pour la valeur de la température en fonction de la force élastique,

$$t = 85f^{\frac{1}{6}} - 75 ;$$

et c'est d'après celle-ci que la cinquième colonne a été calculée.

FORCE ÉLASTIQUE en atmosphères.	PRESSION en centimètres de mercure.	PRESSION par centim. carré. Kilogrammes.	TEMPÉRATURE déterminée par l'Académie.	TEMPÉRATURE calculée au moyen de la formule.
1	76	1,033	100 ^o	100 ^o
1 $\frac{1}{2}$	114	1,549	112,2	112,2
2	152	2,066	122	121,4
2 $\frac{1}{2}$	190	2,582	129	128,8
3	228	3,099	135	135,1
3 $\frac{1}{2}$	266	3,615	140,7	140,6
4	304	4,132	145,2	145,4
4 $\frac{1}{2}$	342	4,648	150	149,8
5	380	5,165	154	153,8
5 $\frac{1}{2}$	418	5,681	158	157,4
6	456	6,198	161,5	160,8
6 $\frac{1}{2}$	494	6,714	164,7	164
7	532	7,231	168	167
7 $\frac{1}{2}$	570	7,747	170,7	169,8
8	608	8,264	175	172,4

Les deux séries de températures s'accordent à un degré près ; mais la seconde est plus régulière, comme cela doit être, et comme on peut en juger en prenant les secondes différences qui sont

3, 1,8, 1,1, 0,8, 0,7, 0,4, 0,4, 0,4, 0,2, 0,2, 0,2, 0,2, 0,2;

tandis que ces différences sont irrégulières pour l'autre série, étant tantôt croissantes ou décroissantes, ou même négatives,

2,4, 2,8, 1, 0,5, 1,2, -0,5, 0,8, 0, 0,5, 0,5, -0,1, 0,6, 0,4.

Cette irrégularité provient sans doute de légères inexactitudes inévitables dans des expériences aussi délicates, et peut-être aussi de ce qu'on aura tenu à avoir des nombres ronds, pour la facilité des applications. M.

N. B. M. A. Comte, ancien élève de l'École Polytechnique, a bien voulu coopérer à la traduction de plusieurs sections de cet ouvrage.

Note pour la page 480.

Une ordonnance royale du 2 septembre 1838 vient de modifier le système de jaugeage des bateaux à vapeur, ainsi qu'il suit :

« Les bateaux à vapeur seront jaugés d'après le mode déterminé par l'ordonnance du 18 novembre 1837, pour les navires à voiles; mais sur le nombre de tonneaux résultant de ce mode, il sera fait déduction de 15 pour cent, qui représente l'espace occupé par les machines et leurs accessoires. »

Par suite de cette nouvelle disposition, la formule du tonnage des bateaux à vapeur (p. 480) doit être transformée en celle-ci :

$$T = \frac{Lcl}{3,8} \left(1 - \frac{15}{100} \right),$$

ou plus simplement,

$$T = \frac{Lcl}{4,47}.$$

FIN.

TABLE ALPHABÉTIQUE

DES MATIÈRES.

A.

	Pages
ACHARD. Ses expériences sur la vapeur	47
ACIDE nitrique (vapeur d')	88
— carbonique (vapeur d')	120, 151
AGRICULTURE (machines pour l')	424
AIR. Sa pesanteur spécifique	129
— mêlé avec la vapeur	154
— (machines à)	15
— (mouvement de l')	140
— (pompes à)	57, 140, 264, 290
— — (tiges des)	561
— pour les foyers	185
— (conduits ou carneaux à)	209
— (régulateur à)	215
ALCOOL (force de la vapeur d')	47, 50, 52, 117
— (machine à)	52
— (chaleur latente de l')	85, 86
— son effet comme combustible	89
AMMONIAQUE	88, 126, 151
AMONTONS (machines d')	15, 23, 74
APPAREILS pour chaudières	215
ARBRES (force des)	568
ARMES à vapeur	11
ARSBERGER, professeur. Ses expériences sur la vapeur	115
ASSEMBLAGE des tiges	385
ATMOSPHÈRE (pression de l')	142
ATMOSPHÉRIQUE (machine)	11, 15, 18, 53, 54, 154, 155, 256, 290
— (effet de la machine)	55, 55
— (piston de la machine)	550
— (perfectionnement de la machine)	65, 297

	Pages.
AUBES	458, 461, 472, 478
— (nombre des).	458, 459
— (force des).	458, 460
— (modification des).	460
— paraboliques.	456
B.	
BACHE d'eau chaude.	17
BALANCIER.	16, 30
— Son mouvement angulaire limité	356
— (force du).	363
— à ressort.	394
BANKS (John).	51
BATEAUX A VAPEUR.	11, 22, 47, 431, 471, 477, 479
— (machines pour).	472
— (jaugeage des).	480, 526
BATEAUX de canal	441
BATTAGE.	425
BEAUTÉ, qualité essentielle à la perfection des machines.	315
BEIGHTON (Henri)	19
BÉLIDOR (Bernard)	23
BELL (Henri)	67
BÉTANCOURT	50, 119, 120, 326
BEVAN (B.). Ses expériences	441
BIELLES	350, 362
— latérales (force des)	363
BLACK (Joseph, le docteur).	51, 78
BLAKE (Francis).	27
BLAKEY (John).	37, 204
BLÉ (moulins à).	426
BLENKINSOP	485, 508
BOCARDS, ou machines à pilons.	419, 420
BOÎTES à étoupes	341
BOULTON.	44, 46
— et Watt.	69, 257, 268, 300, 305, 325
BOSSUT.	49, 456, 458
BRAMAH (Joseph).	40, 60, 352, 341
— (soupapes à coulisse de)	322
— (robinet à quatre ouvertures de)	327
BRANCA.	2
BRIDES du parallélogramme	351
BRINDLEY.	31
BRUNEL fils	510
BRUNTON (foyer de).	214

C.

	Page.
CAGNIARD DE LA TOUR. Ses expériences	114, 120, 121, 125
CARBURE de soufre	123
CANAL (bateaux de).	441
CARBONE. Ses effets comme combustible	170
CARNEAUX, ou conduits intérieurs	199, 377
CARTWRIGHT	52, 54, 555
— (machines de).	152
— (piston de)	53, 54, 535
CAUS (Salomon de).	2, 3, 75
CATARACTE, ou pendule hydraulique.	53, 598
CENDRIER.	182, 184
CHALEUR spécifique.	31, 77
— latente.	78
— (capacité pour la).	77
— (expansion par la)	77, 78
CHANVRE (frottement du).	531
— (garniture de)	552
CHAPMAN.	484
CHAREON de bois. Son effet	170
— de terre	175
— — (effet du)	178
— — (machines pour tirer le).	419
CHARIOT A VAPEUR	10, 189, 206, 421, 481
CHARRUES A VAPEUR.	424
CHASE-WATER (machine de), construite par Smeaton.	54, 205, 532
CHAUDIÈRE avec des conduits intérieurs	33, 34
— à tube	38
CHAUDIÈRES en fonte.	581
— Surface de chauffe.	184
— Espace pour la vapeur et l'eau.	190, 194
— (puissance vaporisante pour la basse pression dans les)	197
— (nombre des).	198
— (forme des).	198
— de Watt.	199
— (force des)	573, 379, 581
— (grandeur des)	198
— cylindriques.	201
— — (règle pour les).	202
— sphériques	580
— à tubes.	206, 207
— — de Rumford	204
— — de Woolf.	206, 381

	Pages
CHAUDIÈRES à foyers intérieurs.	10, 11, 207
— de chariots à vapeur	207, 210
— alimentaires.	208, 216
— de bateaux à vapeur	208
— à haute pression.	210
— portatives	210
— (appareil pour)	215
— (alimentation des).	215
CHEMINS DE FER.	427, 483, 508
CHEMINÉES (ascension de la fumée dans les)	229
— (aire ou section des).	250
— (couronnements des).	252
CHEMISES, ou enveloppes des cylindres	148, 152
— imperméables à l'air.	149
CHOPINE de la pompe à air.	318
CHRISTIAN. Ses expériences.	116
CIMENT	385
— de fer.	383
CLAPET (soupape à).	318
CLÉMENT.	114
COKE.	175, 178
COMBUSTIBLES (effet des)	33, 296, 300, 307
— (nature des).	167, 178, 179
— (moyens de mesurer l'effet des)	176
— (table des effets des)	173
COMBUSTION	167, 171
— (procédé de la).	170
COMPTEUR.	405, 418
CONDENSATION.	12, 39, 52, 233
— (pompes pour la).	255, 258
CONDENSEUR	39, 52, 159, 267
— (machines à).	289
— — (puissance des).	295, 301, 302, 307, 311
— — (application des).	297, 303, 309
CONIQUE (soupape)	319, 320
— (pendule).	394, 397
CONSTRUCTION et proportions des parties des machines	292, 297, 301, 306
CONTRACTION dans les tuyaux	141
— (effets de la).	142
CONTRE-POIDS.	19, 305, 360, 391
CORNOUILLES (rapport sur les machines de)	416
COTON (filature de).	69, 416, 425
COURANTS (résistance des).	465
COURSE (longueur de).	254
— (introduction de la vapeur pendant une partie de la)	284, 303, 309

DES MATIÈRES.

351

	Pages.
CRAWFORD (D.).	32, 170, 171
CREIGHTON.	81, 111
— (expériences par)	111
CUGNOT. Voitures à vapeur.	482
CURR (John)	54
CYLINDRES (refroidissement dans les).	152
— (proportions des)	200
— Rapport des cylindres doubles.	285, 300
— à vapeur.	207

D.

DALTON (John).	62
— (expériences par).	104, 120, 122, 123, 126, 170, 171, 173
DAVY (Sir H.).	129, 178
DELORME.	74
DENTS DES ROUES.	367
DENSITÉ DE LA VAPEUR	24, 159
DÉSAGULIERS (J.-L.).	21
DICKINSON (machine de)	49

E.

EAU (élévation de l').	303, 411
— (air contenu dans l').	264
— (module de la pression de l')	93
— (dilatation de l').	91, 93
— (machines à élever l').	262, 411
— de mer (force élastique de l')	96
— — (analyse de l').	97, 407
— — (point d'ébullition de l').	96, 407, 408
ÉBULLITION (point d') des solutions salines.	96, 97
EDELCRANTZ	224, 325
EFFET UTILE (moyen de mesurer l').	514
EFFORT qu'éprouvent les parties des machines.	358, 359
ÉLECTRIQUE (fluide).	68, 69
EMERSON (William).	50, 346, 427
ENCLIQUETAGE.	347
ÉOLIPYLE.	1, 2
ÉQUILIBRE de la chaleur.	76
ÉTHÉR sulfurique	120
— (chaleur latente de l')	88, 89
— (force élastique de l')	120
EVANS (Olivier).	66, 208, 280, 329

F.

	Pages
FARADAY (Michel)	90, 96, 128, 131
FENWICK (Thomas)	61, 424
FEU (conduite du)	409
— (machine à)	58
FIELD (Joshua).	335, 405, 408
— (soupape de)	595
FILATURE de coton	69, 70, 425
FITZGERALD (Keane).	50
FLOTTEUR.	215
FLUIDES.	59, 175
— (résistance des).	505
FORCE des aubes	458, 460
— de cohésion (effet de la dilatation sur la).	570, 572
— des parties de machines.	558, 585
— des tiges.	560
— des balanciers.	565
— des manivelles	565
— des rayons des roues	565
— des dents des roues.	566, 567
— des arbres.	568
— des tuyaux et cylindres	569
— des plateaux.	575
— des chaudières	575
— des navires	462
— élastique de la vapeur	90, 152
— — (règles de la).	94, 96
— de cheval.	508
FOURNITURE d'eau des villes	420
FOYERS	211
— de Watt.	211
— de Robertson.	212
— de Brunton	214
— (moyen de régler les)	218
FREIN pour mesurer l'effet utile.	514
— des machines.	515
FROTTEMENT des machines.	61, 350
— des corps	168
— des fluides	458, 440
— des pistons	550, 559
— des tiroirs	525
FULTON (Robert).	67, 75, 481
FUMÉE (ascension de la)	159, 252
— (quantité de).	182

G.

	Page
GARNITURE.	341
— métallique	53, 340, 342
— de chanvre	341
— métallique pour les tiges.	350
GAUTIER. Vaisseau à vapeur	67
GAZ (propriétés des).	77, 134
— employés comme agents mécaniques.	129, 150
— d'huile (vapeur du).	129
GENSANNES.	26, 70, 75
GILBERT.	161
GRILLES (barreaux des)	185
— (aire des)	185, 215
GODET à huile.	328

H.

HASSENPRATZ	170
HAUTEFEUILLE.	66
HÉRON d'Alexandrie.	1
HORNBLLOWER (Jonathan).	45, 47, 241, 242, 291, 292, 311
— (soupape de).	320
HOUILLE. <i>Voyez</i> Charbon de terre.	
— menue. Son effet calorifique.	55, 178
HUILE.	410
HULLS (Jonathan)	21
HUMPHRY (Potter)	18
HYDROGÈNE. Son effet comme combustible.	171

I.

INDICATEUR.	44, 400
INJECTION.	16, 237, 295
— (régularisation par).	24, 297
— (température de l').	158
— dans les machines atmosphériques	297
— (quantité de l'eau d').	256
INSPECTION des machines.	418
IRRIGATION.	297, 426
IRVINE (D.).	32
IVORY (James).	115

J.

JACKSON (D.)	386, 388, 489
JESSOP (piston de)	359

	Pages
JET de condensation.	237
JOUFFROY (marquis de).	47, 67

K.

KIER (effet de la machine de).	55
--	----

L.

LATENTE (chaleur)	53, 78
— (mesure de la chaleur).	81
LAVOISIER. Ses expériences.	170, 171
LESLIE (professeur). Ses expériences.	64, 184, 385
LEUPOLD.	20, 326
LIMITE de la force de la vapeur.	247

M.

MACHINE hydraulique.	420
— à haute pression.	20, 39, 63, 242
— — (construction de la).	272
— à expansion.	40, 60, 263, 283, 304, 309
— à simple effet	303
— — à expansion.	304
— à double effet	38, 40, 291, 307
— — pour les mines.	414
— à deux cylindres.	46, 283, 311
— à mouvement alternatif	347
— sans condenseur.	272
— — (puissance de la).	273
— — (combustible et eau pour la)	277
— — à expansion.	278
— — (combustible pour la).	283
— — (pression la plus convenable pour la).	287
— portative	35, 43, 49
— à molette	419
— à vapeur pour les manufactures.	421
— pour les usines à fer.	421
— pour filature.	423
— pour papeterie.	424
— à battre le blé	425
— pour extraire le minerai	419, 420
— pour les mines.	297, 414
— (manœuvre et mise en train. de la)	406

DES MATIÈRES.

535

	Pages.
MACHINES soufflantes.	421
— LOCOMOTIVES.	481
— — Progrès.	481
— — Vitesse.	486, 494
— — Description.	486
— — Dimensions.	490
— — Force	494
— — Effets dynamiques.	505
— — Consommation.	507
— — Améliorations.	510
MACHEPER.	215
MANIVELLE.	548, 565
— (force de la)	563
MANOMÈTRE à mercure.	225, 399
— de sûreté.	225
MAUDSLAY.	50, 257, 527
— et compagnie.	594, 408, 472
MAXIMUM de l'effet utile	51, 257
— dans les machines réglées par un volant.	257, 260
MÉCANISMES pour faire marcher les navires.	446
MELLET et TOUSSAË. Essai sur les bateaux à vapeur.	453, 466, 471
MESURES et valeurs employées dans l'ouvrage	xxii
MÉTALLIQUE (piston).	52
— (garnitures pour les tiges)	341, 342
MILLER (Patrick).	48
MILLINGTON (John)	188, 191, 323
MINES (profondeur des)	414
— (épauement des)	413
MODÉRATEUR	592, 594
MONTGÉRY. Son <i>Traité des machines à vapeur</i>	2, 14
MORLAND (sir Samuel)	7
MOUCHE ou roue planétaire.	41
MOULINS à blé.	426
MOURA (de).	26
MOUTURE des grains.	424, 426
MOUVEMENT excentrique.	544, 546
— rotatif.	22
— — (méthode pour produire le).	22, 50, 59
— — (machines à).	39, 41, 45, 46, 49
— — — (puissance de la vapeur dans les)	238
— de rotation (soupapes à).	525
— rectiligne de la vapeur.	242
— de l'air et de la vapeur.	159
— des machines de bateaux à vapeur.	466
MURDOCH (William).	57
— (tiroir de).	525
MACHINES A VAPEUR.	36

	Pages.
MURRAY (Matthew).	56
— (tiroir de)	322

N.

NAVIGATION par la vapeur.	13, 22, 48, 67, 68, 431
NAVIRES (résistance des).	444, 445, 468
NEWCOMEN (Thomas).	15
— (machine de)	15, 35
NEMMO (Alexandre)	222

P.

PAPIN (machines de).	9
— Ses machines à poudre.	9
— Machine à vapeur appliquée au jet des bombes	10
— Bateaux à vapeur.	10
— Chaudières à foyers intérieurs.	10, 11
— Machine atmosphérique.	9, 11
— Soupapes de sûreté.	14
— Autre machine à vapeur.	14
— Lieu de sa naissance.	23
— Ses inventions citées.	20, 48, 73
PARABOLE.	346
PARALLÉLOGRAMME.	45, 59, 351
— (règles pour le).	354, 356, 357
PASSAGES de la vapeur (aire des)	149
PAYNE (John).	24
PENDULE.	594
— hydraulique.	35, 398
— conique.	392, 393
PERKINS (Jacob).	329
PÉRIER (Scipion).	67, 75
PERRONET.	48
PÉTROLE (huile de).	89, 126, 127
PHOSPHORE. Son effet comme combustible.	171
PISTONS.	16, 350
— métalliques.	52, 350, 352, 355
— — (principe de l'action des)	355
— (pression des).	28, 31
— à coulisse ou tiroir.	321
— (construction des).	550
— (disposition des)	330
— (épaisseur des).	330, 331
— en cuir.	331

	Pages.
PISTONS de machines atmosphériques.	552
— à garniture de chanvre.	553
— (frottement des).	530, 551
PLANS inclinés	419
PLATEAU du foyer	211
POISSON (M.).	158, 456
POMPES (élévation de l'eau au moyen de).	411
— (eau purgée d'air par les).	266
POUTRELLE.	544, 594
PRÉFACE du traducteur	v
— de l'auteur.	xv
PRIVILÈGE ou brevet d'invention.	61
PRODUCTION de la vapeur.	24, 167
— (puissance de la)	258
PRONY (R. de).	50, 191, 351
PUISSANCE dynamique de la vapeur.	242, 246, 247
— — par condensation.	258, 259
— — par production	242
— — Ses limites	247
— — dans les machines rotatives.	250, 251
— — (mode d'appliquer la).	252, 253
— — pour les bateaux à vapeur	471
— — expansive de la vapeur	245, 547
PURGER d'air les machines.	511

R.

RAMES.	461
REFROIDISSEMENT (perte de force par le)	147, 152
REGISTRE (régularisation du feu par le)	56, 220, 377
RÉGULARISATION du mouvement par la cataracte ou pendule hydrauliq.	55, 598
— — par l'injection.	51, 594
— — par l'expansion.	593
— — par la production de la vapeur.	56
— — du foyer.	214
— — de la puissance.	591
— — — par une pompe.	594
RÉGULATEUR	16, 397
— à air.	220
REMORQUEURS.	48, 65, 471
RÉSISTANCE des parties	359
— des fluides	457
— des navires	457, 468
ROBERTON (fourneau de).	60, 212

	Pages.
ROBINETS.	317, 326
— (construction des)	326
— à quatre ouvertures	20, 274, 326, 327
— doubles.	326
— d'épreuve.	13
— à vapeur	45, 398
— du condenseur	45, 52, 400
ROBISON (D. John)	58, 321, 322, 388
— Ses expériences	102, 105, 119, 120
RONDELLES fusibles	227, 228
ROUES.	365
— à aubes.	452, 458, 459
— hydrauliques.	59
— planétaires	41
ROY (le général).	158
RUMFORD (le comte de)	64, 169, 170, 204
— Ses expériences sur la chaleur latente.	79

S.

SADDLER.	49
SAVERY (Thomas)	10, 23
— (machine de).	11, 26, 37, 55, 56
SCHMIDT. Ses expériences sur la chaleur	81
SÉGUIN	484
SMEATON (John).	26, 32, 37, 188, 332
— (piston de).	332
SORTIE (tuyaux de).	18
SOUPAPES.	272, 316
— de sûreté	14, 163, 221, 319
— (dispositions des).	317
— (principe de construction des)	317
— (boîtes des).	317
— à soulèvement	318
— à clapet	318
— de fond	318
— plates.	319
— coniques	319
— de Hornblower	320
— à tiroir	321
— tournantes.	325
— à disques tournants	329
— (moyens d'ouvrir les).	345
— à gorge	42, 325, 592
— reniflante	17

	Pages
SOUTHERN (John).	68, 79, 82
— (expériences par)	81, 107
STABILITÉ des navires.	432
STEPHENSON.	484, 485, 489
SULFURE de carbone.	125
SYMINGTON (William).	65

T.

TABLE de la dilatation de l'eau.	94
— des nombres constants pour l'eau de mer.	98
— des expér. de Watt sur la vapeur d'eau pure et d'eau de mer.	99, 100
— — de Robison sur la vapeur d'eau	103
— — de Dalton <i>idem.</i>	103, 106, 107
— — de Ure <i>idem.</i>	110
— — de Southern <i>idem.</i>	112
— — de Taylor <i>idem.</i>	113
— — d'Arsberger <i>idem.</i>	114
— d'après la formule d'Ivory	116
— de la force de la vapeur d'alcool	119
— — de l'éther.	121, 122
— — de sulfure de carbone.	124, 125
— — de l'huile de pétrole.	127
— — de l'huile de térébenthine.	128
— de la puissance mécanique des gaz.	151
— des expériences de Roy sur l'air et la vapeur.	159
— des effets de contraction.	142
— — des corps simples comme combust.	175, 176, 178
— de la quantité de fumée de combustible.	181
— de l'étendue de surface de chauffe pour les chaudières	187
— des expériences sur les chaudières.	189, 190
— de la force vaporisante des chaudières.	198
— pour calculer les dimensions des soupapes de chaudières.	226
— de la force exercée par les manivelles	350
— des dents de roues.	367
— de l'effet des machines.	416
— des fournitures d'eau pour les villes.	421
— des expériences sur des bateaux de canal.	442
— pour calculer la résistance des navires.	444
— des navires à vapeur	472, 478
— des propriétés de la vapeur	514
— des proportions de machines à simple effet	516
— — à double effet	518
TABLEAU de Southern. Ses expér. sur le volume et la chaleur de la vap.	81
— de Rumford. <i>idem.</i>	84

	Page.
TABLEAU de Ure. Ses expér. sur le volume et la chaleur de la vapeur	88
— des points d'ébullition des solutions salines.	97
TAQUETS de l'encliquetage.	293, 344, 398
TAYLOR (Philippe)	112
— et Martineau.	280
TÉRÉBENTHINE (vapeur de l'huile de).	126, 128
THOMSON (D. F.).	174, 179
TIGES des pistons	350, 342
— (collets des).	341
— (guide des).	345
— (force des)	300
TIROIRS.	274, 275, 317, 321
— (constructions des).	321
— (perfectionnement des).	323
— cylindriques.	324
— (moyens d'ouvrir les)	343
— en forme de D.	306
TONNAGE.	480, 526
TOUAGE.	466
TRÉMIE.	212
TREVITHICK et Vivian.	63, 224, 482, 483
TRINGLES, ou chaînons du parallélogramme	331
TUYAUX.	215
— alimentaires.	215
— de sûreté	217, 229

U.

UNIFORMITÉ du mouvement des machines.	385
— — — obtenue par un volant.	385
— — — un contre-poids.	391
URE (le docteur). Ses expériences	60, 87, 88, 106, 122, 123, 127, 128, 264

V.

VAPEUR (volume de la)	19, 24, 134, 135, 140
— (densité de la)	24, 159
— (condensation de la)	232
— (force élastique de la).	90, 100, 103, 108
— — (règles pour la).	132, 134
— — restant dans le condenseur.	239
— Sa nature.	76
— (règles pour déterminer le volume de la)	134, 135
— (expansion de la).	134
— (température de la)	95

	Pages.
VAPEUR (chaleur pour produire la).	84, 88, 90, 178
— (puissance dynamique de la).	238, 247
— — dans les machines rotatives.	247
— (chaleur latente de la).	78
— (mouvement de la).	140
— (mélange d'air et de).	158, 159
— (fuite de la) par les soupapes.	165, 225
— (quantité de) pour les machines.	272, 276, 295, 301
— (force de la).	50, 62, 90, 152
— (bateaux à).	22, 67, 451
— — (navigation par).	22, 48, 67, 451
— — (machines de).	468
— — — (pressions des).	59, 275, 500
— (enveloppe des cylindres à).	58, 152, 153, 155
— (cylindre à).	255
— (machines à). Invention et perfectionnements.	1-75
— — atmosphériques.	154, 157, 290, 292
— — (effet maximum des).	159, 298
— — atmosphérique. Perfectionnements.	297
— — à simple effet.	289, 500, 425
— — à double effet.	505, 511
— — à deux cylindres.	285, 509
— — à haute pression.	240, 272, 505, 511
— — sans condensation.	272
— — Classification.	275, 292
— — à condensation.	289, 515
— — Perte d'effet par le refroidissement.	152, 156
— — Longueur de la course.	254
— — Vitesse pour l'effet maximum.	257
— — — par expansion.	260
— — (pompe à air de la).	264
— — (force de vapeur pour).	289, 505
— (perte de).	289
— (passages de la).	149
— — (règles pour les).	151
— (tuyaux à).	146
— — (refroidissement dans les).	147
VENT (force du).	465
VINAIGRE (vapeur du).	88, 89
VIS HYDRAULIQUE ou d'Archimède.	448
VITESSE des fluides élastiques.	141
— des machines.	485
— des navires.	464, 468, 470, 472
— des aubes.	452, 460
— — à vis d'Archimède.	448

	Pages.
VOILES (force des)	463
VOLANT.	30, 257, 385
— (vitesse du)	587
— (danger du)	588
— (règles pour le)	388, 390

W.

WATT (D. James).	58, 79, 199, 256, 241, 242, 500, 519, 551, 585
— (expériences de).	{79, 99, 100
<i>Voyez</i> Boulton.	
WILLIAMS (D. W.)	377
WOOD (Nicolas).	189
WOOLF (Arthur).	65, 213, 590
— (machine de)	149, 357
— (chaudière de).	206
— (piston de).	354
WORCESTER (marquis de).	4
— (machine de).	5, 6

Y.

YOUNG (D.). Ses expériences.	90, 191
--------------------------------------	---------

Z.

ZEIGLER (J.-T.). Ses expériences.	45
---	----

FIN DE LA TABLE ALPHABÉTIQUE DES MATIÈRES.

TABLE DES MATIÈRES.

	Articles.	Pages.
Préface du traducteur.		v
Préface de l'auteur.		xv
Mesures et valeurs employées dans la traduction.		xxii

PREMIÈRE SECTION.

Histoire de l'invention et des perfectionnements progressifs des machines à vapeur.

Dates.			
1615.	Salomon de Caus.	3	3
1663.	Marquis of Worcester.	4	4
1683.	Sir Samuel Morland .	5	7
1690.	Denis Papin.	6	9
1698.	Thomas Savery.	7	10
1698.	Denis Papin.	8	13
1705.	Thomas Newcomen .	10	15
1718.	Henri Beighton.	11	19
1720.	Leupold .	12	20
1736.	Jonathan Hulls .	14	21
1739.	Bernard Béliodor.	15	25
1741.	John Payne.	16	24
1751.	Francis Blake .	19	27
1757.	Keane Fitzgerald.	20	30
1758.	William Emerson.	21	30
1762.	Joseph Black .	25	31
1765.	John Smeaton .	24	32
1766.	John Blakey.	25	37

Dates.	Articles.	Pages
1769. James Watt.	26	38
1781. Jonathan Hornblower.	32	45
1782. Marquis de Jouffroy	34	47
1788. Patrick Miller	36	48
1790. Bétancourt.	40	50
1790. R. de Prony.	41	50
1795. John Banks.	42	51
1797. Edmond Cartwright	43	52
1797. John Curr.	44	54
1799. Matthew Murray.	46	56
1799. W. Murdock.	49	57
1801. John Robison	50	58
1801. Joseph Bramah.	52	60
1801. John Dalton.	54	62
1802. William Symington	55	63
1802. Trevithick and Vivian.	56	63
1804. Arthur Woolf	57	65
1806. Oliver Evans	58	66
1807. Robert Fulton	59	67
Progrès des machines à vapeur en Angleterre.	62	69
» » sur le continent.	63 bis	70
Résumé historique.	64 bis	72

DEUXIÈME SECTION.

De la nature et des propriétés de la vapeur, de sa force élastique et expansive, et de sa puissance mécanique.

De l'équilibre de la chaleur.	65	76
De la chaleur propre à la vaporisation de l'eau et des autres corps.	71-82	77
Expériences de M. Clément		82
De la force élastique de la vapeur d'eau et des autres vapeurs.	83	90
Règle pour la force de la vapeur d'eau.	88	94
Expériences de Watt sur la vapeur de l'eau salée.	94	99
» » d'eau pure	94	99
» de Robison.	95	101
» de Dalton.	96	103
» du docteur Ure.	98	107
» de Southern	99	111
» de M. Taylor	100	112
» de M. Arsberger.	102	113
De la force élastique de la vapeur d'alcool	104-105	117

TABLE DES MATIÈRES.

545

	Articles.	Pages.
Force élastique de la vapeur d'éther sulfurique	106-108	120
Expériences de Cagniard de la Tour.	107	121
» du docteur Ure et de Dalton sur l'éther.	108	122
Force élastique du sulfure de carbone	109	123
Expériences de M. Cagniard de la Tour.	111	125
Force élastique de la vapeur d'huile de pétrole, d'essence de térébenthine et du gaz de l'huile	113	126
Force élastique des gaz comprimés.	115-117	129
Expériences de Faraday.	117	130
Essais de M. Brunel.		131
Force élastique des vapeurs isolées des liquides qui les ont produites	118	132
Volume occupé par la vapeur d'une force élastique don- née	120	134
Mélange d'air et de vapeur	122-126	136
Expériences du général Roy	125	138
Du mouvement des fluides élastiques et des vapeurs.	127-134	140
Mouvement de la vapeur dans une machine	135	142
Perte de force par le refroidissement de la vapeur dans les tuyaux	145	147
Aire des passages de la vapeur.	150-154	149
Perte de force dans le cylindre.	155	152
Dans les machines à double effet	157	153
» à simple effet.	160	154
» atmosphériques.	161-164	155
Température de la condensation qui donne le maximum d'effet dans les machines atmosphériques	165	158
Ascension de la fumée dans les cheminées, ou <i>tirage</i>	168-172	159
Sortie de la vapeur par les soupapes de sûreté.	173-175	163

TROISIÈME SECTION.

*De la production et de la condensation de la vapeur, et des appareils
convenables pour ces effets.*

De la combustion et des combustibles	177-196	167
Tableau des effets calorifiques de différents corps.	187-191	171
Opération de la combustion	192-196	178
Fourniture d'air et surface de la grille pour le foyer.	197-199	180
De la surface de la chaudière propre à recevoir l'action du feu.	200-203	184
Espace pour la vapeur et l'eau dans les chaudières.	210-220	190
» l'eau.	217	194

	Articles.	Pages
De la force des chaudières à basse pression	221	197
Forme des chaudières relativement à leurs effets	222-224	198
Chaudières de Watt.	224	199
» cylindriques.	227	201
» du comte de Rumford	232	204
» de Woolf.	233	206
» des bateaux à vapeur.	239	208
» portatives à haute pression	244	210
Des foyers et des fourneaux.	245-250	211
Foyers fumivores de Watt	246	211
Fourneaux fumivores de Roberton.	247	212
Foyers mécaniques de Brunton	250	214
Appareils et dépendances des chaudières.	251	215
Appareils alimentaires	251	215
Des régulateurs du feu pour les chaudières à vapeur.	256-258	218
Clapets ou registres régulateurs mécaniques	257	218
Régulateurs à air mécaniques.	258	220
Soupapes de sûreté.	259-274	220
Aire de la section des cheminées pour les chaudières de machines à vapeur	274-278	229
De la condensation de la vapeur	279-288	232

QUATRIÈME SECTION.

De la puissance mécanique de la vapeur, et de la nature, des proportions générales et de la classification des machines à vapeur.

De la force de la vapeur et des moyens de la réaliser	290-501	238
Par condensation.	291-294	238
Par production	295-296	239
Par expansion ou détente.	297-501	240
Du calcul de la force de la vapeur pour produire le mouvement rectiligne.	502-511	242
Du calcul de la force de la vapeur pour produire le mouvement rotatif	512-518	247
Effet dynamique		250
Modes d'application de la force de la vapeur.	319-526	252
Classification des machines à vapeur	525-526	254
Du rapport entre la longueur de la course du piston et le diamètre du cylindre.	527-550	254
Maximum d'effet utile dans les machines à vapeur.	551-543	257
Dans les machines dont le mouvement est réglé par un volant.	552-558	258

TABLE DES MATIÈRES.

	Articles.	Pages.
Vitesse du piston.		258
Maximum d'effet utile dans les machines à élever l'eau.	339-543	262
Proportions des pompes à air et des condenseurs pour les machines à vapeur	344-355	264
Air contenu dans l'eau d'injection et dans la vapeur		267
Force nécessaire pour mouvoir la pompe à air d'une machine à vapeur.	355-355	268

CINQUIÈME SECTION.

De la construction des machines sans condenseur.

Définition et classification	356-360	272
PREMIÈRE ESPÈCE, ou machines à pression constante.	361-370	273
Proportions de leurs parties.	366	275
De la force des machines sans condenseur, fonctionnant à pression constante.	367-370	275
DEUXIÈME ESPÈCE. Machines sans condenseur, agissant par expansion ou détente	371-380	278
Force des machines à expansion.	377-380	281
Machines à deux cylindres à expansion.	381-383	283
De la pression de la vapeur la plus convenable pour les machines sans condenseur.	384	287

SIXIÈME SECTION.

De la construction des machines avec condenseur.

Description générale et classification des machines à condenseur.	385-391	289
De la construction des machines agissant par condensation.	392	292
Machines atmosphériques	395-405	292
Proportions de ces machines.	395	293
Calcul de la force d'une machine atmosphérique	396-399	294
Machines atmosphériques avec condenseur séparé.	400-405	297
Machines agissant par la pression immédiate de la vapeur.	406-410	300
Machine à simple effet de Boulton et Watt	406	300
Proportions de ses parties	407	301
Règles pour le calcul de sa force	408-410	301
Machines à simple effet, agissant par expansion	411-415	305

	Articles.	Pages
De la machine à double effet de Boulton et Watt.	414-418	505
Proportions des parties pour une machine à double effet, agissant à pression constante	415	506
Calcul de la puissance d'une machine à double effet.	416-418	507
» de Watt		508
Machines à double effet agissant par expansion	419-423	509
Machines à deux cylindres	424-429	511
Machine à double effet et à deux cylindres	425	512
Proportions de ses parties	426	512
Calcul de la force des machines à deux cylindres.	427-429	513

SEPTIÈME SECTION.

Des proportions et de la construction des diverses parties des machines à vapeur.

Des robinets et des soupapes.	452-461	516
Principes et dispositions générales.	452-455	517
Soupapes levantes.	456-442	518
Observations de M. Clément Desormes		519
Soupape de Hornblower.	441	520
Forme perfectionnée de la même soupape	442	521
Soupapes à tiroir.	445-450	521
Soupape à tiroir de Bramah	444	522
» tiroir ou à coulisse de Murray.	446	522
» coulisse de Murdoch	447	525
Système de soupapes à piston.		525
Robinet et soupapes tournantes	451-461	525
Robinet à quatre ouvertures, de Bramah.	455	526
Robinet de même genre, pour fermer l'introduction de la vapeur à une période quelconque de la course.	456	527
Robinet à deux passages.	459	529
Soupapes tournantes à disque aplati	460	529
Régulateur	461	529
Des pistons.	462-474	530
Piston de Bélidor		531
» de Woolf	468	554
Des pistons métalliques.	469-475	555
Piston de Cartwright	469	555
» de Barton	470	556
» de Jessop	475	559
» de Perkins.		559

TABLE DES MATIÈRES.

349

	Articles.	Pages.
Du frottement des pistons	474	559
Collets des tiges des pistons, ou boîtes à étoupes	475-477	541
Moyen d'ouvrir les soupapes, les robinets et les tiroirs.	478-485	545
Des guides des pistons.	486-495	547
Manivelle ou arbre coudé	487	548
Tableau de la variation de la force rotative quand la manivelle est mue par une force constante.	487	550
Parallélogramme.	488-496	551
De la force des parties des machines à vapeur, et règle pratique pour la calculer.	496-529	557
Force des tiges supportant un effort de traction	505	560
" " alternativement des efforts de traction et de compression	505-507	561
Force ou résistance des bras de balanciers et des manivelles.	508	565
Balanciers.	509	564
Manivelles.	510	565
Rayons des roues	511	565
Tableau de la force, etc., des dents et des rayons des roues d'engrenage	515	567
Force des arbres	515	568
De la résistance des tuyaux et des cylindres.	516-520	569
" plaques à l'effort de la pression de la vapeur ou des autres fluides élastiques.	521	575
De l'excès de force nécessaire dans les chaudières pour en diminuer le danger	522-525	575
Observations de M. Williams, maître de forges.		577
Chaudières en tôle.	524-527	578
" fonte.	528-529	581
De l'assemblage des tuyaux et autres parties des machines.	530-535	585

HUITIÈME SECTION.

Des moyens de rendre uniforme l'action des machines à vapeur, d'en régler la puissance, d'en mesurer l'effet utile, et règles pour la conduite de ces machines.

Des moyens de rendre uniforme l'action des machines.	535-541	585
Du volant	556	585
<i>Premier cas.</i> Machine à double effet avec manivelle.	540	589
<i>Deuxième cas.</i> Machine à simple effet.	541	590
Contre-poids.	542	591

	Articles.	Pages.
Des moyens de régler la force des machines,	543-556	591
Soupape à gorge.	544	592
Moyens de régler le mouvement par plus ou moins d'expansion.	546	593
Soupape de Field.	547	593
Balancier à ressort.	549	594
Pendule conique ou gouverneur	550	594
Régulateur	554	597
Cataracte ou pendule hydraulique.	556	598
Des moyens de déterminer l'état et la force effective d'une machine à vapeur	557-565	598
Manomètre pour la vapeur	558	599
" le condenseur	559	400
Indicateur de la pression.	560-561	400
Mesure de l'effet utile d'une machine	562	405
Compteur.	563	405
De la manœuvre ou conduite des machines à vapeur	564-568	406
Système d'alimentation avec l'eau de mer par Maudslay et Field.		408
De la manœuvre des machines à condensation.	566	408
De la conduite du feu	567	409

NEUVIÈME SECTION.

De l'application des machines à vapeur à différents usages.

De l'élévation de l'eau.	570-572	411
De l'épuisement de l'eau dans les mines.	575-578	415
Extrait du rapport mensuel sur les machines de Cornouailles	576	415
Extraction des minerais, etc.	579	419
Machines à pilons.	580	419
Établissements hydrauliques ou pompes à élever l'eau.	581	420
De l'application des machines à vapeur aux mouvements des machines des manufactures.	585	421
Fonderies, forges, machines soufflantes.	584	421
Filature de coton.	585	425
Numérotage du fil.		425
Papeterie.	585	424
De l'application aux travaux de l'agriculture.	587-589	424
Machine à battre les grains	588	425
Moulins à blé.	589	426

TABLE DES MATIÈRES.

551

	Articles.	Pages
De l'application de la force de la vapeur au mouvement des voitures	590-592	427
Par des machines stationnaires	591	428
Par des chariots à vapeur ou machines locomobiles. . .	592	429

DIXIÈME SECTION.

De la navigation par la vapeur.

De la forme des bâtiments sous le rapport de la stabilité, de la vitesse, de la capacité et de la force.	594	452
De la stabilité des bâtiments.	595-610	452
Dans le sens de la longueur	598	453
" largeur	599-610	455
De la résistance des bâtiments	611-623	457
Des mécanismes pour mouvoir les bâtiments à vapeur. . .	624-642	446
Moteur spiral ou vis hydraulique	626-627	448
Roues à aubes.	628-641	452
Modification des roues à aubes.	642	460
Force des bâtiments	643	462
Emploi des voiles.	646	465
Règle pour calculer la puissance des machines pour bateaux.	650	466
Des dispositions pour approprier les machines motrices à la marche des navires	652-656	468
Tableaux des navires à vapeur exécutés.	657-660	472
Procédés pour calculer le tonnage enregistré des navires. .	661	479

ONZIÈME SECTION.

Des machines locomotives.

Progrès rapides des machines locomotives précédées par les bateaux à vapeur	662-665	481
Essais de Watt, de Cugnot, de Trevithick et Vivian.	666-668	482
Machine à roues dentées, de Blenkinsop.	669	485
Machine à câble fixe, de Chapman.	670	484
Première machine de Stephenson.	671	484
Machine à petits tubes et à ventilateur, de M. Seguin . . .	672	484
Concours au chemin de fer de Liverpool, et nouvelle machine de Stephenson.	673	485

MACHINES A VAPEUR.

37

	Articles.	Pages.
Vitesse et consommation des nouvelles machines	674	485
Description des machines	675-682	486
Appareil de vaporisation.	676	486
Soupapes de sûreté.	678	487
Mécanisme	679	488
Essieux et roues	681	489
Train d'approvisionnement ou <i>tender</i>	682	489
Tableaux des dimensions des machines.	684	490
De la résistance des wagons et machines sur les chemins de fer	685-690	491
Frottement	685	491
Résistance de l'air.	685	492
Rampes.	687	493
Vitesse maxima des convois sur les pentes.	689	493
Calcul de la force et de la vitesse des machines	691-695	494
Force de vaporisation	691	494
Effet du tirage par le jet de vapeur.	692	495
Tableau de la vaporisation de six machines	693	497
» divers appareils.	694	498
Calcul du volume correspondant de vapeur	695	499
Calcul de la charge d'une machine.	695	500
Limitation des effets des machines.	697	502
Limite due à la tension de la vapeur.	698	502
» au défaut d'adhérence des roues	699	503
» au poids de la machine.	700	504
Tableau des charges d'une machine de dimension moyenne.	701	504
» des effets dynamiques des machines.	702	505
» de l'effet utile sur chemin horizontal.	704	506
» de la consommation de combustible sur le chemin de fer de Liverpool.	705	507
Des moyens de surmonter les rampes des chemins de fer.	706-709	508
Progress obtenus dans le travail et la vitesse des machines locomotives	710	510

TABLEAUX.

<i>Premier tableau.</i> Des propriétés de la vapeur à différents degrés de force élastique.	711	514
<i>Deuxième tableau.</i> Des proportions des machines à simple effet.	712	516
<i>Troisième tableau.</i> Des proportions des machines à double effet.	713	518

TABLE DES MATIÈRES.

333

Articles. Pages.

TABLEAUX ADDITIONNELS.

Tableau A. De la force élastique de la vapeur de 0° à 650°.	715	523
Tableau B. De la force élastique de la vapeur de 100° à 125°.	716	524
Tableau C. <i>Idem</i> , de l'Académie des sciences.	717	525
Table alphabétique des matières.		527

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.