http://cnum.cnam.fr
Conservatoire numérique des Arts & Métiers

Auteur ou collectivité : Armengaud, Jacques-Eugène
Auteur : Armengaud, Jacques-Eugène (1810-1891)
Titre : Traité théorique et pratique des moteurs à vapeur

Auteur : Armengaud, Jacques-Eugène (1810-1891)
Titre du volume : Tome premier

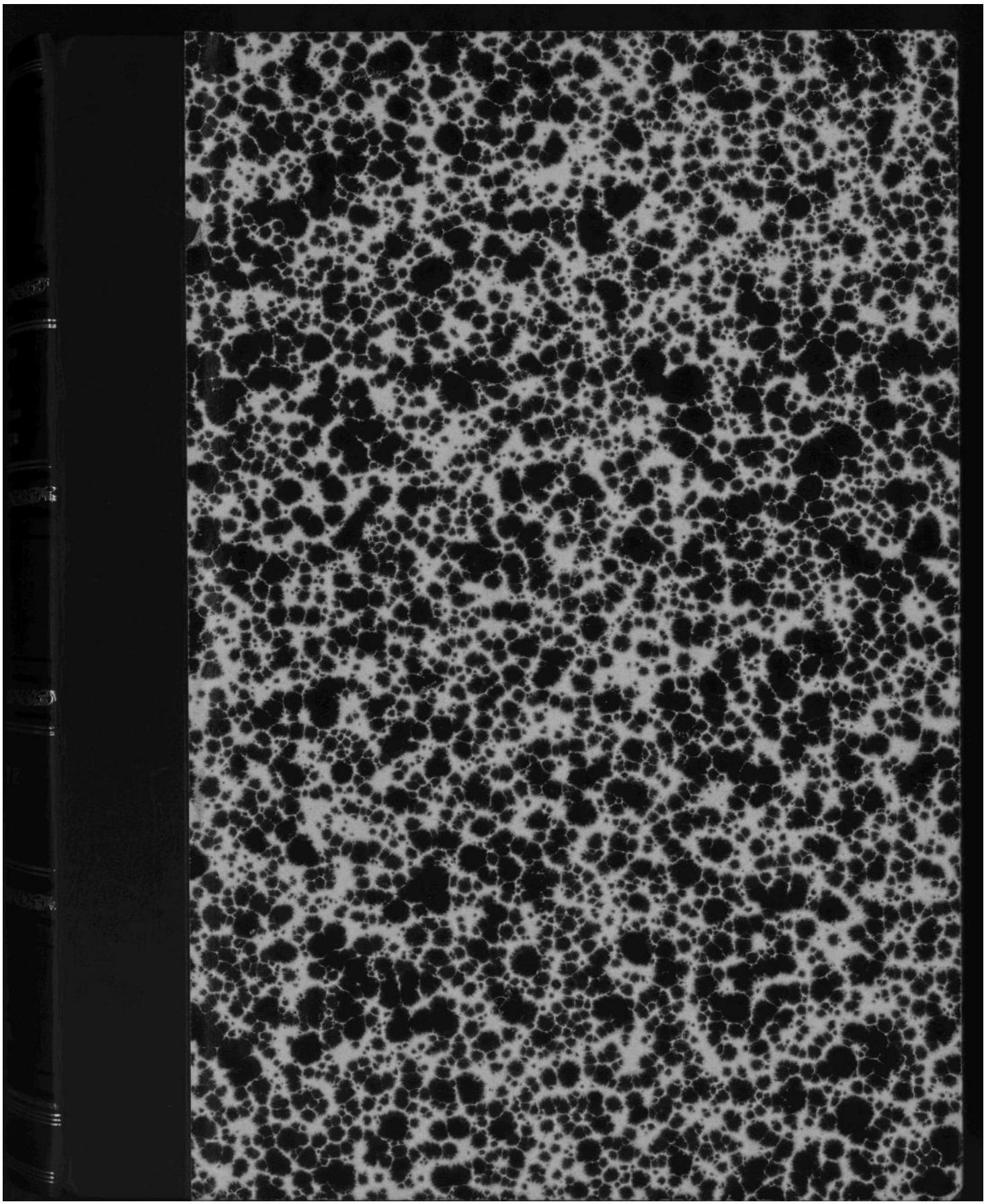
Adresse : Paris : chez l'auteur, 1861
Collation : 1 vol. (VIII-560 p.) : ill., fig., tabl. ; 29 cm
Cote : CNAM-BIB 4 De 30 A (1)
Sujet(s) : Moteurs ; Machines à vapeur ; Vapeur, Technique de la
Note : Le tome 2 publié chez A. Morel et Cie est également disponible sur le Cnum.
Langue : Français

Date de mise en ligne : 18/07/2018
Date de génération du document : 18/7/2018

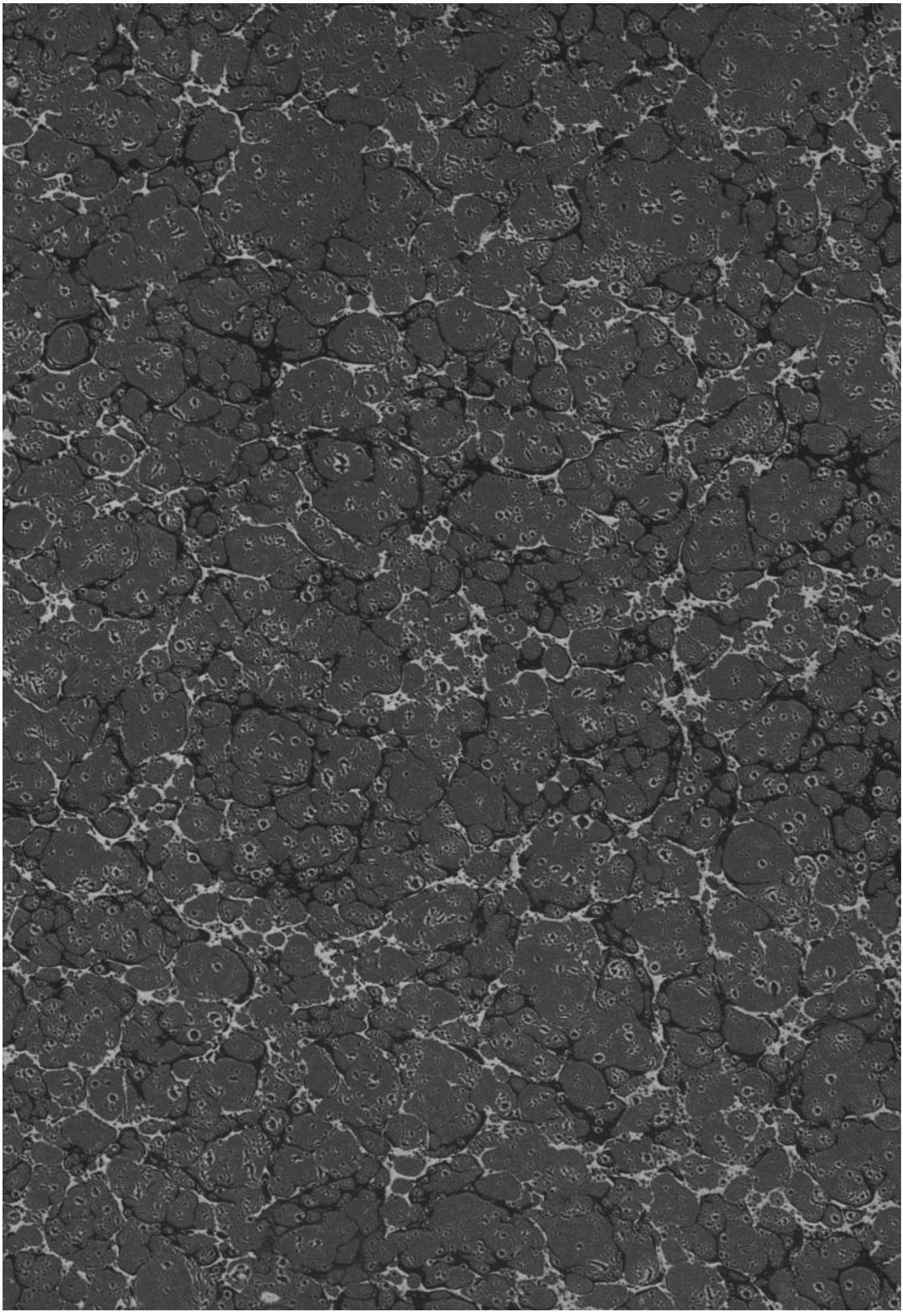
Permalien : http://cnum.cnam.fr/redir?4DE30.1

La reproduction de tout ou partie des documents pour un usage personnel ou d'enseignement est autorisée, à condition que la mention complète de la source (*Conservatoire national des arts et métiers, Conservatoire numérique http://cnum.cnam.fr*) soit indiquée clairement. Toutes les utilisations à d'autres fins, notamment commerciales, sont soumises à autorisation, et/ou au règlement d'un droit de reproduction.

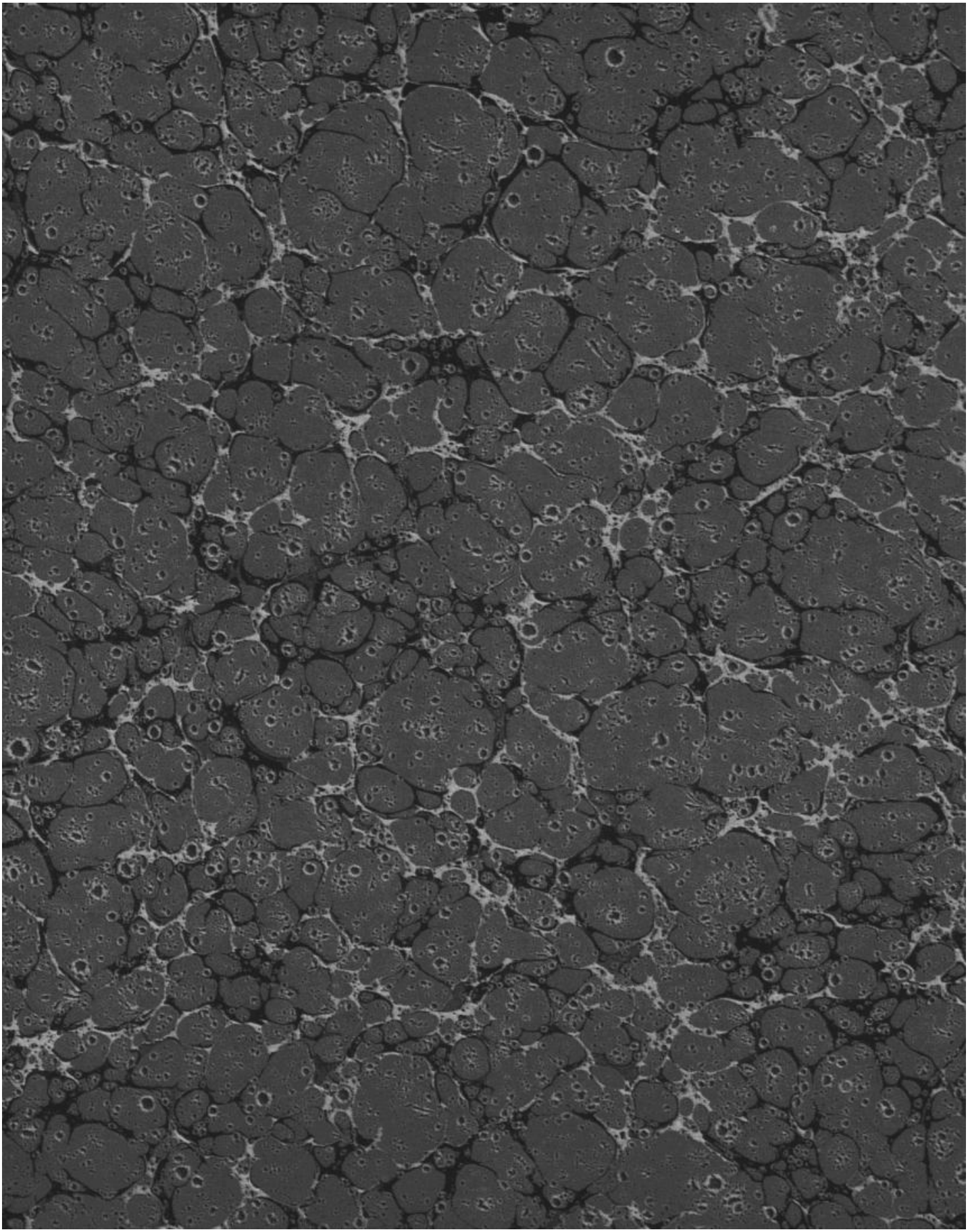
You may make digital or hard copies of this document for personal or classroom use, as long as the copies indicate *Conservatoire national des arts et métiers, Conservatoire numérique http://cnum.cnam.fr*. You may assemble and distribute links that point to other *CNUM* documents. Please do not republish these PDFs, or post them on other servers, or redistribute them to lists, without first getting explicit permission from *CNUM*.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

# TRAITÉ

# DES MOTEURS

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

PARIS. — IMPRIMERIE DE J. CLAYE

RUE SAINT-BENOÎT, 7

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

n° De 30

4° De 30a

# TRAITÉ

THÉORIQUE ET PRATIQUE

DES

# MOTEURS A VAPEUR

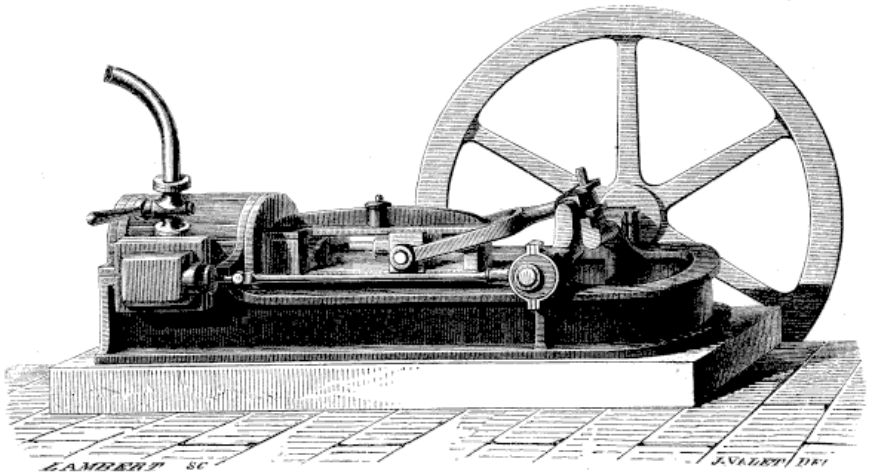
COMPRENANT

LES NOTIONS PRÉLIMINAIRES DE PHYSIQUE ET DE MÉCANIQUE APPLIQUÉES A L'ÉTUDE DE LA VAPEUR D'EAU,
UN APERÇU HISTORIQUE DE L'INVENTION DES MACHINES A VAPEUR,
LES DOCUMENTS RELATIFS A L'ÉTABLISSEMENT DES GÉNÉRATEURS ET DE LEURS APPAREILS DE SURETÉ,
L'ÉTUDE COMPLÈTE D'UN MOTEUR A VAPEUR ET DE SES ORGANES PRINCIPAUX,
LES DIVERS MODES DE DISTRIBUTION, D'APPAREILS ALIMENTAIRES ET DE CONDENSATION,
LA DESCRIPTION DE TOUS LES SYSTÈMES DE MACHINES A VAPEUR, VERTICALES, HORIZONTALES,
A BALANCIER, A DEUX ET A TROIS CYLINDRES, DES LOCOMOBILES, DES LOCOMOTIVES,
DES APPAREILS DE NAVIGATION, ETC., ETC.

PAR ARMENGAUD AINÉ

INGÉNIEUR, ANCIEN PROFESSEUR AU CONSERVATOIRE IMPÉRIAL DES ARTS ET MÉTIERS

TOME PREMIER




CONSERVATOIRE IMPAL DES ARTS ET MÉTIERS
BIBLIOTHÈQUE

PARIS

CHEZ L'AUTEUR, RUE SAINT-SÉBASTIEN, 45

Et chez les principaux Libraires de la France et de l'Étranger

1861

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

# PRÉFACE

Les machines à vapeur ont pris depuis plusieurs années un tel développement, les applications en sont devenues tellement nombreuses, qu'il est permis de les considérer comme la base fondamentale de l'industrie, et, peut-être même, de la civilisation du monde entier. Ne sont-elles pas, en effet, la cause des prodiges accomplis, en moins d'un demi-siècle, dans les relations internationales comme dans toutes les branches industrielles?

Un nouvel agent moteur peut venir un jour se substituer à la vapeur d'eau, et sera peut-être plus économique, ou d'une application plus facile ; mais on n'en devra pas moins la grande initiative à la machine à vapeur qui a frayé la route en créant en tous lieux des forces disponibles considérables, permettant d'exécuter des travaux gigantesques et de franchir des espaces immenses, avec une rapidité jusqu'alors inconnue.

C'est pour elle et par elle que les ateliers de construction se sont multipliés et agrandis, que l'outillage s'est perfectionné, que les usines de toute espèce ont reçu la plus grande extension.

Nous sommes loin de cette époque où l'ingénieux Papin écrivait, en exposant son système de machine à feu qu'il proposait d'appliquer à la navigation :

..... « Nos tubes (les cylindres à vapeur), au contraire, ne chargeraient le vaisseau que d'un poids très-faible ; ils occuperaient peu de place ; on pourrait se les procurer en quantité suffisante s'il existait une fois une fabrique pour les confectionner..... »

Quelle satisfaction n'éprouverait-il pas d'apprendre que ses hautes conceptions se sont ainsi réalisées, s'il lui était permis de voir ces énormes cylindres, fondus d'une seule pièce, ayant 2 à 3 mètres de diamètre et correspondant à des puissances de 6 à 800 chevaux et plus !

Maintenant on exécute des machines à vapeur presque partout, on en rencontre de tout côté, dans tous les pays ; mais, malgré toutes les applications que l'on en a faites, il y a encore des mécaniciens, des contre-maîtres, des chefs d'atelier, très-habiles ouvriers d'ailleurs, qui ne connaissent pas suffisamment les principes essentiels sur lesquels elles reposent ; un grand nombre de fabricants qui s'en servent les ignorent bien davantage. Faut-il s'en prendre aux traités mêmes qui montrent cet agent puissant peut-être trop sous le côté scientifique, ou bien à une sorte d'insouciance ou de prévention pour la lecture des ouvrages de mécanique ? Nous pourrions citer des localités, éloignées à la vérité, où tout récemment des machines bien construites

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

avaient été envoyées de France, sans monteur, et étaient restées complétement abandonnées, parce que personne n'avait pu régler le tiroir de distribution.

En essayant un nouveau travail sur les moteurs à vapeur, nous avons pensé qu'il était indispensable de le mettre à la portée de tous, et que, pour cela, la méthode employée dans notre Recueil industriel (que l'on nous permette de le dire), nous ayant bien réussi, devait être surtout appliquée dans ce traité spécial qui est plus particulièrement destiné aux praticiens. C'est déjà ce que nous avons fait pour celui des moteurs hydrauliques qui a paru en 1858.

Ainsi, en exposant la théorie de la vapeur, en démontrant ses propriétés physiques et mécaniques, nous avons cherché à réduire, autant que possible, les calculs arides à de simples opérations d'arithmétique que tout le monde peut répéter, et qui sont encore simplifiées par des tables et des tracés graphiques.

De même, en décrivant les divers types de machines à vapeur, que nous avons eu le soin de choisir chez les constructeurs les plus expérimentés, nous nous sommes attaché, non-seulement à en bien faire voir toutes les particularités, mais encore à en démontrer les parties délicates qui exigent le plus d'attention, comme par exemple les modes de distribution et de détente qu'il importe tant de bien connaître. Nous avons voulu qu'un tel traité pût servir de guide aussi bien à ceux des industriels qui ne possèdent que de faibles notions sur ces moteurs, qu'aux mécaniciens, chefs et ouvriers qui s'en occupent spécialement.

Une classification méthodique et rationnelle nous a paru nécessaire dans un ouvrage de cette importance; c'est pourquoi nous l'avons divisé en plusieurs sections, qui se subdivisent elles-mêmes en chapitres.

Mais nous tenons à bien faire comprendre surtout la pensée qui nous a inspiré pour faire cette classification. La méthode suivie par les ouvrages destinés à l'enseignement élémentaire est évidemment la seule qui convienne pour préparer l'esprit à l'appropriation facile des notions qui s'y trouvent développées, et qui tendent à la connaissance complète d'un tout, dont les divers éléments s'enchaînent et se succèdent en se démontrant l'un par l'autre. C'est cette méthode, qui ne permet de procéder qu'en passant du connu à l'inconnu, que nous nous sommes efforcé de suivre rigoureusement.

Ainsi, après les notions relatives aux propriétés de la chaleur et de la vapeur, et après un aperçu historique sur l'invention des « pompes à feu », nous commençons l'étude des générateurs qui s'appliquent indifféremment à tous les systèmes de machines à vapeur, comme aussi aux appareils de chauffage et autres. Cette étude comprend les dispositions de chaudières le plus généralement en usage, la construction de leurs fourneaux, de leurs grilles, de leurs cheminées, avec les observations pratiques pour les entretenir et les diriger, et avec les éléments qui servent à en déterminer les proportions ; elle est tout naturellement suivie des détails relatifs aux appareils accessoires, tels que manomètres, indicateurs de niveau, soupapes de sûreté, etc.

Nous arrivons alors à expliquer les principes généraux de la machine à vapeur, en faisant connaître les divers organes qui la constituent, leur relation, le jeu de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

leur mécanisme et les règles qui permettent d'en calculer la puissance. Persuadé que les exemples sont pour les industriels ce qu'ils recherchent le plus, nous leur faisons passer successivement en revue les différents systèmes en usage, soit comme machines horizontales dont on rencontre aujourd'hui tant d'applications, soit comme machines verticales à directrices ou à balancier, à un seul et à deux cylindres, avec et sans condensation, etc.

Tous les modèles que nous avons pris pour types dans chaque espèce sont puisés aux meilleures sources. Nous avons dû ne mentionner que comme mémoire les dispositions qui sont à peu près complétement abandonnées, ou ne rappeler que celles qui renferment des caractères particuliers, en les désignant par des vignettes imprimées dans le texte, et, au besoin, en renvoyant à la *Publication industrielle* des machines, outils et appareils.

Les modes de distribution et de détente qui remplissent les conditions les plus avantageuses sont nécessairement décrits avec tout le développement que comporte leur ingénieux mécanisme; ils méritent d'autant plus qu'on s'y arrête avec attention qu'ils forment la base essentielle de la bonne marche des machines. Aussi, afin d'en rendre la construction intelligible, utile et en même temps intéressante, les dessins qui les représentent sont accompagnés de tracés géométriques à l'aide desquels il devient facile d'en régler les positions par rapport à celles du piston moteur.

C'est particulièrement l'étude des distributions qui nous démontrait la nécessité des définitions progressives et logiquement graduées; car si un mécanisme de distribution présente quelques difficultés pratiques pour le bien régler, son analyse géométrique en présente peut-être davantage. Les procédés que nous avons adoptés pour arriver à faire comprendre le jeu de tous les distributeurs, depuis le tiroir simple jusqu'aux systèmes à détente les plus compliqués, consistent, autant que possible, dans l'emploi de tracés géométriques, au lieu de l'analyse numérique qui, quoique plus rigoureuse, est loin d'avoir le mérite de l'étude descriptive pour fixer les raisonnements dans l'esprit.

Les diverses dispositions de condenseurs, de pompes à air et d'appareils d'alimentation les plus récents et les plus répandus, sont également examinées avec beaucoup de soin et dessinées dans toutes leurs parties.

Nous ne devions pas omettre, dans l'examen des moteurs fixes, le système à simple effet, dit de Cornouailles, que nous avons cru devoir reporter après la description des machines à deux cylindres, à cause de la complication de leur mécanisme, du mode de distribution et de l'appareil particulier appelé *cataracte*. La comparaison de ce système avec les autres est utile à connaître, surtout sous le rapport du travail et des applications.

Un chapitre spécial est consacré aux proportions rigoureuses à établir dans la construction de ces moteurs, sur leur rendement en effet utile, sur l'estimation des dépenses de vapeur et de combustible, etc. Ces documents sont complétés par des tables et par un résumé des expériences faites soit sur les différents genres de générateurs, soit sur les machines à vapeur le mieux exécutées.

Les régulateurs, les volants, qui jouent un rôle important dans ces moteurs, ont

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dû faire aussi le sujet d'un article spécial, et particulièrement les volants, dont les principes ont été développés avec la simplicité indispensable pour les besoins de la pratique.

Nous donnons ensuite des exemples de machines locomobiles, qui se répandent chaque jour de plus en plus dans les fermes comme dans les chantiers de construction. Puis nous abordons les machines locomotives qui, par les améliorations successives qu'elles ont subies, sont devenues des moteurs puissants, capables non-seulement de marcher à de grandes vitesses, mais encore de traîner de fortes charges et au besoin de gravir des rampes plus ou moins prononcées. Elles sont suivies des appareils de navigation à roues et à hélice, des modèles les plus récents exécutés par les constructeurs spéciaux les plus expérimentés.

Enfin, après avoir décrit les machines à action directe, telles que les marteaux-pilons que l'on applique maintenant dans toutes les usines métallurgiques, les machines rotatives qui, malgré qu'on s'en occupe depuis longtemps, sont encore à l'état d'essai, et les nouveaux moteurs qui emploient comme agent principal l'air, l'acide carbonique ou d'autres gaz, nous terminons par un chapitre important, relatif à la résistance des matériaux dans son application particulière à la construction des chaudières et des machines à vapeur. Les pièces qui font particulièrement l'objet de cette étude sont, quant aux machines : les arbres moteurs, les bielles et balanciers, les tiges de piston, les boîtes à étoupe, les coussinets, les poulies, les engrenages, etc. A l'égard des générateurs, ce sont les épaisseurs de tôle, les assemblages, les diamètres des rivets, etc. Empressons-nous d'ajouter que, loin de nous en tenir aux données purement théoriques, nous tenons compte au contraire des dimensions *réellement* adoptées en pratique.

On comprend qu'un travail aussi complexe, qui embrasse autant de sujets divers, la plupart exigeant des développements étendus, ne pouvait être contenu dans un seul volume comme les moteurs hydrauliques ; il nous a paru nécessaire de le diviser en deux parties qui se suivent et se relient entre elles, en formant alors deux forts volumes de texte in-4°, et un atlas de près de 50 planches in-folio.

Dans l'espérance de nous être approché du but que nous nous sommes proposé, et qui, sans aucun doute, est réclamé par les besoins de l'étude générale et de l'industrie, nous adressons tous nos remercîments aux personnes qui ont bien voulu nous prêter leur concours, soit par leurs conseils, soit en mettant à notre disposition des matériaux précieux, fruits de leurs laborieux travaux (1), et qui donnent à notre œuvre ce caractère pratique que nous recherchons dans tous nos ouvrages.

ARMENGAUD aîné.

(1) Pour la généralité des appareils et des procédés dont nous donnons la description, nous n'entendons aucunement en établir par ce fait la vulgarisation absolue; le droit de propriété et de priorité des auteurs reste, de toute façon, une question expressément réservée.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

# MOTEURS A VAPEUR

## PREMIÈRE SECTION

### NOTIONS PRÉLIMINAIRES DE PHYSIQUE ET DE MÉCANIQUE

APPLIQUÉES A L'ÉTUDE DE LA VAPEUR D'EAU

## CHAPITRE PREMIER

### PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DE LA VAPEUR D'EAU

Les fonctions des moteurs à vapeur reposent sur les propriétés mécaniques du fluide aériforme que constitue l'eau à son changement physique, et que l'on désigne par *l'état de vapeur*. Avant d'étudier la construction de ces machines, il est donc indispensable de rendre un compte exact des circonstances qui accompagnent ce phénomène du passage de l'eau de son état liquide à l'état de vapeur, en faisant connaître les conditions suivant lesquelles il s'effectue, les effets physiques immédiats qui en résultent, les moyens d'en apprécier l'intensité, et, enfin, le mode d'intervention du principal agent impondérable, *la chaleur* ou *le calorique*, et les substances combustibles qui le développent.

Ainsi, pour les moteurs à vapeur comme pour les moteurs hydrauliques, la puissance motrice est empruntée aux agents naturels qui sont : le CALORIQUE et la PESANTEUR.

Le calorique transforme un liquide inerte, et seulement pesant, en un gaz expansif prenant sa puissance dans son propre milieu.

La pesanteur agit, avec ce même liquide, comme à l'aide d'un récepteur auquel elle a confié sa puissance, lorsqu'il a été primitivement élevé par les forces de la nature, pour la restituer au moment où ce même liquide peut être utilisé comme *chute*.

La comparaison de ces deux agents impondérables, mis en jeu pour obtenir de la force motrice, nous conduit à faire une remarque très-intéressante : c'est que, dans les deux cas, l'un des deux agents, le calorique, a été la cause première de



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'effet mécanique obtenu, attendu que l'eau élevée, et propre à déterminer une chute utilisable, ne l'a été que par l'action de la chaleur qui l'a fait s'évaporer pour la laisser ensuite retomber en pluie et former les sources. Il est bien certain que, sans cette cause, l'eau ne serait connue du monde qu'à l'état de niveau uniforme, précisément par l'effet de la pesanteur qui s'oppose à ce qu'elle soit élevée autrement qu'en développant préalablement une puissance mécanique quelconque d'une intensité correspondante.

Ainsi, on peut dire que, pour les deux systèmes de moteurs *à eau* et *à vapeur,* le calorique fournit la première dépense physique.

Avec les moteurs hydrauliques, il opère le changement d'état en combattant l'action de la pesanteur qui restituera plus tard cette action dépensée après le retour de l'état de vapeur à l'état liquide;

Avec les moteurs à vapeur l'action du calorique est immédiate, et celle de la pesanteur est éliminée pour l'instant.

Mais il sera facile de reconnaître que, même dans ce dernier cas, les lois de la pesanteur interviennent encore pour mesurer, en quelque sorte, les effets produits par le calorique, qui sont toujours exprimables en poids élevés comme tout travail mécanique produit.

Il est donc très-facile de comprendre cette transformation des puissances naturelles et leur liaison tellement intime que les effets en sont égaux et se font une exacte compensation. C'est ce qui peut permettre d'expliquer l'erreur où sont tombées quelques personnes qui pensaient créer un moteur avantageux, en élevant de l'eau à l'aide d'un vide artificiel engendré par la condensation de la vapeur, pour dépenser ensuite cette eau, en la laissant retomber sur un récepteur de sa puissance motrice.

Or, il est évident qu'un volume d'eau élevé, en dépensant une certaine quantité de vapeur, ne peut pas développer, en retombant, une puissance plus considérable que celle qui eût été produite en se servant directement de cette vapeur : il vaut donc mieux adopter ce dernier moyen.

## DÉFINITION DE LA VAPEUR

1. Les corps de la nature se présentent sous trois états différents qui sont :

L'état liquide, l'état solide et l'état gazeux ou aériforme.

Sans les circonstances particulières qui maintiennent ordinairement quelques-uns de ces corps plutôt dans un état que dans un autre, et qui font dire que les uns sont solides, les autres liquides et d'autres gazeux, on dirait, avec plus de raison, que les corps n'ont pas d'état absolu, et qu'ils peuvent se présenter indifféremment sous les trois états, ce qui est vrai.

L'état normal du milieu dans lequel nous existons est la seule cause de la distinction admise dans le langage usuel. On dit que l'eau est un liquide; les métaux, des solides; l'air, un gaz, etc., et cependant l'eau peut devenir solide et gazeuse, et les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

métaux, des liquides et même des gaz. Si l'air ne semble pas posséder la propriété de se liquéfier ou de se solidifier, c'est probablement parce que nous n'en connaissons pas les moyens, quoiqu'ils puissent exister : d'ailleurs, d'autres gaz sont connus pour atteindre à ces changements d'état.

En résumé, l'état physique d'un corps (l'air mis à part pour l'instant) n'est qu'une question de température. Il est certain que si celle de la terre ne dépassait nulle part 1 degré seulement au-dessous du zéro du thermomètre centigrade, l'eau serait classée parmi les solides. Dans le cas contraire, où la température de notre milieu atteindrait un degré suffisant, l'eau s'appellerait *un gaz*.

Ceci expliqué d'une manière générale, nous ne nous occuperons que de ce qui concerne les changements d'état de l'eau, dont la vapeur est l'agent principal des moteurs qui font l'objet de notre *Traité théorique et pratique*.

Quelle que puisse être la simplicité à laquelle nous désirons ramener l'étude de la vapeur, il ne nous est pas possible de faire que cette étude n'exige quelques connaissances en physique dont les développements ne peuvent trouver place ici. Nous devons donc admettre que l'on possède ces connaissances qui sont à peu près les suivantes : théorie de la pesanteur, hydrostatique, équilibre des gaz et phénomènes de la chaleur. D'ailleurs nous ne manquerons pas, quand il sera nécessaire de le faire, de rappeler les lois fondamentales de ces diverses parties de la physique.

## PRINCIPES DE LA FORMATION DE LA VAPEUR D'EAU

2. Si l'on expose à l'air libre une certaine quantité d'eau contenue dans un vase ou répandue sur le sol, cette eau diminue insensiblement de volume et disparaît même complétement après un temps suffisant, si elle n'a pas été renouvelée.

On dit que cette eau s'est *évaporée* ou transformée en vapeur, c'est-à-dire en gaz, invisible comme l'air et qui s'est mélangée avec lui.

Si, au lieu de laisser simplement le vase contenant de l'eau exposé à la température de l'air ambiant, on le place sur un foyer incandescent, l'eau s'échauffe peu à peu, se met à *bouillir*, et finalement disparaît jusqu'à complète siccité du vase qui la contient, tant qu'il n'en est pas fourni d'autre et que le feu est maintenu assez longtemps.

On dit, cette fois, que l'eau s'est *vaporisée*, c'est-à-dire qu'elle a encore été transformée en vapeur, mais rapidement et avec le phénomène de l'ébullition.

La transformation de l'eau en vapeur, ou son changement de l'état liquide à l'état gazeux, s'effectue donc, à nos yeux, dans deux conditions différentes qui sont :

1° *L'évaporation lente* à l'air libre et sans aucune effervescence;

2° *La vaporisation*, qui désigne la transformation en vapeur rapide et tumultueuse.

Ces deux modes, différents en apparence, ne constituent pas cependant des propriétés différentes de la vapeur. L'étude nous démontrera que ces conditions prouvent uniquement que la vapeur se forme à toutes les températures, et que, dans les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

deux cas, l'eau ne fait que céder, pour passer de l'état liquide à l'état gazeux, à une force répulsive de ses molécules, qui cherchent toujours à s'éloigner l'une de l'autre en surmontant la résistance du milieu ambiant. C'est la formation de la vapeur dans le vide qui montre bien cette vérité et qui, suivant l'appréciation tout extérieure de nos sens, pourrait constituer un troisième mode de formation de la vapeur, tandis qu'il n'est que l'explication d'un seul et unique phénomène général.

Nous trouverons également que cette force expansive des molécules liquides s'accroît au fur et à mesure que la température du liquide augmente.

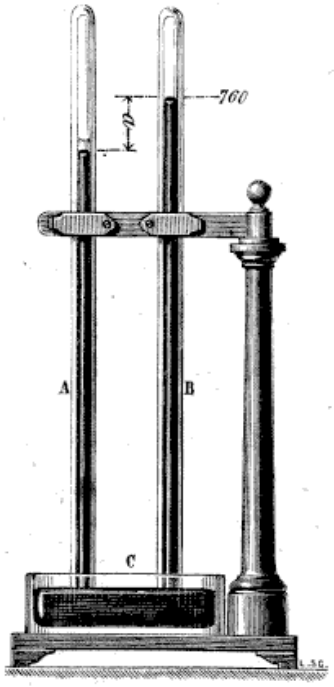
## FORMATION DE LA VAPEUR D'EAU DANS LE VIDE

3. Les expériences les plus concluantes ont permis de reconnaître que la formation de la vapeur est une propriété permanente des liquides qui prendraient immédiatement cet état si la pression extérieure du milieu où ils se trouvent ne s'y opposait pas, dans les conditions ordinaires de leur température.

En effet, l'eau se vaporise instantanément lorsqu'elle est introduite dans un espace entièrement privé d'air et où il n'existe pas de pression, autrement dit dans le vide; d'un corps fluide et apparent, il ne reste qu'un gaz invisible comme l'air, et ce prénomène s'accomplit quelle que soit la température du liquide.

Ce curieux phénomène est démontré par les physiciens à l'aide d'une expérience très-remarquable, peut-être la plus satisfaisante que l'on puisse imaginer.

Fig. 1.




Deux baromètres à mercure étant disposés comme l'indique la fig. 1re, et tous deux marquant d'abord, comme celui B, la pression atmosphérique, on fait passer dans l'un, soit celui A, une goutte d'eau soigneusement privée d'air par la distillation, et que l'on y peut introduire à l'aide d'une pipette recourbée par la partie inférieure du tube de cristal.

La goutte d'eau, en raison de sa légèreté spécifique, ne tarde pas à atteindre le sommet de la colonne de mercure et à pénétrer dans la chambre barométrique ou vide de Torricelli.

Mais, en même temps, il se produit un phénomème remarquable : la colonne de mercure s'abaisse et la goutte d'eau disparaît, en partie ou en totalité, d'après certaines conditions que nous ferons connaître tout à l'heure.

Quoi qu'il en soit, l'abaissement de la colonne de mercure est assez considérable pour qu'il ne puisse pas être attribué au simple poids du liquide introduit qui n'aurait pu déprimer cette colonne que d'une quantité insignifiante en raison de la grande différence de densité des deux liquides. Il ne

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

peut pas davantage être attribué à une certaine quantité d'air atmosphérique qui se dégagerait de l'eau, puisque celle-ci en a été purgée préalablement par la distillation.

Il faut donc conclure de cette expérience qu'il s'est formé dans la chambre barométrique un corps gazéiforme doué d'une force expansive capable d'avoir opéré la dépression $a$ que l'on peut apprécier facilement à l'aide du baromètre B resté parfait.

Or ce gaz, c'est la vapeur même de l'eau dont les molécules, n'éprouvant plus les effets de la pression atmosphérique, qui n'existe pas dans la chambre barométrique, se sont éloignées les unes des autres en exerçant un effort répulsif précisément mesuré par la dépression barométrique $a$ qui en est le résultat.

Ainsi, en principe, le passage de l'eau, de l'état liquide à l'état gazeux ou de vapeur, est le résultat d'une distension naturelle des molécules, qui ne se manifeste qu'autant qu'elle est capable de surmonter la pression du milieu ambiant.

## INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE SUR LA FORMATION DE LA VAPEUR

4. La formation instantanée de la vapeur dans le vide étant un fait établi d'une manière générale, si maintenant on tient compte de la température à laquelle l'eau a été introduite dans le baromètre, on acquiert la certitude que la tendance à la vaporisation varie avec cette température, et que la dépression éprouvée par la colonne barométrique est d'autant plus considérable que la température est elle-même plus élevée.

En d'autres termes, la force élastique de la vapeur croît avec la température de l'eau qui l'a émise.

Pour mieux fixer les idées sur cette proposition importante, supposons que, dans l'expérience précédente (fig. 1), on ait introduit dans le baromètre un décigramme d'eau à la température de + 20 degrés centigrades; l'observation permet de reconnaître que la dépression de la colonne de mercure eût été de 17 millimètres environ (en admettant que l'eau ne se soit pas refroidie dans son passage au travers du mercure); on pourrait dire, par conséquent, que la pression exercée par la vapeur formée est équivalente à une petite colonne de mercure de cette hauteur : soit 17/760 de la colonne entière ou un peu plus de 1/50 de la pression atmosphérique totale.

Si ce même poids d'eau eût été à 50 degrés, la colonne barométrique se serait abaissée de 89 millimètres; et à 100 degrés, elle se serait complétement annulée en s'abaissant jusqu'au niveau de la cuvette C, ce qui revient à dire que la force élastique de la vapeur serait mesurée exactement par la pression atmosphérique.

5. Avant de développer plus complétement ces principales propriétés de la vapeur d'eau, il sera peut-être utile de mieux caractériser ce que l'on doit entendre par *de la vapeur*, et sa constitution réelle comparée à l'idée que l'on pourrait s'en faire, n'ayant pas examiné la question de très-près.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La vapeur, avec sa propriété expansive et dans la phase de formation où nous l'avons supposée, est bien réellement un fluide transparent, invisible comme l'air. On appelle souvent *vapeur* les brouillards gris ou blancs qui s'échappent d'un vase où de l'eau est en ébullition, ou de la cheminée d'une locomotive, etc.; mais c'est là une désignation inexacte au point de vue de la réalité, car ces brouillards ne sont qu'une immense agglomération de bulles microscopiques formées d'une couche d'eau liquide enfermant de la vapeur, et qui nagent dans l'air atmosphérique, mais dont l'ensemble ne possède pas la plus légère force élastique. Ces brouillards sont, en quelque sorte, l'état transitoire où se trouve la vapeur réelle repassant à l'état liquide par l'effet d'un refroidissement relativement lent.

L'atmosphère montre souvent ce phénomène du brouillard, lorsqu'une cause quelconque vient à condenser partiellement la vapeur d'eau à l'état gazéiforme qu'elle renferme toujours en quantité plus ou moins considérable.

### MAXIMUM DE FORCE ÉLASTIQUE DE LA VAPEUR

6. Puisque l'eau ne se vaporise qu'autant que la pression extérieure qu'elle supporte ne s'y oppose pas, il est clair que, dans l'expérience ci-dessus du baromètre, cette vaporisation devra s'arrêter aussitôt que la vapeur déjà formée aura acquis précisément la tension qui limite, pour une température donnée, la distension des molécules du liquide. C'est en effet ce qui arrive. Car si l'on a introduit dans le baromètre une quantité suffisante de liquide, tout ne se transforme pas en vapeur; et la dépression du mercure ayant eu lieu, il reste encore au sommet de la colonne une certaine quantité d'eau à l'état liquide.

Que faut-il pour que ce résultat soit atteint? Que le volume d'eau introduit conserve une certaine relation avec celui de la chambre barométrique, y compris l'abaissement de la colonne de mercure. Lorsque ces conditions ont été remplies et qu'il a été introduit assez d'eau pour que la totalité ne soit pas passée en vapeur, on dit que *l'espace est saturé, que la vapeur est à son maximum d'expansion ou de force élastique.*

Ceci revient donc à dire qu'une pression suffisante s'est développée pour faire équilibre à la tendance que l'eau possède pour se transformer par la force expansive de ses molécules, et pour sa température actuelle.

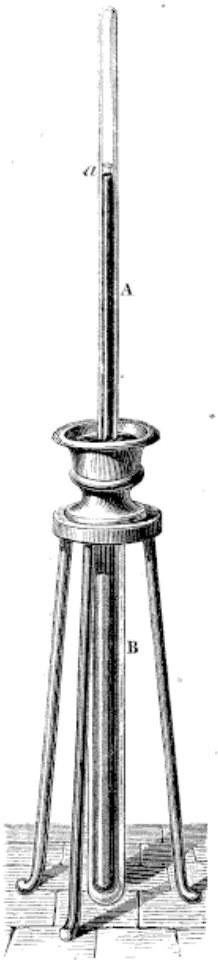
Si, dans cette situation, on parvient d'une manière quelconque à agrandir l'espace occupé par la vapeur, de nouvelles quantités d'eau se vaporisent; et on peut non-seulement la faire disparaître, mais encore, si l'on continue d'étendre l'espace qu'elle occupe, elle le remplit encore sans que jamais sa pression soit complétement annulée.

Dans le cas contraire, où l'on restreint cet espace, l'eau passée à l'état de vapeur revient à l'état liquide; et si l'on persiste jusqu'au point de réduire cet espace au volume même de l'eau primitivement admise, le retour à l'état liquide est complet pour la masse entière.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ces propriétés, qui sont la conséquence inévitable de ce que nous avons dit à propos de l'équilibre entre la tension de la vapeur formée et l'expansion naturelle des molécules de la masse fluide, sont rendues complétement évidentes à l'aide d'un instrument que l'on appelle *baromètre à longue cuvette*.

Fig. 2.




C'est un véritable tube barométrique A, mais dont la cuvette est formée d'un récipient évasé terminant un autre tube B rempli de mercure, et dans lequel le tube A peut s'enfoncer de quantités très-sensibles. Comme la hauteur de la colonne de mercure est invariable, ayant pour base fixe le niveau de la surface libre dans la cuvette, il s'ensuit que, si l'on enfonce plus ou moins le tube A dans la cuvette, c'est la chambre barométrique qui diminue ou qui augmente dans le même rapport.

Par conséquent, si comme précédemment on a fait passer une goutte *a* de liquide au-dessus de la colonne de mercure, et que l'on modifie la position du tube A, l'espace libre offert à la vapeur dégagée s'agrandit ou se réduit suivant que l'on remonte le tube ou qu'on le fait descendre.

En remontant le tube, la goutte d'eau diminue peu à peu et finit par disparaître complétement. En continuant d'agrandir ainsi la chambre barométrique, on voit la colonne de mercure, d'abord déprimée par la force élastique de la vapeur, remonter près de son point de hauteur normale, mais sans jamais y revenir exactement, en supposant même que le tube puisse être indéfiniment remonté, ce qui indique que la vapeur continue d'occuper les espaces successifs qui lui sont offerts, en y exerçant toujours une pression dont l'intensité varie en raison inverse de leurs volumes.

En enfonçant, au contraire, le tube dans la cuvette après l'expérience précédente, on voit peu à peu l'eau reparaître, et même complétement, si l'on abaisse le tube de façon à réduire le vide de Torricelli à celui de la goutte d'eau même.

Ce résultat expérimental a fait dire aux physiciens que la vapeur d'eau, quoique possédant, comme les gaz, une force expansive indéfinie qui la fait se dilater autant que l'on augmente le volume du vase qui la contient, n'est pas, comme la plupart de ces gaz, indéfiniment compressible, et qu'elle a un maximum de force élastique ou de compression au-dessus duquel elle cesse de résister, et revient à l'état liquide en se condensant.

Mais il n'est cependant pas prouvé, qu'en cela, elle n'ait pas des propriétés tout à fait identiques à celles des gaz; car à part ce fait, que rien ne permet d'affirmer, que les gaz résisteraient indéfiniment à la compression, on a pu observer que plusieurs se liquéfient réellement lorsqu'on les soumet à une pression suffisante. Tel est l'acide carbonique, par exemple, qui devient liquide sous une pression de 45 atmosphères. D'autres gaz se liquéfient même à des pressions beaucoup moindres.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Quoi qu'il en soit, la vapeur d'eau permet d'observer facilement ce qui ne se rencontre que peu ou point avec les gaz permanents, c'est-à-dire la condensation qui se manifeste lorsque l'on essaie de la comprimer au delà d'une certaine limite. C'est cette limite que l'on a désignée par le *maximum de force élastique*, et qui varie avec la température du liquide qui l'a émise.

Il résulte de la définition même et de l'expérience que, dans le vide, quand la quantité de liquide est suffisante, la vapeur atteint immédiatement son maximum de force élastique à partir duquel la vaporisation s'arrête, si toutefois l'espace n'éprouve pas de modifications. En disant aussi que dans ce moment l'espace *est saturé*, cette expression rend bien l'idée que l'on doit se faire du mode de formation de la vapeur qui ne peut continuer de se dégager qu'autant que sa propre pression ne s'oppose pas à ce que les molécules liquides continuent de se distendre.

## RELATION ENTRE LA FORCE ÉLASTIQUE DE LA VAPEUR ET SA TEMPÉRATURE

7. Maintenant que l'on a pu concevoir le principe de la formation de la vapeur, mise en évidence par son développement dans le vide, il devient facile de faire voir les conditions de l'accroissement de sa puissance suivant sa température.

Dans l'expérience citée plus haut, l'instrument étant le baromètre, qui ne permet pas de mesurer une pression plus grande que celle de l'atmosphère équilibrée par sa colonne de mercure, on ne pouvait pas observer les effets de la vapeur sous une température plus élevée que 100 degrés, dans lequel cas la pression de la vapeur est capable d'annuler entièrement la colonne de mercure. Les expériences ne pouvaient donc porter que sur une série de températures comprises de zéro (la dernière limite de liquéfaction de l'eau) jusqu'à 100 degrés, où l'instrument cesse de fonctionner, puisque le mercure se trouve ramené au même niveau dans la cuvette et dans le tube vertical.

Cependant ce premier résultat a eu une très-grande importance, puisqu'il a fourni une connaissance exacte des propriétés générales de la vapeur d'eau, et qu'il a permis, en outre, de constituer une unité de mesure de sa puissance.

Tout en conservant la faculté de mesurer la pression de la vapeur par la hauteur de la colonne de mercure déprimée, on a choisi, comme grande unité, la pression de l'atmosphère à laquelle celle de la vapeur devient égale à une certaine température, ainsi qu'on l'a vu précédemment.

Par conséquent, on dit que la pression de la vapeur est égale à *une atmosphère* lorsqu'elle est capable de remplacer la colonne barométrique pour faire équilibre au poids de l'air extérieur. Cette pression exprimée en poids et par unité de surface est égale, comme on sait, à

$1^k,0333$ par centimètre carré.

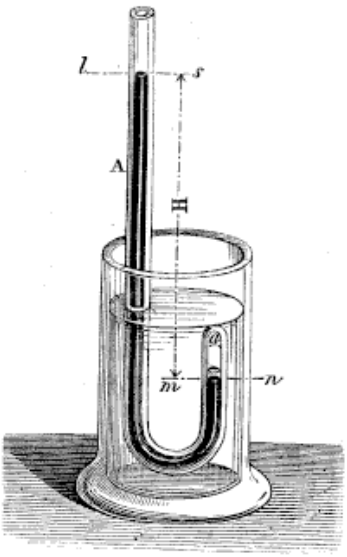
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

C'est tout simplement le poids d'une colonne de mercure ayant 76 centimètres de hauteur et 1 centimètre carré de base.

8. Si, comme nous l'expliquerons plus loin, l'eau ne peut pas dépasser la température de 100 degrés du thermomètre centigrade lorsqu'on la chauffe à l'air libre, les choses se passent tout différemment lorsqu'elle se trouve confinée dans un vase clos d'où la vapeur ne puisse pas s'échapper dans l'atmosphère au fur et à mesure de sa formation. Elle peut alors s'élever de température et donner de la vapeur dont la pression augmente, pour ainsi dire, indéfiniment.

Pour établir une première démonstration de ce fait, les physiciens ont recours à une expérience très-simple dont nous devons dire quelques mots.

Fig. 3.




On prend un tube A (fig. 3), recourbé en U, et dont l'une des branches, plus longue que l'autre, est ouverte à l'air libre, tandis que l'autre est exactement fermée. On le remplit partiellement de mercure, en y introduisant aussi une goutte d'eau qui vient se loger en $a$, au sommet de la colonne de mercure dans la branche fermée.

Si, les choses étant ainsi disposées, on plonge l'instrument dans un bain d'huile dont la température soit plus élevée que 100 degrés (ce qui est facile), la vapeur se forme en se développant de $a$ en $mn$, en repoussant le mercure qui s'élève dans la grande branche du tube jusqu'à une certaine hauteur en $sl$.

Il devient alors évident que la vapeur possède une pression supérieure à celle de l'atmosphère, puisqu'à l'état liquide elle supportait déjà cette pression qui lui était transmise par le mercure, qu'elle a néanmoins repoussé en se transformant en vapeur.

Sa pression véritable est donc égale, en résumé, à celle de l'atmosphère plus celle de la colonne de mercure H mesurée de la surface libre $sl$ à la ligne horizontale $mn$ passant par le sommet de la colonne de mercure dans la courte branche du tube.

Admettons comme exemple que, dans l'expérience précitée, la colonne de mercure excédante ait atteint une hauteur H égale à 45 centimètres; comment devra-t-on s'exprimer pour évaluer la pression de la vapeur qui s'est formée?

Avec un baromètre indiquant que la pression atmosphérique est équilibrée au moment de l'expérience par une colonne de mercure de 76 centimètres de hauteur, la vapeur aura surmonté la résistance d'une colonne égale à

$$76 + 45 = 121 \text{ centimètres.}$$

Pour établir la relation entre cette hauteur de pression et celle de l'atmosphère, on dira :

$$\frac{121}{76} = 1{,}592.$$



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

C'est-à-dire que la pression de la vapeur est égale à 1 atmosphère plus 592 millièmes.

Quant à la pression exprimée en poids et par unité de surface, il suffira de connaître la densité du liquide soulevé (le mercure) et d'en déterminer le poids pour la hauteur trouvée et par centimètre carré, cette superficie prise pour unité.

Cette densité étant de 13,598, soit 13$^{gr}$.598 pour 1 centimètre cube, on aurait :

$$13{,}598 \times 121 = 1645 \text{ grammes.}$$

On dit alors que la vapeur exerce une pression représentée par un poids égal à 1$^{k}$645 sur un centimètre carré.

Remarque. — Afin qu'il ne se présente pas de doute à l'esprit au sujet de la condition du vide supposé précédemment pour la formation de la vapeur, circonstance qui ne se reproduit pas dans l'expérience qui vient d'être citée, il suffit de rappeler que le vide ne modifie pas autrement le phénomène de la formation de la vapeur que de permettre cette formation instantanément, et aux plus basses températures, même celle de la glace.

Par conséquent, les propriétés observées sont exactement les mêmes dans les deux cas. S'il était possible de se transporter dans un lieu où la pression barométrique atteignît une hauteur de 121 centimètres, on pourrait faire l'expérience avec un baromètre et obtenir des résultats absolument identiques.

9. Si l'expérience qui précède a permis d'observer la pression de la vapeur pour des températures qui dépassent un peu 100 degrés, il n'en a pas été de même pour des températures sensiblement plus élevées; car alors on devait craindre que les instruments ne fussent pas assez résistants, attendu que la pression de la vapeur atteint très-rapidement des pressions considérables.

Les premiers observateurs français qui s'occupèrent de cette question d'une manière approfondie furent les célèbres Arago et Dulong, auxquels l'Académie des Sciences confia l'utile et importante mission de déterminer la force élastique de la vapeur d'eau suivant une étendue la plus grande possible de l'échelle des températures. Ce travail ne fut terminé qu'en 1830.

Voici comment les illustres savants procédèrent pour obtenir de hautes températures et mesurer les forces élastiques correspondantes de la vapeur.

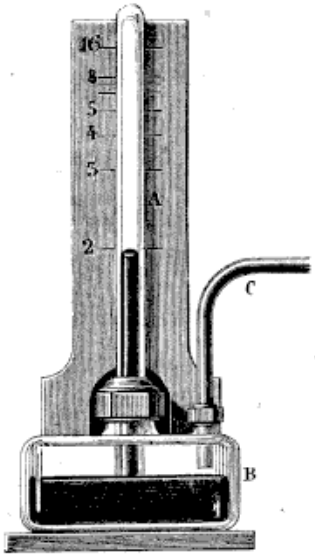
L'eau était renfermée dans une chaudière en forte tôle disposée à l'intérieur d'un fourneau en briques. Ce vase étant parfaitement clos par rapport à l'atmosphère, des canons de fusil, ouverts en haut et fermés en bas, étaient scellés dans le couvercle, et descendaient, l'un jusqu'au fond du liquide et l'autre seulement dans la partie supérieure du vase où la vapeur se confinait; ils étaient tous deux remplis de mercure, lequel se mettait nécessairement en équilibre de température avec le fluide dans lequel plongeaient les tubes, température que l'on pouvait mesurer avec des thermomètres convenablement disposés pour ne pas éprouver de refroidissement.

Pouvant connaître ainsi à chaque instant la température du liquide et de la va-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

peur qu'il émettait, cette vapeur était mise en communication avec un appareil propre à en mesurer la tension correspondante.

Fig. 4.




Cet instrument consistait en ce que l'on a nommé plus tard *un manomètre à air comprimé*. Il se compose, en principe, d'un tube A, fig. 4, fermé à son extrémité supérieure et plongeant par son extrémité ouverte dans une cuvette B contenant du mercure. Une garniture faite avec soin pour l'ajustement du tube avec la cuvette empêche toute communication avec l'extérieur.

Un second tube C, par une disposition semblable, pénètre dans la cuvette, sans plonger dans le mercure, et communique par son autre extrémité avec le vase qui renferme le fluide dont on veut mesurer la force élastique.

Pour comprendre le jeu du manomètre, supposons qu'au début de l'expérience ces diverses capacités soient en parfaite communication et que le tout soit rempli d'air atmosphérique, il est clair que la surface du mercure dans la cuvette se trouvera également pressée en tous ses points et que son niveau sera par conséquent le même à l'intérieur du tube A, qui y plonge, qu'à l'extérieur.

Mais bientôt, la température du liquide commençant à s'élever, il se forme de la vapeur qui chasse peu à peu de la chaudière l'air qu'elle contenait et auquel on a laissé une issue momentanée. Tant que la température n'a pas atteint le point où la vapeur dépasse la tension de l'atmosphère (7), le niveau du mercure ne change aucunement; mais à partir de cet instant, par la disposition spéciale des vases clos, la température du liquide et de la vapeur augmente, ainsi que la force élastique du fluide aériforme; on voit alors le mercure s'élever dans le tube, par l'effet de cet excès de tension qui se manifeste dans la cuvette, au-dessus du mercure comme dans le récipient où la vapeur se forme.

Mais le mercure, en s'élevant dans le tube, comprime nécessairement l'air qu'il renferme, et qui ne peut s'en échapper; cette compression ne peut être qu'égale, en force élastique, à celle de la vapeur, en vertu de l'égalité de pression transmise par les liquides, sauf une correction à faire à cause du poids de la colonne de mercure soulevée.

Cette compression de l'air au-dessus de la colonne de mercure sert donc de mesure à la force élastique de la vapeur; elle est d'autant plus facile à reconnaître, que l'air se comprime en suivant une loi bien connue sous le nom de *loi de Mariotte*, et que l'on énonce ainsi :

*Les volumes des gaz sont inversement proportionnels aux pressions qu'ils supportent.*

Nous reviendrons sur cette loi, que nous citons seulement pour l'intelligence de l'expérience actuelle.

Par conséquent, en prenant pour unité le volume de l'air contenu dans le tube au début de l'opération sous la pression atmosphérique, lorsque le mercure, en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

s'élevant dans le tube, aura réduit le volume d'air à moitié, on en conclura qu'il supporte une pression double, ou 2 atmosphères;

Quand il sera réduit au tiers, une pression triple ou 3 atmosphères;

Au quart, une pression quadruple ou 4 atmosphères, etc.

Le manomètre ainsi disposé permet donc de connaître à chaque instant la force élastique de la vapeur formée, en même temps que les thermomètres donnent sa température.

Là réside entièrement le principe des expériences citées, en en éliminant le détail de toutes les dispositions particulières et minutieuses tendant à empêcher les erreurs et à assurer la parfaite exactitude des résultats.

Il nous suffira d'ajouter qu'en prenant pour unité de tension celle de l'atmosphère qui est représentée par la hauteur barométrique ordinaire d'environ 76 centimètres, les expériences ont été poussées jusqu'à 24 atmosphères.

Ces expériences, ainsi que d'autres exécutées pour une série de températures au-dessous de 100 degrés centésimaux, ont permis de former une table très-complète des forces élastiques correspondantes de la vapeur d'eau, et une formule qui en représente la loi, et qui a permis de calculer les quantités interpolaires.

Nous donnons la partie de cette table qui est plus spécialement relative aux limites de la pratique. Elle se divise d'ailleurs en deux parties, dont l'une renferme les forces élastiques de la vapeur pour des températures de 0 à 100 degrés, et l'autre, les températures qui correspondent à des forces élastiques variant de 1 à 50 atmosphères. Les résultats de 24 à 50 ont été trouvés, évidemment, au moyen de la formule déduite de l'expérience.

D'après la définition ci-dessus (6), ces forces élastiques sont des *maxima*, c'est-à-dire celles où, pour chaque température, la vapeur *sature l'espace* et où elle commencerait à repasser à l'état liquide si l'on essayait de la comprimer.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## PREMIÈRE TABLE.

DES FORCES ÉLASTIQUES MAXIMUM DE LA VAPEUR D'EAU POUR LES TEMPÉRATURES DE 0° A 100 DEGRÉS CENTIGRADES.

| DEGRÉS du thermomètre centigrade. | TENSION de la vapeur en millimètres. | PRESSION sur 1 centimètre carré en kilog. | DEGRÉS du thermomètre centigrade. | TENSION de la vapeur en millimètres. | PRESSION sur 1 centimètre carré en kilog. |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 5,059 | 0,0069 | 51 | 93,301 | 0,12676 |
| 1 | 5,393 | 0,0074 | 52 | 98,075 | 0,13325 |
| 2 | 5,748 | 0,0078 | 53 | 103,060 | 0,13999 |
| 3 | 6,123 | 0,0084 | 54 | 108,070 | 0,14710 |
| 4 | 6,523 | 0,0089 | 55 | 113,710 | 0,15449 |
| 5 | 6,947 | 0,0094 | 56 | 119,390 | 0,16220 |
| 6 | 7,396 | 0,0101 | 57 | 125,310 | 0,17035 |
| 7 | 7,874 | 0,0107 | 58 | 131,500 | 0,17866 |
| 8 | 8,375 | 0,0114 | 59 | 137,940 | 0,18736 |
| 9 | 8,909 | 0,0122 | 60 | 144,660 | 0,19653 |
| 10 | 9,475 | 0,0129 | 61 | 151,700 | 0,20610 |
| 11 | 10,074 | 0,0137 | 62 | 158,960 | 0,21586 |
| 12 | 10,707 | 0,0146 | 63 | 165,560 | 0,22639 |
| 13 | 11,378 | 0,0155 | 64 | 174,470 | 0,23758 |
| 14 | 12,087 | 0,0165 | 65 | 182,710 | 0,24823 |
| 15 | 12,837 | 0,0170 | 66 | 191,270 | 0,25986 |
| 16 | 13,630 | 0,0186 | 67 | 200,180 | 0,27196 |
| 17 | 14,468 | 0,0197 | 68 | 209,440 | 0,28454 |
| 18 | 15,353 | 0,0209 | 69 | 219,060 | 0,29761 |
| 19 | 16,288 | 0,0222 | 70 | 229,070 | 0,31121 |
| 20 | 17,314 | 0,0235 | 71 | 239,450 | 0,32532 |
| 21 | 18,317 | 0,0250 | 72 | 250,230 | 0,33996 |
| 22 | 19,447 | 0,0265 | 73 | 261,430 | 0,35518 |
| 23 | 20,577 | 0,0281 | 74 | 273,030 | 0,37094 |
| 24 | 21,805 | 0,0297 | 75 | 285,070 | 0,39632 |
| 25 | 23,090 | 0,0314 | 76 | 297,570 | 0,40428 |
| 26 | 24,452 | 0,0334 | 77 | 310,490 | 0,42184 |
| 27 | 25,881 | 0,0353 | 78 | 323,890 | 0,44004 |
| 28 | 27,390 | 0,0374 | 79 | 337,760 | 0,45888 |
| 29 | 29,045 | 0,0396 | 80 | 352,080 | 0,47834 |
| 30 | 30,643 | 0,0418 | 81 | 367,000 | 0,49860 |
| 31 | 32,410 | 0,0440 | 82 | 382,380 | 0,51950 |
| 32 | 34,261 | 0,0465 | 83 | 398,280 | 0,54110 |
| 33 | 36,188 | 0,0492 | 84 | 414,730 | 0,56345 |
| 34 | 38,254 | 0,0520 | 85 | 431,710 | 0,58652 |
| 35 | 40,404 | 0,0549 | 86 | 449,260 | 0,61036 |
| 36 | 42,743 | 0,0581 | 87 | 467,380 | 0,63498 |
| 37 | 45,038 | 0,0612 | 88 | 486,090 | 0,66040 |
| 38 | 47,759 | 0,0646 | 89 | 505,380 | 0,68664 |
| 39 | 50,447 | 0,0681 | 90 | 525,28 | 0,71364 |
| 40 | 52,998 | 0,0720 | 91 | 547,80 | 0,64152 |
| 41 | 55,772 | 0,0758 | 92 | 566,95 | 0,77026 |
| 42 | 58,792 | 0,0799 | 93 | 588,74 | 0,79986 |
| 43 | 61,958 | 0,0818 | 94 | 611,18 | 0,83035 |
| 44 | 65,627 | 0,0892 | 95 | 634,27 | 0,86172 |
| 45 | 68,751 | 0,0934 | 96 | 658,05 | 0,89402 |
| 46 | 72,393 | 0,0983 | 97 | 682,59 | 0,92736 |
| 47 | 76,205 | 0,1035 | 98 | 707,63 | 0,96138 |
| 48 | 80,195 | 0,1090 | 99 | 733,46 | 0,99448 |
| 49 | 84,370 | 0,1166 | 100 | 760,00 | 1,03253 |
| 50 | 88,743 | 0,1206 | | | |

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

### DEUXIÈME TABLE.

DES TEMPÉRATURES DE LA VAPEUR D'EAU POUR DES TENSIONS DE 1 A 50 ATMOSPHÈRES.

| FORCES élastiques exprimées en atmosphères de 76 cent. de mercure. | TEMPÉRATURES correspondantes données par le thermomètre centigrade à mercure. | PRESSION sur 1 centimètre carré en kilogrammes. | FORCES élastiques exprimées en atmosphères de 76 cent. de mercure. | TEMPÉRATURES correspondantes données par le thermomètre centigrade à mercure. | PRESSION sur 1 centimètre carré en kilogrammes. |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 100 | 1,033 | 13 | 193,7 | 13,429 |
| 1 1/2 | 112,2 | 1,549 | 14 | 197,19 | 14,462 |
| 2 | 121,4 | 2,066 | 15 | 200,48 | 15,495 |
| 2 1/2 | 128,8 | 2,582 | 16 | 203,60 | 16,528 |
| 3 | 135,1 | 3,039 | 17 | 206,57 | 17,561 |
| 3 1/2 | 140,6 | 3,615 | 18 | 209,4 | 18,594 |
| 4 | 145,4 | 4,132 | 19 | 212,1 | 19,627 |
| 4 1/2 | 149,06 | 4,648 | 20 | 214,7 | 20,660 |
| 5 | 153,08 | 5,165 | 21 | 217,2 | 21,693 |
| 5 1/2 | 156,8 | 5,681 | 22 | 219,6 | 22,726 |
| 6 | 160,2 | 6,198 | 23 | 221,9 | 23,759 |
| 6 1/2 | 163,48 | 6,714 | 24 | 224,2 | 24,792 |
| 7 | 166,5 | 7,231 | 25 | 226,3 | 25,825 |
| 7 1/2 | 169,37 | 7,747 | 30 | 236,2 | 30,990 |
| 8 | 172,1 | 8,264 | 35 | 244,85 | 36,155 |
| 9 | 177,1 | 9,297 | 40 | 252,55 | 41,320 |
| 10 | 181,6 | 10,33 | 45 | 259,52 | 46,485 |
| 11 | 186,03 | 11,363 | 50 | 265,89 | 51,650 |
| 12 | 190 | 12,396 | | | |

Une troisième table a été établie au moyen du calcul pour des pressions de 100 à 1000 atmosphères. Quoique de l'avis même des savants les nombres qu'elle renferme comme température ne puissent être certains puisqu'ils ne sont pas sanctionnés par l'expérience, nous la reproduirons néanmoins pour servir de terme de comparaison.

### TROISIÈME TABLE.

DES TEMPÉRATURES DE LA VAPEUR D'EAU POUR DES TENSIONS DE 100 A 1000 ATMOSPHÈRES.

| FORCES élastiques exprimées en atmosphères. | TEMPÉRATURES correspondantes. | PRESSION sur 1 centimètre carré en kilogrammes. | FORCES élastiques exprimées en atmosphères. | TEMPÉRATURES correspondantes. | PRESSION sur 1 centimètre carré en kilogrammes. |
|---|---|---|---|---|---|
| 100 | 311,36 | 103,30 | 600 | 462,71 | 619,8 |
| 200 | 363,58 | 206,60 | 700 | 478,45 | 723,1 |
| 300 | 397,65 | 309,90 | 800 | 492,47 | 826,4 |
| 400 | 423,57 | 413,20 | 900 | 505,16 | 929,7 |
| 500 | 444,70 | 516,50 | 1000 | 516,76 | 1033,0 |

Mais les deux premières tables présentent, au contraire, toute la garantie que la pratique exige. Des recherches plus récentes, dues à M. Regnault, membre de l'In-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

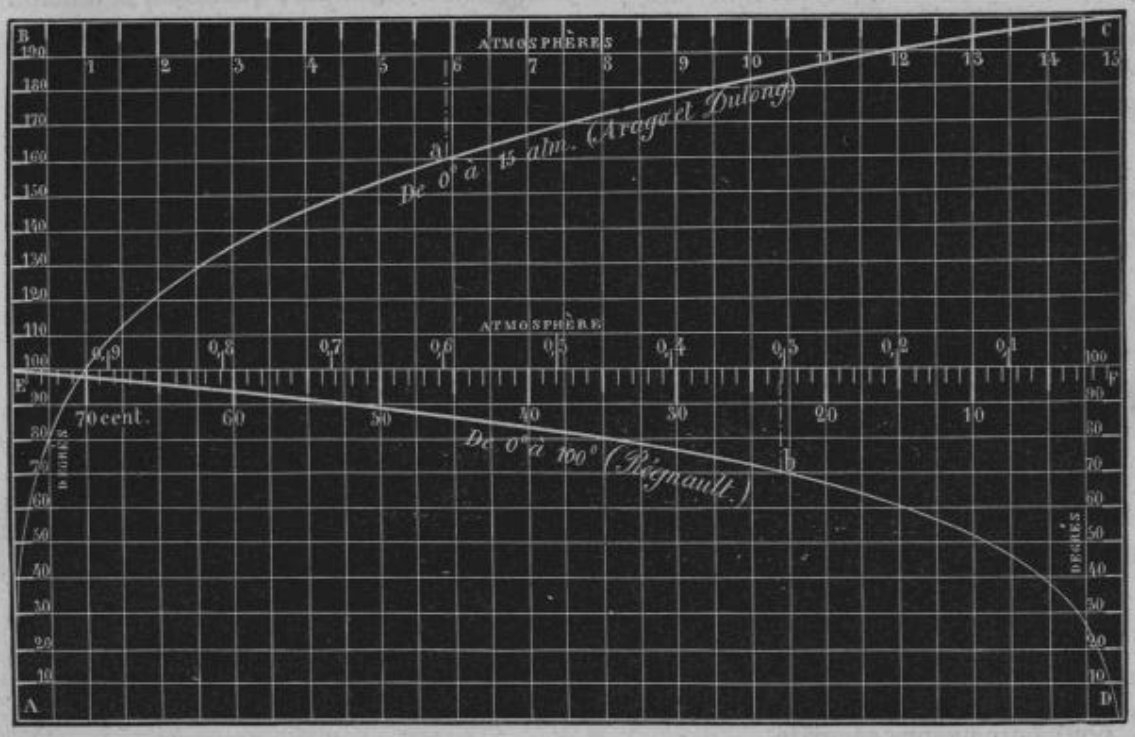
stitut, il résulte en effet que, sauf de légères différences attribuables aux méthodes différentes d'interpolation, on peut compter généralement sur leur exactitude.

10. En examinant ces tables avec un peu d'attention, on est frappé d'un résultat très-remarquable : c'est la promptitude avec laquelle la tension de la vapeur s'accroît, comparativement à sa température, et combien ces deux effets sont loin d'être proportionnels.

On peut rendre cependant cette vérité beaucoup plus apparente encore à l'aide d'un tracé graphique qui, tout étant construit au moyen des nombres de la table, met le résultat qu'on peut en déduire complétement en évidence.

La première idée d'un tracé de ce genre appartient à M. Clément-Désormes, sur les indications de qui M. Leblanc, notre prédécesseur, a exécuté un tableau que l'on peut voir dans les galeries du Conservatoire des arts et métiers de Paris. Celui que nous reproduisons, fig. 5, comprend en outre une courbe spéciale des tensions de 0 à 1 atmosphère, d'après la table dressée par M. Regnault.

Fig. 5.




Le principe du tracé est d'une très-grande simplicité. L'échelle verticale AB est divisée en parties égales indiquant les températures successives de 0 à 200 degrés. La ligne horizontale BC est divisée de même en parties égales qui correspondent à des pressions exprimées en atmosphères. Des points ont été posés sur le diagramme à la rencontre de ces lignes verticales et horizontales, c'est-à-dire de ces abscisses et ordonnées passant par les températures et les tensions qui se trouvent en regard

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les unes des autres dans les tables précédentes, et ces points ont été réunis par la courbe AC.

Une deuxième courbe DE a été tracée pour correspondre aux tensions comprises entre 0 et 100 degrés, et pouvoir apprécier les résultats plus facilement par l'agrandissement de l'échelle. En effet la longueur totale du tableau, qui correspond en BC à 15 atmosphères, n'en représente qu'une seule à l'égard de la deuxième courbe DE, dont l'échelle graduée des tensions est en FE et représente à la fois des fractions d'atmosphère de 760 millimètres de mercure, et des hauteurs absolues de ce même liquide exprimées en centimètres.

Ainsi, par la double graduation de cette échelle, on peut reconnaître simultanément que de la vapeur à une température déterminée correspond à une telle fraction d'atmosphère et à un nombre correspondant de centimètres de mercure.

Prenons, par exemple, la température 70 degrés sur l'échelle DF, et de son intersection *b* avec la courbure DE élevons une verticale jusqu'à l'échelle EF, nous trouvons ainsi que cette verticale correspond sur l'échelle à une hauteur de mercure de 23 centimètres et à 0,3 d'atmosphères.

Cherchons, de même, avec la grande courbe et l'échelle AB, quelle est la tension correspondant à 160 degrés; par l'intersection en *a*, élevant une verticale, nous lisons sur l'échelle supérieure 5,9 atmosphères.

Il est évident que l'opération inverse, consistant à trouver les températures pour une tension proposée, se fait exactement de la même façon, la disposition du tableau ne se prêtant pas moins à l'une qu'à l'autre.

La structure de ces courbes suffit pour faire comprendre l'accroissement rapide de la tension de la vapeur, puisque, pour qu'il fût proportionnel, il faudrait que les points de rencontre des lignes passant par les températures et les tensions se trouvassent situés sur une ligne droite qui serait tracée de A en C.

Il est bien loin d'en être ainsi, puisque la table indique que la force élastique de la vapeur étant de 382 millimètres de mercure, ou une demi-atmosphère, environ, à une température de 82 degrés; elle atteint le double ou 1 atmosphère à 100 degrés, 2 atmosphères à 121 degrés, 3 atmosphères à 135 degrés, et enfin elle parvient à 24 atmosphères avant que sa température se soit élevée à 225 degrés.

La vapeur est donc une puissance dont il ne faut user qu'avec beaucoup de précaution, puisque, arrivée dans de certaines limites, quelques degrés de température suffisent pour doubler sa pression et amener de grands désastres. C'est ce que tous les mécaniciens savent et que les chauffeurs surtout ne devraient jamais oublier pour leur propre sécurité.

## DENSITÉ DE LA VAPEUR D'EAU

11. La densité de la vapeur est très-importante à connaître pour l'étude des machines, puisqu'elle conduit à l'appréciation des quantités d'eau à fournir pour l'alimentation d'un moteur déterminé.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Avant de donner la simple nomenclature des valeurs qui correspondent aux densités diverses de la vapeur suivant ses différentes tensions et températures, une explication est nécessaire pour établir nettement l'état où elle se trouve quand on lui applique une densité quelconque.

Un volume de vapeur d'eau peut être supposé dans deux situations différentes :

1° Renfermé dans un vase avec une certaine quantité du liquide qui l'a émis;

2° Renfermé dans un vase qui s'en trouve complétement rempli et ne contient aucune partie liquide.

Première condition. — Le vase contenant du liquide et de la vapeur déjà formée, si l'on continue de fournir de la chaleur, qu'arrivera-t-il?

L'eau engendrera de nouvelle vapeur qui viendra se joindre à celle déjà formée; mais comme la vapeur occupe beaucoup plus d'espace que l'eau vaporisée, il en résultera que, le volume primitif n'augmentant que d'une quantité insensible, sa pression s'accroîtra notablement, et d'une façon analogue à celle d'un gaz que l'on comprime dans une capacité déterminée.

Cet effet se combine, d'ailleurs, avec la tendance à la dilatation qu'éprouve la vapeur primitivement formée par l'élévation de température.

Deuxième condition. — Un vase ne contenant que de la vapeur et point de liquide, si l'on élève la température de cette vapeur, elle éprouvera une tendance à la dilatation comme un gaz permanent, et sa tension augmentera dans le même rapport.

Mais, dans ce dernier cas, la progression des forces élastiques ne sera plus aussi rapide que dans le premier, puisqu'elle résulte de l'effort de la dilatation qui, dans certaines limites, est proportionnelle à l'élévation de la température.

Conséquences. — Puisque, dans la première des conditions, l'espace occupé par la vapeur, restant sensiblement le même, se charge de nouvelles quantités d'eau évaporées au fur et à mesure que la température et la tension s'élèvent, il est clair que la densité de cette vapeur varie en même temps, ce qui n'arrive pas dans la seconde condition où la vapeur tend à se dilater seulement et ne se charge pas.

Donc la densité particulière de la vapeur d'eau est prise dans la première des deux conditions, où chaque tension nouvelle correspond aussi à de nouvelles quantités d'eau vaporisées.

Nous devons à Gay-Lussac les notions les plus complètes à cet égard. Cet illustre savant s'est livré à des recherches expérimentales qui lui ont permis de déterminer une formule à l'aide de laquelle il a calculé une table des densités de la vapeur d'eau, en se basant sur celles de MM. Arago et Dulong, relativement à la relation entre la température et la tension.

Pour bien comprendre l'application des densités, il faut se rappeler :

1° Que ces densités correspondent aux volumes occupés par la vapeur à son maximum de force élastique, à partir duquel une compression mécanique la ferait repasser à l'état liquide (6);

2° Qu'un poids déterminé de vapeur correspond exactement à celui de l'eau qui l'a formée.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## PREMIÈRE TABLE.

DES DENSITÉS ET VOLUMES DE LA VAPEUR D'EAU AU MAXIMUM DE FORCE ÉLASTIQUE DE 0° A 100 DEGRÉS.

La densité de l'eau liquide à 0° prise pour unité.

| TEMPÉRATURE. | TENSION en millimètre. | DENSITÉ. | VOLUME. | TEMPÉRATURE. | TENSION en millimètre. | DENSITÉ. | VOLUME. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 5,059 | 0,00000540 | 182323 | 51 | 93,301 | 0,00008354 | 11971 |
| 1 | 5,393 | 573 | 174495 | 52 | 98,075 | 8753 | 11424 |
| 2 | 5,748 | 609 | 164332 | 53 | 103.060 | 9174 | 10901 |
| 3 | 6,123 | 646 | 154842 | 54 | 108,270 | 0,00009606 | 10410 |
| 4 | 6,523 | 686 | 145886 | 55 | 113,710 | 0,00010054 | 9946 |
| 5 | 6,947 | 727 | 137488 | 56 | 119,390 | 10525 | 9501 |
| 6 | 7,396 | 772 | 129587 | 57 | 125,310 | 11014 | 9082 |
| 7 | 7,871 | 818 | 122241 | 58 | 131,500 | 11523 | 8680 |
| 8 | 8,375 | 867 | 115305 | 59 | 137,940 | 12044 | 8303 |
| 9 | 8,909 | 919 | 108790 | 60 | 144,660 | 12599 | 7937 |
| 10 | 9,475 | 0,00000974 | 102670 | 61 | 151,700 | 13179 | 7594 |
| 11 | 10,074 | 0,00001032 | 99202 | 62 | 158,960 | 13760 | 7267 |
| 12 | 10,707 | 1092 | 94564 | 63 | 166.560 | 14374 | 6957 |
| 13 | 11,378 | 1157 | 86426 | 64 | 174,470 | 15010 | 6662 |
| 14 | 12,087 | 1224 | 81686 | 65 | 182,710 | 15668 | 6382 |
| 15 | 12,837 | 1299 | 77008 | 66 | 191,270 | 16356 | 6114 |
| 16 | 13,630 | 1372 | 72913 | 67 | 200,180 | 17060 | 5860 |
| 17 | 14,468 | 1451 | 68923 | 68 | 209,440 | 17797 | 5619 |
| 18 | 15,353 | 1534 | 65201 | 69 | 219,060 | 18566 | 5386 |
| 19 | 16,288 | 1622 | 61654 | 70 | 229,070 | 19355 | 5167 |
| 20 | 17,314 | 1718 | 58224 | 71 | 239,450 | 20174 | 4957 |
| 21 | 18,347 | 1811 | 55206 | 72 | 250,230 | 21013 | 4759 |
| 22 | 19,417 | 1914 | 52260 | 73 | 261,430 | 21889 | 4569 |
| 23 | 20,577 | 2021 | 49487 | 74 | 273,030 | 22794 | 4387 |
| 24 | 21,805 | 2133 | 46877 | 75 | 285,070 | 23789 | 4204 |
| 25 | 23,090 | 0,00002252 | 44411 | 76 | 297,570 | 24702 | 4048 |
| 26 | 24,452 | 2376 | 42084 | 77 | 310,490 | 25699 | 3891 |
| 27 | 25,881 | 2507 | 39895 | 78 | 323,890 | 26739 | 3741 |
| 28 | 27,390 | 2643 | 37838 | 79 | 337,760 | 27789 | 3599 |
| 29 | 29,045 | 2794 | 35796 | 80 | 352,080 | 0,00028889 | 3462 |
| 30 | 30,643 | 2938 | 34041 | 81 | 367,000 | 30025 | 3331 |
| 31 | 32,410 | 3097 | 32291 | 82 | 382,380 | 31195 | 3206 |
| 32 | 34,261 | 3263 | 30650 | 83 | 398,280 | 32399 | 3087 |
| 33 | 36,188 | 3435 | 29112 | 84 | 414,730 | 33637 | 2973 |
| 34 | 38,254 | 3619 | 27636 | 85 | 431,710 | 34916 | 2864 |
| 35 | 40,404 | 3809 | 26253 | 86 | 449,260 | 36237 | 2760 |
| 36 | 42,743 | 4017 | 24897 | 87 | 467,380 | 37590 | 2660 |
| 37 | 45,038 | 4219 | 23704 | 88 | 486,090 | 38984 | 2565 |
| 38 | 47,579 | 0,00004442 | 22513 | 89 | 505,380 | 40417 | 2474 |
| 39 | 50,147 | 4666 | 21429 | 90 | 525,280 | 41891 | 2387 |
| 40 | 52,998 | 4916 | 20343 | 91 | 545,800 | 0,00043405 | 2304 |
| 41 | 55,772 | 5156 | 19396 | 92 | 566,950 | 44956 | 2224 |
| 42 | 58,792 | 5418 | 18459 | 93 | 588,740 | 46556 | 2148 |
| 43 | 61,958 | 5691 | 17572 | 94 | 611,180 | 48204 | 2075 |
| 44 | 65,627 | 6023 | 16805 | 95 | 634,270 | 49886 | 2005 |
| 45 | 68,751 | 6274 | 15938 | 96 | 658,050 | 51613 | 1938 |
| 46 | 72,393 | 6585 | 15185 | 97 | 682,590 | 53388 | 1873 |
| 47 | 76,205 | 6910 | 14472 | 98 | 707,630 | 55191 | 1812 |
| 48 | 80,195 | 7242 | 13809 | 99 | 733,460 | 57055 | 1751 |
| 49 | 84,370 | 7602 | 13154 | 100 | 760,000 | 0,00058955 | 1696 |
| 50 | 88,742 | 0,00007970 | 12546 | | | | |

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## DEUXIÈME TABLE.

DES DENSITÉS ET VOLUMES DE LA VAPEUR D'EAU DE 1 A 50 ATMOSPHÈRES.

| TEMPÉRATURE. | FORCES élastiques exprimées en atmosph. | DENSITÉ. | VOLUME. | TEMPÉRATURE. | FORCES élastiques exprimées en atmosph. | DENSITÉ. | VOLUME. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 100 | 1 | 0,0005895 | 1696 | 193,7 | 13 | 0,006107 | 163,74 |
| 112,2 | 1,5 | 0,0008563 | 1167,8 | 197,2 | 14 | 0,006527 | 153,10 |
| 121,4 | 2 | 0,0011447 | 897,9 | 200,5 | 15 | 0,006944 | 144,00 |
| 128,8 | 2,5 | 0,0013673 | 731,39 | 203,6 | 16 | 0,007359 | 135,90 |
| 135,1 | 3 | 0,0016150 | 619,19 | 206,6 | 17 | 0,007769 | 128,71 |
| 140,6 | 3,5 | 0,0018589 | 537,96 | 209,4 | 18 | 0,008178 | 122,28 |
| 145,4 | 4 | 0,0020997 | 476,26 | 212,1 | 19 | 0,008583 | 116,51 |
| 149,1 | 4,5 | 0,0023410 | 427,18 | 214,7 | 20 | 0,008986 | 111,28 |
| 153,1 | 5 | 0,0025763 | 388,16 | 217,2 | 21 | 0,009387 | 106,53 |
| 156,8 | 5,5 | 0,0028094 | 355,99 | 219,6 | 22 | 0,009785 | 102,19 |
| 160,2 | 6 | 0,0030402 | 328,93 | 221,9 | 23 | 0,010182 | 98,21 |
| 163,5 | 6,5 | 0,0032683 | 305,98 | 224,2 | 24 | 0,010575 | 94,56 |
| 166,5 | 7 | 0,0034944 | 286,12 | 226,3 | 25 | 0,010968 | 91,17 |
| 169,4 | 7,5 | 0,0037217 | 268,82 | 236,2 | 30 | 0,012903 | 77,50 |
| 172,1 | 8 | 0,0039434 | 253,59 | 244,8 | 35 | 0,014663 | 68,20 |
| 177,1 | 9 | 0,0043865 | 227,98 | 252,5 | 40 | 0,016644 | 60,08 |
| 181,6 | 10 | 0,0048226 | 207,36 | 259,5 | 45 | 0,018497 | 54,06 |
| 186,0 | 11 | 0,0052557 | 190,27 | 265,9 | 50 | 0,020306 | 49,31 |
| 190,0 | 12 | 0,0056834 | 175,96 | | | | |

## TROISIÈME TABLE.

DES DENSITÉS ET VOLUMES DE LA VAPEUR D'EAU DE 100 A 1000 ATMOSPHÈRES.

| TEMPÉRATURE. | FORCES élastiques exprimées en atmosph. | DENSITÉ. | VOLUME. | TEMPÉRATURE. | FORCES élastiques exprimées en atmosph. | DENSITÉ | VOLUME. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 311,36 | 100 | 0,037447 | 26,72 | 462,74 | 600 | 0,17791 | 5,621 |
| 363,58 | 200 | 0,068635 | 14,570 | 478,45 | 700 | 0,20318 | 4,924 |
| 397,65 | 300 | 0,097671 | 10,238 | 492,47 | 800 | 0,2279 | 4,387 |
| 423,57 | 400 | 0,12534 | 7,978 | 505,16 | 900 | 0,2522 | 3,965 |
| 444,70 | 500 | 0,15202 | 6,578 | 516,76 | 1000 | 0,276 | 3,622 |

L'emploi de ces tables est facile à comprendre; on verra néanmoins des exemples nombreux de leur application en traitant directement des machines mêmes.

Quant à présent, faisons remarquer que toutes les valeurs qu'elles annoncent ne résultant pas d'expériences directes pourraient fort bien ne pas être en accord complet avec les faits réels. Mais en y constatant cette propriété, que les densités de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la vapeur d'eau augmentent avec la tension et la température, on en déduit qu'il est probable qu'à une température suffisamment élevée, elle serait égale à celle de l'eau ; c'est-à-dire qu'une certaine quantité d'eau pourrait passer en vapeur sans augmenter de volume; « elle aurait alors une tension, dit M. Pouillet, dans son excellent *Traité de physique,* de plusieurs centaines et peut-être de quelques milliers d'atmosphères. »

Ce savant nous apprend que M. Cagnard de la Tour a fait une expérience par laquelle il démontre un fait qui paraît être sur le chemin de ce résultat hypothétique. Elle consiste en « un tube de verre très-fort, rempli d'eau à peu près au quart de sa capacité, puis purgé d'air, et ensuite scellé; ce tube est exposé à une température graduellement croissante; alors, à un certain degré de chaleur, l'eau semble disparaître, le tube est comme vide; mais, en refroidissant un peu, le liquide reparaît presque subitement...; c'est à une température voisine de celle de la fusion du zinc (1) que cet effet se produit, c'est-à-dire que l'eau se vaporise complétement dans un espace quadruple de son volume à l'état liquide... »

## ÉBULLITION DE L'EAU

12. Les propriétés fondamentales de la formation de la vapeur d'eau exigent, pour être bien comprises, que le phénomène de l'ébullition soit aussi parfaitement expliqué. Mais ce phénomène nécessitant, pour être rendu compréhensible, une partie des notions qui précèdent, c'est pour cela qu'il ne vient qu'à leur suite.

Tout le monde sait ce qui se passe quand on chauffe, pendant un temps suffisant, un vase contenant de l'eau en libre communication avec l'atmosphère. On voit d'abord apparaître un brouillard qui semble émaner de la surface du liquide et qui devient de plus en plus intense au fur et à mesure que l'eau s'échauffe davantage. Puis il se produit ensuite un frémissement qui fait dire que le liquide *chante;* enfin des bulles, semblables à des bulles d'air, partent de la surface du vase la plus rapprochée du foyer et viennent se résoudre à la surface en donnant encore naissance à du brouillard.

Ces bulles ne sont autre chose que des molécules du liquide qui se transforme en vapeur, et qui, éprouvant de la part de ce liquide et de l'atmosphère qui le presse une résistance égale de toute part, lui oppose aussi une résistance égale et prend la forme sphérique suivant laquelle on voit cette vapeur s'élever dans le sein de la masse liquide.

Or, de la simple observation de ce fait, on peut tirer une conséquence immédiate : c'est que la vapeur ne peut se constituer en bulles qu'autant que sa pression est suffisante pour surmonter celle de la masse liquide et de l'atmosphère qui agit sur la surface libre.

Par conséquent, si cette pression, que nous désignerons par celle de l'ébullition,

(1) On estime que le zinc fond à la température de 360 degrés centigrades.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

correspond à une même température déterminée, il est évident que le liquide devra toujours atteindre cette température, si la pression atmosphérique est invariable, pour que l'ébullition se manifeste.

C'est en effet ce qui a rigoureusement lieu. Chaque fois que l'eau bout à l'air libre, sa température est toujours la même pour une même pression barométrique. Si on a trouvé que de l'eau à 100 degrés centésimaux engendre de la vapeur à la pression de l'atmosphère, c'est tout simplement parce qu'on a choisi le terme de son ébullition sous une pression barométrique de 76 centimètres de mercure pour marquer le centième degré du thermomètre centésimal.

L'ébullition d'un liquide ne peut donc avoir lieu qu'autant que la vapeur qu'il est capable d'émettre fait équilibre à la pression qu'il supporte de la part du milieu ambiant où il se trouve et de la masse même du liquide, ou plutôt de sa propre charge au-dessus de la surface chauffée.

Cette définition du phénomène suffit pour faire comprendre que le chiffre de la température à laquelle se produit l'ébullition d'un liquide est variable et change avec la pression du milieu, puisque la vaporisation peut se produire à tous les degrés. De l'eau à la température de la glace fondante donnerait naissance dans le vide à une ébullition si ce vide pouvait être parfait; mais, en pratique, il est toujours incomplet, et alors l'ébullition ne se produit qu'à quelques degrés au-dessus de zéro.

Sur le sommet du mont Blanc, où la pression atmosphérique est réduite à 417 millimètres environ, au lieu de 760, qu'elle marque au baromètre à la hauteur du niveau de la mer, l'eau entrerait en ébullition à la température de 84 degrés, pour laquelle on a vu, par l'une des tables précédentes (p. 13), que la force élastique de la vapeur était de 414 mil., soit un peu plus que la moitié d'une pression atmosphérique.

Enfin, l'eau est d'autant plus chaude, quand elle bout, que la pression qu'elle supporte est plus considérable, *et vice versâ*, ce qui fait que l'eau que l'on fait bouillir dans une vallée est plus élevée de température que celle qui bout sur une montagne et réciproquement. Ajoutons, comme corollaire, que, dans des situations semblables, tous les liquides donnent des vapeurs de forces expansives égales au moment de leur ébullition. C'est un axiome, puisque l'ébullition indique précisément que la force élastique de la vapeur est devenue égale à celle du milieu où elle se produit.

13. Fixité de la température au point d'ébullition. — Quelle que soit la température où se produit l'ébullition, elle reste invariable tout le temps que cette ébullition dure, autrement dit, le liquide cesse de s'échauffer à partir du moment où il commence à bouillir, toujours à condition que la pression du milieu ne change pas.

Il est facile de se rendre compte de ce fait en songeant que toute nouvelle quantité de chaleur fournie se trouve absorbée par la formation de la vapeur, puisque le liquide a atteint une température où il ne peut plus subsister sans changer d'état. Donc, dans les conditions ordinaires où nous nous trouvons pour faire bouillir de l'eau, elle atteint, quand elle est pure, 100 degrés et conserve cette température d'une façon parfaitement invariable. Elle n'atteindrait réellement cette tempéra-

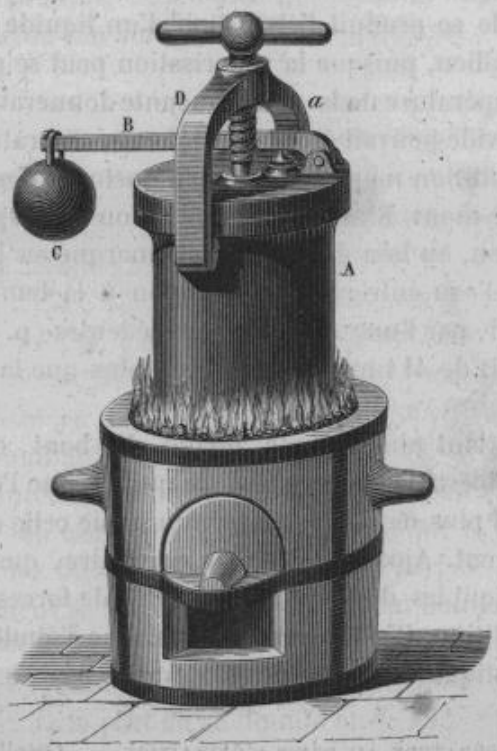
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ture qu'à la hauteur du niveau de la mer, et ne dépasse pas 99°, 8 dans la plupart des villes de l'Europe qui sont nécessairement plus élevées. Cette différence est sans importance pour le point qui nous occupe.

Pour que la température s'élevât, il faudrait créer une atmosphère factice d'une pression plus considérable que celle ambiante, ce que l'on obtient justement pour les machines à vapeur en fermant hermétiquement le vase qui contient le liquide. La vapeur dégagée se comprime alors et ne permet au liquide d'en former de nouvelle que sous une température plus élevée. C'est ce qui s'est produit dans les expériences de MM. Arago et Dulong citées précédemment (9).

Nous pouvons ajouter que, si le vase dans lequel de l'eau se vaporise reste clos et qu'il ne soit pas fait de dépense de vapeur, l'ébullition ne peut même pas avoir lieu, puisque la pression augmentant à chaque instant empêche les bulles de se développer.

Fig. 6.




14. Marmite de Papin. — Pour établir la démonstration expérimentale de ce phénomène, on peut employer l'appareil connu sous le nom de *marmite de Papin*, son inventeur, notre célèbre compatriote, et dont il sera parlé à propos de l'histoire des machines à vapeur.

Cet appareil consiste simplement dans un vase A, fig. 6, en métal et d'une très-grande résistance, parfaitement clos, mais muni cependant à son couvercle d'une faible ouverture bouchée par une soupape qu'un levier B, disposé comme celui d'une balance romaine, maintient fortement appuyée sur son siége.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On connaît cette disposition, qui n'est autre que la soupape de sûreté actuelle, et qui se compose du levier B dont la pression s'exerce sur la soupape *a*, située entre le point d'attache et d'articulation du levier et le poids C dont il est chargé à son extrémité. La soupape ne peut donc s'élever au-dessus de son siége qu'en surmontant la résistance opposée par le levier en raison de sa charge et du rapport de ses deux bras.

Le couvercle du vase A est aussi très-solidement maintenu par une fermeture composée de l'arcade à étriers D, munie d'une vis de pression à l'aide de laquelle on fait appuyer le couvercle sur le bord de la marmite, après avoir pris soin d'y placer une rondelle de métal malléable pour faire un joint étanche.

L'appareil ainsi construit de façon à résister à une forte pression intérieure, on remplit d'eau environ un tiers de sa capacité; puis l'ayant exactement clos, on le place sur un fourneau quelconque.

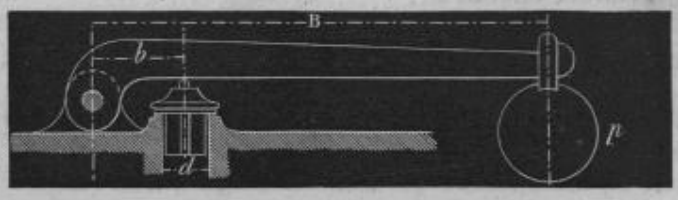
L'eau s'élève alors graduellement de température. Mais comme la vapeur qui se forme ne peut s'en échapper que sous la condition que sa pression soit capable de soulever la soupape, elle se comprime et l'ébullition ne peut avoir lieu.

Si, au moment où la pression intérieure semble atteindre le point où elle devient capable de faire détacher la soupape de son siége, on lève cette soupape, ou que l'on ouvre brusquement un robinet placé sur le couvercle, l'ébullition se manifeste et la vapeur s'échappe impétueusement sous la forme d'un jet qui peut atteindre plusieurs mètres de hauteur (8 ou 10 mètres), suivant la plus ou moins grande énergie de la pression dans le récipient. Le liquide se refroidit jusqu'à 100 degrés et ne tarde pas à passer complétement en vapeur si l'action du foyer est continuée et que l'ouverture de la soupape reste libre.

Les pressions que la vapeur peut atteindre dans cette condition sont très-considérables, et dépendent d'ailleurs du poids dont on a chargé la soupape.

Sans anticiper sur les détails qui seront donnés ultérieurement sur cet important appareil, nous pouvons donner actuellement quelques détails sur les conditions qu'il doit remplir pour obtenir une pression déterminée.

Fig. 7.




Soit, fig. 7, la disposition de la soupape, dans laquelle nous désignerons par :

B, la distance du centre d'artjculation ou du point d'attache à celui du poids, ou le grand bras du levier;

*b*, la distance du même point au centre de la soupape, ou le petit bras du levier;

*d*, le diamètre de l'orifice que ferme la soupape;

*p*, l'intensité du poids suspendu au levier;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

P, la pression totale exercée par la vapeur et de bas en haut sous la soupape, sur une surface de cercle dont le diamètre est $d$.

Nous trouvons d'abord, par la disposition du levier, que la pression P′ qu'il exerce sur la soupape, et de haut en bas, est égale, d'après les propriétés générales des leviers, à

$$P' = p \times \frac{B}{b},$$

le levier étant supposé lui-même pour l'instant sans pesanteur.

Pour que la soupape soit maintenue sur son siége jusqu'à la pression déterminée, il faut que les efforts P′ et P soient égaux. Mais l'effort P est toujours très-facile à connaître, puisqu'il résulte de cette pression et de la dimension ou du diamètre de l'orifice $d$ dont on peut calculer la superficie.

Par conséquent, l'opération se résume à chercher cet effort P d'après les conditions données, et à le substituer à celui P′ dans l'équation précédente qui permettra de calculer l'une des trois dimensions $p$, B ou $b$, les deux autres étant fixées *à priori*.

Exemple : Soit donné de trouver les conditions d'une soupape devant tenir une pression intérieure de 20 atmosphères.

On suppose que le diamètre $d$ du trou sera égal à 1 centimètre.

« le grand bras B du levier = 30 «

« le petit bras $b$ du levier = 2 «

Quelle sera l'intensité du poids $p$?

Une pression de 20 atmosphères représente un effort égal à

$$1^k0333 \times 20 = 20^k666 \text{ par centimètre carré (7);}$$

par conséquent, le diamètre de la soupape étant de 1 centimètre, la pression qui s'y exercera de bas en haut sera égale au produit de la section correspondante, en centimètres carrés, par la pression ci-dessus, pression qu'il faut diminuer de celle extérieure que l'atmosphère exerce nécessairement de haut en bas sur la face supérieure de la soupape, et qui est égale à 1.

On a donc pour l'effort effectif P :

$$P = (20 - 1)\ 1{,}0333 \times 0{,}7854 \times 1^2 = 15^k42.$$

Il en résulte qu'en disposant la relation précédente suivant $p$ pour inconnue, on aura pour sa valeur :

$$p = P' \text{ ou } P\frac{b}{B} = 15^k42 \times \frac{2}{30} = 1^k028.$$

Terminons ce premier aperçu en faisant remarquer qu'il suffirait de déplacer le poids sur le levier pour changer les conditions du problème et le résultat, puisque les bras du levier n'auraient plus le même rapport entre eux.

En résumé, la soupape devient donc la seule cause de la limite que la pression puisse atteindre dans l'expérience de la marmite de Papin, abstraction faite, bien

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

entendu, de la propre résistance du vase. On a obtenu ainsi des pressions de 40 et même de 50 atmosphères, c'est-à-dire de la vapeur exerçant l'effort énorme d'environ 50 kilogrammes par centimètre carré, ou 500,000 kilog. par mètre carré.

15. Influence des substances en dissolution sur la température du point d'ébullition. — Parmi les diverses causes qui peuvent intervenir pour faire varier de quelques degrés l'ébullition de l'eau, relativement à une même pression du milieu, nous citerons les dissolutions de sels et autres substances qui retardent le point d'ébullition, dans de certaines limites, suivant le degré de saturation.

Ainsi, l'eau saturée de sel marin est plus chaude au moment de son ébullition que lorsqu'elle est pure, ou même lorsqu'elle contient des corps simplement en suspension qui ne sont point combinés chimiquement avec elle.

Considéré sous le point de vue pratique qui nous occupe, ce phénomène n'a cependant pas une très-grande importance, puisque, en supposant la saturation complète, la température, au point d'ébullition, n'est élevée que de 9 degrés, et que, d'ailleurs, cet état de saturation complète se présente rarement dans l'emploi de l'eau pour les machines à vapeur.

Cependant, les appareils de navigation et certaines machines fixes situées près de la mer sont alimentés à l'aide de ses eaux qui contiennent du sel en proportions notables. Mais, dans ce cas, la principale objection n'est pas la modification de température, mais bien le danger d'explosion par suite des dépôts qui se formeraient, si on laissait arriver le degré de saturation sans nettoyer le générateur.

16. Mode de vaporisation d'un liquide qui contient des substances étrangères. — Lorsqu'on soumet à la vaporisation un liquide qui contient des substances étrangères à l'état de mélange, mais sans qu'il y ait combinaison chimique intime, la vaporisation s'effectue successivement pour chacune d'elles et dans l'ordre des températures correspondant à leurs points respectifs d'ébullition.

Si l'on soumet, par exemple, à l'action de la chaleur de l'eau qui contienne des substances plus volatiles qu'elle-même, ces substances se dégagent d'abord, la masse du liquide restant à la température qui convient à leur ébullition; puis, quand l'eau n'en contiendra plus, elle s'élèvera de température jusqu'à son point d'ébullition.

Dans le cas contraire, où les substances seraient moins volatiles que l'eau, celle-ci se vaporise d'abord avec la température propre de son ébullition, sous la réserve de la légère modification qui peut résulter du mélange ou de la dissolution, comme il vient d'être dit (15).

Il sera très-facile de comprendre ce fait en remarquant qu'aussitôt que la masse liquide a acquis la température du point d'ébullition du liquide le plus volatil, ce dernier, pour s'évaporer, s'approprie les nouvelles quantités de chaleur fournies, qui ne peuvent plus nécessairement coopérer à l'élévation de la température de la masse entière.

Aussi considère-t-on comme pure de l'eau vaporisée, quelles que soient les substances étrangères qu'elle retenait, puisque celles-ci ont dû disparaître ou devront disparaître, mais jamais en même temps que l'eau.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Telles sont au moins les conditions pratiques que nous pouvons prendre en considération à l'égard du sujet qui nous occupe actuellement. Les machines à vapeur montrent constamment des exemples du principe de l'isolement de l'eau, par la vaporisation, des substances qui s'y trouvent mélangées ou en dissolution.

En effet, tout le monde connaît ce fait de l'incrustation des chaudières à vapeur, par suite des dépôts sédimentaires résultant de l'abandon continuel que l'eau fait, en s'évaporant, des différentes substances calcaires et salines qu'elle contient toujours en proportions diverses. L'alimentation des chaudières avec l'eau de la mer donne lieu à des dépôts considérables de sel marin qui s'est séparé de l'eau au moment de l'évaporation.

C'est ce qui donne lieu à des extractions répétées qu'il est indispensable de faire pour éviter les accidents.

## CONDENSATION DE LA VAPEUR.

17. On appelle condensation de la vapeur son retour à l'état liquide. Bien que cette question puisse être plus amplement traitée après avoir parlé avec détail de l'intervention de la chaleur dans les deux phases du changement d'état, il peut être utile d'en dire un mot quant à présent, et comme fait extérieur.

Déjà nous avons vu qu'une simple compression au-dessus du maximum de force élastique (6) suffit pour faire repasser de la vapeur en partie ou en totalité à l'état liquide, suivant que cette compression n'est que momentanée ou qu'elle se continue jusqu'au point de ramener le volume du fluide à celui qu'il occupait à l'état liquide, bien entendu, sans ajouter de nouvelle chaleur.

Mais, dans les machines, ce n'est pas de cette façon, qui est véritablement *la liquéfaction de la vapeur,* que la destruction de la vapeur s'opère.

La condensation consiste en un *refroidissement* de la vapeur au moyen d'une certaine quantité d'eau froide qui s'empare de la chaleur qui la maintenait à l'état de fluide élastique, et donnant pour résultat une quantité d'eau chaude dont la vapeur qu'elle est capable d'émettre a une force élastique infiniment moindre que celle qui a été détruite, et même aussi faible qu'on le désire, suivant la température et le volume de l'eau froide ajoutée.

Cette propriété de la condensation est de la plus grande importance, puisqu'elle permet de se débarrasser presque instantanément du fluide puissant qui vient de produire un effet, mais qui viendrait ensuite le neutraliser s'il conservait ses propriétés expansives. Il ne manque à l'air atmosphérique et aux autres gaz que la propriété de se condenser facilement pour devenir des agents moteurs qui pourraient alors remplacer avec avantage la vapeur d'eau, puisqu'ils existent naturellement à la température ordinaire, à l'état de fluides élastiques.

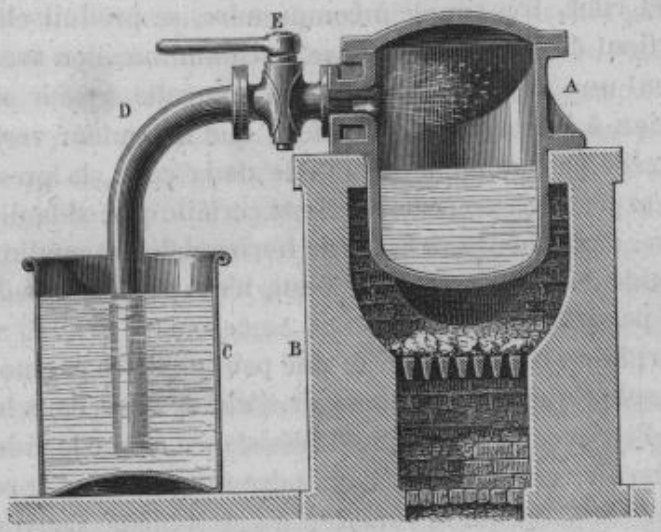
Nous verrons bientôt que de puissantes machines ont pu être exécutées avec la pression atmosphérique pour agent moteur, en faisant intervenir la vapeur d'eau comme autre atmosphère auxiliaire, mais qui possède la précieuse propriété de se

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

détruire en laissant un vide devant lequel l'atmosphère ambiante peut alors manifester son irrésistible puissance. .

18. Absorption. — Pour clore ce premier aperçu sur le phénomène de la condensation, nous citerons une expérience désignée par les physiciens sous le nom de *l'absorption*, qui est destinée, d'abord, à démontrer la faculté que l'on possède de créer un vide au moyen de la condensation de la vapeur, et ensuite, de mettre en garde contre les accidents qui peuvent résulter de cette propriété même.

Fig. 8.




Dans les expériences de chimie et dans beaucoup d'opérations industrielles il se présente une disposition d'appareils analogue à celle que représente la fig. 8 ci-dessus.

Cette disposition consiste dans un récipient clos A, placé au-dessus d'un fourneau B, et contenant un liquide que l'on doit mettre en ébullition; puis un conduit tubulaire D qui part du récipient et descend plonger dans une cuve C contenant un liquide froid, soit de l'eau, au travers de laquelle passe la vapeur qui se dégage du récipient A.

Aussitôt que l'ébullition commence, la vapeur produite chasse peu à peu l'air renfermé dans tout l'appareil, et le force de s'écouler par le conduit D en repoussant devant lui le liquide dont le niveau est nécessairement le même dans le tube que dans la cuve C, puis enfin à sortir lui-même en s'élevant sous forme de bulles dans la masse liquide de la cuve. L'air étant complétement expulsé, c'est la vapeur qui remplit alors exclusivement l'appareil et se dégage exactement de la même façon que l'air.

Si, dans cet état de choses, on éteint le feu, tout en conservant la communication libre par le conduit D, la vapeur, se refroidissant peu à peu, perd de sa force élastique. Or, comme cette force élastique faisait simplement équilibre à la pression atmosphérique, plus à celle de la hauteur de l'eau dans la cuve C, cette pression

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

extérieure devenue dominante commence à se manifester par l'eau qui monte dans le tube D. Puis, la pression de la vapeur continuant de diminuer sans être remplacée par aucune autre, puisque l'air est depuis longtemps parti, l'eau continue de s'élever dans le tube, parvient à sa partie horizontale, et enfin pénètre dans la masse de vapeur que contient encore la chaudière A.

Cette vapeur ne tarde pas à être détruite complétement, d'où le vide se trouve créé dans l'appareil, c'est-à-dire l'absence de tout fluide expansible. On voit alors l'eau continuer son ascension, mais avec impétuosité, et remplir complétement tout l'appareil si le volume contenu dans la cuve le permet.

En résumé, cet effet, très-simple à comprendre, se produit chaque fois qu'une capacité qui contient de la vapeur est mise en communication avec un réservoir de liquide supportant une pression suffisante, et que cette vapeur se trouve détruite par la condensation à la condition, toutefois, que la hauteur verticale de la communication n'excède pas, remplie du liquide de la cuve, la pression que celle-ci supporte. Dans l'expérience précédente, il est certain que, si la distance du niveau de la surface libre, dans la cuve, à la partie horizontale du conduit D avait dépassé 10 mètres, le liquide de la cuve, étant de l'eau, n'eût pu pénétrer dans la chaudière où le vide aurait persisté.

Ainsi, si l'absorption est à craindre, le vide peut ne l'être pas moins, attendu que la pression atmosphérique, qui a le pouvoir d'élever l'eau dans le réservoir supérieur, peut aussi l'enfoncer s'il manque de résistance et que le vide y soit fait. Chaque fois que ce dernier accident est à craindre on place sur le récipient un petit instrument appelé *reniflard,* qui se compose d'une soupape s'ouvrant de dehors en dedans, et qui permet la rentrée de l'air dans l'appareil.

On peut aussi, pour se préserver de l'absorption, employer un robinet E que l'on ferme avant la condensation de la vapeur.

La condensation de la vapeur est donc un moyen de créer un vide et d'élever des volumes de liquide, pour ainsi dire, quelconques, à une hauteur égale à celle qui correspond, pour chaque liquide de densité différente, à la pression atmosphérique. En effet ce que nous venons de signaler comme des accidents, absorption et vide, constituent, dans bien des cas, des moyens précieux dans leur application.

### ACTION CALORIFIQUE DANS LA FORMATION DE LA VAPEUR D'EAU.

19. Les phénomènes de dilatation et de changement d'état des corps ont pour agent principal, ou, pour mieux dire, pour seule cause apparente, le calorique ou la chaleur qui, en pénétrant dans la masse des molécules constitutives, les oblige à se séparer et augmente les interstices qui semblent exister naturellement entre elles.

Le fait extérieur pourrait être défini en disant : que la chaleur repousse les molécules d'un corps les unes des autres pour pouvoir se loger et s'y mettre en équilibre d'intensité avec le milieu ou l'espace occupé par la masse du corps; et que de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cette intervention il résulte un effort répulsif égal et contraire à la propre force de cohésion des molécules de ce corps.

De cette définition, ainsi que du fait observé, on conclut que plus la quantité de chaleur est grande et plus l'effet de répulsion est considérable.

Enfin, cet effet de distension des molécules par une quantité de chaleur en excès, après avoir eu pour résultat une simple dilatation ou augmentation de volume, devient un changement d'état : c'est-à-dire que de solide un corps devient liquide, et de ce second état il devient gazeux ou à l'état de vapeur.

De ce que l'on a vu que ce second changement avait lieu pour les liquides dans le vide, et sans l'intervention apparente du calorique, il n'en faut pas conclure que cette intervention fait défaut. Ce serait une erreur. L'action du calorique est tout aussi réelle que dans tout autre mode de formation de la vapeur; et, comme nous l'avons fait remarquer, le vide n'a pour résultat que de donner lieu presque instantanément à ce qui se serait produit lentement à l'air libre. La pression de l'atmosphère n'est qu'un effort à combattre par des quantités de chaleur plus considérables à employer pour former de la vapeur sous son influence.

Quant à la chaleur nécessaire pour que le phénomène se produise dans le baromètre, elle est prise dans la masse même du liquide et à l'instrument lui-même, au lieu d'être fournie par un foyer.

Ainsi, pas d'exception pour la formation de la vapeur. Quel que soit le mode employé pour la produire, le calorique intervient, et toujours avec la même intensité, pour des vapeurs égales en tension.

L'étude des actions calorifiques appliquées à la formation de la vapeur d'eau peut se diviser en plusieurs parties distinctes que nous allons énumérer et étudier dans les deux chapitres suivants, sous le point de vue pratique où nous nous sommes placé.

1° Définition de l'unité de chaleur;

2° Capacité pour la chaleur ou calorique spécifique;

3° Chaleur latente ou de changement d'état;

4° Quantités de chaleur fournies par la combustion.

L'examen de ces quatre points principaux, de ce que l'on appelle en physique *la calorimétrie,* doit nous conduire à pouvoir apprécier les quantités pratiques de combustible à employer ou à dépenser pour faire de la vapeur, et aussi les quantités de chaleur qu'il faut lui retirer lorsqu'il s'agit de la détruire.

FIN DU CHAPITRE PREMIER

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

# CHAPITRE II

## CAPACITÉ CALORIFIQUE DES CORPS.

### UNITÉ DE CHALEUR

20. L'observation générale du mode d'échauffement des corps permet de reconnaître ce fait, nous dirons, tout extérieur : c'est que, pour amener des quantités différentes d'une même substance à la même température, il faut dépenser des poids d'un même combustible, proportionnels à celui de ces substances.

Ainsi par exemple, si pour élever un certain poids d'eau de 0 degré à 20 degrés on est obligé de brûler 10 kilogrammes de charbon, il faudra, toutes choses égales d'ailleurs, en brûler 20 pour opérer sur un poids double du même liquide.

Cette observation, ramenée aux données exactes de la science, conduit à ce résultat positif; savoir :

Que, pour élever de 1 degré un même poids d'une même substance homogène déterminée, il faut dépenser une même quantité de chaleur;

Et de plus, dans de certaines limites :

Que les quantités de chaleur à fournir sont proportionnelles au poids de ce même corps et à l'élévation de température.

Cela posé, il devenait facile de créer une valeur représentative qui fût capable de servir d'unité comparative entre les divers échanges de chaleur qui s'effectuent entre des corps différents, et aussi de permettre d'apprécier les quantités de chaleur fournies par les sources calorifiques. Il suffisait pour cela de choisir une substance homogène et de prendre pour point de comparaison la quantité de chaleur exacte qu'il faut lui fournir pour élever sa température d'une valeur déterminée.

Agissant d'après ces principes on adopte pour unité de chaleur la quantité qui est nécessaire pour faire varier la température de 1 kilogramme d'eau de 1 degré centigrade. Cette unité, appelée *calorie,* sert de comparaison pour tous les échanges de chaleur observés.

Par conséquent, si l'on prend 1 kilogramme d'eau à 0 degré et qu'on le porte à 1 degré, on dit qu'on lui a fourni une unité de chaleur; à 2 degrés, 2 unités, etc. De même 1 kilogramme d'eau à une température quelconque, au-dessus de 0 degré, est considéré comme possédant autant d'unités de chaleur que le chiffre de sa température.

Il s'agit ici de l'eau liquide et de sa chaleur sensible au thermomètre, mais non pas de celle totale réellement contenue, pour une même température, par ce kilogramme d'eau. Nous verrons plus loin que la plus grande partie de la chaleur que renferme un corps est *latente,* et constitutive de son état liquide ou gazeux.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Supposons, comme exemple, que l'on plonge un boulet rouge dans un vase contenant de l'eau, et que l'on observe l'élévation de température qui résultera pour l'eau du refroidissement du boulet abandonnant sa chaleur à son profit; en ne considérant que l'eau, sans tenir compte des pertes de calorique par sa dispersion en eau vaporisée et par le rayonnement, on évaluera aisément la quantité de chaleur gagnée par la masse liquide, par son poids réel et son élévation de température.

Soit 50 kilogrammes d'eau à 12 degrés qui en atteindraient 45 par suite de l'immersion d'un corps plus chaud. D'après ce qu'il vient d'être dit de la correspondance entre les températures en degrés et les quantités de chaleur, on trouvera la quantité de calories gagnée par l'eau, en faisant le produit de la différence entre les températures observées par le poids de la masse exprimée en kilogrammes.

Appelant :

P, le poids de l'eau en kilogrammes;
$t$, la température primitive;
$t'$, la température acquise;
$n$, la quantité de calories gagnées.

On trouve :

$$n = (t' - t)\ \mathrm{P};\ \text{d'où}\ :\ n = (45 - 12)\ 50^{k} = 1650\ \text{calories.}$$

Le raisonnement serait exactement le même s'il s'agissait de connaître une quantité de calories perdues par l'immersion d'un corps plus froid que l'eau.

Si, par exemple, on plonge dans la masse d'eau de 50 kilogrammes à 45 degrés un corps très-froid qui abaisse sa température à 10 degrés, quel sera le nombre de calories perdues par l'eau quand l'équilibre aura eu lieu?

On trouverait de même :

$$n = (45 - 10)\ 50 = 1750\ \text{calories.}$$

## CALORIQUE SPÉCIFIQUE

21. On dit qu'un corps a une capacité plus ou moins grande pour la chaleur suivant qu'il faut lui en fournir une plus ou moins grande quantité pour faire varier sa température d'un même nombre de degrés. Si l'on met en comparaison deux poids égaux de deux substances différentes, et que l'on trouve qu'il faut fournir à l'une des masses le double de chaleur qu'à l'autre pour élever leurs températures respectives de 1 degré, on en conclut que la capacité de l'un, pour la chaleur, est double de celle de l'autre. On pourra donc dire que la capacité la plus faible étant représentée par 1, la plus forte sera représentée par 2.

Réciproquement, la capacité calorifique sera encore caractérisée en observant le rapport des températures acquises par des masses égales de substances différentes auxquelles on a communiqué des quantités de chaleurs égales; celles qui seront les plus froides auront nécessairement les capacités calorifiques les plus grandes. De

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

plus, les rapports numériques de ces capacités seront représentés par les températures exprimées en degrés, mais d'une façon inversement proportionnelle.

Supposons, comme exemple, que l'on plonge dans trois masses égales de liquides différents des boulets égaux d'un même métal, chauffés à la même température, et que l'on trouve que les masses liquides se sont élevées de températures de 1 degré, 2 degrés, 3 degrés, on pourra dire que leurs capacités calorifiques sont inversement proportionnelles à ces accroissements de température, c'est-à-dire comme 3 : 2 : 1.

Ainsi la capacité d'un corps pour la chaleur, ou *son calorique spécifique*, est représentée par un nombre semblable à un coefficient, se rapportant à l'unité pour laquelle le calorique spécifique d'une certaine substance sert de point de départ.

Pour les liquides et les corps solides on a choisi l'eau, en admettant, ainsi qu'on l'a vu précédemment (20), que l'unité de chaleur correspond à la quantité qu'il est nécessaire d'en fournir à 1 kilogramme pour élever la température de 1 degré.

L'air atmosphérique a été choisi pour les gaz, avec lesquels l'eau doit néanmoins servir également de comparaison, afin d'obtenir des valeurs pratiques absolues.

22. Lorsque l'on cherche la capacité calorifique des gaz entre eux, on les compare en volumes égaux, mais suivant deux conditions différentes.

Lorsqu'on chauffe un gaz, il se dilate et tend à augmenter de volume. S'il est soumis à une pression constante, cette augmentation a lieu librement suivant la valeur de son coefficient de dilatation. Si, au contraire, l'espace qu'il occupe est inextensible, son volume reste le même, mais sa pression augmente.

Par conséquent, les physiciens se sont préoccupés de savoir si, dans ces deux conditions, les capacités calorifiques des gaz ne seraient pas différentes; et c'est pourquoi les tables qui donnent les résultats de leurs travaux indiquent deux colonnes basées sur cette considération.

Du point de vue pratique où nous nous sommes placé, cette distinction n'a peut-être pas une importance sérieuse, d'autant plus que les différences ne sont pas elles-mêmes très-considérables. Mais nous avions besoin d'en faire mention, afin de bien faire comprendre les tables suivantes que nous avons formées d'après les illustres savants auxquels nous sommes redevables de ces utiles recherches.

Disons encore que nous ne citerons que les substances susceptibles de figurer comme emploi dans les organes moteurs qui nous occupent.

23. Pour l'intelligence parfaite de ces tables, il nous suffira de définir nettement ce que l'on entend par la valeur numérique du coefficient de chaleur spécifique, ou simplement par la capacité calorifique d'un corps.

Étant convenu d'appeler *unité de chaleur*, ou *calorie*, la quantité de calorique qui élève la température de 1 kilogramme d'eau de 1 degré, on a fait des comparaisons avec un très-grand nombre de substances, et on a trouvé que cette même quantité de chaleur produisait sur 1 kilogramme de chacune d'elles des modifications de température bien différentes. Sur la presque totalité, l'élévation de température est beaucoup plus considérable que pour l'eau.

Or, la définition même que nous venons d'établir (21) de la capacité calorifique

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

montre que le rapport entre l'élévation de température de l'eau, c'est-à-dire un degré ou l'unité, et l'élévation de température de la substance que l'on considère sera précisément égal au rapport inverse des capacités de l'eau et de cette substance.

Par conséquent, $c$ représentant la capacité de l'eau et $t$ son élévation de température, $c'$ la capacité de la substance que l'on compare, et $t'$ son élévation de température, on aura :

$$t : t' :: c' : c, \text{ ou } \frac{t}{t'} = \frac{c'}{c}.$$

Mais, $t$ et $c$ ayant chacun l'unité pour valeur, la capacité $c'$ de la substance donnée sera égale à :

$$c' = \frac{1}{t'}.$$

Cette dernière relation fournit, en résumé, la définition suivante :

*La valeur numérique* c' *du coefficient de chaleur spécifique d'une substance déterminée est égale au quotient de l'unité divisée par l'accroissement de température qu'une calorie produirait sur* 1 *kilogramme de cette substance.*

Les valeurs inscrites dans les tables suivantes sont précisément les quotients précités pour chaque substance correspondante. On verra plus loin quelques exemples de l'emploi de ces valeurs.

## PREMIÈRE TABLE

### CAPACITÉS DES GAZ

DÉTERMINÉES PAR MM. DELAROCHE ET BÉRARD, CELLES DE L'AIR ATMOSPHÉRIQUE ET DE L'EAU PRISES POUR UNITÉ.

| DÉSIGNATION DES GAZ. | CAPACITÉS CALORIFIQUES celle de l'air étant 1, pour des | | CAPACITÉS pour des masses égales l'eau prise pour unité. | RAPPORT DES CAPACITÉS pour des | |
|---|---|---|---|---|---|
| | volumes égaux. | masses égales. | | volumes constants. | pressions constantes. |
| Air atmosphérique..... | 1,0000 | 1,0000 | 0,2669 | 1,421 | 1,00 |
| Hydrogène..... | 0,9035 | 12,3401 | 3,2936 | 1,407 | 1,00 |
| Oxygène..... | 0,9765 | 0,8848 | 0,2361 | 1,415 | 1,00 |
| Vapeur d'eau..... | 1,9600 | 3,1360 | 0,8470 | D'après Dulong. | |

Cette table nous montre que, parmi les gaz, et à poids égaux, c'est l'hydrogène qui est le plus difficile à échauffer, puisqu'il faut lui fournir douze fois plus de chaleur qu'à l'air atmosphérique pour élever sa température d'une même quantité.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Après l'hydrogène vient la vapeur d'eau, dont la capacité est presque double de celle de l'air, et non loin d'équivaloir à celle de l'eau.

Les deux dernières colonnes du tableau indiquent, d'après Dulong, les variations que subissent les capacités calorifiques des gaz correspondants, suivant qu'on les considère sous une pression constante ou sous des volumes invariables pendant qu'ils sont soumis à la chaleur.

On voit que cette capacité étant 1, sous des pressions constantes, elle devient sensiblement 1,4 si le gaz doit se comprimer sous l'effort de dilatation qu'il exerce en s'échauffant.

Du reste, cette question, qui est très-complexe, ne pourrait pas avoir ici toute son extension. Qu'il nous suffise de l'avoir signalée en passant, renvoyant pour l'approfondir aux ouvrages spéciaux.

### DEUXIÈME TABLE

CAPACITÉS CALORIFIQUES DE DIVERSES SUBSTANCES

CELLE DE L'EAU PRISE POUR UNITÉ.

| DÉSIGNATIONS DES SUBSTANCES. | CAPACITÉS calorifiques. | OBSERVATEURS. |
|---|---|---|
| Eau | 1,0000 | |
| Fer | 0,1100 | Dulong et Petit. |
| *Id.* de 0° à 100° | 0,1098 | *Id.* *Id.* |
| *Id.* 0° à 300° | 0,1218 | *Id.* *Id.* |
| Fonte blanche | 0,1298 | Regnault. |
| Acier | 0,118 à 0,127 | *Id.* |
| Cuivre | 0,0949 | Dulong et Petit. |
| *Id.* de 0° à 100° | 0,0940 | *Id.* *Id.* |
| *Id.* 0° à 300° | 0,1013 | *Id.* *Id.* |
| *Id.* | 0,09515 | Regnault. |
| Laiton | 0,09391 | » |
| Plomb | 0,0293 | Dulong et Petit. |
| *Id.* | 0,0314 | Regnault. |
| Étain | 0,0514 | Dulong et Petit. |
| *Id.* | 0,05623 | Regnault. |
| Zinc | 0,0927 | Dulong et Petit. |
| *Id.* | 0,09555 | Regnault. |
| Verre de 0° à 100° | 0,1770 | Dulong et Petit. |
| *Id.* | 0,1900 | |
| *Id.* 0° à 300° | 0,19768 | Regnault. |
| Charbon de bois | 0,2415 | *Id.* |
| Houilles et coke (moyennes) | 0,20 | *Id.* |
| Bois divers | 0,600 à 0,650 | Mayer. |

Ce deuxième tableau, relatif aux capacités calorifiques des principales matières employées dans la construction et l'industrie, nous indique que c'est l'eau qui parmi elles possède la plus grande et qui s'échauffe, par conséquent, le plus diffi-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cilement et avec le plus de frais. Après elle vient le bois, et, comme plus petite capacité, le plomb.

## APPLICATIONS DES COEFFICIENTS DE CAPACITÉ CALORIFIQUE

24. La connaissance de la capacité calorifique des corps et sa représentation par des valeurs numériques conduisent à des problèmes d'application très-intéressants et surtout très-utiles.

On peut résumer ainsi les principaux :

1° Chercher la quantité de chaleur qu'il faut fournir à un corps pour élever sa température d'un nombre de degrés déterminé; et, réciproquement, ce qu'il faut lui retirer pour abaisser sa température;

2° Trouver la température d'un mélange, les corps étant égaux ou inégaux de masses et de capacités calorifiques;

3° Chercher les effets de dilatation produits par des quantités de chaleur déterminées sur des gaz ou des vapeurs, etc.

Nous allons essayer d'indiquer quelques exemples de ces différentes façons d'envisager la question, réservant, néanmoins, pour plus tard, ce qui est relatif aux effets de dilatation, ce qui peut être particulièrement intéressant en parlant de l'emploi de la vapeur surchauffée et des moteurs qui marchent par les gaz permanents.

### RECHERCHE DE LA QUANTITÉ DE CHALEUR QUI CORRESPOND A UNE VARIATION DONNÉE DE TEMPÉRATURE

25. D'après la définition de la capacité et de l'unité de chaleur, on a vu (20) que la quantité de chaleur qu'un corps quelconque gagne ou perd, suivant qu'il s'échauffe ou qu'il se refroidit d'un nombre de degrés déterminé, est à la fois proportionnelle à sa masse et à sa capacité calorifique, attendu que, si 1 kilogramme d'eau absorbe 1 calorie pour s'échauffer de 1 degré, il en absorberait 2 pour 2 degrés, etc.; ou bien 2 kilogrammes en absorberaient 2 pour 1 degré; enfin 1 kilogramme d'une substance dont la chaleur spécifique serait 0,5 absorberait une demi-unité pour que sa température s'élevât de 1 degré, etc.

Par conséquent, en conservant la notation du paragraphe 20, la formule générale du réchauffement ou du refroidissement est celle-ci :

$$n = t\mathrm{P}c, \quad \text{ou } n = (t' - t)\,\mathrm{P}c, \qquad \text{(A)}$$

$t' - t$ ou simplement $t$ représentant la différence de température ou la quantité de degrés à gagner ou à perdre.

Premier exemple. — Combien 50 kilogrammes d'eau à 15 degrés absorberaient-ils de calories pour s'élever à 60 degrés?

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

*Solution :*

$$n = (60 - 15) \times 50 \times 1 = 2250 \text{ calories.}$$

Le résultat serait évidemment identique pour abaisser la température de 60 degrés à 15 degrés.

Deuxième exemple. — De combien de degrés élèverait-on 500 kilogrammes d'eau auxquels on fournirait 3000 unités de chaleur ?

*Solution.* La formule précédente fournit cette relation :

$$t = \frac{n}{Pc}; \quad \text{d'où } t = \frac{3000}{500 \times 1} = 6 \text{ degrés.}$$

Troisième exemple. — Combien 100 kilogrammes de fer dégagent-ils de calories en se refroidissant de 200 degrés?

*Solution.* La table précédente indiquant que le fer a 0,11 pour capacité calorifique, on trouve :

$$n = 200^{o} \times 100^{k} \times 0{,}11 = 2200 \text{ calories.}$$

Quatrième exemple. — Quelle est la capacité calorifique d'un corps, dont 100 kilogrammes dégagent 1000 unités de chaleur en se refroidissant de 55 degrés?

*Solution.* La principale relation précédente (A) fournit encore :

$$c = \frac{n}{tP}; \quad \text{d'où } c = \frac{1000}{55 \times 100} = 0{,}1819.$$

## DÉTERMINATION DE LA TEMPÉRATURE D'UN MÉLANGE

26. Ce problème peut avoir des solutions diverses suivant que les substances que l'on mélange ont des capacités égales ou différentes. Nous allons donner des exemples des deux cas. Cependant il est possible d'établir une formule générale qui ne fera que se simplifier si les masses ou les capacités sont égales.

Si l'on mélange deux substances dont les poids soient P et P′, les températures $t$ et $t'$, et les capacités $c$ et $c'$, il en résultera une température finale $x$ pour laquelle on raisonnera ainsi :

Après le mélange, les deux masses seront à la même température; l'une se sera refroidie d'un nombre de degrés qui, d'après la règle précédente, sera représentée par

$$t - x;$$

d'où la quantité de calories perdues sera égale à :

$$(t - x)\, Pc.$$

L'autre masse aura gagné, au contraire :

$$(x - t')\, P'c'.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Mais puisque ce que l'une des masses a perdu l'autre l'a gagné, ces deux relations sont égales et fournissent l'équation suivante :

$$(t - x)\,\mathrm{P}c = (x - t')\,\mathrm{P}'c', \qquad \text{(B)}$$

de laquelle on tire :

$$x = \frac{t\mathrm{P}c + t'\mathrm{P}'c'}{\mathrm{P}c + \mathrm{P}'c'}, \qquad \text{(C)}$$

$x$ étant la valeur cherchée de la température du mélange.

Mais il est évident que, si les capacités ou les masses sont égales, cette expression se trouvera diminuée de tous les signes qui les représentent.

Si, par exemple, les masses des corps mélangés étaient égales, on aurait $\mathrm{P} = \mathrm{P}'$; et alors la relation prendrait la forme suivante :

$$\frac{t\mathrm{P}c + t'\mathrm{P}c'}{\mathrm{P}c + \mathrm{P}c'}; \quad \text{d'où l'on tire : } \frac{(tc + t'c')\,\mathrm{P}}{(c + c')\,\mathrm{P}},$$

dans laquelle P doit nécessairement disparaître, ce qui revient alors à :

$$x = \frac{tc + t'c'}{c + c'}, \qquad \text{(D)}$$

c'est-à-dire qu'il n'y a plus à s'occuper de la masse.

Si les capacités étaient égales, la même réduction s'opérerait à l'égard de $c$ et $c'$ qui seraient égaux et disparaîtraient. La formule prendrait la forme suivante :

$$x = \frac{t\mathrm{P} + t'\mathrm{P}'}{\mathrm{P} + \mathrm{P}'}. \qquad \text{(E)}$$

Enfin, si les masses et les capacités se trouvaient égales en même temps, l'expression serait réduite à ceci :

$$x = \frac{t + t'}{2}. \qquad \text{(F)}$$

En résumé, on voit que la première expression générale ci-dessus (B) satisfait à la recherche de la température d'un mélange dans toutes les conditions. On peut, d'ailleurs, supposer encore la forme renversée, c'est-à-dire se proposer de trouver les proportions d'un mélange pour obtenir une température déterminée.

Pour exercer les lecteurs qui ne connaissent pas ces principes, nous allons passer en revue une série d'exemples dans les différents cas, en commençant par les plus simples.

Premier exemple. *Masses et capacités égales.* — Trouver la température $x$ du mélange de deux masses d'eau égales, l'une ayant une température $t = 25$ degrés, et l'autre celle $t' = 40$ degrés.

*Solution* (formule F) :

$$x = \frac{t + t'}{2} = \frac{25° + 40°}{2} = 32{,}5 \text{ degrés.}$$

Deuxième exemple. *Capacités égales.* — Quelle sera la température résultant du mé-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lange de 10 kilogrammes d'eau à 12 degrés avec 15 kilogrammes à 50 degrés du même liquide?

*Solution* (formule E) :

$$x = \frac{tP + t'P'}{P + P'} = \frac{(12^\circ \times 10) + (50 \times 15)}{10 + 15} = 34{,}8 \text{ degrés.}$$

Troisième exemple. *Masses égales.* — On verse 500 kilogrammes d'eau à 90 degrés dans un vase en cuivre de même poids et à la température ambiante de 15 degrés; trouver la température du vase et de l'eau au moment de l'équilibre, en supposant les pertes de chaleur nulles.

*Solution* (formule D). La table donne 0,095 pour la capacité du cuivre. On a, par conséquent :

$$x = \frac{tc + t'c'}{c + c'} = \frac{(90^\circ \times 1) + (15^\circ \times 0{,}095)}{1 + 0{,}095} = 83{,}5 \text{ degrés.}$$

Ainsi, la température ne se serait abaissée que de 6°,5 pour amener les 500 kilogrammes de cuivre de 15 degrés à 83°,5, ce qui résulte de l'énorme différence entre les capacités de l'eau et du cuivre.

Quatrième exemple. *Toutes les conditions différentes.* — On plonge une masse de fer pesant 150 kilogrammes, et à une température de 300 degrés, dans 100 kilogrammes d'eau à 10 degrés; à quelle température sera l'eau au moment de l'équilibre de température?

Les différentes données du problème se résument ainsi :

| | | | |
|---|---|---|---|
| Capacités..... | Eau..... | $c$ | = 1 |
| | Fer..... | $c'$ | = 0,11 |
| Températures. | Eau..... | $t$ | = 10° |
| | Fer..... | $t'$ | = 300° |
| Poids..... | Eau..... | P | = 100$^k$ |
| | Fer..... | P' | = 150$^k$ |

*Solution* (formule C) :

$$x = \frac{tPc + t'P'c'}{Pc + P'c'} = \frac{(10^\circ \times 100^k \times 1) + (300^\circ \times 150^k \times 0{,}11)}{(100^k \times 1) + (150^k \times 0{,}11)} = 51{,}07 \text{ degrés.}$$

Cinquième exemple. *Mélange de gaz.* — Les règles précédentes s'appliquent également aux mélanges des corps dont les quantités ont été exprimées en volumes. Ainsi on a vu plus haut que les capacités relatives des gaz avaient été déterminées de cette manière, en prenant l'air atmosphérique pour unité.

Proposons-nous donc de trouver la température $x$ du mélange de deux volumes d'hydrogène et d'oxygène dans les conditions suivantes :

| | | | |
|---|---|---|---|
| Capacités..... | Hydrogène..... | $c$ | = 0,9035 |
| | Oxygène..... | $c'$ | = 0,9765 |

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

| | | |
|---|---|---|
| Températures. | Hydrogène..... | $t = 10°$ |
| | Oxygène..... | $t' = 45°$ |
| Volumes..... | Hydrogène..... | $V = 1^{m.c.}$ |
| | Oxygène..... | $V' = 0^{m.c.}800$ |

*Solution* (formule C)* :

$$x = \frac{Vtc + V't'c'}{cV + c'V'} = \frac{(1^{m.c.} \times 10° \times 0{,}9035) + (0^{m.c.}800 \times 45° \times 0{,}9765)}{(0{,}9035 \times 1) + (0{,}9765 \times 0{,}800)} = 26°2.$$

## DÉTERMINATION DE LA COMBINAISON D'UN MÉLANGE.

27. Il est aussi fréquent, en pratique, de chercher dans quelle proportion un mélange doit être fait, pour obtenir une température déterminée, que de faire l'opération inverse dont on vient de voir quelques exemples.

Bien qu'il suffise, pour cette autre recherche, d'ordonner convenablement la formule (B) ci-dessus ou celle (C), et que cette opération ne présente aucune difficulté, nous en donnerons, néanmoins, de nouveaux exemples.

PREMIER EXEMPLE. — Dans quelle masse d'eau à 12 degrés faudrait-il plonger une masse de plomb à 150 degrés et pesant 75 kilogrammes, pour que l'ensemble ne dépassât pas 20 degrés au moment où l'équilibre de température sera établi entre le liquide et le métal?

Cette fois, c'est le poids P de la masse d'eau qui est l'inconnue; et si nous conservons la notation de la formule (B), $x$, qui est la température du mélange, égalera 20 degrés.

Par conséquent, la formule fondamentale (B) étant :

$$(t - x)\,Pc = (x - t')\,P'c',$$

on en tire ainsi simplement la valeur de P :

$$P = \frac{(x - t')\,P'c'}{(t - x)\,c}.$$

Cette dernière valeur est alors l'expression générale qui convient à tous les problèmes de l'espèce de celui que nous venons de proposer et dont on va connaître la solution. Remarquons seulement que, pour ce cas particulier où $t'$ est plus fort que $x$, et $x$ plus fort que $t$, on fera bien de changer de place les quantités complexes entre parenthèses pour ne pas avoir de valeurs négatives, ce qui, du reste, n'aurait rien changé au résultat; d'autre part, $x$ n'étant plus l'inconnue, nous remplacerons ce signe par T, indiquant toujours la température donnée pour le mélange.

L'expression ci-dessus modifiée ainsi devient :

$$P = \frac{(t' - T)\,P'c'}{(T - t)\,c}, \qquad (G)$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Au moyen de cette formule, si on y introduit les données du problème, avec la capacité calorifique du plomb = 0,0293 (2me table, page 34), on trouve pour la masse d'eau cherchée :

$$P = \frac{(150^\circ - 20^\circ)\ 75 \times 0{,}0293}{(20^\circ - 12^\circ) \times 1} = 35^{kil.}709.$$

Ce poids d'eau, relativement faible, concorde bien avec la petite capacité calorifique du plomb qui n'est que les trois centièmes environ de celle de l'eau.

Deuxième exemple. — Quel poids P d'eau froide à $t = 12$ degrés faudrait-il ajouter à $P' = 100$ kilogrammes du même liquide à $t' = 80$ degrés, pour obtenir un mélange à $T = 20^\circ$?

*Solution*. Comme ici la capacité est la même pour les deux masses, la formule ci-dessus (G) devient

$$P = \frac{(t' - T)\ P'}{(T - t)}; \quad \text{d'où } P = \frac{(80 - 20) \times 100}{20 - 12} = 750 \text{ kilogrammes.}$$

Ces exemples suffiront pour faire bien comprendre l'utilité et les applications du coefficient de calorique spécifique; ils conduisent, du reste, à la résolution des problèmes dans lesquels entrent les quantités de chaleurs latentes dont nous allons nous occuper maintenant.

Hâtons-nous d'ajouter, toutefois, que les expériences qui ont permis de déterminer les capacités calorifiques des différents corps ne correspondent, pour la plupart, qu'à une étendue de température limitée, et qu'il peut arriver que ces capacités varient légèrement en dehors de ces limites.

Mais, en pratique, ces incertitudes n'ont pas une importance réelle, d'autant plus que les corps soumis à la chaleur en perdent toujours, par des causes accidentelles, des quantités beaucoup plus considérables que celles qui proviendraient d'inexactitude dans les coefficients.

## CHALEURS LATENTES

### OU CALORIQUE DE CHANGEMENT D'ÉTAT

28. Au moment du changement d'état d'un corps, soit dans le passage de l'état solide à l'état liquide ou de ce dernier à l'état gazeux, on observe un phénomène calorifique très-curieux et digne de remarque.

On reconnaît que la température de ce corps reste fixe pendant tout le temps que dure le changement d'état, et, par conséquent, que les quantités de chaleur qu'on lui fournit en même temps ne sont point sensibles au thermomètre.

L'explication de cette particularité est qu'un corps absorbe, pour changer d'état, une certaine quantité de chaleur qui s'y trouve exclusivement employée, et qui ne contribue nullement à modifier sa température. De là, le nom de *latente* donné à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cette quantité de chaleur qui est effectivement *cachée*, puisqu'elle n'est pas perceptible par l'instrument ordinairement employé pour révéler sa présence.

Réciproquement, si un corps opère inversement l'un des deux changements d'état, c'est-à-dire que de gazeux ou liquide il redevienne liquide ou solide, on peut très-bien observer une certaine quantité de chaleur qu'il dégage sans que sa température s'en trouve diminuée tout le temps que s'effectue l'opération. C'est, en effet, le dégagement de la chaleur latente qui lui était nécessaire pour se maintenir à l'état qu'il vient de quitter.

### CALORIQUE DE FUSION

29. Le premier exemple à citer pour la démonstration de l'existence du calorique latent est le passage de l'eau à l'état de glace, ou, réciproquement, son retour à l'état liquide, soit la fusion de la glace.

Avant même les expériences, que nous dirons *quantitatives*, on avait reconnu qu'il existait aussi bien de l'eau solide (de la glace) que de l'eau liquide à la température de 0 degré, quoiqu'il fût nécessaire de chauffer cette glace pour la faire fondre. Ceci suffisait déjà pour révéler l'existence de ce calorique uniquement absorbé pour effectuer le changement d'état; mais il restait à déterminer quelle était son importance.

Alors des recherches très-précises ont démontré que, si l'on met en présence 1 kilogramme de glace à la température de zéro avec un kilogramme d'eau à 79 degrés, la fusion s'étant opérée on obtient 2 kilogrammes d'eau liquide à la température zéro.

Par conséquent, toute la chaleur sensible que contenait l'eau liquide s'est trouvée complétement absorbée pour le changement d'état du kilogramme de glace, qui ne s'est point élevée de température, tandis que l'eau à 79 degrés s'est abaissée à zéro.

Le même résultat serait obtenu si, au lieu de 1 kilogramme d'eau à 79 degrés, on employait pour faire l'expérience 79 kilogrammes à 1 degré.

En nous reportant à ce qui a été dit (20) sur les capacités de chaleur, nous voyons que le kilogramme d'eau à 79 degrés représentait un même nombre d'unités de chaleur ou de calories qui ont été employées à la fusion du kilogramme de glace; d'où l'on conclut (expériences de MM. de la Provostaye et Desains) :

*Qu'un kilogramme de glace à zéro absorbe pour se fondre* 79 *unités de chaleur dite* LATENTE, *ou, plus exactement,* 79,25 *unités;*

*Qu'un kilogramme d'eau liquide à une température quelconque contient, au-dessus de zéro, autant de calories que de degrés de température, plus* 79,25.

Ce phénomène du calorique latent de fusion est commun à tous les corps, qui possèdent chacun leur quantité particulière de calorique absorbé par unité de poids.

30. Comme, dans les machines à vapeur, l'eau n'intervient que dans son second changement d'état, nous ne nous étendrons pas plus longtemps sur le premier



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dont il vient d'être question, et qu'il nous a paru indispensable de faire connaître. Donnons seulement des exemples pour clore ce sujet.

PREMIER EXEMPLE SUR LE CALORIQUE LATENT DE LA FUSION DE LA GLACE. — Proposons-nous de trouver la quantité d'eau à employer pour faire fondre un certain poids de glace supposée à 0 degré, ainsi que le mélange après la fusion; soit :

Glace..... $P = 25$ kilogrammes.
Eau..... $P' =$ le poids cherché.
Température de l'eau..... $t = 15$ degrés.
Calorique de fusion..... $l = 79{,}25$ calories.

*Solution.* Il faut autant de fois 79,25 unités que de kilogrammes de glace; d'autre part, ce nombre d'unités est égal au produit du poids d'eau cherché par sa température, c'est-à-dire :

$$Pl = P't.$$

Par conséquent, on trouve :

$$25 \times 79{,}25 = P' \times 15°; \text{ d'où } P' = \frac{25 \times 79{,}25}{15} = 132{,}08 \text{ kilogrammes.}$$

DEUXIÈME EXEMPLE. — Si l'on jette $P = 10$ kilogrammes de glace à zéro dans $P' = 100$ kilogrammes d'eau à 18 degrés, quelle température $x$ aura le mélange après la fusion?

*Solution.* La glace prendra pour se fondre 10 fois $l$, qui seront à retrancher des quantités de chaleur sensibles de l'eau, c'est-à-dire de 100 fois 18 degrès; et la température $x$ cherchée est le quotient de cette différence divisée par la somme des poids P et P'.

On trouvera donc :

$$x = \frac{(tP') - (Pl)}{P' + P} = \frac{(18° \times 100) - (10 \times 79{,}25)}{100 + 10} = 9{,}16 \text{ degrés.}$$

*Remarque sur l'exemple précédent.* Il est facile de trouver la quantité totale de chaleur $n$ que dégagerait cette masse liquide en passant à l'état solide et à la température zéro.

On aurait en effet :

$$n = (P + P')\, l + (P + P')\, x; \text{ ou } (P + P') \times (l + x);$$

d'où :

$$n = (10 + 100) \times (79{,}25 + 18°) = 10697{,}5 \text{ calories.}$$

Pour rendre ce résultat plus sensible, ajoutons que cette quantité de chaleur serait capable d'élever de 1 degré 10697 kilogrammes d'eau.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

### CALORIQUE LATENT DE VAPORISATION

31. Des effets complétement identiques aux précédents se passent pour le deuxième changement d'état des corps. Lorsque du liquide se transforme en vapeur, il absorbe une très-grande quantité de chaleur qui n'est aucunement sensible au thermomètre, attendu que la vapeur a exactement la même température que le liquide d'où elle émane.

La différence existant entre ce qui se passe pour la fusion et la vaporisation, c'est que les quantités de chaleurs latentes absorbées sont beaucoup plus considérables, à poids égaux, pour le deuxième changement d'état.

Mais tous deux présentent cette particularité que l'absorption de chaleur latente a lieu, quel que soit le mode de fusion ou de vaporisation, lente ou rapide. De la vapeur qui se forme librement dans l'atmosphère et par simple évaporation prend sensiblement la même quantité de chaleur latente que celle provenant de l'ébullition d'une masse liquide soumise à la même pression ambiante.

Quand de la vapeur se forme du sein d'une masse liquide exposée à l'action d'un foyer, elle prend sa chaleur latente à la masse liquide, qui, par conséquent, cesse de s'élever de température, ainsi que nous l'avons vu précédemment (13).

Mais si cette vapeur se forme d'un liquide placé hors de toute source active de chaleur, le calorique latent est pris à la fois sur la masse liquide, sur le vase qui la contient et aux objets environnants. Il peut même en résulter un refroidissement très-sensible pour ces corps environnants et pour la masse liquide si l'évaporation peut être continuée sans récupération de chaleur.

Malgré notre désir de ne pas anticiper sur la physique pure, nous ne pouvons nous dispenser de citer ici une expérience qui met parfaitement en lumière ce phénomène de l'absorption de chaleur latente par la vaporisation, quelles que soient les circonstances qui l'accompagnent et la température où elle se produit.

On place sous le récipient d'une machine pneumatique (fig. 9, p. suivante) une coupelle *a* contenant de l'eau à la température ordinaire, ce vase lui-même disposé au-dessus d'un bassin *b* rempli d'acide sulfurique concentré. Puis on commence à extraire l'air par le fonctionnement de la machine.

Au fur et à mesure que le vide se fait et que la pression diminue à l'intérieur de la cloche, l'eau entre en ébullition, s'évapore, et d'autant plus rapidement que l'action de la machine est elle-même plus prompte. Mais les vapeurs formées, qui ne tarderaient pas à arrêter la vaporisation si elles restaient dans la cloche, sont enlevées en partie par la machine, et le reste est absorbé par l'acide sulfurique.

Par conséquent, le vide se maintient sous le récipient et l'évaporation continue. Mais, après quelques instants, ce qui reste d'eau dans la coupelle est complétement congelé et ne forme plus qu'un glaçon.

L'explication de ce curieux phénomène est tout entière dans la définition qu'on vient de lire sur la chaleur latente. C'est la vapeur qui, en se formant, a pris son

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

calorique de vaporisation à la masse d'eau elle-même, jusqu'au point d'abaisser sa température à celle de la glace.

Fig. 9.




32. Maintenant il nous reste à donner la valeur de ce calorique latent de vaporisation dont les effets extérieurs sont rendus manifestes au moyen d'expériences très-simples.

Le savant M. Regnault, parmi différents expérimentateurs de mérite, s'est livré à des recherches très-précises sur la chaleur latente de vaporisation. Le résultat général de ses travaux sur le calorique latent de vaporisation de l'eau est consigné dans le tableau suivant :

**TABLE**

DES QUANTITÉS DE CALORIQUE LATENT DE VAPORISATION POUR DES VAPEURS QUI SE FORMENT DE 0° A 230 DEGRÉS.

| TEMPÉRATURES | CHALEURS latentes. | TEMPÉRATURES | CHALEURS latentes. | TEMPÉRATURES. | CHALEURS latentes. |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 607 | 80 | 551 | 160 | 494 |
| 10 | 600 | 90 | 544 | 170 | 486 |
| 20 | 593 | 100 | 537 | 180 | 479 |
| 30 | 586 | 110 | 529 | 190 | 472 |
| 40 | 579 | 120 | 522 | 200 | 464 |
| 50 | 572 | 130 | 515 | 210 | 457 |
| 60 | 565 | 140 | 508 | 220 | 449 |
| 70 | 558 | 150 | 501 | 230 | 442 |

Les valeurs renfermées dans les colonnes du tableau sous le titre de *chaleurs la-*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

*tentes* indiquent le nombre de calories absorbées par 1 kilogramme de vapeur d'eau, de chaque température correspondante, au moment de sa formation. Par conséquent, ce sont ces mêmes quantités de calories qui seraient restituées au retour de la vapeur à l'état liquide.

Longtemps on avait admis que la quantité de calorique latent était la même, quelle que soit la température de la formation de la vapeur; mais ce résultat même des recherches de M. Regnault nous prouve que cette idée n'est pas exacte, et que la quantité de calorique absorbé par la vaporisation diminue dans une certaine progression en raison inverse de celle des températures.

Pour ne choisir que des exemples les plus usuels, faisons remarquer que la vapeur d'eau à 100 degrés prend 537 unités de chaleur latente, tandis qu'elle n'en absorbe que 501 à 150 degrés.

## APPLICATION DU CALORIQUE LATENT DE VAPORISATION

33. L'ensemble de l'étude de la chaleur, employée pour former industriellement de la vapeur d'eau, est doublement importante pour la connaissance des quantités de combustibles à dépenser et pour celle de la condensation de cette même vapeur lorsqu'elle a produit son effet dans les machines motrices. Nous avons donc des exemples à montrer pour les deux cas.

Premier exemple. — Quelle quantité totale $n$ d'unités de chaleur doit-on fournir à un poids $P = 25$ kilogrammes d'eau à $t = 10$ degrés de température, pour transformer cette eau en vapeur sous la pression de 1 atmosphère?

*Solution.* La vapeur qui se forme sous une pression de 1 atmosphère ayant 100 degrés (7) ou T de température sensible au thermomètre, chaque kilogramme d'eau absorbera en unités de chaleur : $T - t$, plus la chaleur latente $l$ correspondant à la température $t$, d'après le tableau précédent. On aura donc pour le nombre total d'unités de chaleur :

$$n = (T - t) + l)P; \qquad (H)$$

expression générale qui donne pour l'exemple proposé :

$$n = (100° - 10° + 537) \times 25 = 15675 \text{ calories.}$$

Deuxième exemple. *Mélange d'eau et de vapeur.* — Une quantité donnée de vapeur étant mise en présence d'un certain poids d'eau froide à une température déterminée, et capable de la condenser complétement, trouver la température du mélange.

Soit la même quantité de vapeur que ci-dessus, ajoutée à :

$P' = 200$ kilogrammes d'eau,
$t = 15$ degrés, sa température;

cette quantité de vapeur étant ainsi représentée par :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

P = 25 kilogrammes;
T = 100 degrés, sa température;

quelle sera la température $x$ du mélange?

*Solution.* La masse totale, ou le poids de la vapeur ajouté à celui de l'eau, contiendra nécessairement leurs quantités totales de chaleur; il suffira donc de diviser la somme de ces quantités de chaleur par la masse totale pour trouver la température $x$ cherchée.

On trouvera par conséquent :

$$x = \frac{(T + l)\,P + (tP')}{P + P'}; \qquad (I)$$

expression générale donnant pour l'exemple proposé le résultat suivant :

$$x = \frac{(100^{o} + 537) \times 25^{k} + (15^{o} \times 200^{k})}{25^{k} + 200^{k}} = 84{,}11 \text{ degrés.}$$

Ceci fait déjà comprendre qu'il faut employer, relativement, de très-grands volumes d'eau froide pour faire repasser de la vapeur à l'état liquide et pour que l'eau résultant du mélange ne soit pas à une température trop élevée.

Troisième exemple. — Soit donné de résoudre le problème inverse, c'est-à-dire trouver la quantité d'eau à ajouter à un poids donné de vapeur pour que l'eau résultant du mélange ne dépasse pas une température donnée.

Soit :

P = 15 kilogrammes, le poids de la vapeur;
T = 150 degrés, sa température;
$l$ = 501, son calorique latent (d'après la table précédente);
P′ = le poids d'eau cherché;
$t$ = 10 degrés, sa température;
$t'$ = 25 degrés, la température du mélange.

*Solution.* En tenant simplement compte de ce que $t'$ remplace $x$, c'est exactement la formule ci-dessus (I) qu'il suffit de disposer suivant P′ pour inconnue.

Il vient :

$$t'P + t'P' = (T + l)\,P + t\,P';$$

d'où :

$$P' = \frac{(T + l - t')\,P}{t' - t}. \qquad (J)$$

Cette dernière expression est celle que nous retrouverons chaque fois qu'il s'agira de déterminer la condensation d'une machine à vapeur; nous engageons donc nos lecteurs à la bien prendre en considération.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour l'exemple que nous nous sommes proposé, elle donne le résultat ci-dessus :

$$P' = \frac{(100 + 501 - 25) \times 15}{25^{o} - 10^{o}} = 576 \text{ kilogrammes.}$$

C'est-à-dire, en résumé, qu'il faudrait employer 576 kilogrammes d'eau froide à 10 degrés pour détruire 25 kilogrammes de vapeur à 150 degrés, et que l'eau de condensation ne dépassât pas 25 degrés.

Toutes choses égales, d'ailleurs, il est évident qu'il faut d'autant plus d'eau pour condenser de la vapeur que cette eau est elle-même plus élevée de température et que le mélange doit être plus froid.

Il est hors de doute que, dans certaines circonstances, il est impossible de condenser directement la vapeur des machines ou appareils à condensation faute d'eau en assez grand volume et assez froide.

Nous verrons que les machines de navigation sont souvent exposées à voir leur condensation suspendue ou du moins ne fonctionnant pas convenablement, non pas faute d'eau, puisqu'elles en prennent à la mer, mais parce que cette eau peut être très-chaude, sous les zones tropicales, par exemple.

Ce que nous avions à dire des chaleurs latentes peut se borner là, quant à présent; les applications directes aux machines feront suffisamment comprendre tout ce qu'il peut être utile de connaître à cet égard.

FIN DU CHAPITRE DEUXIÈME.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

# CHAPITRE III

## SOURCES DE CHALEUR

### QUANTITÉS DE CHALEURS FOURNIES PAR LES COMBUSTIBLES

34. Après l'étude des quantités de chaleur nécessaires pour élever la température des corps et produire leurs changements d'état, il vient tout naturellement celle des sources de chaleur sous le point de vue des quantités qu'elles en peuvent fournir; c'est la question économique complète du calorique comme emploi et production.

La science nous apprend que la combustion d'un corps est la combinaison chimique de ce corps avec l'oxygène, phénomène accompagné d'un très-grand dégagement de lumière et de chaleur. Considérés sous ce point de vue, tous les corps de la nature seraient des combustibles, puisqu'ils possèdent tous, plus ou moins, la propriété de se combiner avec l'oxygène; mais tous ne présentent pas, au moment de cette combinaison, les propriétés que l'on recherche pour un combustible, c'est-à-dire la somme de chaleur dégagée plus grande que celle nécessaire pour opérer la combustion, cette combustion persistant même en dehors du foyer où elle s'opère, et le prix de revient du corps lui-même.

Pour sortir des généralités et s'appuyer sur des exemples, disons que du bois, du charbon, de l'hydrogène, quelques autres substances, brûlent pour ainsi dire spontanément, ou au moins achèvent leur combustion complétement à partir du moment où un seul point de leur masse a été porté à une température suffisante. D'autres corps, les métaux par exemple, qui se combinent très-bien avec l'oxygène, cessent de brûler aussitôt qu'on les sort du foyer où la combinaison s'opère, foyer que l'on est obligé, par conséquent, d'alimenter à l'aide d'un autre corps plus facilement combustible.

En résumé, les corps combustibles, ou plus simplement *les combustibles industriels* sont peu nombreux et comprennent :

Les bois, ou en général les végétaux ;

Les charbons végétaux et minéraux;

La tourbe.

Ces corps sont ceux qui présentent dans leur composition la plus grande quantité de carbone et d'hydrogène, les deux seuls corps simples qui possèdent, isolément, toutes les propriétés requises pour le phénomène d'une combustion industrielle, et la propriété d'être, par conséquent, d'excellents combustibles.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les substances animales, telles que la chair, les graisses et les os, sont aussi très-combustibles; mais leur composition très-complexe est cause que l'absorption de chaleur propre à la séparation de ces divers éléments, au moment de la combustion, est considérable, et qu'un poids donné de matières animales ne fournit pas une aussi grande quantité de chaleur utilisable que les combustibles réels dont la composition est plus simple. D'ailleurs, les substances animales ont assez d'emplois précieux pour ne point les utiliser comme combustibles, bien que cela ait eu lieu accidentellement.

35. Notre examen des combustibles ne peut être que très-succinct, n'ayant pour but que de faire connaître les quantités de chaleur que chacun d'eux peut fournir à l'unité de poids.

L'estimation de ces quantités de chaleur est entièrement basée sur l'unité calorifique dont il a été donné précédemment la définition. Ainsi, supposons que l'on ait pris un kilogramme d'un corps combustible quelconque, et que l'on ait trouvé que la chaleur qui s'en est dégagée pendant sa combustion complète a élevé 2000 kilogrammes d'eau de 1 degré; si l'expérience est faite avec toute la précision suffisante pour que l'on puisse être sûr que toute la chaleur dégagée a été prise par l'eau, on dira que 1 kilogramme de ce combustible a fourni, en brûlant, 2000 calories ou unités de chaleur, puisque nous savons (20) que c'est à cette valeur que l'on estimerait la quantité de chaleur nécessaire pour faire varier de 1 degré en plus la température de 2000 kilogrammes d'eau.

La quantité de chaleur dégagée et ainsi mesurée prend le nom de *puissance calorifique* du combustible auquel elle correspond. Des expériences très-précises ont été faites en vue de déterminer ainsi les puissances calorifiques de tous les corps. Elles ont montré que ces puissances étaient non-seulement différentes pour les corps différents, mais aussi très-variables pour le même corps quand sa composition est susceptible de varier.

Or, les combustibles industriels, étant tous des corps de composition complexe, présentent tous cette particularité des puissances calorifiques variables pour une même substance.

Il est clair que les bois, par exemple, sont différents d'essences et varient de composition pour la même espèce, sans parler de leur état plus ou moins complet de dessiccation.

Les houilles, quoique moins variables de composition, le sont néanmoins.

Le charbon de bois, l'un des combustibles les plus purs, présente aussi quelques différences dues à sa préparation plus ou moins parfaite.

36. Cependant, ces différences doivent être considérées plutôt comme scientifiques qu'industrielles : c'est-à-dire qu'il existe pour chaque combustible une puissance calorifique moyenne dont nous pouvons nous contenter pour en faire l'application que nous nous sommes proposée. Ce sont ces chiffres dont le tableau suivant donne un résumé, et auquel nous avons ajouté les puissances calorifiques de l'hydrogène pur et de l'hydrogène bicarboné ou gaz d'éclairage, quoique ces deux corps ne soient pas encore considérés comme combustibles industriels.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## TABLE

DES PUISSANCES CALORIFIQUES DES COMBUSTIBLES INDUSTRIELS.

| NATURE DES COMBUSTIBLES | PUISSANCE calorifique exprimée en calories dégagées par la combustion de 1 kil. de chaque substance. | NOMS des observateurs. |
|---|---|---|
| | | MM. |
| Hydrogène pur (par kilog.) | 34462 | Favre et Silbermann. |
| *Id.* (par mètre cube) | 3067 | *Id.* *Id.* |
| Hydrogène bicarboné (par kilog.) | 11857 | *Id.* *Id.* |
| *Id.* (par mètre cube) | 15117 | *Id.* *Id.* |
| Carbone pur | 8080 | *Id.* *Id.* |
| Charbon de bois (moyenne) | 7000 | Péclet. |
| Bois très-sec | 3700 | Rumfort. |
| Bois (état ordinaire) (moyenne) | 2800 | *Id.* |
| Houille (moyenne) | 7000 | Dulong. |
| Coke (à 0.15 de cendres) | 6000 | Péclet. |
| Tourbe ordinaire (moyenne) | 3600 | *Id.* |
| Huile de colza épurée | 9307 | Rumfort. |
| Alcool à 42° Beaumé | 6853 | Dulong. |

Les valeurs indiquées par ce tableau correspondent évidemment aux quantités maximum de chaleur pour chaque combustible. Par conséquent, c'est ce que nous appellerons les puissances calorifiques théoriques, sur lesquelles la pratique ne peut utiliser que des effets plus ou moins grands.

Il ne faudrait pas penser, toutefois, que ces valeurs sont exemptes d'inexactitudes légères; la diversité des résultats obtenus par des expérimentateurs, également habiles, prouve le contraire; et, d'ailleurs, il n'est pas probable qu'avec le phénomène compliqué de la combustion d'un corps on puisse trouver des nombres toujours les mêmes et toujours invariables pour un même corps. C'est surtout dans les emplois industriels que les combustibles, qui ne sont évidemment choisis ni préparés comme pour une expérience, présentent des différences qui semblent éloigner tout espoir de compter sur des puissances calorifiques d'une exactitude mathématique.

Telles qu'elles sont, ces valeurs peuvent rendre des services incontestables, ainsi qu'on le verra par la suite. Leur degré d'approximation est d'ailleurs presque toujours plus que suffisant pour la pratique.

Cependant il serait peut-être nécessaire de faire de nouvelles expériences à cause de quelques générateurs perfectionnés d'aujourd'hui, où l'on semble obtenir une utilisation extraordinaire du combustible, ainsi que nous le verrons plus loin.

Le chiffre de la puissance calorifique d'un combustible joue le même rôle dans les générateurs à vapeur que le jaugeage de la dépense d'eau pour les moteurs hydrauliques; dans les deux cas c'est évidemment le point qui sert de base au rendement. Il est donc très-important qu'il n'existe là aucune incertitude.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## APPLICATION DES PUISSANCES CALORIFIQUES

37. Avant de nous être occupé des sources, nous avions pu nous rendre compte des échanges de chaleur entre différents corps et, surtout, des quantités de chaleur à fournir à ces corps pour produire des élévations de température déterminées et les changements d'état. Maintenant nous sommes en mesure d'estimer les quantités de combustible à dépenser pour effectuer ces mêmes opérations.

Nous ferons d'abord une remarque très-importante. Dans les exemples suivants, nous cherchons les quantités de chaleur *utiles*, c'est-à-dire celles rigoureusement nécessaires, et non compris ce qui se trouve perdu, quelle que soit l'excellence du foyer et la disposition des appareils.

### RECHERCHE DE LA DÉPENSE DE COMBUSTIBLE POUR PRODUIRE UNE ÉLÉVATION DONNÉE DE TEMPÉRATURE

38. Premier exemple. — Quelle quantité utile de charbon de bois faut-il dépenser pour élever de 10 degrés la température de 100 kilogrammes d'eau ?

*Solution*. Toutes les notions précédentes nous indiquant de quelle façon l'on peut déterminer la quantité $n$ de calories à fournir, il est très-simple de trouver que le poids $p$ de charbon, dont la puissance calorifique sera $u$, égale :

$$p = \frac{n}{u}.$$

En admettant, d'après la table précédente, 7000 pour $u$ correspondant au charbon de bois ordinaire, on trouve pour l'exemple proposé :

$$p = \frac{10 \times 100}{7000} = 0^k142.$$

On ne devrait, en effet, dépenser que ce poids de charbon si toute la chaleur du combustible pouvait être exclusivement absorbée par la masse d'eau à échauffer. Mais, en supposant même que le vase qui contient le liquide et le foyer n'absorbent pas de calorique, étant préalablement échauffés, il resterait encore des pertes de toute nature qui augmentent notablement la quantité théorique ci-dessus trouvée.

Admettons, pour exemple, que les dispositions soient telles que l'on puisse utiliser 0,6, on brûlerait donc réellement :

$$\frac{0,142}{0,6} = 0^k237 \text{ de charbon.}$$

Deuxième exemple. — Quel poids utile de houille doit-on brûler pour liquéfier 50 kilogrammes de glace à 0 degré et porter le liquide à la température de 100 degrés?

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

*Solution.* La quantité $n$ de calories à fournir étant (29),

$$(t + l)\,\mathrm{P},$$

on aura :

$$p = \frac{(100 + 79) \times 50}{7600} = 1^{k}177 \text{ de houille.}$$

### PUISSANCE VAPORISATOIRE D'UN POIDS DONNÉ DE COMBUSTIBLE

39. Quel poids P de vapeur à 100 degrés produirait-on en dépensant 1 kilogramme utile de houille, l'eau à chauffer étant préalablement à 15 degrés?

Ceci est le problème le plus important de l'application du calorique dans les machines à vapeur; c'est celui qui est, ainsi que nous le verrons, le pivot autour duquel tournent tous les perfectionnements qui ont été imaginés et qui le seront encore à l'égard de ces moteurs.

Voyons d'abord la réponse directe que fournit la théorie.

*Solution.* On a vu précédemment (33, H) que la quantité de calories à fournir à un certain poids d'eau, pour le vaporiser, était exprimée par :

$$n = (\mathrm{T} - t + l)\,\mathrm{P};$$

ce nombre de calories devant être égal à celui dégagé par le poids $p$ de combustible proposé, et dont la puissance calorifique est $u$, on trouve :

$$pu = (\mathrm{T} - t + l)\,\mathrm{P};$$

d'où le poids P cherché, d'eau vaporisée, est égal à :

$$\mathrm{P} = \frac{pu}{\mathrm{T} - t + l} = \frac{1^{k} \times 7600}{100 - 15 + 537} = 12^{k}21.$$

Ce qui revient à dire que :

1 *kilogramme de houille peut,* THÉORIQUEMENT, *vaporiser environ* 12 *kilogrammes d'eau dont la température serait primitivement de* 15 *degrés.*

Si la vapeur avait été supposée plus élevée de température, la quantité de combustible eût été aussi un peu plus forte, mais seulement d'une faible quantité, attendu que la chaleur latente, qui est la plus considérable, varie peu, et en sens inverse.

Nous n'ajouterons pas d'autre exemple à ce dernier, qui suffit pour établir la base de toutes les discussions relatives à ce point.

Mais il est essentiel de faire tout de suite une remarque sur ce résultat comparé à ceux obtenus en pratique.

Généralement, on vaporise 7 kilogrammes d'eau avec les bons générateurs à vapeur; on produit aussi souvent moins; mais on a produit plus, et même, dans certains cas, presque autant que ce chiffre théorique de 12 kilogrammes, qui semble ne pouvoir être atteint que très-difficilement, si ce n'est jamais.

Cependant, cela peut avoir lieu, mais rarement, à l'aide de dispositions particu-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lières ou d'un artifice qui consiste, par exemple, à activer la combustion par un courant d'air additionnel qui vient opérer la transformation complète du charbon en acide carbonique, et empêcher qu'aucune particule quelconque de matière combustible ne s'échappe du foyer sans être brûlée, et par conséquent, sans fournir la chaleur qui en résulte. C'est ce qu'on appelle *brûler la fumée*, laquelle n'est autre chose, en grande partie, que du charbon non brûlé, et, par conséquent, non utilisé.

Au reste il n'est pas inutile de se souvenir que la quantité de calories, 7600, indiquée au tableau précédent, pour 1 kilogramme de houille, est une moyenne, et peut être, par conséquent, dépassée quelquefois.

Pour poser les limites absolues, supposons l'emploi du carbone pur qui fournirait 8000 unités de chaleur, et nous trouvons que 1 kilogramme de ce meilleur combustible ne fournirait encore, comparativement à la houille, que :

$$\frac{12{,}21 \times 8000}{7600} = 12^{k}84 \text{ de vapeur.}$$

40. Nous n'avons pas indiqué d'exemples de l'emploi des autres combustibles, attendu que les opérations à faire sont évidemment identiques dans tous les cas : il suffit de changer la valeur de $u$, c'est-à-dire le coefficient de puissance calorifique.

Tout ce qu'il pourrait être intéressant d'examiner, c'est le prix de revient de l'unité de chaleur avec chaque combustible différent, ce que Péclet a fait avec beaucoup de soin dans son excellent *Traité de la chaleur*.

Mais il est aussi remarquable que l'emploi de tel ou tel combustible dépend beaucoup moins de sa valeur vénale que de la facilité plus ou moins grande avec laquelle on peut se le procurer dans chaque localité.

Ainsi un pays, comme la France, la Belgique ou l'Angleterre, qui possède de la houille et relativement peu de bois, préfère généralement ce premier combustible, qui est aussi celui qui donne le plus de chaleur sous un volume moindre et qui peut produire dans un foyer une élévation de température plus intense.

D'autre part, de certains services, tels que la navigation, choisiront toujours le combustible le plus riche, à cause de la moindre place qu'il occupe.

Mais, toutes choses égales d'ailleurs, un établissement industriel possède parfois un combustible issu naturellement de sa fabrication propre qui se trouve presque gratuitement à sa disposition, ce qui fait qu'il l'emploie sans avoir à rechercher s'il est plus ou moins riche que tel ou tel autre.

C'est ainsi que nous voyons les scieries alimenter le foyer de leurs générateurs avec de la sciure de bois et des copeaux, les tanneries utiliser la tannée, les sucreries des colonies employer la bagasse ou paille de canne sèche, etc.

Donc, le prix de l'unité de chaleur n'aurait un véritable intérêt que dans une situation où tous les combustibles seraient également disponibles, ce qui, on peut le dire, n'arrive jamais.

FIN DU CHAPITRE TROISIÈME

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

# CHAPITRE IV

## PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DE LA VAPEUR

### CONDITIONS DE L'ÉCOULEMENT ET DE LA DÉPENSE DE LA VAPEUR

41. Tout ce que l'on a vu jusqu'ici sur la vapeur d'eau peut être regardé comme constituant ses propriétés physiques, c'est-à-dire les phénomènes naturels créés par l'intervention du calorique, qui transforme un corps en un fluide aériforme, pouvant être considéré comme tel et possédant tous les caractères des gaz permanents.

Comme ces derniers, et comme les fluides, en général, la vapeur est susceptible de mouvements et d'effets qui ne proviennent plus, cette fois, des actions mutuelles des éléments pondérables ou non qui les constituent, mais bien des *efforts mécaniques* qu'on lui fait supporter ou qu'elle est elle-même capable de produire.

Si nous adoptons l'eau pour point de comparaison, nous remarquons que ce liquide, ayant ses propriétés physiques, comme densité, capacité calorifique, etc., possède aussi les propriétés mécaniques dues à l'action de la pesanteur, et qui la font considérer sous le rapport de ses mouvements, de la vitesse qu'elle peut acquérir et des efforts qu'elle peut transmettre en cédant à l'influence de la pesanteur terrestre et de sa propre matière.

Il en est tout à fait de même de la vapeur et des gaz, en général, qui peuvent se mouvoir, acquérir de la vitesse et enfin exercer des efforts mécaniques en vertu de leur force expansive, qui représente alors, comme effet, la pesanteur simple d'un liquide.

Nous avons donc à examiner la vapeur d'eau sous ses différents points de vue en faisant ce que nous appellerons de *la pneumodynamique*, comme nous faisions de *l'hydrodynamique* (voir *Moteurs hydrauliques*) à l'égard de l'eau.

### ÉCOULEMENT DE LA VAPEUR PAR UN ORIFICE PERCÉ EN MINCE PAROI

42. Lorsqu'on vient mettre en communication deux capacités différentes renfermant des gaz à des pressions inégales, il s'opère un écoulement de gaz de la capacité où la pression est la plus forte dans celle où elle est la plus faible; c'est exactement ce qui arrive lorsqu'on fait communiquer entre eux deux vases contenant des liquides de densités inégales ou dont les hauteurs de niveaux sont différentes, ou, encore, si l'un des deux vases est complétement vide.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour les gaz comme pour les liquides, l'équilibre tend à s'établir par l'écoulement du fluide plus pressé dans celui qui l'est moins; et cet écoulement suit exactement la même loi dans les deux cas.

Dans le *Traité des moteurs hydrauliques*, nous avons montré que l'écoulement d'un fluide, comme vitesse et comme produit, par un orifice percé dans la paroi du vase qui le contient, au-dessous de la surface libre, dépendait de deux conditions principales : la hauteur verticale du centre de cet orifice au niveau supérieur et la section de l'orifice; et que la vitesse était exprimée par cette formule invariable :

$$v = \sqrt{2gh}$$

dans laquelle $g$ égale 9,8088, et représente la vitesse acquise par un corps au bout d'une seconde de chute dans le vide.

Nous avons dit également que le volume d'eau écoulé était le produit de cette vitesse par la section de l'orifice et par un certain coefficient de contraction.

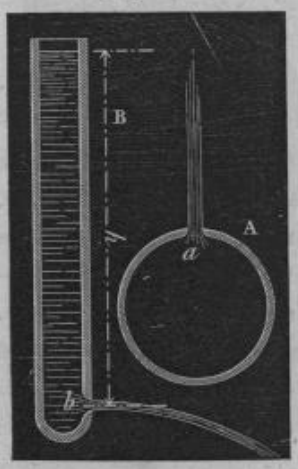
Il en est exactement de même pour les gaz, mais dont la force expansive doit remplacer la hauteur $h$ qui établit, pour les liquides, la charge sur l'orifice d'écoulement, et la hauteur génératrice de la vitesse.

Par conséquent, écartant, pour l'instant, les autres conditions du problème, cherchons la valeur de $h$ lorsqu'il s'agit de l'écoulement d'un gaz. Nous supposons, à cet effet, que l'écoulement s'effectue par un orifice en mince paroi qui diminue la dépense par la contraction, mais qui n'altère pas la vitesse.

43. VITESSE D'ÉCOULEMENT D'UN GAZ PAR UN ORIFICE EN MINCE PAROI. — La théorie et l'expérience démontrent :

*Que la vitesse d'un fluide* ÉLASTIQUE, *qui s'écoule dans un certain milieu, par un orifice en mince paroi, est la même que celle que posséderait, dans les mêmes conditions, un fluide,* NON ÉLASTIQUE, *de même densité que ce gaz, mais qui, par sa hauteur de colonne sur le centre de l'orifice, serait capable d'y exercer une égale pression relative.*

Fig. 10.




Pour rendre ce théorème complétement intelligible, supposons deux vases A et B (fig. 10) placés dans un même milieu, l'atmosphère, par exemple, et renfermant, l'un un gaz et l'autre un liquide dans les conditions suivantes :

1° Le vase A contenant un gaz à une certaine pression;

2° Celui B contenant librement un liquide *d'une densité égale à celle du gaz* du vase précédent, et dont la hauteur $h$ de colonne est suffisante pour presser le fond de ce vase B avec une intensité égale à la pression du gaz contre la paroi intérieure du vase A.

Si, dans cette situation, on pratique un orifice $a$ en un point quelconque du vase A, et un orifice $b$ à la partie inférieure du vase B, le gaz et le liquide s'écouleront, et tous deux avec la même vitesse.

44. Cette loi nous permet de déterminer un premier problème qui servira également à établir la formule générale propre aux applications que nous en voulons faire.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Soit qu'il s'agisse de déterminer la vitesse par 1″ avec laquelle l'air atmosphérique, à la température 0 degré, rentre dans le vide, supposé parfait.

On a :

Pression de l'air (en cent. de mercure)..... $P = 0{,}76$
Densité de l'air..... $d = 0{,}001299$
« du mercure..... $d' = 13{,}598$
Pression du milieu où se fait l'écoulement..... $p = 0$
Vitesse de l'écoulement par seconde..... $v = \sqrt{2gh}$,

D'après le théorème ci-dessus, on voit qu'il ne reste plus qu'à déterminer $h$ pour que le problème puisse être complétement résolu.

D'autre part, on a vu que cette hauteur devait être équivalente à une colonne de liquide de même densité que l'air et exerçant une même pression à sa base, pression qui est égale à la différence des pressions du gaz et du milieu où se fait l'écoulement, ou :

$$P - p.$$

Mais comme ici $p$ est le vide, et équivaut, par conséquent, à 0, cette pression $P - p$ est précisément égale à P et correspond à une colonne de mercure de 0,76; la colonne de fluide non élastique, qui lui ferait équilibre, a donc une hauteur en raison inverse des densités de ce fluide et du mercure, c'est-à-dire qu'elle est égale à :

$$h = P\frac{d'}{d} = 0^m 76 \times \frac{13{,}598}{0{,}001299} = 7955{,}7 \text{ mètres.}$$

Il faudrait donc une colonne de fluide de même densité que l'air, de 7955 mètres de hauteur, pour faire équilibre à celle de 0,76 de mercure.

Par conséquent, la vitesse due à une telle hauteur égale :

$$v = \sqrt{19{,}62 \times 7955{,}7} = 395 \text{ mètres,}$$

vitesse cherchée, celle suivant laquelle l'air atmosphérique rentre dans une capacité où le vide a été fait.

En résumé, lorsqu'on n'a pas à tenir compte des changements de volumes et de densités dépendant des températures, ce problème ne présente aucune difficulté. C'est comme tel que nous trouverons à l'appliquer pour la vapeur dont les tables (p. 18 et 19) donnent toujours les pressions et les densités en relation avec la température, qui, par conséquent, n'a pas besoin de figurer dans le calcul précédent.

45. La formule générale qui convient à la recherche de la vitesse d'un gaz ou de la vapeur est donc celle-ci :

$$v = \sqrt{2g\,(P - p)\,\frac{d'}{d}}$$

dans laquelle,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$v$ représente la vitesse cherchée en mètres par seconde;
$g$ « l'intensité de la pesanteur, égale à 9,8088;
P « la pression absolue du gaz ou de la vapeur, en mètres de mercure;
$p$ « la pression du milieu où se fait l'écoulement, exprimée en unités semblables;
$d'$ « la densité du mercure par rapport à celle de l'eau et égale à 13,598;
$d$ « la densité du gaz qui s'écoule, aussi par rapport à celle de l'eau.

En faisant entrer les quantités fixes dans la formule générale précédente, on trouve d'abord l'expression suivante :

$$v = \sqrt{\frac{2 \times 9{,}8088 \times (\mathrm{P} - p) \times 13{,}598}{d}};$$

laquelle comporte une simplification par le produit de ces mêmes quantités fixes, et devient, en résumé :

$$v = \sqrt{\frac{266{,}76\ (\mathrm{P} - p)}{d}}.$$

Si la pression $\mathrm{P} - p$ était exprimée en atmosphères et fractions d'atmosphères, il faudrait, pour avoir la hauteur génératrice réelle en mètres de mercure, multiplier cette pression, ainsi exprimée, par la hauteur qui fait équilibre à une atmosphère.

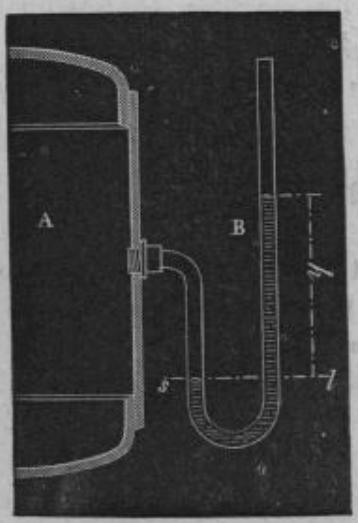
La formule, modifiée en ce sens, deviendrait :

$$v = \sqrt{\frac{2 \times 9{,}8088 \times 0{,}76\ (\mathrm{P} - p)\ 13{,}598}{p}};$$

réduisant, comme ci-dessus par rapport aux quantités fixes, on trouve :

$$v = \sqrt{\frac{202{,}7376\ (\mathrm{P} - p)}{d}}.$$

Fig. 11.




46. La pression résultante, $\mathrm{P} - p$, qui constitue la hauteur génératrice de la vitesse effective de l'écoulement, peut provenir d'une observation directe suivant la disposition de l'instrument qui a servi à la déterminer.

Cet instrument sera *le manomètre à air libre*, ou indicateur différentiel de pression, que l'on peut employer pour mesurer la force élastique d'un gaz ou d'une vapeur par rapport à un certain milieu ambiant.

Supposons une capacité A (fig. 11) renfermant un fluide aériforme quelconque, à une pression plus élevée que celle du milieu où il se trouve placé.

Si on lui adapte un tube B, recourbé en U, contenant du mercure et mis en communication avec l'intérieur du récipient par sa courte branche, tandis que sa plus longue est ouverte librement à la pression extérieure, la pression intérieure agissant sur le mercure le fera monter dans la branche ouverte.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour trouver les conditions d'équilibre du mercure ainsi déplacé, il suffit de mener une ligne horizontale $sl$ par le sommet de la colonne la plus basse et d'examiner la nature des pressions que le mercure supporte en chacun des points situés sur cette ligne.

Cette pression est égale, dans la grande branche, à la pression du milieu ambiant, plus la hauteur $h$ de mercure soulevée; et comme elle ne peut être qu'égale dans l'autre branche et qu'elle est due tout entière à la pression dans le réservoir A, on en conclut que cette pression est, en effet, égale à la pression extérieure, plus la hauteur $h$ de mercure.

Par conséquent, cette hauteur $h$ est précisément égale à la différence des deux pressions et constitue celle $P - p$, qui figure dans le calcul précédent.

Donc, à l'avenir, toute pression génératrice d'une vitesse d'écoulement sera représentée, dans nos opérations, par une colonne de mercure $h$ observée rigoureusement suivant la méthode précédente. C'est cette pression qui, estimée en mètres, doit être multipliée par le rapport de la densité du mercure à celle du fluide que l'on considère, pour obtenir la hauteur réelle qui devient la génératrice de la vitesse d'écoulement de ce fluide.

47. Problèmes sur l'écoulement de la vapeur par orifices en mince paroi. — Proposons-nous de déterminer la vitesse de la vapeur d'eau qui s'écoulerait dans un milieu d'une pression déterminée.

Premier exemple. — Trouver la vitesse de la vapeur à une pression de 3 atmosphères s'écoulant à l'air libre par un orifice en mince paroi.

*Solution.* La vapeur, ayant 3 atmosphères de pression, est représentée par une colonne de mercure de

$$P = 0{,}76 \times 3 = 2^{m}28;$$

et la table de la page 19 indique que sa densité est égale à

$$d = 0{,}001615.$$

D'autre part, si la pression du milieu ambiant est 0,76, on trouve pour la vitesse cherchée :

$$v = \sqrt{\frac{266{,}76 \times (2{,}28 - 0{,}76)}{0{,}001615}} = 502 \text{ mètres.}$$

Deuxième exemple. — Trouver la vitesse d'écoulement de la vapeur à 5 atmosphères, la différence de pression entre le réservoir et le milieu où l'écoulement s'effectue étant mesurée par une colonne de mercure de $0^{m}45$.

*Solution.* On a :

$$P - p = 0{,}45,$$

$$d' = 0{,}0025763 \quad (\text{p. } 19);$$

d'où :

$$v = \sqrt{\frac{266{,}76 \times 0{,}45}{0{,}0025763}} = 216 \text{ mètres.}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Troisième exemple. — Trouver la vitesse d'écoulement de la vapeur à $3^{at.}75$ dans un milieu dont la pression est de $1^{at.}80$.

*Solution.* La table (p. 19) indique, pour les densités de la vapeur à $3^{at.}1/2$ et 4 atmosphères, 0,0018589 et 0,0020997; la densité de la vapeur à $3^{at.}75$ sera sensiblement une moyenne entre les précédentes; soit :

$$d' = \frac{0{,}0018589 + 0{,}0020997}{2} = 0{,}0019793.$$

La pression exprimée, cette fois, en atmosphères, sera :

$$P - p = 3{,}75 - 1{,}80 = 1{,}95.$$

Par conséquent, on trouve, avec la formule ci-dessus disposée *ad hoc* :

$$v = \sqrt{\frac{202{,}7376 \times 1{,}95}{0{,}0019793}} = 447 \text{ mètres.}$$

48. Nous ne multiplierons pas davantage les exemples, ceux qui précèdent étant suffisants pour faire comprendre l'application de la règle. Nous ajouterons seulement quelques réflexions où l'on se trouve conduit par la règle même.

La disposition de la formule fait connaître le mode général de l'écoulement des gaz. Elle fait remarquer que :

1° Les vitesses d'écoulement sont proportionnelles aux racines carrées des pressions effectives, c'est-à-dire aux excès de pression qui donnent lieu à l'écoulement;

2° Elles sont en raison inverse des racines carrées des densités.

Ce qui permet de reconnaître encore :

Que, pour un gaz comprimé, dont la densité est proportionnelle à la pression qu'il supporte, les vitesses d'écoulement, dans le vide, sont égales pour une même température, quel que soit le degré de compression.

A l'égard des vapeurs au maximum de force élastique (6), dont la densité n'est pas proportionnelle à la tension, il arrive cependant une certaine limite où la vitesse d'écoulement cesse de s'accroître sensiblement avec la pression.

Supposons, comme exemple, des vapeurs s'écoulant dans l'atmosphère ambiante à 5 et 10 atmosphères de tension, dont les densités sont, d'après la table donnée page 19, 0,0025763 et 0,0048226, et cherchons les vitesses correspondantes.

Nous trouvons :

$$\text{Pour } 5^{atm.} : v = \sqrt{\frac{202{,}7376 \times (5-1)}{0{,}0025763}} = 562 \text{ mètres;}$$

$$\text{pour } 10^{atm.} : v = \sqrt{\frac{202{,}7376 \times (10-1)}{0{,}0048226}} = 615 \text{ mètres.}$$

Ce n'est donc qu'une différence de 53 mètres de vitesse pour 5 atmosphères de différence de tension.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## TABLES ET TRACÉ GRAPHIQUE RELATIFS A L'ÉCOULEMENT DE LA VAPEUR

49. La solution des problèmes de la nature de ceux que nous venons de passer en revue exige toujours trop de temps et une aptitude trop spéciale pour que les praticiens puissent généralement en tirer tout le profit possible; d'ailleurs des intérêts d'un ordre tout autre et non moins importants exigent à leur tour qu'on ne puisse se livrer à l'incertitude des résultats d'un calcul direct : il faut, au contraire, à un constructeur des renseignements certains, issus d'une étude qui ne peut être faite que par l'homme de cabinet soustrait aux préoccupations d'une application immédiate.

C'est en cela que les tables de calculs faits sont d'une utilité incontestable; elles permettent de résoudre une question proposée très-rapidement et avec sûreté, attendu que chaque chiffre qu'on leur emprunte fait partie d'une série en progression régulière dont les termes se vérifient, pour ainsi dire, par leur simple rapprochement. C'est pourquoi nous nous sommes constamment attaché à accompagner autant que possible les règles pratiques de tables toutes faites qui simplifient les calculs et donnent la certitude d'obtenir des résultats exacts.

C'est dans ce même but que nous reproduisons les deux tables suivantes des vitesses d'écoulement de la vapeur dans les circonstances les plus générales de l'application. Ces deux tables, qui, du reste, peuvent être calculées tout entières à l'aide des règles précédentes, sont empruntées à l'excellent ouvrage *le Guide du mécanicien conducteur de machines locomotives,* de MM. Flachat et Petiet.

La première table est relative à l'écoulement de la vapeur dans l'atmosphère ambiante, à des pressions qui varient de 5 à 1,01 atmosphères; la densité de la vapeur, ou son poids par mètre cube pour chaque pression, s'y trouve encore reproduit.

La deuxième table indique les vitesses d'écoulement de la vapeur à 5, 4 et 3 atmosphères dans des milieux dont la pression varie de 4,95 à 1,25 atmosphères. Une colonne est réservée pour la pression effective exercée par la vapeur par mètre carré de surface. Cette pression est évidemment la même dans les trois cas pour une même pression résistante, puisque les différences sont aussi les mêmes.

Par conséquent, la série est complète avec les deux tables, puisqu'on peut résoudre ce problème pour de la vapeur variant de 1,01 à 5 atmosphères, s'écoulant dans des milieux de pressions différentes de 1 à 4,95 atmosphères.

Après ces deux tables, nous donnons un tracé graphique qui permet encore de résoudre les mêmes problèmes.

Dans tous les cas, on suppose l'écoulement effectué par un orifice en mince paroi; car autrement, si cet orifice avait une épaisseur considérable et comparable au développement d'un tuyau, la vitesse serait altérée. Cette façon d'envisager la question forme le sujet de l'un des articles suivants.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## PREMIÈRE TABLE

VITESSES DE LA VAPEUR S'ÉCHAPPANT DANS L'ATMOSPHÈRE A DIVERSES PRESSIONS.

| PRESSION absolue de la vapeur qui s'écoule. | POIDS du mètre cube. | VITESSE d'écoulement par seconde. | PRESSION absolue de la vapeur qui s'écoule. | POIDS du mètre cube. | VITESSE d'écoulement par seconde. | PRESSION absolue de la vapeur qui s'écoule. | POIDS du mètre cube. | VITESSE d'écoulement par seconde. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5,00 | 2,568 | 562 | 1,75 | 0,984 | 394 | 1,12 | 0,674 | 194 |
| 4,75 | 2,457 | 554 | 1,60 | 0,900 | 368 | 1,10 | 0,636 | 178 |
| 4,50 | 2,334 | 549 | 1,50 | 0,854 | 343 | 1,09 | 0,630 | 170 |
| 4,25 | 2,217 | 546 | 1,45 | 0,830 | 334 | 1,08 | 0,626 | 164 |
| 4,00 | 2,096 | 537 | 1,40 | 0,800 | 318 | 1,07 | 0,622 | 154 |
| 3,75 | 1,972 | 530 | 1,35 | 0,778 | 302 | 1,06 | 0,619 | 140 |
| 3,50 | 1,855 | 520 | 1,30 | 0,750 | 285 | 1,05 | 0,610 | 129 |
| 3,25 | 1,734 | 512 | 1,25 | 0,722 | 265 | 1,04 | 0,607 | 116 |
| 3,00 | 1,611 | 502 | 1,22 | 0,705 | 252 | 1,03 | 0,601 | 101 |
| 2,75 | 1,487 | 488 | 1,20 | 0,693 | 242 | 1,02 | 0,598 | 83 |
| 2,50 | 1,363 | 472 | 1,18 | 0,681 | 232 | 1,01 | 0,595 | 58 |
| 2,25 | 1,238 | 451 | 1,16 | 0,670 | 220 | 1,00 | 0,590 | 0 |
| 2,00 | 1,111 | 427 | 1,14 | 0,658 | 213 | » | » | » |

## DEUXIÈME TABLE.

VITESSES DE LA VAPEUR S'ÉCHAPPANT DANS DES MILIEUX A DES PRESSIONS DIFFÉRENTES.

| VAPEUR A 5 ATMOSPHÈRES ABSOLUES | | | VAPEUR A 4 ATMOSPHÈRES ABSOLUES. | | | VAPEUR A 3 ATMOSPHÈRES ABSOLUES. | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Pression dans le récipient. | Pression effective en kilog. par mètre carré. | Vitesse d'écoulement en mètre par 1″. | Pression dans le récipient. | Pression effective en kilog. par mètre carré. | Vitesse d'écoulement en mètre par 1″. | Pression dans le récipient. | Pression effective en kilog. par mètre carré. | Vitesse d'écoulement en mètre par 1″. |
| 4,95 | 517 | 63 | 3,95 | 517 | 69 | 2,95 | 517 | 79 |
| 4,90 | 1,034 | 89 | 3,90 | 1,034 | 97 | 2,90 | 1,034 | 112 |
| 4,85 | 1,550 | 108 | 3,85 | 1,550 | 120 | 2,85 | 1,550 | 137 |
| 4,80 | 2,067 | 125 | 3,80 | 2,067 | 139 | 2,80 | 2,067 | 158 |
| 4,75 | 2,584 | 140 | 3,75 | 2,584 | 155 | 2,75 | 2,584 | 178 |
| 4,65 | 3,618 | 166 | 3,65 | 3,618 | 184 | 2,65 | 3,618 | 210 |
| 4,55 | 4,651 | 188 | 3,55 | 4,651 | 209 | 2,55 | 4,651 | 238 |
| 4,50 | 5,168 | 198 | 3,50 | 5,168 | 220 | 2,50 | 5,168 | 251 |
| 4,25 | 7,752 | 242 | 3,25 | 7,752 | 269 | 2,25 | 7,752 | 307 |
| 4,00 | 10,336 | 281 | 3,00 | 10,336 | 314 | 2,00 | 10,336 | 355 |
| 3,75 | 12,920 | 314 | 2,75 | 12,920 | 347 | 1,75 | 12,920 | 396 |
| 3,50 | 15,504 | 344 | 2,50 | 15,504 | 380 | 1,50 | 15,504 | 423 |
| 3,25 | 18,088 | 371 | 2,25 | 18,088 | 414 | 1,25 | 18,088 | 469 |
| 3,00 | 20,672 | 396 | 2,00 | 20,672 | 439 | » | » | » |
| 2,75 | 23,256 | 421 | 1,75 | 23,256 | 466 | » | » | » |
| 2,50 | 25,840 | 444 | 1,50 | 25,840 | 491 | » | » | » |
| 2,25 | 28,424 | 465 | 1,25 | 28,424 | 515 | » | » | » |

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

50. Tracé graphique. — Nous avons pu établir un tracé, basé sur notre méthode particulière, pour déterminer ces mêmes vitesses d'écoulement des gaz en mince paroi. Il est complétement analogue à ceux que l'on a vus dans notre *Traité des Moteurs hydrauliques* pour estimer les dépenses d'eau par orifices avec charge sur le centre.

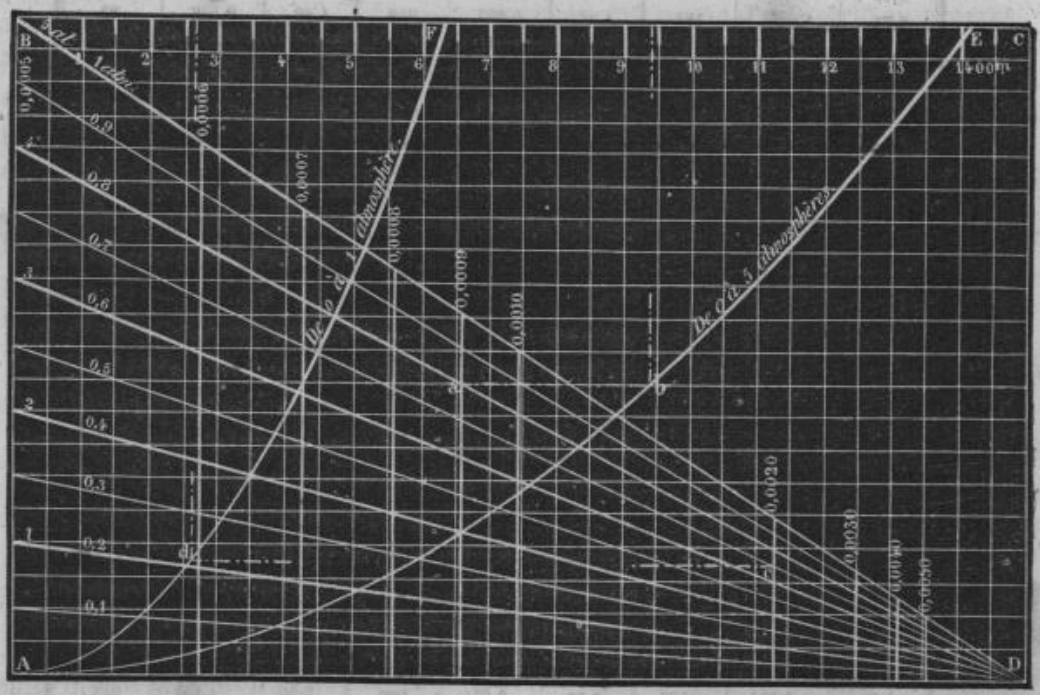
Celui-ci (fig. 12) est disposé pour donner les vitesses maximum d'écoulement des gaz pour des densités, toujours rapportées à celle de l'eau, variant de 0,0005 à 0,005, et des pressions relatives de 0 à 5 atmosphères.

Une série de lignes droites partant du point D correspondent, pour la courbe AE, à des pressions de 1 à 5 atmosphères, et, pour la courbe AF, à des pressions de 0,1 à 1 atmosphère.

Une autre série de lignes verticales, y compris celle A B représentent les densités de 0,0005 à 0,005.

L'échelle supérieure BC exprime les vitesses d'écoulement par grandes divisions de 100 mètres.

Fig. 12.




*Usage du tracé.* On cherche l'intersection de la verticale, indiquant la densité, avec l'oblique qui correspond à la pression relative P — *p*, et de cette intersection on suit l'horizontale jusqu'à la courbe. De ce second point de rencontre on élève une verticale dont la projection sur l'échelle BC indique la vitesse cherchée.

Soit, par exemple, qu'il s'agisse de déterminer la vitesse d'écoulement d'un gaz dont la densité est 0,0009 et la pression relative 4 atmosphères;

On cherchera l'intersection *a* de la verticale 0,0009 avec l'oblique 4 D, et de cette intersection on suivra l'horizontale correspondante jusqu'à sa rencontre *b* avec la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

courbe AE; la verticale élevée de ce dernier point correspond, sur l'échelle BC, à 940 mètres environ pour la vitesse cherchée. Le calcul rigoureux donnerait 943.

Comme exemple de l'emploi de la deuxième courbe, cherchons la vitesse d'écoulement d'un gaz dont la densité est 0,002 et la pression relative $0^{at}.7$;

Ce sera exactement la même manière, si ce n'est que nous emploierons la courbe AF; l'intersection, $c$ de l'oblique 0,7 D avec la verticale correspondant à 0,002, détermine l'horizontale $cd$ qui rencontre la courbe AF en $d$. Ce point projeté sur l'échelle supérieure indique 265 mètres environ pour la vitesse cherchée.

Le calcul donne 266 mètres.

Les légères différences entre les quantités calculées et celles trouvées au moyen du tableau ne proviennent pas d'une certaine inexactitude dans le principe de ce dernier, mais uniquement de son exiguïté qui ne permet pas de compléter les divisions des échelles. En le construisant à une échelle à peu près triple, on aurait les résultats cherchés à moins d'un mètre près.

Il en serait de même pour les valeurs qui ne se trouvent pas indiquées sur celui-ci. Ainsi, pour une pression intermédiaire de celles indiquées par les obliques partant du point D, il suffit de supposer la verticale AB, qui sert de base, divisée en quantités proportionnelles à toutes les pressions possibles comprises entre 0 et 5 atmosphères, et des obliques partant de chacun de ces deux points de divison.

A l'égard de la série des verticales de densités, qui suit une progression décroissante à partir de la plus faible, on peut aussi supposer des intermédiaires situées à des distances inverses de leurs propres valeurs pour les densités comprises entre celles du tableau.

## VITESSE D'ÉCOULEMENT D'UN GAZ PAR UN CONDUIT

**51.** Jusqu'ici nous considérions l'écoulement d'un gaz par un orifice percé en mince paroi, ne donnant pas lieu, par conséquent, à un frottement capable d'en altérer sensiblement la vitesse.

Mais lorsqu'il s'agit d'un écoulement par un conduit d'une certaine longueur, les choses ne se passent pas de la même façon. La vitesse du gaz, à sa sortie du conduit, est moindre que celle qui serait due à la pression initiale du réservoir ou à son excès de pression $P - p$ (43) sur celle du milieu où se fait l'écoulement. Il y a donc eu une perte de force occasionnée par la résistance que le conduit oppose au mouvement du gaz.

Le savant d'Aubuisson a trouvé que cette résistance suivait les lois suivantes :

1° La résistance est proportionnelle à la longueur du canal;

2° Elle croit proportionnellement avec le carré de la vitesse du gaz;

3° Elle est en raison inverse du diamètre de la conduite.

Par conséquent, désignons par :

P, la pression du réservoir, ou son excès $h$ (46) sur celle du milieu où se fait l'écoulement, exprimée en mètres de mercure;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$p$, la hauteur génératrice de la vitesse effective suivant laquelle le gaz s'écoule à l'extrémité de la conduite, cette hauteur exprimée de la même façon en mètres de mercure;

$v$, la vitesse effective d'écoulement;

L, la longueur de la conduite en mètres;

D, son diamètre, également en mètres;

D′, son diamètre à l'extrémité, ou celui de l'ouverture par laquelle se fait l'écoulement (on suppose la conduite terminée par un ajutage conique convergent dont l'orifice égale D′);

$k$, un coefficient d'expérience.

Nous avons alors, d'après d'Aubuisson, les relations suivantes :

La vitesse moyenne $u$ de l'écoulement dans toute la conduite sera sensiblement égale à celle effective $v$ de sortie par l'ajutage conique, multipliée par le rapport inverse des carrés des diamètres D et D′, c'est-à-dire :

$$u = v \times \frac{D'^2}{D^2}; \quad \text{et } u^2 = v^2 \frac{D'^4}{D^4}.$$

Mais cette vitesse $v$ est représentée par :

$$v = \sqrt{2gp}, \text{ d'ou } v^2 = 2gp; \text{ et } p = \frac{v^2}{2g},$$

$p$ étant, comme nous l'avons dit, la pression ou la hauteur manométrique $h$ à laquelle serait due la vitesse de sortie.

D'autre part, considérant que la force absorbée par la résistance de la conduite a eu pour résultat de diminuer la pression P jusqu'à $p$, cette force sera représentée par $P - p$; et, d'après les lois ci-dessus, on pose l'équation suivante :

$$P - p = k \frac{Lu^2}{D}.$$

Mais les relations ci-dessus donnent :

$$p = \frac{v^2}{2g}; \quad \text{et } u^2 = \frac{v^2 D'^4}{D^4}.$$

Alors, remplaçant dans l'équation de résistance $p$ et $u^2$ par ces dernières valeurs, on obtient :

$$P - \frac{v^2}{2g} = k \frac{Lv^2 D'^4}{D^5},$$

de laquelle, tirant directement la valeur de $v$, il vient :

$$v = \sqrt{\frac{2g\,P D^5}{k2g\,L D'^4 + D^5}}. \qquad (K)$$

Ainsi, cette valeur est celle de la vitesse réelle de l'écoulement du gaz (abstrac-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tion faite pour l'instant de sa densité), après avoir parcouru la conduite dans toute sa longueur et sortant par un orifice rétréci au diamètre D′.

Si l'orifice de sortie était égal à celui de la conduite, on aurait D′ = D, et la formule serait ainsi modifiée :

$$v = \sqrt{\frac{2g\,\mathrm{PD}}{k2g\,\mathrm{L} + \mathrm{D}}}. \qquad \text{(L)}$$

Quant à la valeur du coefficient $k$, elle se déduit des expériences de d'Aubuisson, qui avait déterminé celle d'un nombre expérimental $n$, égal en moyenne à 0,0238, dans lequel $2g$ était facteur. Par conséquent, si l'on effectue la division on trouve :

$$\frac{0{,}0238}{19{,}62} = 0{,}0012,$$

qui devient la valeur du coefficient $k$.

Ce résultat est évidemment très-susceptible de changer suivant l'état de la surface frottée par le gaz en mouvement. D'Aubuisson l'avait obtenue en faisant passer de l'air atmosphérique dans des tubes en fer-blanc qui devaient présenter peu de résistance relativement aux conduites de fonte dont les parois sont ordinairement plus rugueuses.

On peut donc indifféremment adopter cette valeur, en la faisant figurer dans les équations ci-dessus, ou bien remplacer, dans le dénominateur, le facteur $k2g$ par le nombre fixe 0,0238, ce qui ne changera pas les valeurs définitives.

52. Pour résumer ce sujet et montrer des exemples, nous allons compléter les formules en leur appliquant le multiplicateur relatif aux densités.

Telles qu'elles viennent d'être définies, les vitesses que ces formules représentent sont celles qui correspondraient à des hauteurs de pressions manométriques, c'est-à-dire exprimées en colonnes de mercure. Pour obtenir les vitesses des gaz ayant les pressions correspondantes, il suffit de multiplier, comme ci-dessus (44), les deux termes sous le radical par le rapport des densités du mercure et du gaz que l'on considère.

Représentant encore (44) la densité du mercure par $d'$ et celle du gaz par $d$, on aura :

$$v = \sqrt{\frac{2g\,\mathrm{PD}^5}{k2g\,\mathrm{LD}'^4 + \mathrm{D}^5}\,\frac{d'}{d}} = \sqrt{\frac{266{,}76\,\mathrm{PD}^5}{(0{,}0238\,\mathrm{LD}'^4 + \mathrm{D}^5)\,d}} \qquad \text{(M)}$$

pour la première formule (K) où l'on suppose l'orifice de sortie d'un diamètre différent de celui de la conduite.

Et pour la deuxième formule (L), avec les diamètres égaux, on aura :

$$v = \sqrt{\frac{266{,}76\,\mathrm{PD}}{(0{,}0238\,\mathrm{L} + \mathrm{D})\,d}}. \qquad \text{(N)}$$

Cependant, il n'est pas inutile de faire remarquer que, dans ce dernier cas, on devrait peut-être modifier le coefficient, attendu qu'il a été déterminé avec des conduites dont la sortie présentait un rétrécissement et, par suite, de la contraction.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Mais l'erreur que l'on commet en le conservant tel quel, est peu considérable; et d'ailleurs, en pratique, on s'écarte des résultats de la théorie d'une façon notablement plus sensible.

53. Problèmes sur l'écoulement d'un gaz par un conduit. — Cherchons successivement les vitesses d'écoulement de l'air atmosphérique et de la vapeur dans les deux cas : la conduite terminée par un ajutage conique qui en diminue le diamètre à la sortie, et la conduite librement ouverte.

Premier exemple. — Trouver la vitesse de l'écoulement de l'air, par une conduite terminée par un ajutage, dans les conditions suivantes :

| | | |
|---|---|---|
| Pression ou hauteur $h$ (46) à l'origine de la conduite... | P | $= 0^m10$ |
| Longueur de la conduite... ..... | L | = 60 mètres. |
| Diamètre *id*..... | D | = 0,20 |
| Diamètre de l'orifice à la sortie..... | D′ | = 0,05 |
| Densité de l'air (supposée d'après sa température).... | $d$ | = 0,0013 |

*Solution* (formule M). Admettant que l'état de la conduite permet l'application du coefficient de d'Aubuisson, on trouve :

$$v = \sqrt{\frac{266{,}76 \times 0{,}10 \times \overline{0{,}20}^{5}}{\left(0{,}0238 \times 60 \times \overline{0{,}05}^{4} + \overline{0{,}20}^{5}\right) \times 0{,}0013}} = 140^m9.$$

Si la vitesse n'était pas altérée par la conduite, elle serait celle due directement à une pression de 0,10, et égale à 144 mètres d'après les règles ci-dessus (43). Il y a donc une perte d'un peu plus de 3 mètres, ce qui est peu de chose. Mais cela tient à ce que nous avons supposé l'orifice de sortie beaucoup plus petit que le diamètre de la conduite, où le gaz n'y possède, par conséquent, qu'une très-faible vitesse comparativement.

En effet, les diamètres étant, respectivement, 20 et 5 centimètres, la vitesse moyenne $u$ dans la conduite n'est que le 1/16 (carré du rapport des diamètres) de la vitesse à la sortie, sauf une correction à faire, à cause de la contraction par l'orifice, et dont le coefficient est égal à environ 0,93; soit :

$$u = \frac{v\,\overline{\mathrm{D}'\,0{,}93}^{2}}{\mathrm{D}^2} = \frac{140{,}9 \times 0{,}0025 \times 0{,}8649}{0{,}04} = 7^m61.$$

La perte par le frottement doit donc être extrêmement faible.

Deuxième exemple. — Trouver la vitesse de l'écoulement, avec les mêmes conditions que ci-dessus, si ce n'est que la conduite est supposée complétement ouverte, de façon à avoir D′ = D.

*Solution.* La formule ci-dessus (N), disposée pour ce cas-là, fournit :

$$v = \sqrt{\frac{266{,}76 \times 0{,}10 \times 0{,}20}{(0{,}0238 \times 60 + 0{,}20) \times 0{,}0013}} = 50^m4.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On voit que, dans ce dernier cas, la vitesse serait notablement altérée; mais aussi l'air aurait eu cette vitesse, en moyenne, dans tout son parcours.

Troisième exemple. — Trouver la vitesse de l'écoulement de la vapeur à 4 atmosphères, dans l'air ambiant, par un conduit, dans les conditions suivantes :

Pression effective de la vapeur (3 atmosphères) ou... $P = 2^m 28$
Densité..... *id*..... $d = 0{,}0021$
Longueur du conduit..... ..... $L = 25$ mètres.
Diamètre (uniforme) du conduit..... $D = 0{,}12$

*Solution* (formule N). La vitesse moyenne dans le conduit ainsi que celle de l'écoulement sont sensiblement égales à :

$$v = \sqrt{\frac{266{,}76 \times 2{,}28 \times 0{,}12}{(0{,}0238 \times 25 + 0{,}12) \times 0{,}0021}} = 220^m 6.$$

Si la vitesse n'avait pas été altérée, on aurait eu (voir les règles et tables 43 à 50) :

$$v = \sqrt{\frac{266{,}76 \times 2{,}28}{0{,}0021}} = 538 \text{ mètres.}$$

L'altération de la vitesse est donc très-considérable; mais comme la vitesse est aussi très-grande, le résultat n'est que conforme à la théorie qui indiquait que la force absorbée par le frottement croît comme le carré de la vitesse.

Quatrième exemple. — Admettons encore les données ci-dessus, mais avec une conduite de 20 centimètres au lieu de 12, afin d'avoir une idée de l'influence du diamètre sur la perte de vitesse.

*Solution* (formule N). On trouve :

$$v = \sqrt{\frac{266{,}76 \times 2{,}28 \times 0{,}20}{(0{,}0238 \times 25 + 0{,}20) \times 0{,}0021}} = 268 \text{ mètres,}$$

au lieu de $220^m 6$ avec une conduite de 0,12, et à peu près moitié de la vitesse maximum 538 due à la pression relative de la vapeur s'il n'existait pas de frottement.

## VOLUMES DE VAPEUR ÉCOULÉS PAR DES ORIFICES SIMPLES ET PAR DES CONDUITS

54. La seule difficulté à surmonter, dans la question des dépenses de gaz ou de vapeur, était évidemment la recherche de la vitesse. Quant aux volumes écoulés, ils sont, comme pour les fluides incompressibles, le produit de cette vitesse par la section de l'orifice et par un coefficient de contraction déterminé par l'expérience.

Par conséquent, cette dernière partie du problème peut n'être considérée que comme une simple remarque, consistant principalement dans l'examen du coefficient de contraction à adopter.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

55. Coefficients de contraction. — D'Aubuisson a trouvé que les coefficients de contraction $m$ applicables à la dépense des gaz avaient, comme pour les fluides incompressibles, les valeurs suivantes :

0,65 pour un orifice percé en mince paroi;
0,93 pour un ajutage court et cylindrique;
0,95 pour un ajutage court, peu évasé.

Il suffit donc de multiplier le produit théorique par l'une de ces valeurs, suivant le cas, pour obtenir le débit réel.

Premier exemple. — Soit un orifice circulaire percé en mince paroi, ayant 5 centimètres de diamètre, et par lequel s'écoule un gaz avec une vitesse égale à 150 mètres par seconde; trouver le volume total Q écoulé par minute.

*Solution.* On trouve :

$$Q = \frac{\overline{0,05}^2 \times \pi \times 150 \times 60 \times 0,65}{4} = 11,486 \text{ mètres cubes.}$$

Deuxième exemple. — Quel volume de vapeur pénètre dans le cylindre d'une machine, sachant que l'orifice de la dépense est rectangulaire, ayant 20 centimètres de large sur 3 de haut, et qu'il est ouvert en plein pendant un temps réduit de 0,5 de seconde; et sachant aussi que la pression et la densité correspondent à une vitesse égale à 300 mètres?

*Solution.* On a :

$$0,03 \times 0,20 = 0^{m.q}.006 \text{ pour la surface de l'orifice.}$$

Si nous adoptons 0,9 pour coefficient, il vient :

$$Q = 0,006 \times 300^m \times 0,5 \times 0,9 = 0^{m.c}.810,$$

ou 810 litres (1).

56. Remarque. — A l'égard de la dépense par un tuyau de conduite, nous ferons remarquer que, s'il s'agit d'un conduit terminé par un ajutage rétréci, on pourra employer le coefficient de contraction 0,93 dont l'emploi sera supprimé si la conduite est entièrement cylindrique. L'opération se réduit donc exactement aux mêmes termes que précédemment.

## NOTE RELATIVE A LA RECHERCHE DU DIAMÈTRE D'UNE CONDUITE POUR UN ÉCOULEMENT DE CONDITIONS DÉTERMINÉES

57. Trouver les dimensions d'un orifice devant satisfaire à des conditions déterminées est un problème qui n'offre ordinairement aucune difficulté; mais il n'en est

(1) Cet exemple est complétement hypothétique : car il suppose que la pression dans le cylindre ne se modifie pas en raison de l'écoulement, ce qui n'arrive pas. L'espace se saturant au fur et à mesure que la vapeur afflue, la pression s'élève, et, par suite, la vitesse d'écoulement et la quantité de vapeur écoulée diminuent jusqu'au point que cette vitesse ne soit plus qu'égale à celle du piston multipliée par le rapport des sections du cylindre et de l'orifice.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pas de même des dimensions d'une conduite, dont nous avons vu que le diamètre entrait à deux puissances différentes dans l'expression de la vitesse ou de la dépense.

Cependant il est possible d'obtenir un résultat pratique suffisamment exact au moyen d'une méthode simple dont nous allons essayer de donner les éléments. Nous supposons évidemment une conduite d'un diamètre uniforme et sans rétrécissement à la sortie.

Si l'on rapproche l'expression de la vitesse de celle qui correspond à la section d'un conduit (que nous avons toujours supposé circulaire), et qu'on les multiplie l'une par l'autre, le produit sera évidemment égal au volume Q débité dans ces conditions, puisque ce sera le produit de la vitesse par la section.

On aura donc (formule N):

$$\sqrt{\frac{266{,}76\ \mathrm{PD}}{(0{,}0238\ \mathrm{L} + \mathrm{D})\ d}} \times \frac{3{,}1416\ \mathrm{D}^2}{4} = \mathrm{Q}.$$

Élevant les deux membres au carré, et représentant par $a$ le produit des quantités invariables, excepté le coefficient 0,0238, il vient :

$$\mathrm{Q}^2 = \frac{a\ \mathrm{P}\,\mathrm{D}^5}{(0{,}0238\ \mathrm{L} + \mathrm{D})\ d}.$$

Puisque nous cherchons le diamètre D, il faut donc tirer sa valeur de cette formule. Mais comme cette opération serait très-difficile à faire directement, à cause des deux puissances D et $\mathrm{D}^5$, nous tirons la valeur de $\mathrm{D}^5$ comme si D était connu, et nous trouvons :

$$\mathrm{D} = \sqrt[5]{\frac{(0{,}0238\ \mathrm{L} + \mathrm{D})\ \mathrm{Q}^2\ d}{a\ \mathrm{P}}}.$$

Et comme $a$ est un nombre fixe, égal, comme on peut le voir, à :

$$\left(\frac{3{,}1416}{4}\right)^2 \times 266{,}76 = 164{,}5576,$$

on en extrait la racine cinquième, qui est égale à 2,8, par laquelle on divise l'unité, ce qui donne 0,3571; soit 0,36, et on sort cette valeur comme multiplicateur du radical, d'où il résulte cette dernière expression :

$$\mathrm{D} = 0{,}36 \sqrt[5]{\frac{(0{,}0238\ \mathrm{L} + \mathrm{D})\ \mathrm{Q}^2\ d}{\mathrm{P}}}. \qquad (\mathrm{O})$$

Maintenant, pour opérer à l'aide de cette formule et dégager définitivement D, voici ce que l'on peut faire :

On fera une première opération en considérant D sous le radical comme égal à 0; on trouvera ainsi une première valeur de D, mais un peu faible;

On recommencera l'opération, mais en attribuant cette fois à D sous le radical la valeur approximative trouvée par la première opération;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La deuxième valeur trouvée ainsi pour D sera presque toujours assez approchée de la véritable pour la pratique; cependant si les deux valeurs trouvées sucessivement offraient une très-grande différence, on pourrait s'assurer si la deuxième est suffisamment approchée en faisant une troisième opération où la deuxième valeur trouvée serait attribuée à D sous le radical, et on aurait la preuve demandée si la troisième valeur était sensiblement égale à la deuxième.

58. Exemple. — Soit donné de trouver le diamètre D d'une conduite dans les conditions suivantes :

| | | |
|---|---|---|
| Longueur de la conduite..... | L = | 100 mètres. |
| Débit, en mètres cubes de gaz, par 1″..... | Q = | $0^{m.c.}5$ |
| Pression relative du gaz en mètres de mercure. | P = | $0^{m}7$ |
| Densité..... *id*..... | *d* = | 0 002 |

*Solution* (formule O). Considérant D comme égal à 0 sous le radical, nous trouvons :

$$D = 0{,}36 \sqrt[5]{\frac{(0{,}0238 \times 100^{m} + 0) \times 0{,}25 \times 0{,}002}{0{,}7}} = 0^{m}101.$$

Nous trouvons, pour la première valeur de D, $0^{m}101$ que nous mettons à sa place sous le radical pour une deuxième opération, et nous trouvons :

$$D = 0{,}36 \sqrt[5]{\frac{(0{,}0238 \times 100^{m} + 0{,}101) \times 0{,}25 \times 0{,}002}{0{,}7}} = 0^{m}101.$$

Or, cette deuxième opération donnant le même résultat que la première, nous sommes certains que nous avons la véritable valeur du diamètre cherché, et aucune autre opération semblable n'est nécessaire.

S'il peut sembler étrange que l'on puisse trouver le même résultat avec deux formules dont l'une possède une quantité de plus que l'autre, il suffit de faire remarquer que les résultats sont aussi différents, mais seulement dans une série de décimales qui ne sont pas appréciables pratiquement.

En général, la disposition même de la formule nous fait comprendre qu'il suffit que la longueur d'une conduite soit égale à plusieurs fois son diamètre (ce qui est presque toujours et que l'on peut prévoir d'avance), pour que le résultat trouvé par la première opération, en supposant D égal à 0, donne la véritable dimension pratique cherchée. Une seule opération suffirait donc; mais il est bon de vérifier, soit en répétant l'opération en donnant à D sa valeur sous le radical, soit en faisant la preuve en cherchant le débit de la conduite d'après ses conditions définitives.

Ainsi, pour la preuve de l'opération précédente, si l'on cherche la vitesse d'écoulement (51) d'après sa longueur, 100 mètres, son diamètre 0,101 et la pression $0^{m}7$, on trouve $62^{m}60$ pour cette vitesse qui, multipliée par 0,008012, superficie du cercle 0,101, donne $0^{m.c.}501$ pour le débit de la conduite. Il est inutile d'ajouter que ce résultat peut être considéré comme rigoureusement conforme à la donnée primitive du problème.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

59. Nous bornons là ce qu'il nous semblait utile de dire au sujet de la dépense de la vapeur ou des gaz, pensant que, pour avoir des notions complètes, on fera bien d'avoir recours aux ouvrages scientifiques, tels que les traités de MM. d'Aubuisson, Péclet, Morin, etc.

D'ailleurs les conduites de vapeur sont ordinairement établies dans des conditions qui permettent de dépasser de beaucoup les limites indiquées par le calcul. Mais il est indispensable de connaître au moins ces limites, qui sont, en résumé, le point de départ de toute application.

Ajoutons encore que toutes les notions précédentes, relatives aux conduites d'une longueur appréciable, s'appliquent en supposant des conduites rectilignes ou courbes, mais sans étranglements ni coudes brusques qui puissent détruire une partie de la force vive du fluide en mouvement.

## PUISSANCE MÉCANIQUE DE LA VAPEUR D'EAU

60. Si la vapeur est utilisée pour produire du travail moteur, à l'exclusion des gaz permanents, c'est à cause de la possibilité que l'on a de pouvoir anéantir promptement sa puissance, ou, en général, de lui donner facilement une tension supérieure à celle du milieu où fonctionne le moteur qu'elle alimente.

On conçoit, en effet, que s'il était possible d'annuler ou de diminuer la pression des autres gaz, ou d'augmenter cette pression autrement qu'en dépensant de la force mécanique, ces gaz pourraient être employés comme force motrice aussi bien que la vapeur, l'action de l'expansion étant la même dans tous les cas.

Il est vrai que l'on a construit des machines motrices alimentées par de l'air atmosphérique dont on utilisait l'expansion due à la dilatation produite par le chauffage; ce procédé est réellement praticable: mais, outre la raison d'économie, on rencontre déjà plus de difficulté à dépouiller l'air de sa chaleur acquise, après l'effet produit, que de détruire de la vapeur par la condensation.

Ainsi, jusqu'à présent, c'est encore la vapeur qui reste maîtresse du terrain. Nous allons donc essayer d'expliquer ses propriétés mécaniques motrices, en faisant néanmoins remarquer que les mêmes raisonnements s'appliqueraient à un gaz permanent.

### TRAVAIL DÉVELOPPÉ A PLEINE PRESSION

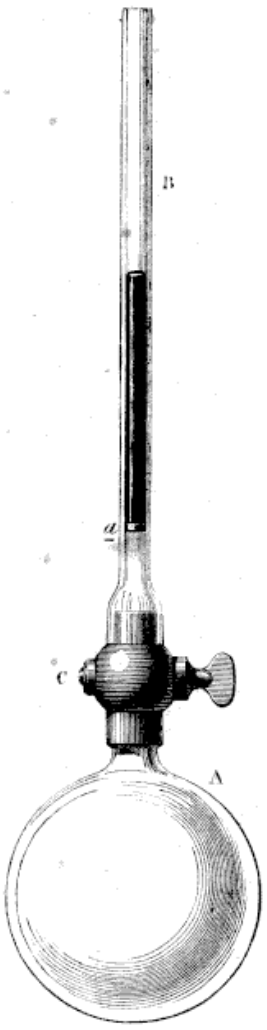
61. Nous avons vu que si on livre passage à de la vapeur contenue dans un réservoir quelconque, elle s'échappe avec une énergie dont l'intensité dépend de sa propre tension et de celle du milieu où se fait l'écoulement. L'échappement est, en résumé, la conséquence de la pression que la vapeur exerce sur tous les points du récipient qui la contient, et particulièrement contre la partie de la paroi dans laquelle l'orifice a été pratiqué.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour transformer cette propriété en travail moteur, il nous paraît utile de supposer l'expérience suivante :

Une capacité A (fig. 13), contenant de la vapeur qui peut se renouveler d'une façon continue à une tension supérieure à celle du milieu ambiant, est munie d'un tube vertical B d'une longueur que nous supposerons indéfinie. Un robinet C permet d'interrompre la communication entre le réservoir et le tube, lequel renferme une colonne de mercure reposant sur un petit piston *a*.

Fig. 13.




Le robinet étant fermé, la colonne de mercure est à la partie inférieure du tube et repose, par l'intermédiaire du petit piston ou diaphragme *a*, sur l'ouverture du robinet.

Mais si l'on vient à ouvrir le robinet, la pression de la vapeur s'exercera sous la colonne de mercure et tentera de la soulever pour s'échapper.

Toutefois cette action aura des résultats différents suivant la situation réciproque des éléments.

Premièrement, si le poids de la colonne de mercure, y compris la pression extérieure qu'elle supporte, est égal ou supérieur à la pression exercée par la vapeur sur sa base inférieure, cette colonne de mercure restera immobile et l'échappement n'aura pas lieu ; la colonne de mercure représentera tout à fait la résistance de la paroi du vase qui s'oppose à l'expansion de la vapeur.

Mais si c'est la pression de la vapeur qui l'emporte, la colonne de mercure s'élèvera dans le tube avec une vitesse qui s'accélérera uniformément, jusqu'au point de devenir égale à celle de l'échappement libre de la vapeur, vitesse qui ne peut évidemment pas être dépassée.

Par conséquent, si nous choisissons ce point de la vitesse uniforme, nous aurons non-seulement l'image, mais la mesure d'un travail mécanique produit, puisque nous aurons un poids, celui de la colonne de mercure, élevé et se mouvant avec une certaine vitesse dans l'unité de temps. La pression simple de la vapeur se trouvera ainsi transformée en un véritable effet dynamique.

Maintenant nous n'avons pas besoin de supposer que la vapeur acquiert toute la vitesse que sa tension peut engendrer ; elle pourrait élever ce poids avec une vitesse uniforme aussi faible qu'on peut l'imaginer.

Pour le concevoir, il suffit de se reporter à ce qui a été dit à propos des effets mécaniques de l'eau dans les notions préliminaires du *Traité des moteurs hydrauliques*. Nous allons, du reste, en nous basant sur les mêmes principes, expliquer ce qui arriverait pour le cas dont il s'agit.

La colonne de mercure, étant d'abord d'un poids inférieur à la pression de la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vapeur, s'élèvera avec une vitesse croissante, dont la progression plus ou moins rapide dépendra de l'excès plus ou moins grand de la puissance sur la résistance.

Mais, si en un point quelconque de cette progression on vient à rétablir l'équilibre en ajoutant un peu de mercure, la vitesse cessera de s'accélérer et conservera uniformément la valeur qu'elle possédait au moment où l'équilibre a été rétabli.

Cette dernière remarque nous conduit encore à dire, comme à propos des moteurs hydrauliques, que :

*Dans une machine à l'état de mouvement uniforme, les forces motrices et résistantes se font parfaitement équilibre.*

Nous rappellerons encore, que la même expérience met également en évidence cette force dépensée en excès pour vaincre l'inertie d'un corps et lui faire acquérir une vitesse uniforme après un temps déterminé. (*Moteurs hydrauliques,* 16 à 18.)

62. Pour résumer la précédente définition, nous dirons que le travail de la vapeur est aussi mesuré par un poids, en kilogrammes, se déplaçant en ligne droite à raison d'une certaine vitesse uniforme exprimée en mètres par secondes.

L'expérience ci-dessus nous fournit les termes exacts du problème, dans lequel le poids de mercure soulevé, plus la pression ambiante qu'il supporte, représente la résistance vaincue, et doit être égal à la pression de la vapeur sur la base de la colonne au moment de la vitesse uniforme.

Ainsi, cette colonne pesant, pression extérieure et mercure, 2 kilogrammes par exemple, et ayant 1 centimètre de section à sa base, la tension de la vapeur devra atteindre cette même valeur sur un centimètre carré, ce qui serait approximativement une pression de 2 atmosphères, d'après la définition (7).

Si la vitesse restée uniforme était de 1 mètre par seconde, le travail dépensé serait de 2 kilogrammètres. Le travail utile serait moitié moindre, puisque nous supposons que la pression atmosphérique constitue la moitié de la résistance.

63. Non-seulement l'effort exercé par la vapeur, effectuant un travail, est complétement assimilable à un poids simple qui se déplace, mais les quantités de vapeur à dépenser peuvent être aussi mesurées d'après le travail qu'elles peuvent produire.

Dans l'expérience supposée précédemment, il est clair que, pour chaque mètre de chemin parcouru par la résistance, le réservoir a dû fournir un nouveau volume de vapeur ayant pour mesure ce chemin et la section du tube.

Par conséquent, les volumes de vapeur écoulés sont exactement proportionnels au travail produit, qui est lui-même exprimé par le même chemin et par l'intensité du poids soulevé, lequel est encore représenté par la section intérieure du tube et la pression de la vapeur sur cette section.

Mais, d'autre part, comme la pression dépend de la tension propre de la vapeur et de l'étendue de la section, on en conclut que le volume de vapeur dépensé, pour un même travail produit, est inversement proportionnel au chiffre de son unité de tension effective.

En résumé, 1 kilogrammètre étant le produit de 1 kilogramme par 1 mètre, correspond à une dépense de vapeur ayant une tension effective de 1 atmo-



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sphère, abstraction faite de la fraction, égale à une colonne de 1 mètre de hauteur sur 1 centimètre carré de base : soit 0,1 de litre. Si la tension effective était double, le volume serait moitié moindre, etc.

64. Par conséquent, la relation qui permet de calculer l'unité dynamique de volume de la vapeur d'eau peut s'écrire ainsi :

$$V = \frac{0{,}1\,k}{1^k0333\,P} = \frac{k}{10^k333\,P},$$

dans laquelle,

V représente le volume de vapeur dépensée, en litres;

$k$ » la quantité de travail, exprimée en kilogrammètres;

P » la pression effective de la vapeur, c'est-à-dire son excès sur celle du milieu pouvant s'opposer comme travail résistant, et sachant que 1 atmosphère correspond à une pression exacte de $1^k0333$ par centimètre carré.

Exemple. — Quel volume de vapeur doit-on dépenser par seconde pour produire 1000 kilogrammètres de travail, la pression effective de la vapeur étant 3 atmosphères?

*Solution.* On trouve :

$$V = \frac{1000}{10^k333 \times 3} = 32{,}259 \text{ litres.}$$

Évidemment il en est de cette valeur comme de celle qui correspondait à la production de vapeur par kilogramme de combustible (39) : c'est la valeur théorique ou celle correspondant à l'effet utile réel; mais elle varie beaucoup en pratique, à part même le mode d'emploi de la vapeur avec détente, ainsi que nous le verrons bientôt. Cependant, c'est un point de départ général qu'il sera bon de ne pas oublier.

65. Pour conformer ce résultat à la disposition de la table que l'on verra plus loin, nous chercherons directement la quantité de travail que peut produire un volume donné de vapeur à une pression déterminée.

Si nous adoptons le mètre cube pour unité, il nous suffira de supposer que le tube de l'expérience précédente ait 1 mètre carré de base, ce qui produira 1 mètre cube de vapeur engendré pour 1 mètre de chemin parcouru par la résistance. Or, celle-ci faisant toujours équilibre à la pression de la vapeur, le poids soulevé sera précisément égal à la tension de la vapeur multipliée par la base de 1 mètre carré.

On aura donc 10333 kilogrammes, par chaque atmosphère de pression, multipliés par 1 mètre : soit 10333 kilogrammètres, travail théorique développé par 1 mètre cube de vapeur par chaque atmosphère effective de pression.

Nous ferons de nouveau remarquer que cette quantité de travail suppose que la vapeur conserve sa pression initiale pendant toute la durée du temps que s'effectue le travail, ce qui n'arrive pas lorsqu'on l'emploie avec détente, ainsi que nous allons essayer de le faire comprendre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

### TRAVAIL DÉVELOPPÉ AVEC DÉTENTE

66. D'après les propriétés physiques reconnues, dès le principe, aux vapeurs et aux gaz en général, on peut se figurer ce qui arrive lorsqu'on agrandit un espace quelconque rempli d'un volume défini de vapeur.

Cette vapeur, en vertu de son pouvoir expansif indéfini, qui tend à lui faire occuper des espaces de plus en plus grands, continue de remplir la capacité qu'elle occupait, malgré son extension et en exerçant toujours contre ses parois une pression qui va en diminuant dans le rapport inverse des volumes successifs qu'on fait occuper à la vapeur.

Cette propriété, dont l'effet est complétement analogue à la détente d'un ressort que l'on a comprimé et que l'on abandonne ensuite, est caractérisée dans l'industrie par le nom de *détente de la vapeur;* et l'on conserve cette désignation pour les machines où la vapeur est employée d'après ce principe.

67. Pour donner une idée générale de l'emploi de la vapeur avec détente, il nous suffira de revenir à l'expérience citée précédemment et de supposer que la vitesse uniforme étant obtenue, on ferme complétement le robinet C (fig. 13), de façon à empêcher que le réservoir fournisse de nouvelles quantités de vapeur. Celle-ci se trouve alors limitée au volume renfermé dans le tube entre le robinet et la base de la colonne de mercure soulevée; si la résistance restait fixe, le mouvement se continuerait pendant quelques instants, en vertu de la vitesse acquise, mais suivant une vitesse uniformément retardée, après quoi surviendrait l'immobilité, suivie immédiatement de la chute de la colonne de mercure qui viendrait réduire le volume de vapeur à celui qu'il occupait au moment de la fermeture du robinet.

Mais s'il est possible de diminuer progressivement le poids de la colonne de mercure dans le même rapport que la pression de la vapeur, qui diminue au fur et à mesure que l'espace qu'elle occupe s'agrandit, le mouvement ascensionnel uniforme sera conservé, et la vapeur, par sa force expansive, développera encore du travail, de plus en plus faible, il est vrai, mais qui pourrait être indéfini, et qui n'a pour limite que la résistance extérieure du milieu ambiant à laquelle la puissance de la vapeur ne peut pas être inférieure pour être en état de produire un mouvement quelconque en s'y opposant.

Par conséquent, en sus du travail développé par la vapeur sortant librement du réservoir, et estimé comme cela a été dit ci-dessus (64), une autre somme de travail peut être produite sans nouvelle dépense de vapeur; il est en effet certain que, pour tirer de la puissance de la vapeur le plus grand profit possible, il faut ne l'abandonner que lorsque sa pression est aussi très-faible et presque incapable d'aucun travail utile.

Reste maintenant à calculer les quantités totales de travail développées dans ces conditions. C'est ce qu'il sera facile de faire après avoir dit quelques mots de la loi de Mariotte que nous n'avions fait que citer (9).

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

68. Loi de Mariotte. — Lorsqu'on soumet à des pressions différentes un volume défini d'un gaz permanent, on constate aisément qu'il diminue de volume quand la pression augmente, et, réciproquement, qu'il augmente de volume quand la pression diminue.

A part ce premier résultat tout à fait évident et palpable, on a reconnu qu'à températures égales les volumes occupés sont, d'une façon sensible, inversement proportionnels aux pressions exercées; d'où l'on déduit naturellement aussi que les densités sont directement proportionnelles à ces mêmes pressions.

Cette loi importante de la physique porte le nom de l'abbé Mariotte, physicien français qui l'a, le premier, énoncée.

Depuis, cette loi a été vérifiée par les hommes les plus compétents, parmi lesquels nous citons MM. Arago et Dulong, Pouillet, Regnault, etc. Ces illustres savants ont trouvé que la loi de Mariotte éprouvait quelques écarts pour de certains gaz et pour des pressions considérables; cependant, les différences que l'on observe, à l'aide d'opérations très-délicates, ne sont pas de nature à troubler les résultats de la pratique usuelle. Nous admettrons donc cette loi, purement et simplement, pour étudier les effets de la vapeur d'eau dans le phénomène de la détente où elle se présente comme un gaz permanent qui occupe successivement des volumes différents.

69. Avant d'aborder ce sujet, résumons la loi par sa représentation numérique et par un exemple. Si nous désignons par :

P, la pression d'un gaz ou l'expression de sa force élastique par unité de surface;

V, son volume correspondant;

$d$, sa densité;

et par P′, V′ et $d'$, les mêmes propriétés dans d'autres conditions, nous dirons :

$$P : P' :: V' : V,$$

c'est-à-dire que : *les pressions sont en raison inverse des volumes.*

Puis nous trouvons :

$$d : d' :: P : P' \quad \text{ou} \quad d : d' :: V' : V,$$

ce qui revient à dire que :

*Les densités sont directement proportionnelles aux pressions ou inversement proportionnelles aux volumes.*

Exemple. Si l'on réduit de 1/5 le volume V, égal à 1 mètre cube, d'un gaz dont la pression est P, égale à 0,80 mètre de mercure, et la densité $d$ égale à 0,0012, quelles seront les pression et densité P′ et $d'$ sous le nouveau volume V′?

*Solution.* Les relations ci-dessus fournissent les suivantes :

$$P' = \frac{P \times V}{V'}; \quad \text{et } d' = \frac{d \times V}{V'}.$$

Mais, d'après les données, on a pour la valeur du nouveau volume :

$$V' = 1^{\text{m. c.}} \times \frac{4}{5} = 0^{\text{m. c.}}8.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

De cette valeur on déduit les suivantes de la pression et de la densité :

$$P' = \frac{0{,}80 \times 1^{m.c.}}{0^{m.c.}8} = 1^m 00; \quad \text{et } d' = \frac{0{,}0012 \times 1^{m.c.}}{0^{m.c.}8} = 0{,}0015.$$

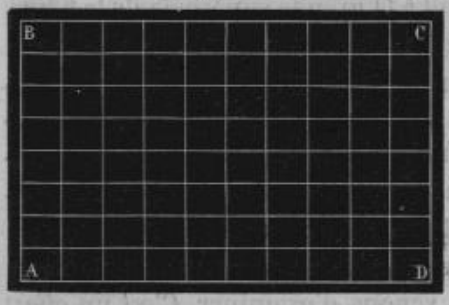
Cette loi est si simple que ces indications suffiront certainement pour en faire comprendre l'application. D'ailleurs les deux proportions ci-dessus fournissent tous les éléments des problèmes que l'on pourrait proposer.

Rappelons seulement que, pour que son application soit juste, il faut que le gaz soumis au changement de volume conserve sa température primitive, sans quoi il se produit des effets de dilatation ou de contraction qui viennent influer individuellement et modifier le résultat qui est supposé dû uniquement au changement de volume.

70. Calcul du travail total du a la détente de la vapeur. — Puisqu'une quantité de travail est toujours exprimée par un produit dont les facteurs sont : la pression exercée et le chemin parcouru dans l'unité de temps par la résistance qui fait équilibre à cette pression, une quantité de travail peut donc être représentée graphiquement par une surface qui peut être aussi mesurée par le produit de deux facteurs.

En effet, supposons qu'un effort quelconque, que l'on exprime en kilogrammes, soit représenté à une certaine échelle, par une droite AB (fig. 14), dont les divisions soient précisément autant de kilogrammes; et que le chemin que parcourt la résistance dans l'unité de temps sous l'influence de cet effort et dans la période du mouvement parvenu à l'uniformité, soit représenté par une horizontale AD, dont les divisions seront autant de mètres ou de fractions de mètres; il est clair qu'en complétant le rectangle ABCD, sa superficie sera évaluée par le travail même, puisqu'elle sera le produit des unités de AB par celles de AD.

Fig. 14.




Supposons, par exemple, que AB ait 8 centimètres et représente 8 kilogrammes, et que AD ayant 10 centimètres représente 10 mètres de chemin parcouru dans l'unité de temps, soit pendant 1 seconde;

La quantité de travail, évaluée comme à l'ordinaire, sera égale à :

$$8 \times 10 = 80 \text{ kilogrammètres.}$$

Mais la superficie du rectangle, évaluée suivant les unités de divisions qui représentent les kilogrammes et les mètres, sera aussi égale à 80; et chaque petit rectangle formé par les lignes de division représentera 1 kilogrammètre.

Ce fait bien constaté, et très-facile à saisir, du reste, supposons que pendant son parcours l'effort varie, tout en conservant la vitesse uniforme; il arrivera alors que la droite AB, qui était supposée se transportant de AB à DC, et qui engendrait un rectangle par la fixité de sa valeur, n'aura plus cette fixité, et que BC ne sera plus une ligne droite.

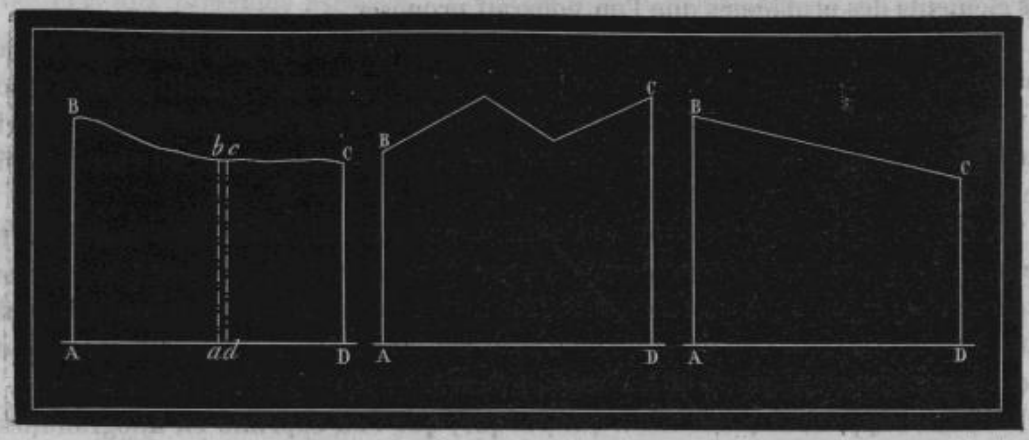
Alors la figure ne sera plus un rectangle, mais une surface limitée par des lignes

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

droites sur trois côtés et par une ligne brisée ou courbe sur le quatrième; ou encore par une ligne droite, mais non parallèle à la base, si la variation de la résistance suit une certaine loi régulière.

On obtiendrait ainsi l'un des trois tracés indiqués par la fig. 15 ci-après:

Fig. 15.




Cependant la quantité totale de travail, développée pour chaque chemin parcouru AD, et par la résistance variable, n'en sera pas moins très-exactement représentée par la superficie de chaque figure. Car on peut diviser ces surfaces en parties assez petites, comme *abcd*, dans la direction du chemin parcouru, pour pouvoir les considérer comme autant de rectangles ou parties de travail engendrées par un effort particulier, mais fixe pendant le temps correspondant. La superficie de chacune de ces parties élémentaires représentera donc la quantité de travail correspondante; et comme la somme de ces parties équivaut à la grande superficie de la figure entière, celle-ci représente, par conséquent, la quantité totale de travail développé.

En résumé, si l'on connaît la loi de la variation qu'éprouve un effort dans la durée de l'accomplissement d'un travail, il sera toujours facile de calculer la quantité totale de travail développée, puisqu'il suffit d'en faire une représentation graphique, et d'évaluer la superficie de la figure qui en résulte, suivant des unités convenues d'avance pour représenter les efforts et le chemin parcouru.

71. La quantité de travail développée par la vapeur d'eau pendant sa détente se trouve justement dans les conditions que nous venons d'examiner. C'est un effort décroissant qui agit pour vaincre une résistance que l'on suppose diminuer en même temps pour conserver la vitesse uniforme. Quant à sa loi de décroissance, on admet qu'elle suit celle de Mariotte, comme nous l'avons dit ci-dessus, et en supposant que la vapeur conserve sa température initiale pendant qu'elle se détend.

Cherchons, d'après cela, à rapprocher ces principes pour trouver la valeur du travail qui sera développé par un volume déterminé de vapeur qui produit d'abord une quantité de travail à pleine pression, et que l'on peut évaluer comme on l'a fait plus haut (64 et 65), puis qui se détend ensuite jusqu'à une limite déterminée.

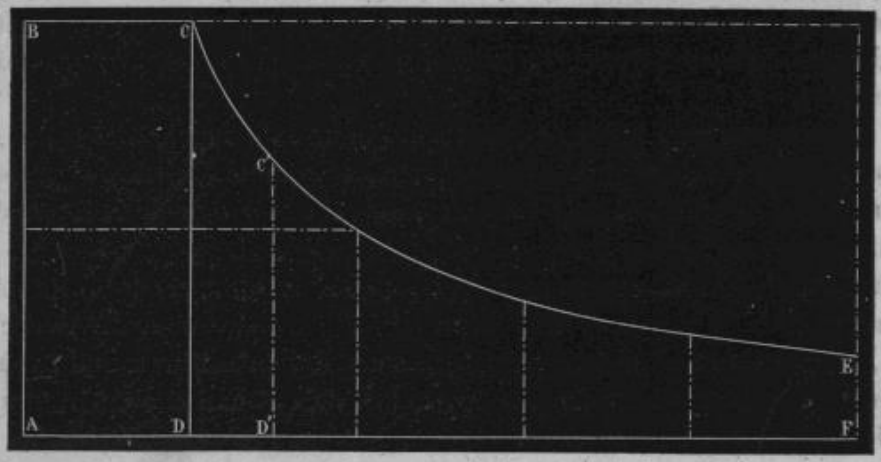
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En se reportant à l'expérience que nous avons admise (61), on a pu déterminer l'effet produit par 1 mètre cube de vapeur agissant avec toute sa pression initiale, et l'on a trouvé (65) que le travail développé ainsi serait de 10333 kilogrammètres par mètre cube et par chaque atmosphère effective de pression. De plus, si le chemin parcouru égale 1 mètre, la pression correspondante sera 10333 kilogrammes.

Or, si à partir de ce travail effectué il n'est pas fourni de nouvelle vapeur, celle admise, et maintenant isolée de sa source, occupera des volumes de plus en plus grands, d'où sa pression diminuera successivement suivant la même progression décroissante que la loi de Mariotte nous permet d'apprécier. La base du récipient où s'opère la détente restant la même, puisque c'est un cylindre, le volume de vapeur ne faisant que de *s'allonger*, la décroissance de la pression s'appliquera directement à celle initiale de 10333 kilogrammes.

Par conséquent, représentons graphiquement le travail à pleine pression par un premier rectangle ABCD (fig. 16), dont AB représente la pression initiale 10333, et AD le chemin parcouru pendant le travail; puis, ayant prolongé la base du rec-

Fig. 16.




tangle, traçons des lignes parallèles à AB en chacun des points qui représentent les chemins successifs parcourus à partir du moment où a eu lieu l'interception de la vapeur.

Chacune de ces verticales devra avoir pour valeur la pression acquise au bout de ces chemins parcourus; et comme ils sont exactement proportionnels aux volumes successifs de la vapeur, et que la pression qu'elle acquiert à chaque nouveau volume obtenu est en raison inverse du rapport de ce volume à celui primitif, chaque nouvelle pression acquise sera facile à déterminer; on aura toujours :

$$CD \text{ ou } AB : C'D' :: AD' : AD$$

d'après la proportion précédente (69) :

$$P : P' :: V' : V.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En d'autres termes, si chaque division de chemin parcouru ou d'augmentation de volume est, par exemple, le 1/20 de celui primitif AD, on aura pour les valeurs successives des ordonnées semblables à C'D :

$$CD \times \frac{20}{21}, \frac{20}{22}, \frac{20}{23}, \frac{20}{24}, \frac{20}{25}, \frac{20}{26}, \frac{20}{27}, \text{ etc.,}$$

attendu que les volumes successifs seront :

$$\frac{21}{20}, \frac{22}{20}, \frac{23}{20}, \frac{24}{20}, \frac{25}{20}, \frac{26}{20}, \frac{27}{20}, \text{ etc.}$$

Alors, joignant les extrémités de toutes les ordonnées ainsi déterminées, on aura la figure entière ABCEF dont la superficie représentera la somme totale de travail développé par le volume primitif de vapeur détendu jusqu'à l'augmentation de volume indiquée par l'étendue de la base AF de la figure, étendue qui peut être prolongée jusqu'en telle limite qu'on le désire.

Si l'on fait cette opération pour de la vapeur à l'unité de pression, le travail trouvé par la quadrature de la figure sera proportionnel, pour une même détente, à toutes les pressions initiales que peut avoir la vapeur, attendu que, pour une même détente, la base AF est invariable et que les hauteurs sont proportionnelles aux pressions.

Mais, en prenant pour point de départ un volume de vapeur déterminé, il est clair que le résultat lui est aussi proportionnel, puisque la base AF est proportionnelle au volume primitif, et qu'à hauteurs égales la superficie de la figure devient proportionnelle à la base.

En résumé, on établit, par ce procédé, les quantités de travail que peut développer 1 mètre cube de vapeur à la pression de 1 atmosphère pour divers degrés de détente, et lorsqu'on veut connaître le travail correspondant à un autre volume et à une autre pression, il suffit de faire le produit de ces données différentes par la valeur indiquée pour 1 mètre cube.

Les résultats que l'on obtient ainsi sont complétement satisfaisants pour la pratique. Seulement il est indispensable que les appareils où s'effectue la détente soient bien disposés pour éviter les refroidissements extérieurs qui produiraient une condensation de la vapeur détendue, et rendraient inexacte l'application de la loi de Mariotte.

72. Le savant général Poncelet, qui a, un des premiers, fait connaître cette théorie, a aussi calculé une table qui donne la quadrature de la figure de principe pour des détentes différentes, dans une assez grande étendue.

Nous reproduisons cette table, à laquelle nous renverrons chaque fois qu'il s'agira de calculer les conditions d'une machine marchant avec détente (1).

(1) Il existe une méthode très-expéditive pour obtenir les nombres de cette table ou pour calculer directement le produit d'une détente. C'est l'emploi des logarithmes hyperboliques, dans lequel cas il faut, il est vrai, avoir cette autre table à sa disposition. On trouve tous les éléments de cette méthode et la table dans les ouvrages de MM. Poncelet et Morin, et principalement dans l'*Aide mémoire* qu'a publié ce dernier savant.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## TABLE

DES QUANTITÉS TOTALES DE TRAVAIL DÉVELOPPÉES PAR 1 MÈTRE CUBE DE VAPEUR SOUS DIFFÉRENTES DÉTENTES ET SOUS LA PRESSION DE 1 ATMOSPHÈRE.

| VOLUME après la détente. | QUANTITÉ de travail correspondante. | VOLUME après la détente. | QUANTITÉ de travail correspondante. | VOLUME après la détente. | QUANTITÉ de travail correspondante. | VOLUME après la détente. | QUANTITÉ de travail correspondante. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| m. c. | kgm. | m. c. | kgm. | m. c. | kgm. | m. c. | kgm. |
| 1,00 | 10333 | 1,35 | 13434 | 2,80 | 20973 | 5,50 | 27949 |
| 1,01 | 10436 | 1,40 | 13840 | 2,90 | 21335 | 5,60 | 28135 |
| 1,02 | 10538 | 1,45 | 14173 | 3,00 | 21686 | 5,70 | 28318 |
| 1,03 | 10639 | 1,50 | 14523 | 3,10 | 22024 | 5,80 | 28498 |
| 1,04 | 10739 | 1,55 | 14862 | 3,20 | 22353 | 5,90 | 28674 |
| 1,05 | 10837 | 1,60 | 15190 | 3,30 | 22671 | 6,00 | 28848 |
| 1,06 | 10935 | 1,65 | 15508 | 3,40 | 22979 | 6,25 | 29270 |
| 1,07 | 11032 | 1,70 | 15816 | 3,50 | 23279 | 6,50 | 29675 |
| 1,08 | 11129 | 1,75 | 16116 | 3,60 | 23570 | 6,75 | 30065 |
| 1,09 | 11224 | 1,80 | 16407 | 3,70 | 23853 | 7,00 | 30441 |
| 1,10 | 11318 | 1,85 | 16690 | 3,80 | 24128 | 7,25 | 30804 |
| 1,11 | 11412 | 1,90 | 16966 | 3,90 | 24397 | 7,50 | 31154 |
| 1,12 | 11504 | 1,95 | 17234 | 4,00 | 24658 | 7,75 | 31493 |
| 1,13 | 11595 | 2,00 | 17496 | 4,10 | 24914 | 8,00 | 31820 |
| 1,14 | 11687 | 2,05 | 17751 | 4,20 | 25163 | 8,25 | 32139 |
| 1,15 | 11778 | 2,10 | 18000 | 4,30 | 25406 | 8,50 | 32447 |
| 1,16 | 11867 | 2,15 | 18243 | 4,40 | 25643 | 8,75 | 32747 |
| 1,17 | 11956 | 2,20 | 18481 | 4,50 | 25875 | 9,00 | 33038 |
| 1,18 | 12044 | 2,25 | 18713 | 4,60 | 26103 | 9,25 | 33321 |
| 1,19 | 12131 | 2,30 | 1894 0 | 4,70 | 26325 | 9,50 | 33597 |
| 1,20 | 12217 | 2,35 | 19162 | 4,80 | 26542 | 9,75 | 33865 |
| 1,21 | 12303 | 2,40 | 19380 | 4,90 | 26755 | 10,00 | 34127 |
| 1,22 | 12388 | 2,45 | 19593 | 5,00 | 26964 | 15,00 | 38347 |
| 1,23 | 12472 | 2,50 | 19802 | 5,10 | 27169 | 20,00 | 41289 |
| 1,24 | 12556 | 2,55 | 20006 | 5,20 | 27369 | 25,00 | 43595 |
| 1,25 | 12639 | 2,60 | 202 7 | 5,30 | 27566 | 50,00 | 50738 |
| 1,30 | 13044 | 2,70 | 20397 | 5,40 | 27759 | 100,00 | 57920 |

USAGE DE LA TABLE PRÉCÉDENTE. — La première colonne de cette table indique les volumes successifs que peut prendre un mètre cube de vapeur à 1 atmosphère de pression en se détendant, et la deuxième contient les quantités de travail correspondantes totales, développées avant et pendant la détente. Elle permet aussi de reconnaître le grand avantage d'une détente très-prolongée.

Ainsi lorsque, sans détente, un mètre cube de vapeur ne développe que 10333 kilogrammètres, il en produit 26964 détendu jusqu'à 5 fois son volume primitif, et à 10 fois 34127.

En attendant les exemples aux applications directes aux machines, nous dirons que, pour obtenir le travail correspondant pour des volumes et des pressions effectives, il suffit de faire le produit de ces données par le nombre de la table corres-



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pondant à la même détente. Supposons que l'on veuille connaître le travail développé par $0^{m.c.}400$ de vapeur à 5 atmosphères et la détente 5 fois, on aura :

$$26964 \times 0^{m.c.}400 \times 5 = 53928 \text{ kilogrammètres.}$$

## CONCLUSION DES NOTIONS PRÉLIMINAIRES

73. Ce qui précède suffit pour connaître, pratiquement, toutes les conditions d'être de l'agent qui anime les moteurs dont nous nous occupons actuellement.

Il fallait évidemment connaître ses propriétés physiques, c'est-à-dire les lois qui régissent sa formation simple et les phénomènes naturels qu'il présente, avant même toute application.

Venait ensuite la constatation de sa puissance mécanique ou la transformation de sa pression physique simple en travail, caractérisé par une résistance vaincue et un chemin parcouru.

Après ce dernier point démontré, la description d'une machine à vapeur ne peut plus présenter de difficultés pour être comprise ; car, à part les différences de formes et de système des récepteurs de sa puissance, la vapeur est toujours employée comme nous l'avons supposé en principe, sous la réserve des divers moyens imaginés pour transformer le mouvement rectiligne élémentaire en mouvement circulaire continu le plus généralement réclamé dans les applications.

Avant d'aborder cet intéressant sujet, nous allons essayer de tracer un historique rapide des phases qu'a suivies l'invention des machines à vapeur, dont chaque nation de l'Europe voudrait avoir vu naître, à l'exclusion des autres, le véritable auteur primitif; tandis qu'il nous semble que les droits sont un peu partagés à cet égard, à cause de l'immense différence qui existe entre les machines qui furent, les premières, capables d'un travail utile, et les essais tentés dans l'origine par les hommes auxquels leurs nations respectives prétendent attribuer tout le mérite de cette sublime création.

Une aussi grande chose est certainement une œuvre collective, découverte par partie, et, pour ainsi dire, sans que les premiers auteurs eussent pu soupçonner l'importance qu'elle devait avoir dans l'avenir, après que les génies réunis de plusieurs générations successives, et de toutes les nations, ont contribué à la rendre vraiment utile et applicable.

Nous pensons donc qu'on ne doit pas dire que la machine à vapeur est due plutôt à un homme qu'à tel autre, plutôt à un pays qu'à un autre, mais que des hommes, appartenant aux diverses nations, ont séparément, et presque à la même époque, émis des idées qui se sont peu à peu réalisées et modifiées, et ont produit, au bout de près de deux siècles d'essais, les moteurs à vapeur perfectionnés tels que nous les connaissons aujourd'hui.

FIN DU CHAPITRE QUATRIÈME ET DE LA PREMIÈRE SECTION.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

# DEUXIÈME SECTION

## APERÇU HISTORIQUE DE L'INVENTION DES MACHINES A VAPEUR

Depuis que la machine à vapeur est devenue, pour ainsi dire, la commensale indispensable de notre vie industrielle, on s'est bien souvent demandé à quel homme et à quelle nation nous en sommes redevables. La recherche n'en était pas chose facile, et la vérité du résultat est aussi difficile à saisir. Il faut non-seulement de longues et savantes recherches, mais aussi, une grande impartialité pour ne pas se laisser entraîner à trouver, quand même, l'inventeur parmi ses compatriotes.

Aussi n'avons-nous pas la prétention de refaire cette histoire, qui a été déjà écrite plusieurs fois par divers savants, et principalement par l'illustre Arago, qui en fit l'objet d'une de ses plus intéressantes notices dans l'*Annuaire du bureau des longitudes*. (Années 1828 et 1837.)

Tout en nous appuyant sur une grande partie du travail du célèbre astronome, il est impossible de ne pas tenir compte des recherches toutes récentes de M. L. Figuier, écrivain distingué qui s'est efforcé d'élucider encore la question, au risque même de ne pas être toujours d'accord avec les opinions émises par M. Arago.

Il semble résulter pour nous, des éléments du débat, que la découverte de la puissance de la vapeur d'eau est réellement très-ancienne, et qu'elle était connue de bien des hommes auxquels on ne peut pas cependant attribuer l'honneur de l'invention des machines ou de l'application de la vapeur comme force industrielle.

Dans ce nombre, on peut même comprendre Salomon de Caus, qui avait pourtant chez nous le titre d'inventeur des machines à vapeur.

Celui auquel ce titre ne paraît pas contestable, c'est encore un Français, Denis Papin, le premier qui ait imaginé un mécanisme capable d'utiliser la puissance de la vapeur dans des conditions analogues à ce qui se fait aujourd'hui.

Mais la première application réelle semble appartenir à un citoyen de la Grande-Bretagne, le capitaine Savery, dont les essais furent suivis par les machines de Newcomen, mécanicien de la même nation.

Nous espérons qu'on pourra se faire une idée assez juste de l'état de la question à l'aide des divers documents que nous donnons ci-après.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

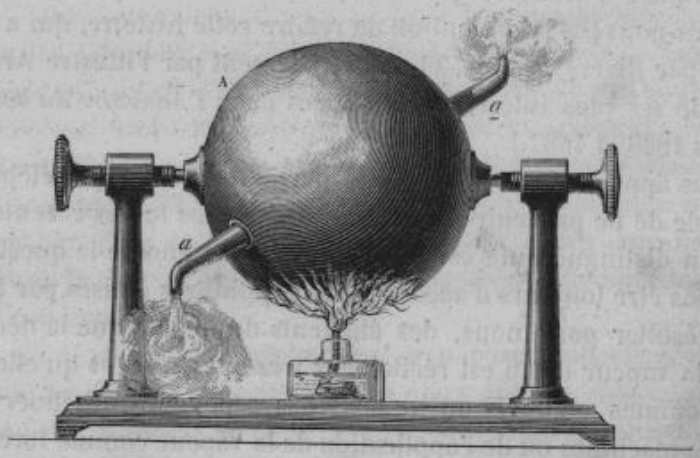
## OBSERVATEURS ANCIENS DE LA PUISSANCE DE LA VAPEUR D'EAU

Héron d'Alexandrie (120 *ans avant Jésus-Christ*). — Ce physicien de l'antiquité, dont le nom est bien connu, particulièrement pour l'instrument hydraulique appelé *fontaine de Héron*, a proposé divers problèmes de physique amusante qui se trouvent décrits dans un ouvrage intitulé : *Spiritalia seu pneumatica*.

Parmi ces problèmes, il s'en trouve un qui consiste dans le moyen de produire un mouvement de rotation par la production de la vapeur et son échappement dans l'atmosphère. C'est ce que l'on appelle un *éolipyle*, qui n'est autre que la vapeur d'eau agissant par réaction, tout à fait de la même façon que l'eau dans le tourniquet. (*Moteurs hydrauliques*, p. 260.)

Sans rechercher la forme exacte de l'appareil de Héron, on pourra en avoir une idée complète à l'aide de la figure suivante qui représente cet appareil, tel qu'on pourrait le construire aujourd'hui pour la démonstration.

Fig. 17.




Une sphère creuse A, renfermant une certaine quantité d'eau, est montée entre deux pointes d'après lesquelles elle peut exécuter facilement un mouvement de rotation comme sur un tour; cette sphère est munie de deux buses *a*, à bec recourbé, ouvertes à l'extérieur et placées sur un diamètre qui forme un certain angle avec l'axe de rotation.

Si l'on vient à chauffer la sphère, l'eau qu'elle contient se transforme en vapeur et s'échappe par les deux buses *a*. La boule prend alors un mouvement rapide sur elle-même, d'après les mêmes propriétés réactives réalisées par l'échappement de l'eau dans le tourniquet hydraulique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Telle est la machine de Héron, qui a même fait dire que l'invention des machines à vapeur remontait à des temps très-reculés.

Mais, outre que les machines usuelles ne marchent pas d'après le même principe, il ne semble pas le moins du monde que le philosophe grec ait pensé à appliquer son procédé comme force motrice et d'aucune façon.

Il est donc inutile d'insister davantage pour démontrer que l'éolipyle de Héron ne marque aucunement le premier pas de l'invention des machines à vapeur, et que c'est simplement la révélation de l'une des propriétés du fluide, mais sans idée de son application, puisqu'il ne montrait même pas comment le mouvement rotatif obtenu se serait transmis.

Cependant, si l'on parvenait à faire des machines à vapeur marchant utilement par le mode de réaction, Arago pensait que l'on devrait en attribuer l'invention primitive à Héron, puisqu'il en montrait le premier le principe, sans se douter néanmoins de l'application (1).

Blasco de Garay (1543). — On a trouvé dans les archives espagnoles un document manuscrit tendant à établir qu'un capitaine de mer, Blasco de Garay, fit, le 17 juin 1543, à Barcelonne, et d'après l'autorisation donnée par Charles-Quint, une expérience pour mettre un navire en mouvement *sans rames et sans voiles*.

On reconnut, suivant ce document, que le moyen proposé par cet inventeur consistait dans une chaudière d'eau bouillante et dans des roues attachées à l'un et l'autre bord du bâtiment.

C'est à peu près tout ce que l'on connait de la découverte de Blasco, qui ne donna pas suite à ses essais et cacha soigneusement les parties essentielles de son appareil.

D'après l'opinion d'Arago, cette mention ne mériterait pas de figurer dans l'histoire des machines à vapeur, puisqu'on ne peut même dire que celle de Blasco en fût réellement une, quelle que soit d'ailleurs sa disposition.

Cependant, tout ceci prouverait que *le dèsir* de faire mouvoir les navires autrement que par les antiques procédés, les rames et les voiles, n'est au moins pas récent.

Flurance Rivault (1605). — Un nommé David Rivault, seigneur de Flurance, gentilhomme de la chambre de Henri IV et précepteur de Louis XIII, a écrit un petit traité, *les Éléments d'artillerie,* dans lequel il signale les effets de l'eau chauffée et renfermée dans une bombe ou dans un canon, disant que *l'eau se transforme en air,* et fait éclater le vase qui la renferme avec un grand éclat.

(1) Plusieurs auteurs, et en particulier M. *Slate*, ont cherché à établir des machines à vapeur rotatives sur ce système, mais sans en obtenir les résultats qu'on en espérait. Il y a une vingtaine d'années, on voyait chez M. Philippe, ingénieur à Paris, un appareil de ce genre exécuté sur une grande échelle, composé de deux bras creux d'environ 1 mètre de rayon, montés sur un axe horizontal creux également, et marchant, entre deux disques fermés, à des vitesses considérables qui ne permettaient pas de maintenir les boîtes à étoupes étanches pendant bien longtemps. Comme la dépense de vapeur était énorme comparativement au peu de puissance obtenue, on eut plus tard l'idée de faire l'appareil double, c'est-à-dire d'envoyer la vapeur, qui avait produit son action, ou plutôt sa réaction, sur les branches du premier, dans celles du second, afin d'en tirer encore quelque chose. Le malheureux mécanicien anglais, Georges, qui passait, en 1840, pour l'un des premiers conducteurs de locomotives, et qui a été l'une des victimes de la catastrophe arrivée sur le chemin de fer de Versailles (rive gauche), en 1842, proposait alors une application de ce système aux machines locomotives avec transmission de mouvement par poulies et courroies, et ne voulait pas se rendre aux objections que nous lui faisions à ce sujet. Quoi qu'il en soit, tout a été abandonné peu de temps après d'infructueux essais.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Nous ne pouvons voir là aucun précédent quant aux machines à vapeur, mais seulement une preuve que la force expansive de ce fluide était connue et constatée, avec cette restriction, toutefois, que ses véritables propriétés physiques ne l'étaient pas encore, puisqu'on disait que l'eau se transformait en air quand on la chauffait.

Salomon de Caus (1615). — Nous arrivons à l'homme dont le nom est constamment prononcé par toute personne qui se reporte à l'origine des machines à vapeur. C'est un personnage d'autant plus intéressant qu'une tradition populaire le représente comme un grand inventeur méconnu de son époque, et même jeté dans un hôpital de fous par le cardinal de Richelieu qu'il aurait obsédé de la narration incessante de ses découvertes.

Or, si nous nous en rapportons aux recherches d'Arago et de M. L. Figuier, Salomon de Caus n'aurait pas une aussi grande figure historique et aurait encore moins été enfermé à Bicêtre. Voici ce que ces savants écrivains nous apprennent :

Salomon de Caus, né en 1576, paraît être originaire de Normandie. Après avoir passé une partie de sa jeunesse à l'étude des arts et des sciences, il fit divers voyages, et, se trouvant en Angleterre, il eut la charge de maître de dessin de la princesse Élisabeth. Il fut chargé aussi par le prince de Galles de décorer les jardins de Richemont qui se trouvèrent ainsi enrichis, par ses soins, de statues, grottes, fontaines jaillissantes, etc.

Plus tard, la princesse Élisabeth ayant épousé, en 1613, le duc de Bavière, Frédéric V, se fit accompagner en Allemagne par son maître de dessin, Salomon de Caus, en qualité d'ingénieur et d'architecte. A Heidelberg, comme à Richemont, notre compatriote fit merveille dans la construction des jardins; et, par son art, des collines abruptes se virent bientôt transformées en parcs les plus beaux et les plus frais, avec nombreuses grottes rocailleuses et les jets d'eau les plus réjouissants, etc.

Or, dans le moment même où l'architecte normand s'occupait des jardins de l'électeur Palatin, il fit imprimer un recueil où il rendait compte d'une infinité de problèmes résolus par son art, tels que constructions de fontaines, de jets d'eau, de jardins, etc. Ce recueil, écrit en français et publié par Jean Norton, libraire anglais établi à Francfort, porte le titre suivant :

*Les raisons des forces mouuantes, avec diverses machines tant utiles que plaisantes aus quelles sont adjoints plusieurs desseings de grotes et fontaines,* par Salomon de Caus, *ingénieur et architecte de Son Altesse Palatine électorale.*

L'épître de dédicace est adressé à Louis XIII, dont le privilége est daté de 1614.

Après la mention de quelques appareils servant à démontrer la force de l'air comprimé et de l'eau chauffée, « s'exhalant en air, » on trouve dans cet ouvrage la description de plusieurs procédés pour mettre l'eau en mouvement, puis un autre procédé pour faire élever l'eau au-dessus de son niveau; c'est cet article, seul, qui a rapporté à Salomon de Caus la gloire d'être proclamé chez nous l'inventeur des machines à vapeur.

Voici exactement cet article, avec un véritable *fac simile* de la figure donnée par l'auteur, pour aider à son intelligence :

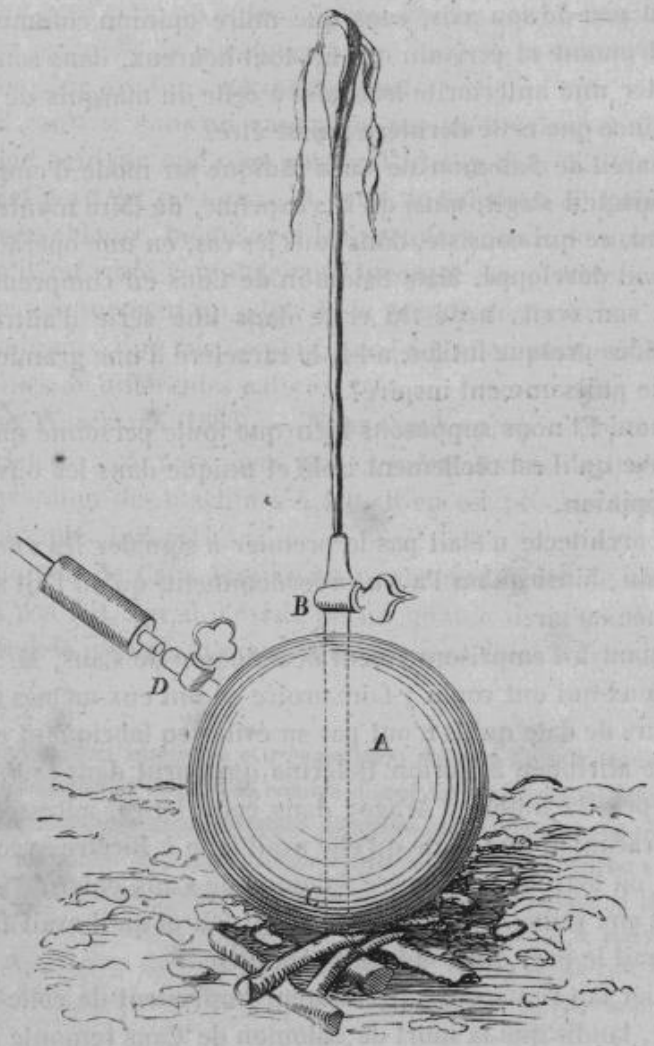
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

THÉORESME V

L'eau montera, par aide du feu, plus haut
que
son niveau.

« Le troisiesme moyen de faire monter (l'eau) est par l'aide du feu, dont il se « peut faire diuerses machines; i'en donneray icy la démonstration d'une. Soit « une balle de cuiure marquée A, bien soudée tout à l'entour, à laquelle il y aura

Fig. 18.




« un souspiral marqué D, par où l'on mettra l'eau, et aussi vn tuyau marqué BC, « qui sera soudé en haut de la balle, et dont le bout C aprochera près du fond, « sans y toucher; après, faut emplir ladite balle d'eau par le souspiral, puis le bien

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

« reboucher et le mettre sur le feu; alors la chaleur, donnant contre ladite balle, « fera monter toute l'eau par le tuyau BC (1). »

Ainsi, pour ramener au langage usuel la description de ce procédé, c'est la pression de la vapeur qui, se formant dans la sphère, agira sur la surface du liquide non vaporisé et le fera s'élever dans le tube plongeur AB, lorsqu'on ouvrira le robinet B.

C'est donc sur cet article, signalé pour la première fois par M. Baillet, inspecteur des mines, que se fonde la réputation de Salomon de Caus, dont les ouvrages étaient, pour ainsi dire, inconnus auparavant.

Arago, dans sa curieuse notice, a cru pouvoir conserver ce titre de gloire à Salomon de Caus; mais M. L. Figuier, dans son récent travail sur la découverte des machines à vapeur, a déclaré ne pas partager cette opinion; et nous avouons que nous sommes un peu de son avis, sans que notre opinion commune puisse faire tort au grand astronome et écrivain qui fut tout heureux, dans son amour patriotique, de constater une antériorité française à celle du marquis de Worcester, des Anglais, toute mince que cette dernière puisse être.

En effet, l'appareil de Salomon de Caus indique un mode d'emploi utile de la vapeur d'eau, puisqu'il s'agit, ainsi qu'il s'exprime, de faire monter l'eau au-dessus de son niveau, ce qui consiste, dans tous les cas, en une opération mécanique ou dans un travail développé. Mais Salomon de Caus en comprenait-il lui-même l'importance? Et son écrit, noyé du reste dans une série d'autres descriptions d'objets ou procédés presque futiles, a-t-il le caractère d'une grande pensée mise à jour par un génie puissamment inspiré?

Évidemment non. Et nous supposons bien que toute personne qui connaîtra cet écrit, si elle trouve qu'il est réellement isolé et unique dans les ouvrages de Caus, partagera notre opinion.

D'ailleurs, cet architecte n'était pas le premier à signaler les effets d'expansion de la vapeur d'eau, ainsi qu'on l'a vu précédemment, qu'on l'ait appelée vapeur ou eau transformée en air.

Maintenant, quant à l'emprisonnement de Salomon de Caus, M. L. Figuier fait remarquer que ceux qui ont voulu y faire croire en ont eux-mêmes montré la fausseté par les erreurs de date qu'ils n'ont pas su éviter en fabriquant cette fable.

C'est une lettre attribuée à Marion Delorme qui parut dans *le Musée des familles* quelque temps après la notice d'Arago; dans cette lettre, adressée à Cinq-Mars, Marion Delorme racontait une visite qu'elle avait faite à Bicêtre avec le marquis de Worcester, et où on leur aurait montré Salomon de Caus enfermé dans un cabanon d'où il criait aux visiteurs qu'il n'était point fou et qu'il avait fait une découverte qui enrichirait le pays qui voudrait l'appliquer.

Or, M. L. Figuier fait remarquer que l'auteur imprudent de cette lettre l'a datée du 3 février 1641, tandis que la mort de Salomon de Caus remonte à 1630 (2). Cet

(1) *Les Raisons des forces mouvantes*, 1615, p. 4, livre premier. Cet ouvrage se trouve à la bibliothèque du Conservatoire des arts et métiers de Paris.

(2) Cette date se trouve inscrite, dit M. Figuier, au revers d'un portrait de Salomon de Caus, conservé dans la galerie d'antiquités de Heidelberg.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

écrivain ajoute aussi que Bicêtre, acquis par Louis XIII en 1632, était, à cette même époque (1641), une commanderie de Saint-Louis où l'on donnait asile à d'anciens militaires, et non un hôpital. D'après Dulaure, ce n'est qu'en 1656 que Bicêtre, par suite de la fondation de l'Hôtel des Invalides par Louis XIV, fut transformé en succursale de l'Hôpital général, appelé depuis *Hospice de la Salpêtrière*.

Mais que l'amour-propre national se console : si Salomon de Caus n'est pas le véritable inventeur des machines à vapeur, c'est, comme on le verra plus loin, un autre Français, Papin, auquel personne ne pourra contester l'idée première et réelle, non-seulement de l'emploi de la vapeur comme force motrice, en général, mais même de son application à la navigation.

Branca (1629). — Avant de parler du marquis de Worcester (le Salomon de Caus des Anglais), on peut citer un auteur italien, Branca, qui a décrit, comme Salomon de Caus, divers appareils de physique, parmi lesquels se trouve une application de la vapeur d'eau pour produire un mouvement.

Cet appareil consiste dans un vase placé sur un brasier, et d'où part un jet de vapeur qui vient agir sur une roue garnie d'ailettes et la fait tourner (1).

Outre que cet écrit est postérieur à ceux de Salomon de Caus, l'appareil décrit n'a aucune ressemblance, même avec les premiers essais de machines à vapeur, ce qui prouve qu'il est resté complétement inconnu des premiers expérimentateurs, et ne constitue aucunement un jalon de la grande découverte.

Notons, néanmoins, une fois de plus, que l'attention était éveillée, au moins chez bien des hommes de différentes nations.

Le marquis de Worcester (1663). — Nous avons appelé cet homme le Salomon de Caus de l'Angleterre; car avec aussi peu et même moins de titres que notre compatriote à l'invention des machines à feu, il en est proclamé unanimement dans son pays « le premier inventeur. »

En effet, Salomon de Caus donnait au moins une figure de son appareil, ce que Worcester n'a pas fait, car il n'existe de lui qu'une description très-confuse dans un ouvrage anglais intitulé : *Century of inventions*. Voici la traduction qu'en donne Arago :

« J'ai inventé un moyen admirable et très-puissant d'élever l'eau à l'aide du feu, non par aspiration, car alors on serait renfermé, comme disent les philosophes, *intra sphæram activitatis*, l'aspiration ne s'opérant que pour certaines distances; mais mon moyen n'a pas de limite, si le vase a une force suffisante. Je pris en effet un canon entier dont la bouche avait éclaté, et l'ayant rempli d'eau aux trois quarts, je fermai par des vis l'extrémité rompue et la lumière ; j'entretins ensuite dessous un feu constant, et au bout de vingt-quatre heures le canon se brisa en faisant un grand bruit. Ayant alors trouvé le moyen de former des vases de telles manières qu'ils sont consolidés par la force intérieure (2), et qui se remplissent l'un après l'autre, j'ai vu l'eau couler

(1) C'est encore une idée que l'on voit parfois renouvelée de nos jours par des cerveaux creux qui n'ont aucune idée de la mécanique, et qui s'imaginent avoir trouvé quelque chose de merveilleux.

(2) Ce passage, dit Arago, a été traduit presque toujours d'une autre manière : « Ayant découvert, fait-on dire à Worcester, le moyen « de fortifier les vaisseaux intérieurement, etc, etc. » La phrase, je dois l'avouer, est beaucoup plus raisonnable que celle de ma version, mais c'est presque un argument contre sa fidélité, tant,



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'une manière continue comme celle d'une fontaine, à la hauteur de quarante pieds. Un vase d'eau raréfiée par l'action du feu, élevait quarante vases d'eau froide. L'ouvrier qui surveille la manœuvre n'a que deux robinets à ouvrir, de telle sorte qu'au moment où l'un des deux vases est épuisé, il se remplit d'eau froide pendant que l'autre commence à agir, et ainsi successivement. Le feu est entretenu dans un degré constant d'activité par les soins du même ouvrier ; il a pour cela tout le temps nécessaire durant les intervalles que lui laisse la manœuvre des robinets. »

Ainsi, qu'a donc fait le marquis de Worcester de plus que Salomon de Caus, dont le travail est encore antérieur de presque cinquante ans?

Disons donc que rien ne justifie la réputation faite à Worcester dans son pays, puisque réellement après lui la machine à vapeur était encore à trouver.

Sir Samuel Moreland (1683). — Ce personnage est fort cité en Angleterre à propos de l'origine des machines à vapeur. Cette réputation lui vient encore de quelques lignes écrites par lui dans un manuscrit que l'on conserve au Bristish Museum, et ayant pour titre *Élévation des eaux par toutes sortes de machines*, etc.

On y parle de la puissance de la vapeur d'eau et de la possibilité d'en tirer un parti utile comme force motrice.

Mais aucune disposition n'est proposée pour l'application.

## PREMIERS INVENTEURS DE LA MACHINE A VAPEUR

Denis Papin (1690 et 1695). — C'est à Denis Papin que l'on peut aujourd'hui, sans conteste, attribuer l'idée primordiale de l'emploi de la vapeur d'eau comme force motrice, et agissant par l'intermédiaire d'un mécanisme récepteur au lieu d'utiliser seulement son action directe pour des élévations d'eau, comme paraissent l'avoir pensé Salomon de Caus, en France, et Worcester, en Angleterre.

Denis Papin naquit à Blois, le 22 août 1647, d'une famille appartenant à la religion réformée. Il commença sa carrière par l'étude de la médecine, qui était aussi la profession de son père. Mais, dirigé bientôt par son goût pour les sciences mathématiques, il vint à Paris où il s'attacha au célèbre Huygens, appelé en France par le ministre Colbert, à l'époque où ce grand homme d'État fondait l'Académie des sciences.

Papin, se trouvant associé aux travaux du savant Hollandais, eut l'occasion de faire diverses expériences sur un sujet qui préoccupait fort les physiciens de l'époque; il s'agissait de trouver les moyens d'utiliser, comme force motrice disponible,

en général, les projets de Worcester sont chimériques et extravagants. Au reste, voici le texte original : « Having a way to make my vessels so that they are *strengthened by the* force *within them*, etc., etc. » Il m'a semblé que *force within them* ne peut pas désigner des moyens de consolidation intérieurs. Si j'ai bien compris ces paroles, pour répondre à une objection qu'il prévoyait, Worcester a jugé convenable d'assurer que ses nouvelles chaudières n'éclateraient jamais; et en effet, il aurait atteint ce but, si, comme il le dit, elles devenaient d'autant plus fortes que la vapeur les pressait avec plus d'intensité de dedans en dehors. Cette circonstance donnera un nouveau poids à l'opinion de ceux qui pensent que Worcester n'a jamais fait l'essai de sa machine, mais je m'empresse de faire remarquer que tout cela est sans importance quant à la question de priorité qu'il faut discuter ici. »

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la puissance de l'atmosphère, dont les propriétés venaient d'être mises en lumière par les travaux de Pascal, Torricelli, Otto de Guéricke, etc.

Les essais des deux physiciens eurent pour premier résultat *une machine à poudre*, dont l'idée primitive paraît appartenir à Huygens, qui en décrivit plus tard une disposition qu'il se proposait de lui donner.

Cette machine avait pour principe l'inflammation de la poudre à canon, qui devait, en s'enflammant, chasser l'air du tube qui la contenait, et produire un vide au-dessous d'un piston sur lequel la pression de l'atmosphère pouvait alors devenir effective et transmettre sa puissance à l'aide d'un certain mécanisme relié au piston.

Cet appareil, qui fut positivement l'origine de la découverte principale de Papin, n'eut pas évidemment le succès que l'on en attendait ; le vide ne s'y faisait d'abord qu'imparfaitement, et d'ailleurs la poudre à canon n'est pas un agent facilement maniable.

Avant de décrire ce point important des travaux de Papin, il est indispensable de dire quelques mots des principaux incidents de son existence, dont l'un surtout eut pour résultat de priver la France de l'honneur d'avoir vu se faire chez elle les premiers essais de la plus grande invention des temps modernes.

Après avoir travaillé avec Huygens, Papin passa en Angleterre vers la fin de 1675 et continua ses recherches scientifiques avec Boyle, savant Anglais, ou plutôt Irlandais de naissance, qui cite lui-même l'utile coopération de Papin dans la construction des appareils de physique, et particulièrement la machine pneumatique à deux corps, et le fusil à vent, dont il le donne même comme l'inventeur.

C'est dans cette période de sa vie, en 1681, qu'il fit connaître un appareil qu'il avait imaginé et qu'il nommait *digesteur*, de l'emploi auquel il le destinait, c'est-à-dire à la cuisson des viandes et des os : c'est la célèbre marmite dont nous avons dit un mot dans les notions préliminaires (§ 14). C'est aussi pour ce même appareil qu'il inventa la soupape de sûreté, qu'il destinait, disait-il, à permettre de reconnaître l'état de la température intérieure de la marmite et de mesurer facilement le point de cuisson des substances qu'il y renfermait.

Papin quitta encore l'Angleterre et y revint cependant plus tard, mais après avoir parcouru divers pays de l'Europe. De retour en Angleterre, il se livra de nouveau à l'étude d'une machine atmosphérique qui permit d'utiliser cette grande puissance naturelle. A ce propos, il présenta à la Société royale de Londres le modèle d'une machine qu'il disait propre *à transporter au loin la force des rivières*. Elle avait pour principe une grande machine pneumatique mise en mouvement par une chute d'eau, et qui devait faire le vide dans un long tube métallique dans lequel se trouvait un piston qui se serait alors avancé sous la pression atmosphérique et aurait pu transmettre cette puissance à l'aide d'une corde ou autre organe mécanique. Ce sera, à vrai dire, le principe de nos chemins de fer atmosphériques actuels.

Cette machine, sur laquelle Papin fondait beaucoup d'espérance, n'eut aucun succès ; de là un profond découragement qui venait coïncider encore à une très-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

grande faiblesse de ressources. Il songea donc à revenir en France; mais la révocation de l'édit de Nantes lui en interdisait l'entrée. Force lui fut de chercher une terre plus hospitalière et surtout mieux avisée que sa patrie, où, pour un motif le plus complétement illusoire, on ne craignait pas de proscrire une partie des plus intelligentes de la population du pays.

Il vint donc à Marbourg, où il fut chargé, par l'électeur de Hesse, de la chaire de mathématiques.

C'est alors qu'après de nouveaux essais sur les moteurs à poudre, il fit enfin connaître l'idée qu'il avait eue de remplacer ce dernier agent par de l'eau se transformant en vapeur, et produisant le vide par une prompte condensation.

La première mention de la découverte de Papin a été faite par lui, en août 1690, dans un recueil rédigé en langue latine, et publié à Leipzick sous le titre de *Acta Eruditorum*.

Une reproduction un peu étendue du même article a été faite par Papin dans un de ses ouvrages imprimés à Cassel en 1695, sous le titre de *Recueil de diverses pièces touchant quelques nouvelles machines*.

Comme nous arrivons au grand point de la découverte des machines à vapeur, nous donnerons la partie du travail de Papin qui décrit particulièrement son appareil et une copie exacte (fig 19) de celle qui s'y trouve jointe.

Après avoir fait remarquer qu'il avait dû renoncer à l'emploi de la poudre pour opérer le vide sous le piston récepteur de la pression atmosphérique, il dit que l'idée lui est venue d'employer l'eau, qui se transforme facilement en vapeur et se condense aussi bien, en ne laissant que le vide dans l'espace qu'elle occupait sous l'état de fluide élastique.

Voici, en effet, de quelle façon s'exprimait Papin : « ... J'ai donc essayé de parvenir par une autre route (que par l'emploi de la poudre) au même résultat, et comme, par une propriété qui est naturelle à l'eau, une petite quantité de ce liquide, réduite en vapeur par l'action de la chaleur, acquiert une force élastique semblable à celle de l'air, et revient ensuite à l'état liquide par le refroidissement, sans conserver la moindre apparence de sa force élastique, j'ai été porté à croire que l'on pourrait construire des machines où l'eau, par le moyen d'une chaleur modérée, et sans frais considérables, produirait le vide parfait que l'on ne pouvait pas obtenir à l'aide de la poudre à canon. Parmi les différentes constructions que l'on peut imaginer à cet effet, voici celle qui m'a paru la plus commode :

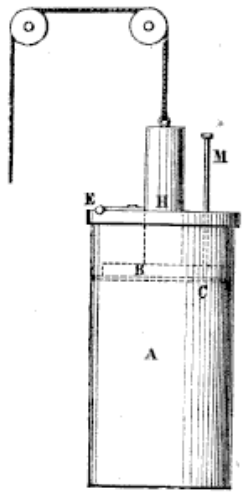
« A est un tube d'un diamètre partout égal, exactement fermé dans sa partie inférieure; B est un piston adapté à ce tube ; H un manche, ou tige, fixé au piston ; EH une verge de fer qui se meut horizontalement autour de son axe; un ressort presse la verge de fer EH de manière à la pousser nécessairement dans l'ouverture H aussitôt que le piston et sa tige sont élevés à une hauteur telle que l'ouverture soit au-dessus du couvercle; C est un petit trou pratiqué dans le piston, par lequel l'eau peut sortir du fond du tube A lorsqu'on enfonce, pour la première fois, le piston dans ce tube.

« Voici quel est l'usage de cet instrument : on verse dans le tube A une petite quantité d'eau, à la hauteur de trois ou quatre lignes, puis on introduit le piston, et on le pousse jusqu'au fond,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

jusqu'à ce qu'une partie de l'eau versée sorte par le trou C; alors ce trou est fortement bouché par la verge M ; on place ensuite le couvercle où sont pratiquées les ouvertures nécessaires. Au moyen d'un feu modéré, le tube A, qui est en métal très-mince, s'échauffe bientôt, et l'eau changée en vapeur exerce une pression assez forte pour vaincre le poids de l'atmosphère, et pousser en haut le piston B jusqu'au moment où le trou H de la tige du piston s'élève au-dessus du couvercle ; alors on entend le bruit de la verge EH, poussée dans l'ouverture H par le ressort. Il faut, dans ce moment, ôter aussitôt le feu, et les vapeurs renfermées dans le tube à minces parois se résolvent bientôt en eau par l'action du froid, et laissent le tube parfaitement vide d'air. On retire ensuite la verge EH de l'ouverture H, ce qui permet à la tige de redescendre ; aussitôt le piston B éprouve la pression de tout le poids de l'atmosphère, qui produit avec d'autant plus de force ce mouvement désiré que le diamètre du tube est plus grand. On ne peut douter que le poids de la colonne atmosphérique ne soit mis tout entier à profit dans des tubes de cette espèce. J'ai reconnu par expérience que le piston élevé par la chaleur au haut du tube redescendait peu après jusqu'au fond, et cela à plusieurs reprises, en sorte que l'on ne peut supposer l'existence de la plus petite quantité d'air qui resterait dans le fond du tube; or, mon tube, dont le diamètre n'excède pas deux doigts, élève cependant un poids de 60 livres avec la même vitesse que le piston descend dans le tube, et le tube lui-même pèse à peine 5 onces. Je suis donc convaincu qu'on pourrait faire des tubes pesant au plus 40 livres chacun, et qui cependant pourrait à chaque mouvement élever à 4 pieds de haut un poids de 2,000 livres. J'ai éprouvé, d'ailleurs, que l'espace d'une minute suffit pour qu'avec un feu modéré le piston soit porté jusqu'au haut de mon tube; et comme le feu doit être proportionné au diamètre des tubes, de très-grands tubes pourraient être chauffés presque aussi vite que des petits; on voit clairement par là quelles immenses forces motrices on peut obtenir au moyen d'un procédé si simple, et à quel bas prix. On sait, en effet, que la colonne d'air pesant sur un tube de 1 pied de diamètre, égale à peu près 2,000 livres; que si le diamètre est de 2 pieds, ce poids sera environ de 8,000 livres, et que la pression augmentera ainsi de suite en raison des diamètres. Il suit de là que le feu d'un fourneau qui aurait un peu plus de 2 pieds de diamètre suffirait pour élever à chaque minute 8,000 livres pesant à une hauteur de 4 pieds, si l'on avait plusieurs tubes de cette hauteur; car le feu, renfermé dans un fourneau de fer un peu mince, pourrait être facilement transporté d'un tube à un autre; et ainsi le même feu procurerait continuellement, soit dans l'un, soit dans l'autre tube, ce vide dont les effets sont si puissants. Si l'on calcule maintenant la grandeur des forces que l'on peut obtenir par ce moyen, la modicité des frais nécessaires pour acquérir une quantité de bois suffisante, on avouera sans doute que notre méthode est de beaucoup supérieure à l'usage de la poudre à canon, dont on a parlé plus haut, surtout puisqu'on obtient ainsi un vide parfait, et qu'on obvie aux inconvénients que nous avons énumérés. Comment peut-on employer cette force pour tirer hors des mines l'eau et le minerai, pour lancer des globes de fer à de grandes distances, pour naviguer contre le vent et pour faire beaucoup d'autres applications? C'est ce qu'il serait beaucoup trop long d'examiner. Mais chacun, dans l'occasion, doit imaginer un système de machines approprié au but qu'il se propose. Je dirai cependant ici, en passant, sous combien de rapports une force motrice de cette nature serait préférable à l'emploi des rameurs ordinaires pour imprimer le mouvement aux vaisseaux : 1° les rameurs ordinaires surchargent le

Fig. 19.




Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vaisseau de tout leur poids, et le rendent moins propre au mouvement ; 2° ils occupent un grand espace, et par conséquent embarrassent beaucoup sur le vaisseau ; 3° on ne peut pas toujours trouver le nombre d'hommes nécessaires ; 4° les rameurs, soit qu'ils travaillent en mer, soit qu'ils se reposent dans le port, doivent toujours être nourris, ce qui n'est pas une petite augmentation de dépense. Nos tubes, au contraire, ne chargeraient, comme on l'a dit, le vaisseau que d'un poids très-faible ; ils occuperaient peu de place ; on pourrait se les procurer en quantité suffisante s'il existait une fois une fabrique pour les confectionner ; et enfin ces tubes ne consumeraient du bois qu'au moment de l'action, et n'entraîneraient aucune dépense dans le port. Mais comme des rames ordinaires seraient mues moins commodément par des tubes de cette espèce, il faudrait employer des roues à rames telles que je me souviens d'en avoir vu dans la machine construite à Londres, par l'ordre du sérénissime prince palatin Rupert. Elle était mise en mouvement par des chevaux à l'aide de rames de cette espèce, et laissait de bien loin derrière elle la chaloupe royale, qui avait cependant seize rameurs. Il n'est pas douteux que nos tubes pussent imprimer un mouvement de rotation à des rames fixées à un axe, si les tiges de pistons étaient armées de dents qui s'engrèneraient nécessairement dans des roues également dentées et fixées à l'axe des rames. Il serait nécessaire seulement que l'on adaptât trois ou quatre tubes au même axe, pour que son mouvement pût continuer sans interruption. En effet, tandis qu'un piston toucherait au fond de son tube, et ne pourrait plus, par conséquent, faire tourner l'axe avant que la force de la vapeur l'eût élevé au sommet du tube, on pourrait, au moment même, éloigner l'arrêt d'un autre piston qui, en descendant, continuerait le mouvement de l'axe. Un autre piston serait ensuite poussé de la même manière et exercerait sa force motrice sur le même axe, tandis que les pistons, abaissés en premier lieu, seraient de nouveau élevés par la chaleur, et se retrouveraient ainsi en état de mouvoir le même axe de la manière précédemment décrite. D'ailleurs, un seul fourneau et un peu de feu suffiraient pour élever successivement tous les pistons. Mais on objectera peut-être que les dents des tiges engrenées dans les dents des roues exerceront sur l'axe des actions en sens inverse, quand elles descendront et quand elles remonteront, et qu'ainsi les pistons montants contrarieront le mouvement des pistons descendants, et réciproquement. Cette objection est sans force. Tous les mécaniciens connaissent parfaitement un moyen par lequel on fixe à un axe des roues dentées qui, mues dans un sens, entraînent l'axe avec elles, et qui, dans l'autre sens, ne lui communiquent aucun mouvement, et le laissent obéir librement à la rotation opposée. La principale difficulté est donc d'avoir une fabrique où l'on forge facilement ces grands tubes, comme on l'a dit en détail dans les *Actes des érudits*, du mois de septembre 1688. Et cette nouvelle machine doit être un nouveau motif pour accélérer cet établissement, car elle démontre clairement que ces grands tubes pourraient être appliqués très-commodément à plusieurs usages importants (1). »

Ce mémoire établit certainement, de la façon la plus péremptoire, la part que pourrait revendiquer notre compatriote, non-seulement de l'invention des machines à vapeur, mais encore de leur application à la navigation.

Ce dernier point même n'est pas resté pour Papin à l'état de simple prévision, car il est maintenant certain qu'il a fait construire, de 1706 à 1707, un bateau fondé sur ce principe, lequel bateau fut détruit par les mariniers du Weser, qui s'opposaient à son entrée sur ce fleuve.

Ces faits ont été prouvés par une correspondance de Papin avec Leibnitz, retrouvée récemment par M. Kuhlman, professeur à l'université de Hanovre, et com-

(1) *Actes des érudits*, août 1690. (Extrait d'une traduction de M. L. Figuier.)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

muniquée à l'Académie des sciences de Paris dans la séance du 29 mars 1852.

A partir de ces derniers revers, Papin, déjà vieux et réduit pour ainsi dire à la misère, fut à peu près errant en Europe, cherchant un foyer pour y terminer ses jours.

Il paraît que l'on n'a pu parvenir à fixer exactement le lieu ni l'époque de sa mort, qui a dû avoir lieu, néanmoins, après 1714, puisqu'une lettre de Leibnitz, de cette date, parle de lui comme étant de retour en Angleterre.

En résumé, Papin est le premier qui ait eu l'idée de se servir de la vapeur pour faire le vide sous un piston, et utiliser la pression atmosphérique en en déduisant une force mécanique capable d'être transmise par des organes quelconques. Non-seulement cette idée était juste et fondamentale, mais encore elle était pratique ; et les machines qui furent construites immédiatement après ont été établies sur ce principe, et telles, ont rendu de véritables services à l'industrie.

Si Papin n'a pas fait davantage, comme réalisation, on ne peut l'attribuer qu'à un désordre d'idées, issu certainement de sa vie errante et aventureuse, et de la situation que sa propre patrie lui avait faite. On doit certainement à l'édit qui le frappa de proscription de ne pas avoir vu naître chez nous les véritables premières machines à vapeur.

Le capitaine Savery (1698). — Si l'on veut donner légalement à chacun la part qui lui revient, on devra reconnaître que l'Anglais, Thomas Savery, fut le premier, entre les hommes des différentes nations de l'Europe, qui employa la vapeur à produire un travail réel. Mais nous ajouterons, pour les mêmes motifs d'équité, que son appareil n'est autre chose que la réalisation pratique des idées émises d'abord par Salomon de Caus, et plus tard par le marquis de Worcester.

Thomas Savery, d'abord simple ouvrier des mines, puis plus tard capitaine de marine et ingénieur distingué, eut la pensée de construire un appareil qui fût utilement applicable au desséchement des mines de houilles dont on s'occupait déjà avec beaucoup d'ardeur.

Il connaissait parfaitement les travaux de Papin, dont il était alors question en Angleterre. Disons que si l'on s'occupait des travaux de notre compatriote, c'était en les critiquant sévèrement. Robert Hooke, entre autres, ne manquait pas de faire remarquer combien la disposition de l'appareil était vicieuse, par sa marche lente et la nécessité de retirer le feu de dessous le piston pour chacun de ses mouvements. En cela, le critique anglais n'avait que le tort de ne pas s'apercevoir du peu qu'il eût été nécessaire de faire pour rendre pratique un principe qui avait pour lui la vérité.

Savery préféra donc inventer quelque chose que d'essayer de perfectionner l'appareil de Papin. La disposition qu'il adopta, et pour laquelle une patente lui fut délivrée en 1698 (1), consistait dans un appareil où la vapeur devait agir directement sur l'eau que l'on voulait élever, analogue en cela à la méthode de Salomon

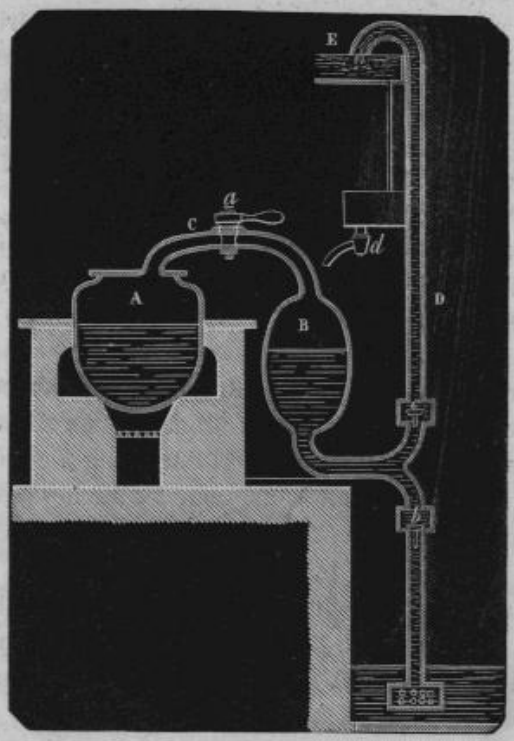
(1) Tredgold, dans son *Traité des machines à vapeur*, fait remarquer que c'est la première patente délivrée en Angleterre pour une machine à feu.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de Caus, si ce n'est que la vapeur devait être formée dans un récipient indépendant des vases où l'eau élevée devait se rendre.

Cette machine, successivement perfectionnée par son auteur, a été décrite par lui, en 1699, dans une brochure intitulée *l'Ami du mineur* (*The Miner's friend*). Voici, d'après Tredgold, en quoi elle consistait, au moins, lorsqu'elle fut arrivée à un certain point de perfectionnement.

Fig. 20.




Une chaudière A (fig. 20), montée sur un fourneau, était mise en communication avec un récipient semblable B au moyen d'un conduit C muni du robinet *a*; ce récipient était lui-même en relation, par sa partie inférieure, avec un tube d'ascension D plongeant par le pied dans l'eau que l'on voulait épuiser, et montant jusqu'à un chenal E qui devait recevoir l'eau élevée. Ce tube D était aussi muni de deux soupapes *b* et *c* que nous appellerons soupapes d'aspiration et de refoulement, par leurs fonctions tout à fait identiques à ce qui se passe dans une pompe élévatoire ou pompe foulante ordinaire.

En ouvrant le robinet *a*, la vapeur se rendait dans le récipient B dont elle ne tardait pas à chasser l'air, ainsi que celui contenu dans la partie supérieure de la colonne d'ascension D. On fermait alors le robinet *a* et on ouvrait celui *d* qui laissait écouler de l'eau froide sur le récipient B; la vapeur se condensait, d'où résultait un vide partiel sous l'influence duquel l'eau s'élevait dans la colonne d'ascension, soulevait le clapet *b* et remplissait le récipient.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On ouvrait de nouveau le robinet *a* donnant issue à la vapeur qui, venant faire pression sur l'eau, la forçait de soulever le clapet *c* et de s'élever dans la partie supérieure de la colonne d'ascension jusqu'au chenal où elle était déversée.

Il est facile de comprendre maintenant que, pour continuer l'opération, on devait de nouveau refroidir le vase B en y amenant extérieurement de l'eau froide, ce qui donnait lieu à une condensation et à une nouvelle élévation de l'eau inférieure.

Il est à peine nécessaire d'ajouter que cette machine ne possédait pas tous les éléments d'une complète réussite. En effet, la vapeur devait acquérir une pression d'autant d'atmosphères plus une, que l'eau devait être élevée de fois 10 mètres de hauteur au-dessus du niveau de la chaudière, soit 6 atmosphères pour 50 mètres; et il était alors très-difficile d'établir des vases assez solidement clos pour résister à de hautes pressions.

Il paraît, d'ailleurs, que Savery n'a pas eu l'idée d'appliquer la soupape de sûreté de Papin (1), ce qui fait qu'on n'osa pas élever de l'eau à plus de 40 pieds de hauteur, de crainte d'explosion; la pression de la vapeur devait atteindre pour cela un peu plus de deux atmosphères.

Cependant, cette pression aurait été poussée une fois jusqu'à 8 ou 10 atmosphères; mais le physicien Désaguliers dit qu'alors les soudures des vases se fondaient et les joints s'ouvraient.

Et puis elle ne pouvait pas élever par aspiration, ainsi qu'une pompe, à plus de 10 mètres, au maximum.

Aussi ne put-elle être employée que pour des élévations peu importantes, au lieu de servir pour les mines, suivant l'intention de l'inventeur.

Mais, si peu que cela soit, elle a été appliquée, ce qui lui constitue un titre suffisant à une mention dans l'histoire. Si son principe est le même que celui de l'appareil de Salomon de Caus, on y retrouve de plus l'idée d'une chaudière indépendante pour la production de la vapeur et l'application de la condensation, imaginée par Papin.

Newcomen, Cawley et Savery (1705). — Les essais de Savery n'en devaient pas moins attirer l'attention des industriels en Angleterre, et permettaient de soulever un peu le voile qui cachait encore l'avenir de cette puissante innovation.

Deux obscurs artisans, Thomas Newcomen et Jean Cawley, l'un serrurier et l'autre vitrier, eurent un jour l'occasion de voir fonctionner un appareil de Savery; ils conçurent bientôt l'espérance de tirer un meilleur parti de ce principe dont les premiers résultats avaient suffi pour les émerveiller.

Newcomen entretenait quelques relations avec Robert Hooke, le même que nous avons vu critiquant l'invention de Papin. Il lui fit part de quelques idées qu'il avait au sujet de la machine de Savery, et Hook lui répondit en lui donnant connaissance de l'appareil de l'ingénieur français, mais en renouvelant ses critiques à son égard. On a retrouvé dans ses papiers un brouillon d'une lettre adressée à Newco-

(1) Le physicien français, Désaguliers, a fait l'application de cette soupape à l'appareil de Savery, vers 1717.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

men où il lui disait : « Si Papin pouvait faire le vide *subitement* dans son cylindre, votre affaire serait faite. »

Or, cette révélation suffit à Newcomen et Cawley pour augmenter leur espoir de réussir; et bientôt Newcomen eut construit « au coin de sa forge » (dit M. L. Figuier) le modèle primitif de l'une des premières machines à vapeur réelles. Les deux hommes de génie n'eurent qu'à transformer l'idée de Papin en l'améliorant de la modification indiquée par Hooke, *une condensation subite,* et combiner un mécanisme de transmission pour l'appliquer au piston récepteur; en y adaptant la chaudière indépendante de Savery, la machine, pour ainsi dire moderne, fut inventée.

La modification apportée par Newcomen et Cawley à la machine de Papin consistait d'abord à produire de la vapeur dans un récipient indépendant et à la diriger par un conduit dans le cylindre où devait se mouvoir le piston; puis à projeter de l'eau froide sur la surface extérieure du cylindre pour le refroidir et condenser la vapeur lorsqu'il était arrivé au bout de sa course et que la pression atmosphérique devait agir.

Ils réclamèrent alors une patente. Mais Savery, qui pensait voir là un empiétement sur les droits que la sienne lui conférait, fit opposition à leur demande.

Mieux avisés que beaucoup d'inventeurs de nos jours, Newcomen et Cawley préférèrent s'associer avec Savery plutôt que de plaider. C'est de là que vint la liaison que nous voyons entre ces trois hommes qui s'entr'aidèrent pendant quelque temps pour faire faire un premier pas à la nouvelle machine. C'est sous cette raison sociale qu'une patente leur fut, dit-on, délivrée en 1705 (1).

Cependant l'association ne persista pas, car peu de temps après on ne retrouve plus que les noms des deux premiers inventeurs.

Ils obtinrent, vers 1712, d'établir une machine de leur système pour opérer l'épuisement d'une mine de houille. Elle fonctionnait déjà lorsqu'une circonstance fortuite vint leur révéler un nouveau perfectionnement fondamental à lui apporter.

Un jour qu'ils l'examinaient marcher avec cette lenteur inévitable, due à la condensation opérée seulement par le refroidissement extérieur du cylindre, ils la virent prendre subitement une allure beaucoup plus vive. Vérification faite de l'état de marche, ils découvrirent qu'une portion de l'eau, qu'on était dans l'habitude de mettre au-dessus du piston, pour mieux étancher son joint avec les parois du cylindre, avait pénétré au-dessous du piston, en le traversant, par un petit trou qui s'y trouvait accidentellement, et en se trouvant directement en contact avec la vapeur, elle avait opéré sa condensation plus rapidement qu'à l'ordinaire.

Ce fut, pour l'homme de génie qui sut faire cette déduction, un trait de lumière pour l'avenir. Au lieu de diriger l'eau de condensation dans l'enveloppe qui garnis-

(1) Il y a là une singulière objection à faire. Les auteurs les plus savants et les plus spéciaux, Arago, Tredgold et M. L. Figuier, font mention de cette patente, et cependant il nous a été impossible d'en trouver la moindre trace dans les anciens documents qui donnent la liste complète des patentes délivrées en Angleterre depuis l'origine de la plus ancienne loi; nous n'y avons vu que la patente délivrée à Savery, en 1698. La seule mention qui ait été faite, à cette époque, des travaux de Newcomen, se trouve dans *l'Encyclopédie métropolitaine* de Londres.

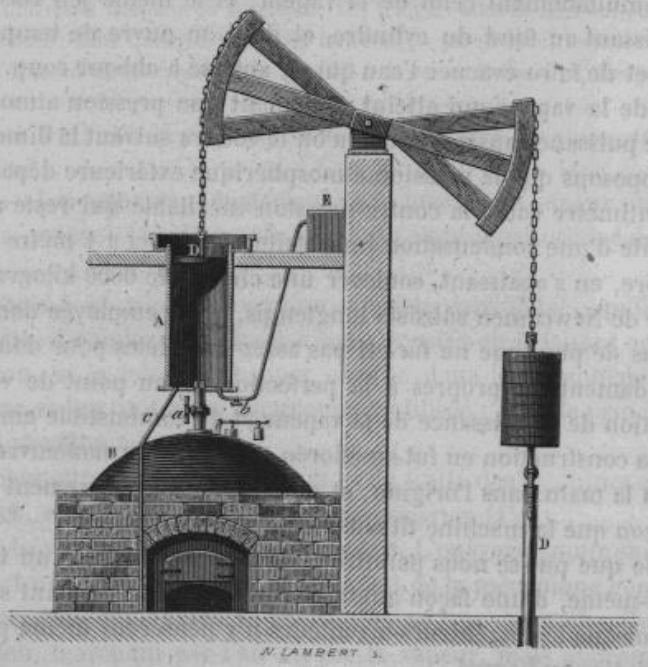
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sait extérieurement le cylindre moteur, il l'injecta dans le cylindre même ; et par la condensation, désormais plus rapide, la machine put donner huit à dix coups par minute.

A partir de cet instant, la machine, qui prit alors le nom de NEWCOMEN, se répandit rapidement en Angleterre, et l'on pourrait dire qu'elle existe encore aujourd'hui dans certaines localités.

La fig. 21 permettra de bien se rendre compte de ce qu'était cet appareil, dans lequel nos lecteurs pourront d'ailleurs reconnaître plusieurs des éléments principaux de nos machines modernes. Comme il a reçu de nombreuses applications, il a été reproduit par presque tous les auteurs, et sous divers aspects. L'image que nous en donnons ici revient à peu près à celle que représenta Tredgold dans son *Traité des machines à vapeur*. Il est important de faire remarquer, toutefois, que ce n'est guère qu'une figure de principe, attendu que tout imparfaite qu'elle était, cette machine a cependant reçu divers perfectionnements, que nous n'indiquons pas, mais dont il sera question plus loin.

Fig. 21.




On voit, à l'aide de la figure 21, que la machine comprend un cylindre A monté directement au-dessus d'une chaudière B avec laquelle on peut le mettre en communication à l'aide d'un robinet *a*. Un plateau D, servant de piston, se meut dans ce cylindre ; il est comme suspendu à un balancier en bois dont les extrémités forment deux segments de cercle sur lesquels s'appliquent deux chaînes dont l'une

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

porte le piston D et l'autre la tringle à contre-poids D′, qui n'est autre chose que la tige de la pompe d'épuisement mise en mouvement par la marche du piston.

Pour connaître le jeu de cette primitive machine, on remarquera qu'en ouvrant le robinet *a*, au moment où le piston est au bas de sa course, la vapeur de la chaudière exerce sous lui une pression qui n'a besoin que d'être égale à celle de l'atmosphère pour l'élever jusqu'en haut du cylindre, parce que la tige D et son contre-poids sont suffisants pour faire équilibre à tout le système et vaincre la résistance de la pompe élévatoire dans sa course descensionnelle.

Le piston parvenu au sommet de sa course, comme la figure l'indique, on ferme le robinet *a* et on en ouvre un autre *b* qui permet à une portion de l'eau contenue dans un réservoir spécial E de se répandre en gerbe dans l'intérieur du cylindre rempli de vapeur. Cette eau condense la vapeur, détruit sa force élastique et donne lieu ainsi à un vide sous le piston, vide partiel, mais suffisant pour que l'excès de la pression atmosphérique en dessus le fasse redescendre en surmontant la résistance opposée par le poids de la tige D, et de la colonne d'eau soulevée par la pompe.

Lorsque le piston est revenu au bas de sa course, on ferme le robinet d'eau froide et on ouvre simultanément celui de la vapeur, et le même jeu recommence. Un tuyau *c* aboutissant au fond du cylindre, et dont on ouvre de temps en temps le robinet, permet de faire évacuer l'eau qui s'y amasse à chaque coup.

Ainsi, avec de la vapeur qui atteint seulement une pression atmosphérique, on peut créer une puissance aussi grande qu'on le voudra suivant la dimension donnée au piston. Supposons que la pression atmosphérique extérieure dépasse seulement de $0^k6$ par centimètre carré la contre-pression inévitable qui reste au-dessous du piston, par suite d'une condensation imparfaite, si celui-ci a 1 mètre de superficie, il pourra encore, en s'abaissant, soulever une charge de 6000 kilogrammes.

La machine de Newcomen subsista longtemps, et fut employée dans cet état tant que les notions de physique ne furent pas assez complètes pour donner naissance aux idées fondamentales propres à la perfectionner au point de vue d'une plus grande utilisation de la puissance de la vapeur et du combustible employé.

Cependant la construction en fut améliorée, et surtout la manœuvre des robinets, qui se faisait à la main dans l'origine, et qu'on relia au mouvement même du balancier, de façon que la machine fit elle-même sa distribution.

Toute simple que puisse nous paraître cette idée de disposer un tel mécanisme se servant lui-même, d'une façon automatique, il avait cependant sa difficulté de conception, puisque les ingénieurs-inventeurs n'y pensèrent même pas et qu'on le doit pour ainsi dire au hasard.

En effet, l'auteur est un enfant qui ne songeait certainement pas faire une chose aussi importante. C'est, du reste, une anecdote assez répandue que celle-là, comme tout ce qui tient un peu au merveilleux. Voici comment Arago l'a racontée :

La première machine de Newcomen exigeait l'attention la plus soutenue de la part de la personne qui fermait ou ouvrait sans cesse certains robinets, soit pour introduire la vapeur aqueuse

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dans le cylindre, soit pour y jeter la pluie froide destinée à la condenser. Il arrive, dans un certain moment, que cette personne est le jeune Henri Potter. Les camarades de cet enfant, alors en récréation, font entendre des cris de joie qui le mettent au supplice. Il brûle d'aller les rejoindre, mais le travail qu'on lui a confié ne permettrait même pas une demi-minute d'absence. Sa tête s'exalte; la passion lui donne du génie; il découvre des relations dont jusque-là il ne s'était pas douté. Des deux robinets, l'un doit être ouvert au moment où le balancier, que Newcomen introduisit le premier et si utilement dans ses machines, a terminé l'oscillation descendante, et il faut le fermer, tout juste, à la fin de l'oscillation opposée. La manœuvre du second est précisément le contraire. Ainsi, les positions du balancier et celles des robinets sont dans une dépendance nécessaire. Potter s'empare de cette remarque. Il reconnaît que le balancier peut servir à imprimer aux autres pièces tous les mouvements que le jeu de la machine exige, et réalise à l'instant sa conception. Les extrémités de plusieurs cordons vont s'attacher aux manivelles des robinets; les extrémités opposées, Potter les lie à des points convenablement choisis sur le balancier; les tractions que celui-ci engendre sur certains cordons en montant, les tractions qu'il produit sur les autres en descendant, remplacent les efforts de la main; pour la première fois, la machine à vapeur marche d'elle-même; pour la première fois, on ne voit auprès d'elle d'autre ouvrier que le chauffeur qui, de temps en temps, va raviver et entretenir le feu sous la chaudière.

Aux ficelles du jeune Potter, les constructeurs substituèrent bientôt des tringles rigides verticales fixées au balancier et armées de plusieurs chevilles qui allaient presser, de haut en bas ou de bas en haut, les têtes de différents robinets ou soupapes. Les tringles elles-mêmes ont été remplacées par d'autres combinaisons; mais quelque humiliant que soit un pareil aveu, toutes ces inventions sont de simples modifications du mécanisme que suggéra à un enfant le besoin d'aller jouer avec ses petits camarades.

(Éloge de Watt, *Annuaire du bureau des longitudes*, 1838.)

Leupold (1720). — Les principaux historiens de la machine à vapeur mentionnent le nom de Leupold, mécanicien allemand, comme s'étant aussi occupé des *machines à feu*.

La part de Leupold à la grande invention consiste dans l'idée, qu'il semble le premier avoir émise, d'employer la *vapeur à haute pression* en la faisant agir directement sur un piston, et la laisser échapper ensuite dans l'atmosphère ambiante, dont la pression ne se trouvait ainsi aucunement utilisée : c'est le principe de nos machines à haute pression actuelles.

Leupold a fait connaître son projet dans un vaste traité des machines qu'il publia en 1724, à Leipsick, sous le titre de *Theatrum machinarum* (1).

C'est un travail très-important pour cette époque. L'ouvrage comprend plusieurs volumes du format in-folio, traitant respectivement de la mécanique générale et de l'hydraulique. C'est dans cette dernière partie que se trouve un chapitre consacré aux machines à feu, marchant par l'air ou par la vapeur, mais appropriées à des élévations d'eau.

Après avoir décrit quelques appareils où l'air échauffé est l'agent employé pour faire mouvoir de l'eau, Leupold a fait connaître une machine qu'il attribue à Papin, et dans laquelle c'est la vapeur d'eau qui agit pour élever de l'eau qui sert à ali-

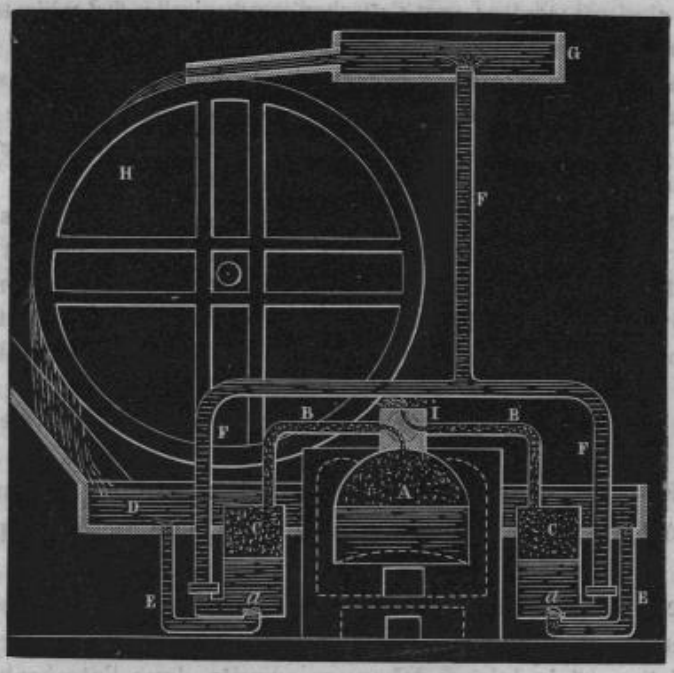
(1) Voir *Theatri machinarum hydraulicarum*, t. II, tab. 43. — Leipzig, édition de 1774.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

menter une roue hydraulique en dessus, devenant alors le récepteur de la force motrice. Sans nous arrêter à cette dernière condition qui est vicieuse et qui prouve seulement que Papin sortait mal à propos du véritable chemin, pourtant bien indiqué par sa découverte primitive, il suffira de faire remarquer que l'on y trouve l'idée d'employer la vapeur à haute pression, sans condensation, et l'usage d'un robinet à quatre *chemins,* que Papin inventait.

Voici (fig. 22) l'appareil de Papin tel que l'a donné Leupold, mais réduit à moitié de grandeur de la gravure originale.

Fig. 22.




A est une chaudière d'où la vapeur se distribue, alternativement, par deux conduits B, à deux réservoirs C, en communication par leurs parties inférieures avec un bassin D toujours alimenté d'eau. Les tubes recourbés E, qui établissent cette communication, sont munis, au fond de ces réservoirs, de clapets *a* s'ouvrant de dehors en dedans pour y laisser pénétrer l'eau lorsque la pression atmosphérique excède celle de l'intérieur desdits réservoirs C.

L'action principale de la vapeur est tout à fait analogue à celle de la machine de Savery. Ainsi la vapeur vient presser sur l'eau contenue dans les capacités C et la force de s'élever par le conduit élévatoire F qui aboutit à l'auge G de la roue hydraulique H, sur laquelle l'eau se déverse, la fait tourner et retombe dans le premier bassin D pour être de nouveau élevée.

Mais au lieu d'être condensée lorsqu'elle a produit son effet, la vapeur repasse par le conduit qui l'a amenée et s'échappe librement dans l'atmosphère.

Le simple examen de la figure nous permet aujourd'hui de comprendre com-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ment cette distribution s'opère. On voit, en effet, le robinet I, imaginé par Papin, dont la clef est percée de deux lumières qui mettent alternativement chaque réservoir C en relation avec la chaudière ou avec l'atmosphère, en faisant faire un quart de tour à la clef.

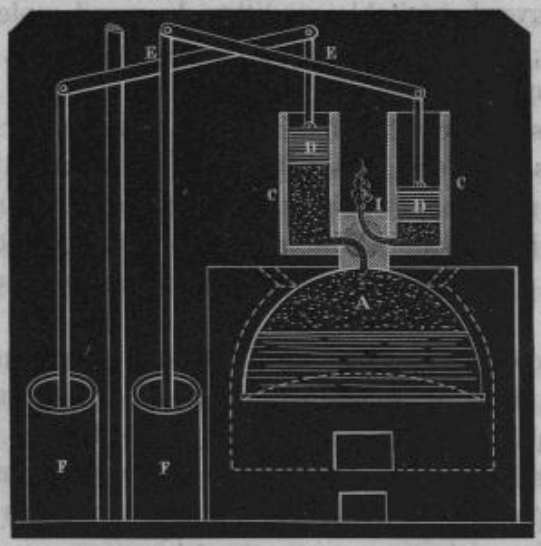
Par conséquent, les mouvements de l'eau dans les réservoirs C sont alternatifs : lorsque l'eau s'élève dans l'un par l'effet de la pression extérieure, elle est repoussée de l'autre par la pression de la vapeur; et, dans la même phase des mouvements, la vapeur sort du premier pour s'échapper dans l'atmosphère, et va de la chaudière dans le second pour y exercer son action.

Cette machine, pas plus que celle de Savery, n'était exempte du défaut de ne pouvoir élever de l'eau sans donner une grande tension à la vapeur, qui devait d'ailleurs perdre beaucoup de sa température et de sa puissance lorsqu'elle arrivait en contact avec l'eau froide à élever.

Mais Leupold, mettant à profit sa disposition d'ensemble, eut l'heureuse idée de substituer des cylindres à pistons aux réservoirs C et d'en obtenir un mouvement pareil aux machines de Newcomen pour faire marcher des pompes.

Nous reproduisons également le dessin réduit à moitié de celui qu'il donna, et que représente la fig. 23.

Fig. 23.




Après la description de la machine précédente de Papin, celle-ci pourrait être comprise à l'aide de la figure seule.

On reconnaît très-bien les cylindres C munis de leurs pistons D sous lesquels vient agir alternativement la vapeur fournie par la chaudière A et distribuée par le robinet I. Les pistons commandent les pompes F par l'intermédiaire des balanciers E; chaque piston s'élève sous l'excès de pression de la vapeur sur l'atmosphère; et, dans le mouvement inverse, la vapeur pouvant s'échapper librement,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le piston remis en équilibre doit descendre de son propre poids en entraînant les résistances à vaincre.

Tout imparfait que soit le dessin de Leupold, il est très-facile de comprendre ce qu'il faudrait faire à une telle machine, dont le principe est sans reproche, pour la rendre pratique, en se reportant à l'état de la question vers cette époque.

En effet, la hauteur à laquelle on peut élever de l'eau est maintenant indépendante de la pression de la vapeur qui doit seulement excéder celle de l'atmosphère pour être capable de produire un travail; et ce travail sera aussi grand qu'on pourra le désirer en donnant aux cylindres C un diamètre suffisant.

Et puis le refroidissement de la vapeur n'est plus à craindre, puisqu'elle n'est plus en contact avec l'eau qu'on élève. C'est ainsi qu'à Bougival la machine à vapeur à double effet et à basse pression, établie en 1824, comme, du reste, les moteurs hydrauliques employés par Rennequin du temps de Louis XIV, élèvent l'eau de la Seine, directement, d'un seul jet, à 160 mètres de hauteur verticale, avec un parcours de 1300 mètres.

James Watt (1769). — Si les droits d'un premier inventeur n'étaient pas imprescriptibles et incontestables, tous les noms précédents pourraient disparaître devant celui de James Watt, que l'on peut appeler à juste titre le Newton de la machine à vapeur. Ses devanciers l'ont inventée, mais Watt l'a presque créée, lui a donné sa véritable existence. Comme Newton, qui sut deviner les secrets de la machine céleste, Watt sut trouver la véritable condition du grand moteur dont les hommes venaient de se doter, et qui devait un jour les récompenser, plus qu'au centuple, des efforts qu'ils firent pour l'enfanter.

Entreprendre de suivre cet homme de génie dans les perfectionnements qu'il apporta aux moteurs à vapeur, ce serait décrire presque entièrement la machine moderne, ce que nous devons faire plus loin avec tous les détails que le sujet mérite. D'ailleurs, la vie de James Watt a été trop consciencieusement tracée par Arago pour essayer d'effleurer ce sujet, sans craindre d'amoindrir cette grande figure historique.

Qu'il nous suffise d'emprunter au récit du célèbre astronome les points caractéristiques des travaux de Watt, en donnant un résumé de ses inventions.

James Watt est né à Greenock, en Écosse, le 19 janvier 1736, et mort le 25 août 1819. Doué d'une très-grande facilité pour l'étude et d'une très-grande adresse, il acquit de bonne heure une profonde érudition, et fut en même temps très-habile constructeur d'instruments de précision.

Son aptitude en théorie et en pratique le firent distinguer de l'université de Glasgow, qui le nomma, à l'âge de vingt et un ans, son ingénieur, chargé aussi de la conservation de ses collections de modèles.

C'est en cette qualité qu'il eut un jour à réparer un modèle d'une machine de Newcomen qui n'avait jamais pu marcher d'une façon satisfaisante.

Dans les mains de cet artiste, le modèle retrouva l'existence et put figurer avantageusement dans les cours où l'on professait cette science.

Mais Watt ne s'en tint pas là. Non content d'avoir su réparer la machine d'un

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

autre, il conçut les modifications dont le système lui paraissait susceptible, et, mettant en pratique les notions acquises récemment en physique et celles qui résultaient de ses propres études, il fit si bien que l'ancien moteur de Newcomen se trouva successivement transformé, jusqu'au point d'acquérir presque toute la perfection qu'ont actuellement les meilleures machines à vapeur. En effet, si nous en exceptons les perfectionnements de formes et de détails, dus surtout aux outillages de nos ateliers modernes, nous ne trouvons que fort peu de différence entre les moteurs à vapeur construits de nos jours et ceux établis dans les derniers temps par Watt et son digne associé Boulton.

Pour mieux saisir l'ensemble de la transformation subie par la machine à vapeur sous le souffle inspiré de l'immortel ingénieur, il est nécessaire de résumer les caractères principaux de forme et de système au point où il la trouva.

A part les modifications apportées à la machine de Newcomen au point de vue de sa distribution, et dont il a été dit précédemment quelques mots, on s'était aussi préoccupé déjà d'obtenir le mouvement circulaire en transformant celui du piston à l'aide d'un mécanisme intermédiaire rattaché au balancier; mais rien encore de raisonnable n'avait été appliqué.

La vapeur n'était employée que pour faire le vide et utiliser ensuite la pression atmosphérique, si ce n'est l'essai de Leupold, qui, ainsi que nous l'avons vu, avait proposé de faire agir la vapeur directement et de la renvoyer dans l'atmosphère.

La condensation de la vapeur s'opérait directement dans le cylindre, ce qui donnait lieu à un refroidissement très-contraire à l'économie du combustible.

Dans cet état de choses, Watt apporta successivement les modifications suivantes :

Il proposa de condenser la vapeur dans un vase indépendant du cylindre, qu'il pût alors envelopper et maintenir toujours chaud; il inventa le *condenseur* et les cylindres à double enveloppe. Comme complément indispensable, il inventa la *pompe à air,* destinée à extraire l'eau du condenseur et à y maintenir un vide convenable;

A la machine atmosphérique, il substitua la machine *à simple effet,* dans laquelle la vapeur se rendait à la partie supérieure du piston pour le pousser de haut en bas, puis se répartissait en dessus et en dessous pendant le mouvement contraire, et s'échappait enfin au condenseur à la nouvelle descente du piston;

Il obtint la transformation du mouvement rectiligne alternatif du piston en celui de rotation continue, d'abord à l'aide d'une combinaison d'engrenages, et ensuite en employant la *manivelle* proposée par Washborough, qui s'était fait patenter pour ce perfectionnement, ce qui empêcha Watt d'en faire immédiatement l'application.

La machine à vapeur fut alors utilement employée à produire de la force motrice autrement que pour opérer des épuisements, ainsi que cela avait lieu auparavant; on lui fit avec succès l'application du *volant régulateur,* qui avait été proposé en 1757 par un ingénieur, Keane Fitzgerald, membre de la Société royale de Londres.

Watt est aussi l'inventeur des machines à double effet, système dont on fait usage le plus généralement aujourd'hui. On sait que ce système consiste dans l'in-



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

troduction symétrique de la vapeur des deux côtés du piston, qui reçoit ainsi une action égale à chaque coup simple, montant ou descendant.

Watt imagina encore l'emploi de la vapeur *avec détente*, principe qui consiste à interrompre l'arrivée de la vapeur du générateur au milieu de son travail qu'elle achève en se détendant comme un ressort.

Enfin, le grand ingénieur a inventé le parallélogramme, à qui la postérité à conservé son nom, et qui sert à maintenir la tige du piston en ligne droite; il a inventé le régulateur à force centrifuge, etc.

Déjà nous avons dit qu'énumérer les inventions de Watt, ce serait décrire la machine à vapeur presque entière : aussi nous avons seulement cité les points fondamentaux de ses grandes découvertes.

Watt ne s'est pas seulement distingué par son imaginative pour créer, il s'est aussi rendu célèbre par ses recherches théoriques concernant les proportions des machines comme dimensions générales et résistance des pièces du mécanisme. Secondé par son célèbre associé Boulton, il présida lui-même à la construction de l'immense quantité de machines qui sortirent de ses ateliers.

Son établissement était devenu une sorte d'école pratique où tous les ingénieurs de l'Angleterre et de l'Europe entière venaient étudier la construction des machines à vapeur afin de les introduire dans leurs pays respectifs. C'est ainsi que Perrier arriva à construire les machines établies à Chaillot pour l'élévation des eaux de la Seine, et connues sous le nom de *pompes à feu*. Ces machines ont été remplacées récemment par des machines modernes sorties de l'établissement du Creusot.

A partir de Watt, il est aisé de comprendre que les innovations durent se multiplier rapidement, puisqu'il ne s'agissait que de perfectionner un moteur déjà très-avancé et dont l'importance n'était plus douteuse.

Hornblower, en 1781, et Woolf, en 1804, imaginèrent la machine à deux cylindres, qui permet d'employer avantageusement la vapeur avec détente. Ce système se compose d'un premier cylindre où la vapeur agit d'abord à pleine pression et s'échappe ensuite dans un deuxième cylindre d'une capacité plus grande où elle agit alors par expansion avant de s'échapper au condenseur.

MM. Trevithick et Vivian paraissent être les premiers qui, en 1802, aient fait l'application des machines à haute pression, proposées, ainsi qu'on vient de le voir, depuis longtemps par Papin et Leupold. Mais il est vrai que l'emploi de la vapeur à haute pression exige que l'on possède des moyens certains pour la construction des générateurs et des appareils de sûreté et d'observation, ce qui explique suffisamment pourquoi cette application n'a pas eu lieu plus tôt.

A l'égard des améliorations successives apportées aux générateurs ou appareils destinés à la production de la vapeur, nous en dirons quelques mots en décrivant les dispositions actuelles; la comparaison en sera plus facile : et d'ailleurs ces organes n'ont pas reçu de modifications aussi caractéristiques que le moteur lui-même, ce qui nous excuse peut-être de n'en pas faire un historique spécial.

FIN DE LA DEUXIÈME SECTION.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

# TROISIÈME SECTION

## PRODUCTION INDUSTRIELLE DE LA VAPEUR D'EAU

---

## CHAPITRE PREMIER

### ANCIENS GÉNÉRATEURS A VAPEUR

On désigne ordinairement sous le nom de *générateur,* l'appareil spécial dans lequel se forme la vapeur d'eau destinée à alimenter un moteur ou à être dépensée pour effectuer des opérations manufacturières, ou bien encore pour servir à un chauffage quelconque.

Dans un cas comme dans l'autre, le générateur se compose de la chaudière proprement dite, qui contient l'eau et la vapeur engendrée, du foyer, de la grille, du fourneau et de la cheminée d'appel. Il est accompagné d'une série d'appareils accessoires, sortes d'instruments de précision qui permettent d'observer la marche de la vaporisation et surtout de se mettre à l'abri des dangers permanents qui résultent de la production d'un fluide qui possède une grande puissance expansive.

Ces instruments, dont plusieurs sont aussi anciens en principe que les machines à vapeur elles-mêmes, comprennent :

Les manomètres, les soupapes de sûreté, les niveaux d'eau, les flotteurs, les sifflets avertisseurs, etc.

Les générateurs et leurs appareils accessoires ont des formes très-diverses qui ont été sensiblement modifiées et améliorées dans ces dernières années.

Les motifs de ces modifications sont de plusieurs sortes, parmi lesquels nous citerons principalement les pressions de plus en plus considérables que l'on fait atteindre à la vapeur, et l'économie du combustible employé, tout en accélérant autant que possible la vaporisation. Viennent ensuite les moyens employés pour diminuer les chances d'explosion, et les dispositions imaginées en vue de supprimer ou du moins de diminuer la quantité de fumée, laquelle n'est, en grande partie, que du charbon qui s'échappe du foyer sans être brûlé, ce qui est aussi contraire à la salubrité qu'à l'économie du combustible.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les générateurs, comme les machines elles-mêmes, changent de disposition suivant qu'ils sont établis à poste fixe dans les usines ou manufactures, qu'ils sont montés sur des bateaux, ou qu'ils s'appliquent aux locomotives ou aux locomobiles.

Nous ne nous occupons pour l'instant que des premiers, les générateurs fixes, parmi lesquels on peut néanmoins ranger ceux qui, tout étant destinés à fonctionner à poste fixe, sont construits pour pouvoir être au besoin facilement déplacés.

Nous commencerons par dire un mot des dispositions adoptées anciennement, puis nous décrirons successivement les dispositions nouvelles et généralement usitées. Les fourneaux et cheminées, les foyers de divers systèmes, les appareils d'observation et de sûreté, soupapes et valves d'admission d'eau et de vapeur, seront également l'objet d'un examen tout spécial.

## DISPOSITION PRIMITIVE DES GÉNÉRATEURS A VAPEUR

Au moment de l'apparition des premières machines à vapeur de Savery et de Newcomen, les conditions calorifiques de la vapeur d'eau étant presque entièrement inconnues, on ne pouvait pas suivre de principes réels pour la construction des générateurs; dans l'ignorance des faits, on ne devait même pas songer à remplir certaines conditions qui favorisent aujourd'hui la vaporisation sous le double rapport de la célérité et de l'économie du combustible.

D'autre part, les seules machines, celles de Newcomen, qui figurent avec avantage et qui furent les premières appliquées, marchant sous la seule influence de l'atmosphère, la vapeur employée ne dépassait pas cette pression, ce qui rendait la construction des chaudières plus facile et ne montrait pas absolument aux mécaniciens du temps la nécessité de perfectionner les dispositions alors en usage.

Les chaudières de cette époque, que nous croyons pouvoir nous dispenser de dessiner, consistaient à peu près en un vase circulaire terminé en dessus par une coupole ou portion de sphère. Ce vase était enveloppé par une maçonnerie de forme cylindrique ou carrée extérieurement; le feu se faisait sur une grille placée au-dessous de la chaudière, et la flamme, après l'avoir enveloppée, arrivait directement à la cheminée.

On peut se reporter à la fig. 21 qui précède, représentant le principe d'une machine de Newcomen, avec un générateur de ce système. Il y a peu d'années, on voyait encore les chaudières de la pompe à feu de Chaillot, qui en étaient un des derniers spécimens (1).

Mais aussitôt que Watt se fut occupé des moteurs à vapeur, la théorie pouvant, dès cette époque, venir en aide à la pratique, il put alors se rendre un compte exact des conditions à remplir pour construire des générateurs donnant le meilleur effet possible; les principes généraux furent découverts et mis en application.

(1) La machine de Chaillot et ses chaudières ont été amplement décrites par M. de Prony dans un Traité spécial que l'on peut consulter à la bibliothèque du Conservatoire des arts et métiers de Paris.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On comprit l'importance de l'économie du combustible après avoir trouvé la quantité théorique que la vaporisation devait en absorber. De là la création des bases de la construction d'un générateur qu'on peut résumer à peu près ainsi :

1° Donner à la chaudière des surfaces exposées au feu (que l'on apelle *surfaces de chauffe*), directement proportionnelles au poids d'eau à transformer en vapeur dans l'unité de temps;

2° Disposer le fourneau de façon à ce qu'il présente des passages pour le calorique en rapport avec les surfaces de chauffe de la chaudière, et avec un développement suffisant pour que l'air chaud et les produits de la combustion, en général, n'arrivent à la cheminée qu'après avoir éprouvé un abaissement de température notable au profit de la vaporisation, et pour la plus grande économie possible;

3° Envelopper le corps de la chaudière de toute part, afin de la préserver des refroidissements extérieurs;

4° Donner à la chaudière une capacité suffisante pour être en rapport avec le volume de vapeur incessamment dépensée;

5° Enfin, établir la grille sur des dimensions convenables pour pouvoir y brûler la quantité de combustible proportionnelle au calorique absorbé par la vaporisation.

Nous ne disons pas que ces conditions ont été immédiatement remplies (elles ne le sont même pas encore complétement aujourd'hui), mais elles indiquent parfaitement le but à atteindre, et Watt a beaucoup fait pour cela. Néanmoins ses meilleurs et plus sérieux essais n'ont guère été dirigés que pour la production de la vapeur à basse pression, c'est-à-dire dépassant peu celle de l'atmosphère; ses machines ont été, du reste, toutes établies sur cette donnée. Aussi les chaudières de Watt ont-elles une forme à peu près abandonnée aujourd'hui, attendu que la plupart des moteurs modernes marchent à des pressions supérieures pour lesquelles il faut que la construction des chaudières soit différente.

Mais nous redisons encore que les principes fondamentaux restent, à peu de chose près, les mêmes, au point de vue de la bonne utilisation du combustible; et laissant de côté ce qui a été fait avant Watt, nous allons faire connaître le système de générateur du célèbre mécanicien.

## CHAUDIÈRES A BASSE PRESSION DE WATT

Ce système de chaudière consiste, pour le corps proprement dit, en une caisse en tôle de forme prismatique dont la section transversale présente deux parois verticales presque planes, un fond plat ou un peu concave, et la paroi supérieure demi-cylindrique; cette forme les fait désigner ordinairement par le nom de *chaudières en tombeau* ou *en chariot*.

Les fig. 24 et 25 représentent, en coupes transversale et longitudinale, une chaudière sortie des ateliers de MM. Hick et Rothwell, à Bolton, et construite exactement d'après les dispositions de Watt. C'est l'une des trois qui alimentent la ma-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

chine à vapeur établie à Saint-Ouen (1), près Paris, où elle met en mouvement la roue élévatoire servant à remplir le bassin de la gare ou *port Saint-Ouen*.

On voit par ces figures que le corps A de la chaudière forme à peu près une caisse prismatique dont le pourtour et le fond sont composés de parois courbes. Elle est engagée dans un fourneau en briques qui laisse tout autour d'elle un espace vide ou carneau B pour la circulation de la flamme qui vient en chauffer les parois latérales. A l'avant se trouve la grille C, placée directement au-dessous de la chaudière. L'action du foyer s'exerce d'abord directement par voie de rayonnement sur la partie antérieure du fond, puis les produits de la combustion s'étendent dans toute la longueur de celui-ci et parviennent au carneau supérieur B, qui fait le tour entier de la chaudière et communique ensuite avec la cheminée.

Fig. 24.

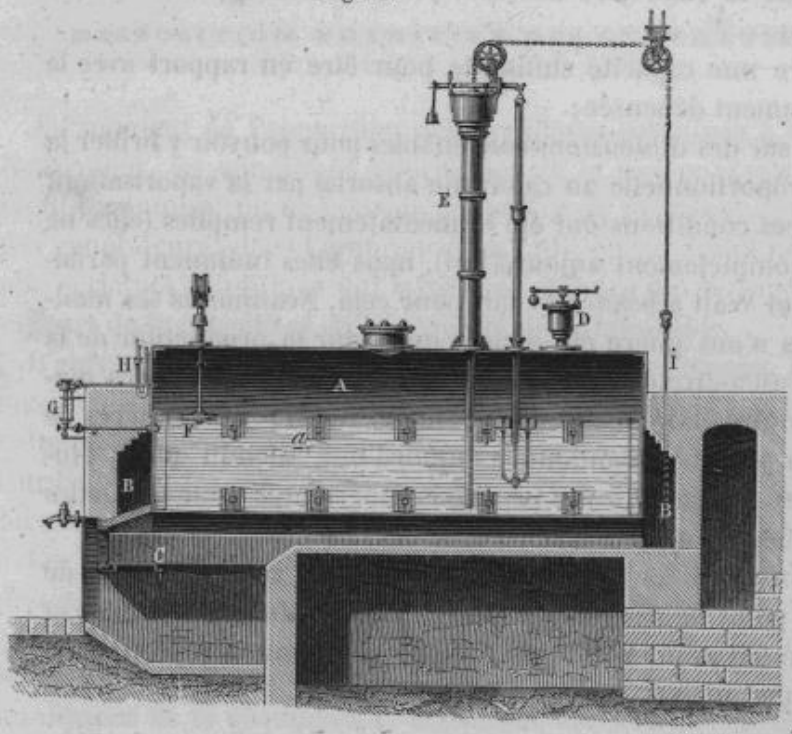
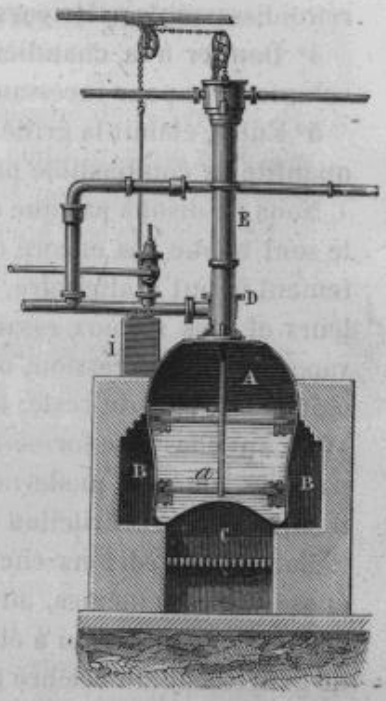



Fig. 25.




N. LAMBERT. s.

Toutes les parties de la chaudière, mises ainsi en contact extérieurement avec la chaleur dégagée par le foyer, sont dites *surfaces de chauffe*, directes ou indirectes, suivant qu'elles sont exposées au rayonnement ou au simple passage des gaz chauds; la surface intérieure correspondante doit donc être exactement couverte d'eau, pour utiliser la chaleur et pour éviter que le métal ne s'élève trop de température. La chaudière se trouve en effet remplie d'eau jusqu'au point le plus élevé des carneaux, la partie vide qui excède étant réservée pour loger la vapeur et s'appelant, par cela même, *la chambre de vapeur*.

(1) Voir plus loin la machine elle-même, représentée et décrite aussi avec tous ses détails dans le 1er vol. de la *Publication industrielle*.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ce générateur est muni des divers appareils de service dont nous parlerons plus loin avec tout le détail que ce sujet comporte. Disons seulement qu'on peut y remarquer : 1° la boîte à soupape D servant à donner issue à la vapeur pour alimenter la machine motrice; 2° un appareil spécial E qui opère automatiquement l'alimentation d'eau; 3° un flotteur F pour observer l'état du niveau de l'eau; 4° le niveau en cristal G, servant au même objet; 5° un manomètre à mercure et à flotteur H pour observer la pression de la vapeur.

Il existe également des soupapes de sûreté, le registre I pour régler le tirage du foyer, etc.

En adoptant cette forme de chaudière et la disposition de son fourneau, Watt avait trouvé que cet ensemble était très-favorable à l'économie du combustible, comme présentant le plus grand développement possible de surface pour un volume total déterminé et un parcours de flamme suffisamment long, afin que les gaz n'arrivent à la cheminée qu'à une température seulement indispensable pour conserver un bon tirage.

En donnant au fond une forme concave par rapport au foyer, on augmentait encore la surface chauffée par la première action, qui est évidemment la plus productive; cette forme est aussi d'accord avec la résistance contre la tendance à la déformation par suite des efforts intérieurs, et, d'après Tredgold, elle avait encore l'avantage de ramener les sédiments calcaires dans les deux angles situés hors de l'action la plus énergique du foyer.

Cependant cette forme de chaudière ne pouvait convenir que pour une basse pression; encore était-on obligé de munir l'intérieur d'armatures en fer *a* pour empêcher les parois latérales de céder sous la faible différence de tension entre la vapeur et celle de l'atmosphère : aussi sont-elles abandonnées maintenant, même pour de basses pressions, et remplacées par des générateurs formés de corps cylindriques, qui sont d'ailleurs plus faciles à construire.

Quoi qu'il en soit, les chaudières de Watt ont été de bons appareils, et fréquemment appliquées. Elles ont le mérite de représenter tous les principes généraux à suivre pour l'établissement des générateurs, et elles ont été l'objet d'un très-grand nombre d'expériences, les premières qui aient eu une véritable importance. Elles ont permis d'apprécier la relation qui existe naturellement entre la quantité pratique de combustible à brûler, pour vaporiser un poids d'eau déterminé, et l'étendue des surfaces à présenter à la chaleur pour correspondre avantageusement au même résultat; les dimensions de la grille et de l'ensemble du fourneau, comme carneaux et cheminée, ont été également étudiées et déterminées.

Proportions des chaudières de Watt. — Pour ne pas revenir ultérieurement sur ce système de chaudière, qui ne peut plus avoir pour nous qu'un intérêt purement historique, nous ferons connaître dès à présent les données principales qui servaient à Watt pour trouver les proportions de ses générateurs, au moins quant aux surfaces de chauffe et à celle de la grille.

*Surface de chauffe.* — La pression de la vapeur étant en moyenne de 1$^{at}$ 1/4, Watt avait reconnu qu'il fallait établir le générateur sur une base de 26 mètres

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

carrés de surface de chauffe pour vaporiser 1 mètre cube d'eau dans une heure; soit :

$$\frac{1000^k}{26} = 38,4 \text{ kilogrammes}$$

d'eau vaporisée par mètre carré et par heure; c'est à peu près trois fois plus qu'on ne fait produire aujourd'hui aux générateurs; mais, dans les chaudières prismatiques, la surface exposée directement à l'action du foyer est plus grande que dans les générateurs actuels, et moyennement le tiers de la surface totale.

Si maintenant nous nous reportons à ce qui a été dit (64) sur les quantités de travail developpées par la vapeur, nous obtenons les résultats suivants, relatifs à la valeur de la surface de chauffe pour l'unité de puissance dynamique :

Suivant la table (72), 1 mètre cube de vapeur à 1 atmosphère, employée sans détente, correspond à un travail théorique de 10333 kilogrammètres, soit pour $1^{at.}25$ :

$$10333 \times 1,25 = 12916.$$

La table des densités (p. 19 et 61) indiquant qu'un mètre cube de vapeur, à cette pression, pèse, à très-peu près, $0^k722$, nous trouvons que 1 mètre carré qui vaporise $38^k4$ par heure, développe, par conséquent, dans le même temps de la vapeur, pour

$$\frac{38^k4}{0^k722} \times 12916 = 686945 \text{ kilogrammètres.}$$

Or, l'unité dynamique ordinaire (1 cheval-vapeur) étant égal à 75 kilogrammètres par 1″, il s'ensuit que la production précédente, pour 1 heure et par mètre carré de surface de chauffe, produit en unités dynamiques ou en chevaux-vapeur :

$$\frac{686945}{75 \times 3600} 2,5442 \text{ chevaux.}$$

Admettant qu'en pratique on ne doive compter que sur environ la moitié de ce résultat, nous trouvons, en résumé, pour la quantité de surface de chauffe rapportée à l'unité dynamique nominale :

$$\frac{1^{m.q.}}{1,2721} = 0^{m.q.}78 \text{ de surface de chauffe par cheval.}$$

C'est-à-dire que, rigoureusement, une surface de 78 décimètres carrés doit suffire pour produire la vapeur nécessaire à la force effective de 1 cheval; mais ce résultat est généralement au-dessus de la réalité.

Ainsi, les chaudières de Saint-Ouen ont chacune 22 mètres carrés de surface de chauffe, dont le fond figure pour un tiers environ; comme il y a deux chaudières toujours en action pour alimenter la machine, qui est de la force nominale de 40 chevaux, on voit que la surface de chauffe active est de :

$$\frac{44}{40} = 1^{m.q.}10 \text{ par force de cheval.}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il est vrai que cette machine peut réellement produire au moins 50 chevaux au lieu de 40, ce qui ferait plus exactement :

$$\frac{44}{50} = 0^{m.q}.88 \text{ par force de cheval.}$$

Mais il est bon de remarquer qu'en indiquant le chiffre de 26 mètres pour vaporiser 1 mètre cube d'eau dans 1 heure, Watt n'entendait probablement pas compter la surface absolue exposée au feu et à la flamme, mais bien une réduction de la surface totale rapportée à celle du fond dont la puissance de vaporisation est bien supérieure à celle des faces latérales.

C'est ainsi qu'opérait Tredgold, qui trouvait aussi 26 mètres, et qui faisait remarquer que la surface du fond pourrait servir exclusivement de base à la mesure de la surface de chauffe, en lui attribuant $0^{m.q}.41$ par cheval.

Somme toute, la surface de chauffe totale des chaudières à basse pression devait être basée sur un minimum de $1^{m.q}.10$ à $1^{m.q}.20$ par force de cheval, valeur qui s'élève naturellement un peu si l'on veut produire de la vapeur à une tension plus forte, et qui s'est élevée encore depuis, d'abord en raison de la forme différente donnée aux générateurs actuels, et aussi en vue de moins forcer la vaporisation, ainsi que nous le verrons bientôt.

*Surface de la grille.* — Dans les calculs précédents, nous avons trouvé que $38^k.4$ d'eau, évaporée par heure et par mètre carré de surface de chauffe, correspondaient à la proportion de $0^{m.q}.78$ par force de cheval utile; on peut en déduire, de la même façon, le poids d'eau dépensé pour la même puissance obtenue. On trouve :

$$38,4 \times 0,78 = 29^k.952;$$

soit 30 kilogrammes d'eau vaporisée par cheval et par heure.

Du temps de Watt, la marche des foyers ne permettant pas de produire utilement plus de 5 kilogrammes de vapeur par kilog. de houille brûlée, il en résulte que, d'après le poids d'eau à vaporiser par cheval utile et par heure, la dépense correspondante de charbon était de 6 kilogrammes environ.

La surface de la grille de chaque chaudière de Saint-Ouen est de $1^{m.q}.40$, et la force maximum de la machine 50 chevaux. Par conséquent, la consommation de combustible peut s'élever à 300 kilogrammes de houille par heure, et comme il y a deux foyers pour fournir à cette dépense, on trouve que la quantité de houille brûlée par décimètre carré et par heure est égale à :

$$\frac{300^k}{140 \times 2} = 1^k.03.$$

Ce serait évidemment un travail maximum pour la grille; Tredgold trouvait qu'on ne devait pas dépasser 0,6, règle qu'on suit pour ainsi dire encore aujourd'hui avec les foyers à tirage libre. D'ailleurs, la force nominale de la machine de Saint-Ouen est de 40 chevaux, d'où les constructeurs pouvaient adopter cette dimension pour les grilles; car la combustion s'élève, dans ce cas seulement, à :

$$\frac{240}{140 \times 2} = 0^k.85 \text{ par décimètre carré et par heure.}$$



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Cependant la consommation indiquée ci-dessus, 6 kilog. de charbon par force de cheval et par heure, était plutôt une valeur adoptée par le constructeur pour servir de base à la construction du générateur et se trouver plutôt en dessus qu'en dessous de la vérité, attendu que, quels que soient l'état peu perfectionné du fourneau et la faible qualité de la houille, on pouvait réellement obtenir un résultat meilleur en maintenant la machine dans un bon état d'entretien et de marche.

En effet, les machines à basse pression de moyennes forces, bien construites, ne devaient pas dépasser 5 kilogrammes par cheval, ce qui est néanmoins bien supérieur à ce que l'on consomme aujourd'hui en marchant à des pressions supérieures et avec détente.

En résumant les dimensions des grilles des chaudières de Saint-Ouen, et en cherchant leur rapport avec la force motrice à développer, on remarque que leurs surfaces correspondent à

$$\frac{140 \times 2}{40^{\text{ch.}}} = 7^{\text{d}},$$

c'est-à-dire 7 décimètres carrés par force de cheval nominal.

La même comparaison établie pour la puissance maximum que le moteur peut développer, fournit :

$$\frac{140 \times 2}{50^{\text{ch.}}} = 5^{\text{d}}6,$$

c'est-à-dire que la surface des grilles correspond à une moyenne de 6 à 7 décimètres carrés par force de cheval.

*Volume de la chaudière.* — Nous ne croyons pas devoir insister sur ce point, attendu que, contrairement à ce qui avait lieu à cette époque, on se préoccupe peu, aujourd'hui, du rapport existant entre le volume d'eau renfermé par le générateur et sa puissance nominale; nous ne prendrons comme preuve de ceci que l'exemple des chaudières tubulaires, qui se propagent de plus en plus, et où l'espace réservé à l'eau est souvent très-restreint, trop restreint peut-être, mais ce qui prouve que la quantité d'eau maintenue constamment à l'état liquide n'est pas une condition *sine qua non* des proportions générales d'un appareil de vaporisation.

FIN DU CHAPITRE PREMIER

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

# CHAPITRE II

## CHAUDIÈRES CYLINDRIQUES A FOYERS EXTÉRIEURS

### DISPOSITION GÉNÉRALE D'UN GÉNÉRATEUR A BOUILLEURS

(PLANCHE PREMIÈRE)

Depuis que l'on emploie la vapeur à haute pression, on a substitué aux chaudières en tombeau de Watt des capacités cylindriques dont la forme s'accorde mieux avec une égale résistance que les vases à parois planes, auxquelles il eût fallu donner des épaisseurs excessives pour les empêcher de se courber sous des pressions élevées.

La disposition de générateur la plus généralement employée actuellement, et qui a presque immédiatement été substituée à celle dite à basse pression de Watt, c'est celle formée de corps cylindriques superposés, analogue à celui que la pl. 1 représente. Seulement on exécutait quelquefois ces appareils en fonte, tandis qu'ils sont construits, maintenant, exclusivement en tôle de fer; on en fait aussi, mais bien rarement, en cuivre rouge.

L'appareil dont nous donnons le dessin a été établi suivant des conditions que nous nous sommes efforcé de rendre d'accord, aussi complétement que possible, avec la meilleure pratique; c'est un type que l'on peut adopter avec sûreté pour cette espèce de générateur.

La fig. 1 en est une coupe longitudinale passant par l'axe 1-2 de l'ensemble;

La fig. 2 est une vue extérieure de bout, du côté de l'entrée du foyer;

La fig. 3 est une coupe transversale suivant la ligne 3-4 perpendiculaire à l'axe de la grille;

La fig. 4 est une section horizontale du fourneau suivant la ligne 5-6, le corps de chaudière conservé en vue extérieure;

Les autres figures sont des détails des parties principales.

Un générateur comprenant, comme nous l'avons dit, la chaudière et son fourneau, la première est formée ici d'un corps cylindrique principal A, et de deux corps de même forme B, mais plus petits de diamètre, et que l'on nomme plus souvent *les bouilleurs*. Le nom de chaudière proprement dite désigne ordinairement la plus grande capacité A. Chacun de ces organes est rendu solidaire du corps principal par deux tubulures C, appelées *communications*, qui en font ainsi une seule capacité close, dont toutes les parties sont en parfaite et libre relation.

Le corps entier de la chaudière et de ses bouilleurs se trouve complétement enve-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

loppé, comme les appareils de Watt, par une construction en briques qui constitue le fourneau, et dans laquelle ont été ménagés la grille D du foyer, où s'opère la combustion, et les carneaux E, E′ et E″ pour la circulation des gaz et de la fumée.

Les carneaux sont disposés d'une telle façon que les produits de la combustion enveloppent directement les bouilleurs sur les trois quarts environ de leur circonférence, et suivant leur longueur entière; puis ils traversent une cloison horizontale, établie au-dessus des bouilleurs, par une ouverture F située à l'extrémité opposée à la grille; cette ouverture communique avec le carneau supérieur que les gaz chauds parcourent, en suivant les côtés de la chaudière, et parviennent jusqu'au canal de sortie G qui les conduit à la cheminée.

Les carneaux supérieurs E′ et E″ sont constitués par deux parois concaves, isolant la chaudière des deux côtés, et par une cloison de séparation établie sous la chaudière même, et dans toute sa longueur, entre les communications C. Le même passage se trouve ménagé à l'avant-bout de la chaudière pour établir la relation entre les deux carneaux.

Si nous remarquons que ces carneaux ne s'élèvent qu'à la hauteur du centre de la chaudière, nous en pouvons déduire que l'action de la chaleur s'exerce sur près de la moitié de sa circonférence, moins l'épaisseur de la petite cloison centrale.

La surface de chauffe totale se trouve ainsi constituée par les 3/4 de la superficie totale des bouilleurs et par la moitié de celle de la chaudière. On peut admettre cette moitié complète, puisqu'il y aurait à ajouter la moitié de la superficie des bouts et celle des communications C, dont on ne tient généralement pas compte.

Comme principe général, cette construction a la propriété de présenter le plus possible de surface exposée à l'action directe des produits de la combustion, pour un volume total déterminé de l'appareil, et de donner à ces produits un parcours suffisant pour qu'ils abandonnent le plus possible de leur calorique au profit du générateur, sans toutefois s'être assez refroidis pour nuire au tirage.

A la vérité, le problème était déjà résolu avec les chaudières de Watt; mais la forme circulaire de la chaudière actuelle et l'addition des bouilleurs en ont nécessairement modifié les termes pour la construction du fourneau.

### ENSEMBLE DES FONCTIONS DU GÉNÉRATEUR

Le corps de l'appareil est rempli d'eau jusqu'à 10 centimètres au-dessus du centre de la chaudière; l'espace libre restant est *la chambre de vapeur,* à laquelle on réserve une capacité additionnelle H que l'on appelle *le dôme* ou réservoir de vapeur. Le dôme est destiné, d'abord, à agrandir l'espace occupé par la vapeur, et ensuite à placer la prise de vapeur assez haut pour qu'il se trouve moins d'eau non vaporisée entraînée avec elle.

Le combustible, qui est le plus souvent de la houille menue, est déposé sur la grille D en couche régulière dont l'épaisseur ne doit guère dépasser 15 à 18 centimètres pour que la combustion soit facile et que toute la masse se trouve presque

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

entièrement en ignition; si la couche de charbon était très-épaisse, la partie inférieure ne brûlerait pas, ou bien, s'il fallait attendre qu'elle fût atteinte, on devrait ajouter du charbon frais en grande quantité pour rétablir l'épaisseur normale de la charge, et le feu aurait à subir des variations d'intensité aussi contraire à la sûreté du générateur qu'à la régularité de la vaporisation.

Cette observation, qui est très-importante, s'applique d'ailleurs aux foyers qui, semblables à celui-ci, se chargent en jetant le charbon frais au-dessus de la couche incandescente qui reste sur la grille; mais nous verrons qu'il a été imaginé diverses dispositions, très-bonnes à notre avis, dans lesquelles la charge s'opérant *par dessous*, l'épaisseur totale de la couche de combustible cesse d'être une objection. Seulement, avec les foyers alimentés en dessous, il ne faut plus parler de la simplicité qui distingue celui dont nous nous occupons actuellement, et qui le fera préférer longtemps, malgré ses inconvénients.

Quoi qu'il en soit de la façon d'établir le foyer, son action la plus énergique, le rayonnement, s'exerce directement contre la partie des bouilleurs située au-dessus et y produit une vaporisation extrêmement intense. La vapeur formée s'élève en bulles tumultueuses à la partie supérieure de chaque bouilleur, qu'elles suivent jusqu'au moment où elles rencontrent la première communication C; arrivées là, elles continuent de s'élever, et, traversant la masse liquide contenue dans le corps principal A, viennent éclater à la surface et se répandent en masses gazeuses dans la chambre de vapeur.

A partir de cette première action du foyer, c'est la flamme d'abord, et plus tard les gaz éteints, mais encore à une très-haute température, qui suivent les parois des bouilleurs et celles de la chaudière, en y développant une vaporisation qui va évidemment en diminuant d'intensité de plus en plus au fur et à mesure qu'ils s'approchent de l'échappement.

On règle le passage des gaz et le tirage du foyer au moyen d'un registre K placé à l'origine du canal d'échappement G. Ce registre est une plaque de fonte montée dans un cadre également en fonte, ajusté dans la maçonnerie. Sa hauteur se maintient à l'aide d'un contre-poids *b* suspendu à une chaîne de renvoi *c*, et qui descend devant le fourneau à la portée du chauffeur. La pratique indique à ce dernier la position qu'il doit donner au registre suivant la quantité de combustible qu'il doit employer dans un temps déterminé pour correspondre à une production suffisante de vapeur.

Nous avons dit (8) dans quelles conditions s'effectue la vaporisation en vase clos, où il est possible d'atteindre telle pression qu'on le désire lorsque la résistance du récipient est suffisante. Tandis qu'on ne dépassait que de très-peu la pression de l'atmosphère avec les chaudières de Watt, on atteint ordinairement avec celle-ci jusqu'à 5 et 6 atmosphères,

Quoique le générateur soit parfaitement conditionné pour fonctionner en sûreté avec ces hautes pressions, on multiplie cependant tous les appareils d'observations, ainsi que nous le verrons très en détail; car si la solidité de l'appareil correspond au travail qu'on lui fait développer, on a vu (10) que dans ces limites la tension de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la vapeur peut s'accroître énormément pour une élévation de quelques degrés de température, et dépasser rapidement les limites de résistance de la chaudière.

La haute pression a fait aussi modifier le procédé d'alimentation d'eau froide, qui se réglait automatiquement au moyen du jeu d'un flotteur dans la chaudière de Watt. La pression intérieure dépassant ici de beaucoup celle extérieure, on est obligé de se servir d'une pompe foulante dont le conduit vient aboutir à une boîte à soupape I montée sur la chaudière. Cet appareil correspond à un tube intérieur J qui se divise en deux branches pénétrant chacune, par les communications C, jusqu'au fond des bouilleurs où arrive alors l'eau froide envoyée par la pompe foulante dite *pompe alimentaire*. Quelquefois ce tube, au lieu de pénétrer dans les bouilleurs, s'infléchit et repose sur le fond même de la chaudière en se prolongeant vers le bout le plus froid, celui le plus éloigné du foyer.

De toutes façons il s'établit à l'intérieur de l'appareil un double courant d'eau et de vapeur; celle-ci s'élève en grande quantité par la première communication C située au-dessus du foyer, tandis que l'eau descend de la chaudière pour se rendre aux bouilleurs par les deux autres communications qui doivent néanmoins livrer aussi passage à une certaine quantité de vapeur formée incessamment dans cette région des bouilleurs.

Il nous semble assez logique de ne pas envoyer l'eau d'alimentation, qui est relativement froide, et qui l'est souvent d'une façon absolue, directement dans les bouilleurs où la vaporisation est nécessairement plus énergique que dans la chaudière, surtout à l'extrémité de celle-ci. Mais on adopte volontiers la disposition que nous avons indiquée dans notre exemple pour faire servir au besoin le conduit intérieur J à la vidange du générateur et à l'épuisement des dépôts qui résultent de la vaporisation de l'eau.

On voit que la boîte à soupape I est munie, à cet effet, d'une tubulure à robinet *a* que l'on ouvre après avoir fermé la soupape d'alimentation, lorsqu'on veut vider la chaudière et ses bouilleurs.

On choisit pour cela le moment où la vapeur est encore en pression; elle agit alors sur le liquide, le force à s'écouler par le tube J et ensuite au dehors par le robinet *a*, en entraînant avec elle la partie liquide des dépôts.

## SERVICE DES APPAREILS DE SURETÉ ET D'OBSERVATION

Sans préciser, pour l'instant, les termes de la loi qui prescrit l'emploi des appareils de sûreté, nous ferons connaître d'abord leur destination et les fonctions qu'ils remplissent, n'en ayant dit que quelques mots en parlant de la chaudière de Watt.

Ils correspondent à trois fonctions distinctes qui sont :

1° L'observation de la pression de la vapeur;

2° L'indication et la réglementation du niveau de l'eau dans le générateur;

3° L'échappement libre de la vapeur pour une tension maximum déterminée.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les appareils nécessaires pour remplir ces diverses conditions sont :

Le manomètre ;

Le niveau d'eau et les flotteurs à sifflet ;

Les soupapes de sûreté.

Manomètre. — Le manomètre est destiné à faire connaître très-exactement, et à chaque instant, la tension de la vapeur à l'intérieur de la chaudière. Nous avons déjà montré (9 et 46) sur quels principes cet appareil peut être fondé.

Les premiers manomètres dont on a fait usage n'étaient pas autre chose que l'instrument que nous avons décrit (46), et que l'on désignait sous le nom de *manomètre à air libre*, attendu que la pression atmosphérique agissait librement sur l'une des extrémités de la colonne de mercure qui indiquait, par sa situation, la différence de tension entre la vapeur et le milieu ambiant.

Lorsque nous décrirons particulièrement les appareils d'observation, nous montrerons que les manomètres à air libre sont certainement les plus précis, mais qu'ils ont été peu à peu remplacés à cause de la grande dimension qu'ils acquièrent lorsqu'il s'agit de mesurer des tensions un peu considérables. On leur substituait ceux à air comprimé (9), qui étaient peu embarrassants, il est vrai, mais qui manquaient aussi de la précision désirable.

On adopte de préférence, maintenant, les manomètres métalliques qui sont de deux principes différents :

1° Les manomètres de M. Bourdon, où la pression de la vapeur s'exerce à l'intérieur d'un tube aplati, et tourné en hélice, qu'elle tente de ramener au rond, et le fait se développer circulairement de certaines quantités qui deviennent alors les indices de la pression ;

2° Les manomètres de M. Desbordes, dans lesquels la vapeur agit sur une lame de ressort dont les flexions plus ou moins grandes correspondent aux pressions exercées.

En adoptant l'un ou l'autre de ces systèmes, le manomètre, dont la forme générale est une boîte ronde ou oblongue de peu de dimension, s'adapte au générateur à peu près comme l'indiquent les fig. 1 et 2 de la pl. 1.

Le manomètre L (système Bourdon) est placé sur le devant du fourneau, parfaitement en vue de l'ouvrier qui le dirige. Il est mis en communication avec la chambre de vapeur à l'aide d'un petit tuyau de cuivre rouge *d*, qui part d'une petite tubulure spéciale *e*, branchée sur la partie supérieure de la chaudière ; un robinet *f*, appartenant au manomètre, permet d'interrompre, au besoin, la communication avec la vapeur.

La pression de la vapeur se fait sentir sur l'instrument avec toute son intensité. Cependant, ce n'est pas toujours elle qui agit directement sur lui, mais souvent et mieux c'est de l'eau, qui, étant incompressible et pouvant être relativement froide, transmet très-exactement l'action qu'elle reçoit de la vapeur, sans détériorer l'instrument comme cette dernière, par sa haute température.

Les indications du manomètre sont données en atmosphères et fractions décimales d'atmosphère ; avec le système Bourdon, c'est une aiguille qui parcourt les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

divisions d'un cadran, suivant les mouvements plus ou moins grands du tube qui ressent l'influence de la pression, et auquel cette aiguille est rattachée. Le premier chiffre de l'échelle du cadran est l'unité, ce qui indique, lorsque l'aiguille y correspond, que la pression à l'intérieur de la chaudière est la même que celle extérieure, soit qu'elle contienne de la vapeur à cette pression, soit qu'elle soit arrêtée et pleine d'air. Par conséquent, l'aiguille commence à se mouvoir aussitôt que la pression, dans la chaudière, commence à dépasser celle de l'atmosphère extérieure; on obtient ainsi la valeur absolue de la tension de la vapeur et non pas son excès sur celle du milieu ambiant.

Le point où se fait le branchement du manomètre sur le générateur n'a rien d'exclusif, pourvu qu'il ait lieu dans un endroit où l'on suppose que la vapeur a bien sa pression maximum; mais il est interdit par les règlements administratifs de faire cette prise sur une conduite où la vapeur soit en mouvement pour un autre service, et qui soit susceptible d'être fermée à certains moments.

Niveau d'eau. — Le maintien du niveau de l'eau à l'intérieur de la chaudière est une condition très-importante sous le double rapport de la sécurité et de la continuité du service. Il est réglé, comme nous l'avons dit, à environ 10 centimètres au-dessus de la partie supérieure des carneaux, et doit très-peu varier de ce point, de façon que jamais aucune partie sèche intérieure du générateur se trouve en contact avec le courant de gaz chauds; car on sait qu'un vase métallique, qui ne contiendrait pas de liquide vaporisable, et qui se trouverait exposé à la chaleur, peut s'échauffer jusqu'au point de rougir, se détruire, et produire une explosion, pour le cas dont il s'agit.

Il ne faut donc pas que ce niveau s'abaisse; mais il ne faut pas non plus qu'il s'élève trop, car la capacité réservée à la vapeur diminuerait sensiblement; et puis, si la quantité d'eau froide fournie dépasse celle vaporisée par le foyer, il n'est plus possible de maintenir la pression dont on a besoin.

Comme il est difficile de compter sur la parfaite relation entre l'action du foyer et la marche de la pompe qui alimente la chaudière, on fait usages de différents appareils qui indiquent exactement la position du niveau d'eau, indépendamment de toute autre considération : les uns, *les niveaux en cristal,* rendent cette observation sensible aux yeux; les autres, les flotteurs à sifflet, avertissent lorsque ce niveau dépasse, en moins ou en plus, les limites possibles.

Le simple niveau d'eau M, employé généralement, et même imposé par l'administration supérieure, se compose d'un tube en cristal monté entre deux tubulures à robinets, formant un ensemble qui se place sur le devant du fourneau, de telle façon que le milieu de sa hauteur coïncide avec le niveau normal de l'eau dans la chaudière. L'intérieur du tube de cristal est mis en communication par ses deux extrémités avec les parties inférieure et supérieure du générateur avec lequel il devient vase communiquant. Par conséquent, la vapeur s'y rendant par le haut et l'eau par le bas, son niveau s'y établit en concordance parfaite avec l'intérieur de la chaudière; il suffit d'y jeter les yeux pour voir si ce niveau s'éloigne de sa position normale.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour établir la communication entre le niveau et le générateur, on adopte très-souvent le moyen suivant : on fait traverser la muraille du fourneau par deux tubes qui s'ajustent dans le bout de la chaudière, au-dessus et au-dessous du niveau normal, de façon que l'un laisse passer de la vapeur et l'autre de l'eau ; ces deux tubes s'ajustent alors extérieurement avec les deux extrémités du *niveau d'eau*. (On peut voir cette disposition sur les fig. 1 à 4, pl. 2.)

Mais on adopte aussi la disposition représentée ici (pl. 1, fig. 1 et 2), et qui nous semble préférable en ce que, les tubes de communication n'étant pas engagés dans la maçonnerie, on n'a plus à craindre les dislocations qui résultent de la poussée de la brique sous l'influence de la chaleur, et aussi parce qu'aucun point ne se trouve caché.

Ici le tube $g$, qui correspond à la vapeur, est placé extérieurement et peut se brancher sur le dessus de la chaudière en un point quelconque. (Nous avons choisi, pour éviter un trou de plus dans la chaudière, la petite tubulure $e$ qui correspond au manomètre, et qui possède pour ces deux appareils deux brides particulières.) Le tube $g'$ correspondant à l'eau est de même placé à l'extérieur, et va se brancher sur l'un des bouilleurs dont on voit les têtes qui sortent du fourneau.

Flotteur a sifflet. — A part les inconvénients du niveau en cristal, et dont nous parlerons plus tard, c'est un instrument qu'il faut regarder, comme le manomètre, pour être au courant du fait que l'on a intérêt à surveiller. Pour être mis à l'abri de cette préoccupation et savoir ce qui se passe dans la chaudière, même sans être présent, on dispose un flotteur qui fait fonctionner un sifflet avertisseur, s'il s'abaisse au delà d'une certaine limite.

Nous supposons ici, comme exemple, le flotteur magnétique de M. Lethuillier-Pinel, l'un des systèmes qui évitent une garniture mobile dans la paroi de la chaudière pour le passage de la tige de suspension.

C'est une boîte métallique N parfaitement fixée sur la chaudière, qui est percée d'un trou en cet endroit. A l'intérieur se meut librement un barreau d'aimant surmontant une tige à laquelle se trouve suspendu un corps métallique $h$, creux et flottant ; la vapeur a son libre accès dans cette boîte N qui est exactement close par rapport à l'extérieur.

Le flotteur $h$, sa tige et le barreau d'aimant constituent un tout indépendant, d'une seule pièce, qui s'élève ou s'abaisse avec le niveau de l'eau ; les fluctuations moyennes sont connues de l'extérieur à l'aide d'une aiguille en fer placée sous verre, en dehors de la boîte N, laquelle aiguille se meut, avec le barreau aimanté et sous son influence, au travers de la paroi de la boîte où il est renfermé. Mais si le flotteur et son aimant atteignent une position inférieure anormale, par suite d'un abaissement notable du niveau de l'eau, la tige du flotteur agit sur un petit mécanisme de renvoi, disposé à l'intérieur de la boîte N, qui communique avec la petite soupape par laquelle la vapeur s'échappe et fait parler un sifflet $i$ monté à la partie supérieure de l'appareil.

Le bruit du sifflet suffit pour annoncer au chauffeur que la chaudière manque d'eau et qu'il doit accélérer l'alimentation ou modérer la production ou la dépense



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de la vapeur, suivant le cas. De toutes façons, la conduite du générateur exige que le niveau d'eau soit promptement ramené à sa hauteur normale.

Voilà, en principe, en quoi consiste un flotteur à sifflet; il en existe de différents systèmes que nous ferons connaître. Mais remarquons tout de suite qu'on s'est toujours attaché à perfectionner leur disposition au point de vue de conserver à la tige du flotteur toute sa mobilité, en évitant de la faire passer dans une garniture ménagée dans la chaudière : en un mot, on s'est efforcé de faire de l'ensemble de l'appareil un tout sans aucune communication entre la chaudière et l'extérieur. Plusieurs constructeurs ont résolu le problème, et particulièrement M. Lethuillier (de Rouen), en employant l'action magnétique, qui permet de rendre sensibles, à l'extérieur, les mouvements du flotteur, tout en le laissant complétement libre.

Dans ces conditions, un flotteur peut remplacer entièrement le niveau à tube de cristal, puisqu'il peut donner les fluctuations du liquide pour ainsi dire millimètre par millimètre; mais jusqu'ici le niveau en cristal est ordonné et conservé, par conséquent. Cependant il présente des dangers en raison de sa fragilité; et puis il se dépolit intérieurement, et ses indications deviennent difficiles à voir. Aussi tous les générateurs fixes possèdent aujourd'hui concurremment les niveaux en cristal et les flotteurs à sifflet, réglementaires tous deux, et d'autres appareils qui les suppléent et les vérifient.

Soupapes de sureté. — La soupape de sûreté, dont nous avons parlé à propos de la marmite de Papin (14), est, au moins depuis Newcomen, le complément indispensable de tout générateur, et devient aujourd'hui obligatoire; un générateur en doit posséder généralement deux.

C'est un appareil très-simple, ainsi qu'on l'a vu, et qui n'a guère varié de construction depuis qu'on l'emploie. C'est toujours une soupape maintenue sur son siége par l'effort d'un poids suspendu à l'extrémité d'un levier, suivant la disposition d'une balance romaine. Chacune des soupapes établies sur une chaudière doit être équilibrée de façon que la vapeur puisse la soulever lorsque sa tension atteint le chiffre maximum pour lequel la chaudière a été établie, et qui est indiqué par un timbre légal placé sur l'une des parties extérieures du corps, telles que le réservoir de vapeur et la tête des bouilleurs. Les leviers des soupapes et les poids sont aussi poinçonnés par un délégué de l'Administration pour pouvoir constater toute modification ou surcharge qu'on pourrait illégalement leur faire subir.

Les soupapes de sûreté font ordinairement partie d'un groupe d'appareils, flotteurs et robinets de prise, pour ne pas multiplier les ouvertures à pratiquer sur le corps de la chaudière. Ici l'une des soupapes O est supposée indépendante; l'autre, O′, fait partie de la boîte N du flotteur magnétique.

En décrivant spécialement ces appareils, nous ferons connaître les dimensions des soupapes et les motifs qui conduisent à déterminer exactement leurs diamètres en rapport avec les proportions du générateur. Une soupape doit, en effet, satisfaire à la double condition de se lever à une pression maximum déterminée et de donner à la vapeur une issue suffisante dans le cas d'une production excessive, ou d'un arrêt dans la dépense, qui déterminerait aussi une accumulation anormale.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

### DÉTAILS DE LA CONSTRUCTION DE LA CHAUDIÈRE

Assemblages et trous d'homme. — Le corps de la chaudière et les bouilleurs sont formés de viroles de tôle de 8 à 10 millimètres d'épaisseur, solidement rivées. Les deux bouts de la chaudière sont faits d'une seule pièce chacun, en tôle plus épaisse, et dont les bords ont été relevés au marteau et à chaud pour former la pince d'assemblage. L'un des bouts de chaque bouilleur est fermé de la même façon; mais l'autre, celui du côté du foyer, doit pouvoir s'ouvrir à volonté pour y laisser entrer un homme, au besoin, si le diamètre le permet, et, dans tous les cas, pour opérer le nettoyage. Ce mode de fermeture est simplement l'*autoclave*. On aura une idée exacte de cette disposition en jetant les yeux sur les fig. 5 et 6, qui représentent en détail la partie supérieure du réservoir de vapeur H où le *trou d'homme* a été réservé pour pénétrer dans le corps principal de la chaudière.

Le cylindre de tôle, qui forme le réservoir de vapeur, est rivé avec une pièce circulaire en fonte *j* dont le fond est percé d'une ouverture elliptique de la dimension convenable pour le passage d'un homme; cette ouverture se ferme, pendant la marche, à l'aide d'un bouchon *k* de même forme, mais un peu plus grand pour recouvrir l'ouverture. A la faveur de cette forme, on peut introduire ce bouchon dans l'intérieur en le présentant de côté, et son petit axe dans le même sens que le grand axe du trou; une fois entré, on le ramène à sa place où on l'y maintient au moyen des boulons *l* et des étriers *m* qui s'appuient sur la pièce *j* à l'extérieur; ces boulons sont ordinairement pris dans la fonte du bouchon pour éviter les fuites qui pourraient survenir s'ils passaient simplement au travers.

Ce bouchon ainsi mis en place et garni de mastic au minium sur tout le joint du rebord, aucune fuite ne peut se manifester, la pression dans la chaudière le faisant appuyer davantage sur son siége.

Chaque bouilleur est donc muni d'un appareil semblable, ainsi que le montrent les diverses figures de notre dessin, et particulièrement les détails fig. 7 et 8, où l'on suppose néanmoins les bouchons retirés pour ne laisser voir que les siéges *j'*.

Disposition des feuilles de tôle. — Quant à la répartition des viroles de tôle, elle a lieu suivant les longueurs et les diamètres de l'appareil.

Les viroles composant la chaudière A sont formées chacune de deux tôles dans le sens de la circonférence, et cintrées perpendiculairement au laminage, ce qui doit toujours être fait lorsque les dimensions le permettent. Ce sont des tôles de $1^m10$ de largeur, se croisant de 7 centimètres à l'endroit des clouures.

Mais pour les bouilleurs qui sont exposés directement à l'action la plus violente du foyer, on doit observer des principes un peu différents et plus absolus.

D'abord, la première virole vers l'avant du fourneau doit être aussi longue que possible et dépasser rigoureusement la longueur de la grille pour qu'il ne se trouve pas de rivure au-dessus du foyer. Dans notre exemple, le foyer ayant $1^m50$ de profondeur, la première virole a $2^m30$; la première rivure est donc reculée de 80 cen-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

timètres environ. D'ailleurs, nous devions montrer le meilleur mode de construction, celui que l'on doit adopter lorsque les moyens d'exécution, comme outillage, le permettent ; les bouilleurs, dont la longueur totale dépasse 6 mètres, sont néanmoins formés chacun de trois viroles, c'est-à-dire le moins qu'on en puisse mettre, ce qui est la meilleure condition possible. Moins il y a de raccords de tôle et moins les fuites et les flexions sont à craindre.

Lorsque les bouilleurs ont un grand diamètre, chaque virole comprend deux feuilles de tôle sur la circonférence. Celle inférieure de la première virole, et que l'on appelle le *coup de feu,* doit être d'une qualité irréprochable. C'est évidemment cette partie qui souffre le plus de l'action, même normale, du foyer, mais qui se détruit encore souvent par l'accident que l'on désigne par *un coup de feu,* et qui provient ordinairement de la négligence du chauffeur, qui a laissé tomber la vapeur, et qui, pour se relever, charge tout d'un coup la grille d'une trop grande épaisseur de combustible. Sans examiner, quant à présent, ce point important, il est facile de faire comprendre que la vitesse de transmission du calorique au travers de la tôle a nécessairement une limite, et que, si l'action rayonnante du foyer s'exerce avec trop de violence et de trop près, la chaleur ne se trouvant pas aussi vite absorbée par le liquide qu'elle est fournie par le foyer, l'extérieur de la tôle pourra atteindre la température à laquelle le fer s'oxyde ou se brûle. D'ailleurs, une vaporisation trop vive dans le bouilleur aura encore pour résultat d'isoler la tôle du liquide et de lui permettre de s'élever de température.

Réservoir de vapeur. — Le réservoir de vapeur, ou le dôme H, est formé d'une seule feuille de tôle roulée et rivée par ses bords; sa partie inférieure est relevée à chaud, de façon à constituer une cornière pour le river sur la chaudière. Souvent cette cornière était indépendante et rapportée; mais cela faisait une clouure de plus, ce qu'il faut éviter autant que possible.

La partie du corps principal A où se monte le dôme n'est pas percée suivant un trou d'un même diamètre, comme cela avait néanmoins lieu quelquefois. Il est préférable de n'ouvrir qu'un trou *n*, beaucoup plus faible, et seulement suffisant pour débiter largement le volume de vapeur qui se dépense incessamment; on y trouve l'avantage de ne pas affaiblir le corps de la chaudière, qui serait ainsi coupé sur près de la moitié de sa circonférence si l'ouverture devait correspondre au diamètre du réservoir.

C'est le plus généralement sur le dôme que se fait la prise de vapeur, ainsi que nous l'avons dit. Lorsque cet appareil est terminé, comme ici, par le siége *j* du trou d'homme, on a soin de ménager à cette pièce la tubulure *o* nécessaire pour y adapter un robinet ou une boîte P qui contient la valve de sortie de vapeur, afin de n'avoir pas de nouvelles ouvertures à pratiquer dans la tôle. Les constructeurs ménagent souvent plusieurs tubulures semblables (voir pl. 2), soit pour plusieurs appareils, soit pour être maîtres de choisir plus facilement le côté de la prise de vapeur, d'après les positions relatives du générateur et de la machine qu'il alimente.

Communications ou cuissards. — Les conduits C qui relient les bouilleurs avec la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

chaudière, et qui les mettent en communication, sont aussi des cylindres de tôle dont les deux bouts sont relevés en forme de cornières épousant la forme de la partie où elles s'appliquent et y sont rivées. Leur direction, en section transversale, fig. 3, est telle que l'axe de chacun passe par le centre du bouilleur et à côté de celui de la chaudière, suivant un tracé qui évite que les deux communications voisines ne se touchent et que les trous ouverts dans la chaudière ne se rejoignent; il faut qu'il reste entre eux près de trois fois la largeur d'une pince ou d'un rebord de clouures. Suivant la disposition prise pour exemple, il reste entre les cornières près de 11 centimètres pour le passage de la cloison de brique.

Le diamètre des communications doit être aussi grand que possible, et ne pas être inférieur à 30 centimètres intérieurement. Mais pour les placer facilement, même avec cette dimension minimum, on voit que la chaudière ne peut pas avoir beaucoup moins que nous ne lui supposons, c'est-à-dire 1 mètre de diamètre intérieurement, et les bouilleurs 0,60; autrement ces corps principaux se trouveraient sensiblement affaiblis par les ouvertures correspondantes. Lorsqu'un générateur ne peut atteindre ces dimensions, nous verrons qu'il vaut mieux n'adopter qu'un seul bouilleur, afin de lui conserver un grand diamètre ainsi qu'aux tubulures C.

Ces tubulures sont ici d'une seule pièce, chacune réunissant invariablement, par des rivures, la chaudière et les bouilleurs. Mais on les a souvent faites en deux pièces, raccordées avec des brides boulonnées ou par un étrier et un joint au mastic de fonte. On avait imaginé cette disposition en vue de faciliter le montage et la séparation de la chaudière et des bouilleurs; mais on a généralement reconnu l'inconvénient de ce système qui laissait presque toujours les fuites se déclarer, et l'on préfère les communications d'une seule pièce comme nous l'avons indiqué. Cependant, il n'est pas douteux qu'en certaines circonstances on soit obligé de rendre les bouilleurs facilement séparables de la chaudière : alors on devrait au moins éviter la réunion au mastic de fonte, qui réussit mal et qui présente de grandes difficultés à bien faire.

### CONSTRUCTION DU FOURNEAU

Le genre de fourneau que nous considérons ici est de l'espèce de ceux établis isolément sur trois de leurs faces et appuyés seulement par la quatrième contre le mur en maçonnerie qui le sépare de la cheminée. (Voir, sur la fig. 1 de la pl. 3, l'ensemble du fourneau et de la cheminée.)

La masse générale se compose de quatre murailles en brique ordinaire, revêtues intérieurement d'une demi-longueur de brique réfractaire dans toutes les parties exposées au feu ou au courant d'air chaud (1).

La forme intérieure des carneaux est courbe, ce qui convient assez bien à la répartition du courant d'air autour de la chaudière, mais qui ne se fait pas tou-

(1) Cette distinction de brique a été faite seulement sur les sections verticales (fig. 1 et 3), au moyen d'une teinte un peu plus claire que celle correspondant à la brique ordinaire.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

jours, par la raison que c'est un peu plus difficile de construction que les parois latérales purement planes et verticales.

La séparation entre le carneau inférieur E et ceux E′ et E″ est établie par une cloison plane en briques réfractaires reposant simplement sur les bouilleurs.

Nous proposons, comme exemple d'une construction soignée, une voûte en brique ordinaire $p$ qui laisse au-dessus de la chaudière un espace à peu près vide, lequel est très-utile contre le refroidissement extérieur. Ordinairement, la chambre de service au-dessus du fourneau est à une température tellement élevée (attendu qu'on ne doit pas chercher à la refroidir par l'air extérieur) qu'un homme a peine à s'y tenir; nous avons eu l'occasion de remarquer que l'existence de cette voûte isolante était si efficace que la température du milieu où se trouve situé le fourneau se maintenait pour ainsi dire à une température ambiante de 20 degrés au plus, sans avoir cherché à l'aérer. Mais ce genre de construction n'est pas non plus le moins dispendieux.

Le carneau E inférieur est formé d'une voûte légère $q$ qui laisse un vide perdu et fermé à l'une de ses extrémités par un mur en brique $r$ qui sert de point d'appui à la chaudière, et de l'autre par un mur semblable R sur lequel s'appuie la grille et qui s'élève d'une quantité convenable, afin de ne laisser au-dessous des bouilleurs que l'espace suffisant pour le passage des produits de la combustion en forçant la flamme de s'allonger et de *lécher* les parois du générateur. C'est ce mur que l'on nomme l'*autel;* en s'élevant au-dessus de la grille, il sert à retenir le combustible que l'on y dépose en couche plus ou moins épaisse. Comme son bord du côté de la grille subit la plus énergique action du foyer, il est important de le garnir de briques réfractaires et de ne pas laisser d'arête vive, qui serait du reste bien vite dégradée.

Comme le fourneau se charge promptement de suie qui réduit insensiblement la section des passages, il faut pouvoir le nettoyer facilement. Pour cela, on ménage sur la face antérieure deux ouvertures $y$, vis-à-vis des carneaux E′ et E″, et qui ne sont closes que par une cloison en brique qui est aussi aisément remontée que démolie.

Quant au carneau inférieur, on repousse la poussière et la suie qui se déposent sur la voûte $q$ ou contre les bouilleurs dans l'espace vide restant entre la cloison $r$ et la muraille du fourneau. Pour purger cet espace à son tour, lorsqu'il vient à s'encombrer, ce qui est peu fréquent, on y parvient facilement, soit en défonçant les cloisons R et $r$ (la voûte $q$ en étant indépendante), soit en ménageant un regard correspondant dans la muraille extérieure du fourneau, s'il est isolé.

A l'égard du canal G qui se rend à la cheminée, on arrive à le nettoyer par le regard V ménagé à la cheminée même (voir fig. 1, pl. 3).

Il est à peine utile d'ajouter que la masse entière du fourneau doit être établie sur un massif en maçonnerie très-solide et parfaitement stable; sur notre dessin, on peut voir que le massif règne dans toute la superficie du fourneau.

Ce dernier doit être aussi indépendant des constructions voisines latérales : c'est-à-dire que ses murailles ne pénètrent par aucun point dans le mur contre lequel il

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

s'appuie; et même, pour parer à la poussée de la brique, en raison des effets de la chaleur, nous supposons une distance de quelques centimètres entre les deux constructions, vide que l'on fait disparaître en haut en le rebouchant sans inconvénient suivant une petite hauteur.

## CONSTRUCTION DE LA CHEMINÉE

(FIG. 1, PL. 3)

Les cheminées des générateurs à vapeur fixes sont isolées, ayant la forme générale d'un vaste conduit vertical d'une section rectangulaire ou circulaire. Pour des générateurs dont la puissance s'élève au-dessus de 8 à 10 mètres de surface de chauffe, les cheminées sont en brique et peuvent être carrées ou rondes; au-dessous de cette puissance, on les fait souvent en tôle et cylindriques. Dans ce dernier cas, si la cheminée est isolée dans la plus grande partie de sa hauteur, on est obligé de la retenir au moyen de haubans en fil de fer se rattachant aux constructions les plus voisines, attendu qu'elle ne présente aucune stabilité par sa base.

Mais le plus souvent, disons-nous, les cheminées sont construites en briques comme celle T, qui est représentée fig. 1 et 2, pl. 3, et que nous supposons appliquée au générateur dessiné pl. 1. Le conduit intérieur est circulaire et d'un diamètre sensiblement uniforme du bas en haut. L'extérieur est également circulaire, mais suivant un cône très-prononcé, donnant à la muraille une notable augmentation d'épaisseur et de diamètre à la base.

La forme carrée est souvent adoptée en raison d'une plus grande simplicité de construction; mais outre que l'action des vents s'y fait sentir plus énergiquement que sur les cheminées rondes, il est également vrai que, dans ces dernières, la forme intérieure, présentant le moindre contour pour une même section et les angles les moins prononcés, est la plus favorable au passage du courant d'air et des gaz. Aussi la forme ronde est-elle adoptée de plus en plus, aujourd'hui surtout que les procédés de construction sont très-améliorés.

Une cheminée doit être élevée en briques entières et qui aient conservé complétement leur croûte vitrifiée par la cuisson. Autant pour ce motif que pour économiser la main-d'œuvre, on obtient une forme extérieure régulière en faisant supporter au conduit intérieur la diminution successive de l'épaisseur des parois par une suite de retraits qui forment entre eux des parties uniformes d'épaisseur, mais variant de l'une à l'autre de 11 centimètres, soit la largeur d'une brique. Dans les conditions ordinaires, l'épaisseur vers le haut de la cheminée peut être réduite à 11 centimètres, comme dans notre exemple, et chaque retrait successif correspond à 11 centimètres de plus, de façon qu'en partant du sommet chaque division a successivement pour épaisseur une demi-longueur de brique, une longueur, une longueur et demie, deux longueurs, etc.

L'ensemble de la cheminée présente ainsi un fût conique qui semble reposer sur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

un piédestal dont la section peut être carrée extérieurement. A la rencontre du fût et du piédestal, on incruste un larmier en pierre U qui sert en même temps de décoration et de revêtement pour rejeter les eaux pluviales qui ont suivi la surface extérieure de la cheminée.

Le piédestal s'élargit un peu à sa partie inférieure en figurant un ou deux repos, et pénètre dans le sol à la profondeur nécessaire pour se trouver à la hauteur du canal G de communication avec le dernier conduit E'' des carneaux. Au-dessous de ce dernier, l'ensemble de la cheminée s'appuie sur une fondation en maçonnerie qui doit présenter une stabilité parfaite. En effet, à part le poids propre à supporter, on conçoit qu'une légère dénivellation de la base peut faire pencher la cheminée et déranger son centre de gravité d'une quantité considérable en raison du grand rapport qui existe entre la hauteur et la base. Quoique la température du courant d'air chaud ne doive pas dépasser 300° en arrivant à la cheminée, il est convenable de faire le revêtement intérieur en briques réfractaires sur les deux ou trois premiers mètres, ainsi que le canal de communication G.

Ce canal doit être, autant que possible, disposé au-dessous du sol, mais à une faible profondeur, afin d'en rendre les réparations faciles. Il faut cependant un recouvrement d'une résistance suffisante pour le protéger contre les chocs que le sol peut éprouver de la part de grosses voitures ou des dépôts de matériaux. Vis-à-vis son entrée dans la cheminée, on ménage une ouverture V correspondant à une fosse par laquelle on peut pénétrer dans la cheminée pour la nettoyer et sortir les amas de suie. On tient cette ouverture simplement fermée par une cloison en briques réunies avec de la terre ou par une porte en tôle.

Le canal de jonction du générateur à la cheminée a souvent un développement beaucoup plus considérable que celui indiqué sur le dessin ; mais il arrive aussi que la cheminée est à peu près accolée au fourneau ; dans tous les cas, les règlements administratifs prescrivent de ne jamais construire la cheminée dans l'axe même du fourneau dans l'hypothèse d'une explosion qui pourrait produire son effet suivant l'axe de la chaudière, et, par la chute de la cheminée, aggraver les accidents.

Quant au mode de terminer le sommet de la cheminée, il consiste ordinairement à former un chapiteau, soit en dalles de pierre, soit avec des cordons de briques saillantes. Mais il n'y a vraiment d'utile que de recouvrir la brique pour empêcher l'eau d'en dégrader les joints. On obtient ce résultat à l'aide d'un simple chapeau en tôle ou en fonte mince. Dans tous les cas, plus ce recouvrement sera lourd et plus les oscillations de la cheminée sous l'influence du vent seront sensibles : on doit donc le faire aussi léger que possible.

Tracé de la cheminée. — On détermine facilement la forme d'une cheminée d'après le diamètre qu'elle doit avoir intérieurement et la pente que la pratique a indiquée comme la plus convenable pour sa paroi extérieure, afin d'obtenir une stabilité suffisante. Les mêmes données permettent aussi de fixer le nombre de retraits ou changements d'épaisseurs d'après les dimensions mêmes des matériaux employés : ce sont ici des briques dont les trois dimensions les plus ordinaires sont 22,11 et 5,5 centimètres, correspondant à la longueur, la largeur et l'épaisseur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La pente de la paroi extérieure est ordinairement maintenue entre 25 et 30 millimètres par mètre de hauteur verticale, la pente la plus forte se trouvant appliquée lorsque la cheminée présente peu de hauteur par rapport à son diamètre.

D'après ce premier aperçu, le tracé serait très-simple; il suffirait, pour avoir la section verticale de la cheminée, de tracer un trapèze ayant pour petite base le diamètre donné, plus les épaisseurs de brique, et deux côtés inclinés suivant la donnée précédente. C'est en effet ce qu'il faut faire, sous la réserve d'une certaine vérification que fournit le complément du tracé.

Lorsqu'on a ainsi, *à priori*, trouvé la grande section de la cheminée, si elle doit être d'un même diamètre aux deux extrémités, on retranche la petite base de la grande et on prend la moitié de la différence, laquelle moitié devient alors l'épaisseur inférieure de la cheminée. Mais, par la nature même des matériaux, cette épaisseur doit être un multiple exact de 11 centimètres, la largeur d'une brique : il faut donc modifier celle trouvée en ce sens, en l'augmentant ou en la diminuant suivant qu'elle se trouve plus voisine d'un multiple de 11, plus fort ou plus faible.

Une fois cette rectification faite, on possède à la fois la forme définitive de la section et le nombre de retraits, qui est évidemment égal au nombre de fois 11 contenu dans l'épaisseur inférieure, l'épaisseur minimum en haut étant elle-même égale à 11 centimètres. Si cette dernière épaisseur était égale à une ou deux fois de plus 11, le nombre de retraits se trouverait diminué d'autant.

Exemple. — La cheminée représentée pl. 3, fig. 1, a $0^m47$ de diamètre à sa partie supérieure, et 16 mètres de hauteur dans sa partie circulaire et conique. En ajoutant deux épaisseurs de 11 centimètres, le diamètre extérieur en haut devient $0^m69$, et celui inférieur, avec 3 centimètres de pente, est égale à :

$$0{,}69 + 2\,(16^m \times 0{,}03) = 1^m65.$$

En supposant l'intérieur exactement cylindrique, on aurait pour l'épaisseur inférieure,

$$\frac{1{,}65 - 0{,}47}{2} = 0{,}59.$$

Ce nombre contient cinq fois 11 exactement, d'où 55 a été adopté pour l'épaisseur dans cette partie, y compris le revêtement intérieur en briques réfractaires, dans le piédestal. L'épaisseur à la base de la partie conique devient alors quatre fois 11 centimètres ou deux longueurs de briques, et la hauteur présente quatre retraits. Au lieu de modifier la forme trouvée à l'aide de la première approximation, elle a été conservée au profit du diamètre intérieur dans le bas, ce qui n'est pas contraire au tirage; le diamètre extérieur trouvé ci-dessus restant égal à 1,65, on a pour l'intérieur :

$$1{,}65 - 2 \times 0{,}55 = 0{,}55.$$



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## GRANDE CHEMINÉE DES FORGES DE RACHECOURT

(FIG. 3 ET 4, PL. 3)

Après avoir donné pour exemple un des plus petits modèles de cheminée d'usine construite en briques, nous sommes désireux de montrer un exemple inverse des plus grands modèles, ce qui permettra bien de juger dans quelles limites la construction peut varier.

Il s'agit ici de la cheminée appliquée aux forges de Rachecourt (Haute-Marne), qui est commune à tous les feux de cet important établissement; elle a été construite sur les données de MM. les ingénieurs Thirion et de Mastaing.

Comme ses dimensions sont très-considérables, nous n'avons pu reproduire sur notre planche que la partie supérieure de cette cheminée, dont on pourra néanmoins se faire une idée complète.

La fig. 3 représente, en effet, le sommet de la cheminée avec le chapiteau en fonte qui la recouvre et garantit les joints de la brique;

La fig. 4 est, en partie, une section horizontale de la maçonnerie et une vue extérieure du chapiteau.

Cette cheminée a $36^m35$ d'élévation, à partir du sol jusqu'au chapiteau, et 40 mètres depuis le massif en maçonnerie sur lequel elle repose, massif qui n'a pas moins de 5 mètres de diamètre.

Le diamètre intérieur est, au sommet, de $1^m50$, et de $2^m25$ à la base. L'épaisseur de la muraille est formée d'une longueur de brique, en haut, et de 3 1/2 en bas; les diamètres extérieurs correspondants sont égaux, par conséquent, à $1^m94$ et 4,00, cette dernière dimension prise à la naissance de la partie conique. La pente extérieure de la paroi est aussi de 3 centimètres par mètre.

Les différences d'épaisseur se répartissent en cinq parties en retraite l'une de l'autre de chacune 6 mètres de hauteur, plus la partie inférieure qui en compte nécessairement 10 à partir du massif.

Pour consolider cette immense construction, les ingénieurs ont fait incruster dans la muraille, en la montant, 35 cercles *a*, formant armatures, en fer plat de 50 millimètres de largeur sur 3 millimètres d'épaisseur. Ces armatures ont pour but de neutraliser les effets de dislocation que la brique subit en raison de la haute température des gaz appelés par la cheminée. On a ménagé aussi 100 échelons en fer *b* pour en permettre l'ascension à volonté; ils se trouvent espacés de $0^m40$.

Le chapiteau en fonte A, qui la recouvre, est formé de quatre pièces qui se réunissent en place au moyen de boulons *c*. Ses épaisseurs sont généralement de 20 millimètres, mais son poids total doit être, en résumé, aussi faible que possible, pour ne pas charger inutilement la construction.

Excepté ses proportions, on voit que cette cheminée a été tracée à l'aide des mêmes principes que celle représentée fig. 1. Seulement, il est bon de remarquer que les constructeurs n'ont pas voulu réduire l'épaisseur minimum, en haut, à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

une demi-brique, à cause du grand diamètre et de la grande hauteur, bien que cela ait eu lieu autre part.

### REDRESSEMENT DES CHEMINÉES

Il n'est pas rare de voir une cheminée d'usine hors d'aplomb, en raison de sa faible base et de son poids considérable qui fait souvent fléchir les fondations.

Quand l'obliquité accidentelle ne va pas jusqu'à exiger la reconstruction complète, on emploie plusieurs modes de *redressement* qu'il ne sera pas sans intérêt de faire connaître, au moins les principaux.

L'un d'eux consiste à enfoncer des coins à diverses hauteurs dans la maçonnerie, jusqu'à ce que la verticalité soit suffisamment rétablie.

M. Voruz, de Nantes, a pratiqué ce moyen pour redresser la cheminée de sa fonderie, mais en le perfectionnant. Il a fait fondre quatre plaques de fonte garnies chacune de parties saillantes comme des nervures, puis il les a introduites deux à deux et l'une sur l'autre dans la muraille de la cheminée, à sa naissance inférieure. Une fois en place, les deux paires de plaques laissaient entre elles, par leurs parties saillantes, des vides dans lesquels des coins ont été chassés à coups de masse. Cette opération a eu un résultat complet.

Enfin un autre procédé, également en usage, consiste à donner des coups de scie au travers du corps de la cheminée jusqu'à son centre. Ces coups de scie forment des vides que la cheminée referme en s'inclinant de son propre poids, en sens contraire du hors d'aplomb qu'il s'agit de détruire. On les multiplie, par conséquent, suivant l'intensité d'inclinaison à regagner.

### MONTAGE DE LA CHAUDIÈRE DANS LE FOURNEAU

L'ensemble de la chaudière et de ses bouilleurs est porté aux extrémités de ces derniers, d'une part, au moyen des supports en fonte ou *chandeliers s*, s'appuyant sur le mur *r*, et d'autre part, sur le chambranle en fonte ou *plaque de foyer* S. Cette plaque, que l'on voit en détail, fig. 7 à 9, est appliquée contre la face antérieure du fourneau, et s'y trouve solidement retenue par six boulons *t*, qui, pour bien faire, doivent pénétrer dans la masse de la brique à une profondeur au moins égale à la distance de l'autel; leur extrémité engagée doit traverser une ancre en fer de forte dimension, et s'étendant largement dans la brique.

Cette plaque, ainsi solidement fixée, porte deux échancrures demi circulaires pour recevoir la tête des bouilleurs qui ne font que s'y reposer.

Lorsqu'une chaudière ne dépasse pas la longueur et le volume de celle-ci, ces deux points d'appui extrêmes suffisent; nous remarquons, du reste, qu'en adoptant plus de deux points comme supports, on n'est pas sûr que tous portent quelque chose, à cause des mouvements que la chaleur fait faire au métal des bouilleurs

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

qui se courbent toujours plus ou moins dans le sens de leur longueur; c'est aussi pour cette même raison que les bouilleurs ne font que reposer sur leurs supports et ne s'y trouvent nullement attachés, afin de leur permettre de s'allonger librement.

Cependant, pour cette même longueur, comme pour de plus considérables, la chaudière A est souvent munie d'oreilles en fonte qui sont posées vers la hauteur de son centre et qui pénètrent dans la brique au-dessus des carneaux, et se reposent sur les murailles latérales. (Voir fig. 3 et 7, pl. 2.)

Nous savons que ces oreilles ne sont pas indispensables pour la solidité de la chaudière, au moins dans les dimensions de celle qui nous occupe; mais elles peuvent devenir d'une très-grande utilité dans le cas d'une réparation exigeant, par exemple, le démontage de la plaque du foyer. Elles rendent bien plus faciles les moyens d'étayer la chaudière et peuvent prévenir des accidents graves par suite de négligence ou d'oublis.

Quant à multiplier les supports au-dessous des bouilleurs, c'est une mauvaise condition, non-seulement par la raison que nous en avons donnée ci-dessus, mais encore parce qu'ils approchent alors du foyer et se détruisent promptement. Éloignés comme ceux que nous indiquons, ils sont peu en danger de brûler; mais il faut au moins tailler leurs faces en coins pour diviser la flamme et diminuer son action sur eux.

Foyer. — On donne le nom de *foyer* à tout l'espace réservé en avant de l'autel et dans lequel s'opère la production du calorique nécessaire à la vaporisation.

Le foyer est divisé en deux parties distinctes par la grille D; la première, celle supérieure, est la chambre de combustion ou le *foyer* proprement dit comme étant celle dans laquelle brûle le combustible; celle inférieure est le *cendrier*, qui reçoit effectivement la cendre et les résidus menus appelés *escarbilles*. C'est aussi une chambre à air, puisqu'elle reçoit l'air extérieur qui alimente la combustion et qui est forcé de passer dans cette chambre pour traverser la grille.

La plaque verticale S, qui garnit la face du fourneau et que l'on nomme *chambranle*, est ouverte au-dessus de la grille et à la hauteur du cendrier; l'ouverture supérieure, par laquelle on introduit le combustible, est munie d'une ou de deux portes *t*, qui servent à empêcher l'air extérieur de pénétrer dans le foyer autrement que par le cendrier et en traversant la grille. L'ouverture du cendrier est souvent aussi garnie d'une porte que l'on ferme dans les moments d'arrêt pour empêcher les entrées d'air froid. On parvient ainsi à maintenir la pression, non-seulement pendant les heures de repos, mais même pendant une nuit entière.

Plusieurs praticiens ont donné le conseil de faire arriver l'air extérieur au cendrier par un conduit spécial au lieu de lui donner entrée simplement dans la chambre du générateur. C'est un moyen de ne pas insuffler de l'air déjà à une température élevée, comme il est généralement dans l'espace réservé devant le fourneau pour le service du foyer.

Notre dessin indique que le sol du foyer est en contre-bas de celui extérieur, de façon à retenir une couche d'eau de quelques centimètres d'épaisseur. Cette dispo-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sition a pour but d'éteindre les escarbilles qui tombent incandescentes de la grille; et puis l'eau, qui ne tarde pas à s'échauffer, se vaporise peu à peu, et sa vapeur, en traversant le foyer, peut encore contribuer à l'animer par sa décomposition en gaz hydrogène et oxygène, l'un comme combustible et l'autre comme corps comburant.

La grille est formée de barreaux plats qui sont généralement en fonte dure, posés parallèlement à côté les uns des autres, et ne se touchant que par des saillies ou *talons*, lesquels sont ménagés aux extrémités seulement, si leur longueur ne dépasse guère 1 mètre, et en outre au milieu si celle-ci est plus grande. Le rapport de l'épaisseur de ces saillies à celle des barreaux est telle que la somme des espaces vides n'est pas plus de 1/4 de la surface entière de la grille, ce qui revient à dire que la saillie de chaque côté est le sixième seulement de l'épaisseur d'un barreau à sa base supérieure.

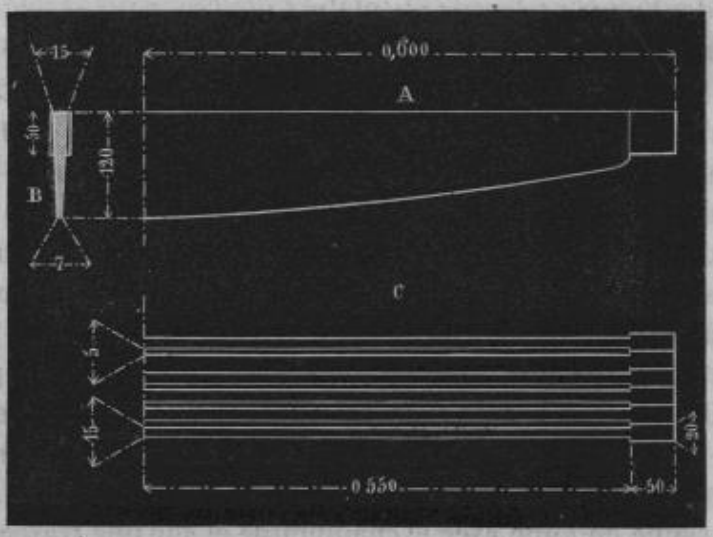
La fig. 26 ci-dessous représente en détail la disposition exacte des barreaux qui composent un fragment de grille établie d'après ces principes.

A est la projection longitudinale d'un demi-barreau;

B en est une section transversale faite au milieu de sa longueur;

Et C est une projection horizontale de plusieurs barreaux rapprochés, tels qu'on les dispose pour former la grille entière.

Fig. 26.




Comme on le voit, la section transversale d'un barreau est une sorte de trapèze dont la grande base, correspondant à la surface supérieure, n'a pas plus de 15 millimètres d'épaisseur, et la plus petite, celle inférieure, environ 6 à 7. L'épaisseur aux talons étant de 20 millimètres, ils laissent donc réellement entre eux un espace libre de 5 millimètres. Par conséquent, la totalité des vides constitue le quart de la surface totale de la grille mesurée entre les parties en contact.

Bien des motifs conduisent à faire les barreaux minces et les intervalles libres très-étroits. Déjà ces conditions sont indispensables pour employer des combus-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tibles menus, afin qu'il s'en échappe le moins possible à travers la grille; d'autre part si, tout en faisant les vides étroits, on conservait beaucoup d'épaisseur aux barreaux, une partie plus grande du combustible se trouverait masquée par rapport à l'entrée de l'air; et puis l'ensemble de la grille présenterait une trop grande surface, puisque le passage de l'air par les vides est une condition à remplir nécessairement indépendante de la superficie absolue de la grille.

De plus, il est évident que, si l'on augmentait l'épaisseur des barreaux, ils emmagasineraient beaucoup de calorique que l'entrée de l'air froid ne pourrait suffire à dissiper : alors ils s'échaufferaient, se brûleraient plus facilement et ne tarderaient pas à se déformer. En les faisant, au contraire, suffisamment minces, ils restent, relativement, presque froids et se conservent plus longtemps.

Depuis longtemps déjà on a constaté l'avantage des barreaux minces dans la construction des grilles de fourneaux. Des expériences suivies, faites à Mulhouse en 1842, en ont montré les bons résultats; pour mieux démontrer l'avantage qui résulte d'une grille très-bien faite et de la parfaite rectitude des barreaux, ils avaient été préalablement bien dressés à la meule sur leur face supérieure et par leurs points de contact.

M. Corbin Desboissières, à qui l'on doit des perfectionnements importants dans les appareils d'usines à fer, attribue en partie les succès qu'il a obtenus, particulièrement dans les fours et fourneaux, à l'application des barreaux minces à son système de foyer, dont nous parlerons plus loin.

Les dimensions que la figure précédente indique sont ordinairement adoptées pour brûler de la houille. On leur donne cette forme renflée dans le sens vertical, afin qu'en en diminuant la masse ils présentent une roideur suffisante contre la déformation sous l'action du feu.

On comprend facilement que l'emploi d'une grille d'une seule pièce n'est pas possible, attendu qu'on n'aurait pas la même facilité de maintenir un bon état d'entretien qu'avec des barreaux indépendants qui peuvent être isolément remplacés au fur et à mesure qu'ils se détériorent.

Comme il est important que le feu ne soit pas en contact avec les portes du foyer, on isole la grille du chambranle S en interposant une plaque pleine en fonte $u$, dont la surface supérieure correspond à celle des barreaux et au seuil de l'ouverture des portes $t$. Cette plaque, dont la largeur est de 25 à 30 centimètres, s'appuie sur une saillie venue de fonte avec le chambranle et sur une traverse en fer ou en fonte $v$, scellée des deux bouts dans la maçonnerie; celle-ci reçoit aussi l'une des extrémités de la grille dont l'autre est supportée de même par une traverse semblable $v'$, placée contre le mur d'autel. Généralement, ces diverses pièces laissent entre elles un peu de jeu pour parer à la dilatation et par suite à une certaine déformation qu'il serait difficile d'éviter, si l'on faisait des ajustements précis.

Nous croyons que tous les détails de construction du foyer sont suffisamment indiqués par les tracés d'ensemble, pl. 1 et par les fig. 7 à 9, pour ne pas avoir besoin d'insister davantage à cet égard. Faisons remarquer seulement la disposition du chambranle en fonte S, avec les nervures qui le consolident. L'une de celles-ci sur-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tout, celle $x$, est très-utile, parce qu'elle donne à la face du fourneau la résistance suffisante en lui servant de point d'appui.

Il nous reste donc peu de chose à dire du générateur que nous avons pris pour exemple, et qui est d'une application générale, à cause de la facilité d'exécution et d'entretien qu'il présente. Nous aurons encore à montrer bien d'autres systèmes analogues qui pourront servir de thème dans la discussion des motifs qui conduisent plutôt à une disposition qu'à une autre.

Mais avant d'en examiner les variétés, nous croyons utile de faire connaître immédiatement les règles pratiques qui servent de bases dans le calcul des dimensions principales d'un générateur cylindrique, suivant la quantité de travail qu'on veut lui faire produire. Il est d'ailleurs remarquable que la plupart de ces principes sont fondamentaux et conviennent à tous les systèmes.

## PROPORTIONS D'UN GÉNÉRATEUR A CORPS CYLINDRIQUES

Aujourd'hui, quel que soit le système de construction d'un générateur, les bases du calcul pour en déterminer les dimensions sont les mêmes; il ne peut y avoir de modifications que dans la manière de l'appliquer suivant la forme et les dispositions, comme suivant la rapidité demandée pour la vaporisation et la nature du combustible employé; nous admettons donc, qu'en cherchant à analyser les conditions de marche du générateur dont on vient de lire la description, rien ne sera plus simple que d'appliquer les mêmes raisonnements aux chaudières en apparence si différentes, telles que les chaudières tubulaires, à foyer intérieur, etc.

Déjà nous en avons dit un mot en décrivant le système de Watt; mais nous tenons essentiellement à détailler aussi complétement que possible ce que nous appellerons : *les bases ou principes rudimentaires des proportions d'un générateur à vapeur.*

Voici en quoi consistent ces bases :

1° La puissance d'un générateur est en raison directe du poids d'eau qu'il peut vaporiser dans l'unité de temps, en tenant compte aussi de la tension à laquelle on veut élever la vapeur;

2° Le poids d'eau à vaporiser, dans ces conditions, est directement proportionnel à l'étendue des surfaces du vase qui la contient, et qui sont exposées à l'action du calorique, l'énergie du foyer étant maintenue à un degré suffisant pour correspondre à la quantité de chaleur que les parois chauffées peuvent et doivent absorber;

3° La surface de la grille est déterminée suivant la quantité de combustible à consommer, laquelle doit correspondre à celle absorbée par la vaporisation;

4° Les sections des passages doivent être en raison des volumes de gaz qui alimentent la combustion et qui s'en dégagent, en tenant compte de leur cheminement contre les surfaces qu'ils doivent chauffer et de la vitesse qui leur est nécessaire dans la cheminée pour conserver l'activité du tirage;

5° Enfin, l'ensemble de toutes ces conditions doit satisfaire à la meilleure utilisation du calorique dégagé par la combustion au profit de la vaporisation.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Maintenant nous ferons remarquer que, par la raison qu'un volume donné de vapeur produite, ou ce qui revient au même, un certain poids d'eau vaporisée, correspond à une valeur dynamique déterminée, on en déduit généralement qu'un générateur correspond aussi à une puissance dynamique que l'on exprime en chevaux-vapeur. Mais pour peu que l'on se rappelle la table et les principes que nous avons examinés (66 à 72), il sera facile de comprendre que cette méthode est vicieuse et entièrement sujette à erreur, puisque le travail développé par la vapeur est variable suivant son mode d'emploi, c'est-à-dire suivant que la machine fonctionne à pleine pression ou à détente plus ou moins prolongée, ou, en un mot, qu'elle économise plus ou moins bien la vapeur.

Par conséquent, nous nous en tiendrons à notre définition première; et au lieu de considérer un générateur sous le rapport de sa puissance dynamique, nous le désignerons par *sa puissance évaporatoire,* que l'on peut indifféremment traduire en poids d'eau vaporisée à l'unité de temps ou en surface de chauffe, puisque l'on peut regarder ces deux choses comme étant proportionnelles, à la différence près du degré de tension, mais qui modifie peu les résultats, ainsi qu'on a pu le voir (39), lorsque nous avons examiné la relation qui existe entre les tensions et les quantités correspondantes de chaleur absorbées.

Néanmoins, nous pensons qu'il vaut mieux prendre pour base la surface que le poids d'eau évaporée, attendu que, industriellement parlant, pour un même générateur, l'un est rigoureusement invariable et l'autre ne l'est pas.

### SURFACES DE CHAUFFE

Dimensions des corps cylindriques. — Le simple examen de la disposition d'un générateur à vapeur quelconque permet de reconnaître que chacune de ses parties exposées à l'action de la chaleur en reçoit une impression différente. A partir de la portion de surface exposée directement au rayonnement du foyer, laquelle est évidemment la plus énergiquement chauffée, l'intensité de la chaleur décroît insensiblement en vertu de l'action naturelle de l'absorption par les parois exposées au courant de gaz chauds. Par conséquent, on peut en conclure que les poids d'eau vaporisée dans un temps déterminé décroissent aussi avec les parties du générateur les plus éloignées du foyer.

Cette première considération amènerait à limiter la surface de chauffe d'un générateur à la partie qui est directement exposée à l'action du feu, si l'on n'avait en vue que la promptitude de la vaporisation; mais il faudrait abandonner les produits de la combustion à une température extrêmement élevée, et on perdrait, par suite, une grande partie de l'effet du combustible.

C'est, au contraire, pour bien utiliser celui-ci que l'on donne aux générateurs une certaine étendue en dehors du foyer, afin d'offrir aux gaz chauds des surfaces à échauffer en leur faisant abandonner la plus grande partie de leur calorique; il en résulte, il est vrai, une vaporisation très-inégale d'intensité pour chacun des points du générateur, mais cela ne nuit en rien au résultat définitif.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Des expériences rapportées par le savant physicien Péclet il résulte qu'un mètre carré de surface de métal, de l'épaisseur ordinairement employée dans la construction des chaudières, exposé au feu le plus violent, laisse passer une quantité de chaleur suffisante pour vaporiser 100 kilogrammes d'eau dans une heure.

Mais avec la forme de générateur dont nous nous occupons, on ne peut faire d'appréciation analogue pour toutes les autres parties en dehors du foyer. On a donc dû s'en rapporter à l'expérience qui a montré, non pas la quantité d'eau vaporisée par partie, mais bien la quantité moyenne obtenue en divisant la production totale d'un générateur bien construit par sa surface de chauffe totale exprimée en mètres carrés.

Sans prendre pour exemple les chaudières de Watt, dont la chauffe directe était plus grande que celle des générateurs à bouilleurs, nous dirons qu'on admettait autrefois qu'avec ces derniers on pouvait vaporiser 15 à 20 kilogrammes d'eau par heure et par mètre carré de surface de chauffe totale, directe et indirecte, le développement des carneaux étant suffisant et le tirage réglé de telle façon que la température de l'air ne dépassât pas 300° centigrades en se projetant dans la cheminée.

Aujourd'hui, on adopte de préférence un chiffre inférieur, afin de moins fatiguer le générateur et de moins activer la combustion. On fait donc les générateurs plus grands et on organise le tirage d'une façon convenable pour qu'il puisse bien s'effectuer, nonobstant le refroidissement plus considérable que l'air a dû subir en arrivant à la cheminée, puisque sa chaleur a été plus complétement employée.

Ainsi, nous admettons, avec les meilleurs constructeurs, que, pour les chaudières appliquées aux machines fixes, chaque mètre carré de surface de chauffe totale n'a pas à vaporiser plus de 12 kilogrammes d'eau par heure, à une pression absolue de 5 à 6 atmosphères; cette donnée suffit, comme on va le voir, pour déterminer toutes les conditions d'un bon générateur.

La surface de chauffe étant connue, le système de construction permet aussi de déterminer le rapport existant entre la partie exposée au feu et la superficie totale du générateur; d'autre part, les exigences de la pratique indiquant presque toujours d'avance les sections transversales ou les diamètres, on arrive par là à trouver très-aisément la longueur.

Le générateur que nous avons choisi pour exemple, et qui est représenté sur la pl. 1, est basé sur une étendue de 25 mètres carrés de surface de chauffe;

Soit, par conséquent, pour une production moyenne de :

$$12^{k} \times 25^{m.q.} = 300 \text{ kilogrammes d'eau vaporisée par heure.}$$

Il comprend trois corps cylindriques dont l'un a 1 mètre de diamètre et les deux autres 0,60; ils peuvent être considérés comme d'égales longueurs quant à leurs parties susceptibles de recevoir l'action de la chaleur. Le premier, la *chaudière* proprement dite, a la moitié de sa circonférence exposée au courant d'air chaud, et les deux autres, les *bouilleurs*, en ont environ les 3/4, en faisant la déduction de la partie recouverte par la cloison qui forme la séparation des carneaux supérieurs, E′ et E″, et de celui inférieur E.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

D'après cela, si nous désignons par :

D, le diamètre de la chaudière en mètres;
$d$, le diamètre des bouilleurs;
L, leur longueur respective;

la partie proportionnelle du corps entier, en surfaces de chauffe, aura pour expression :

$$\frac{1}{2}\pi D + 2\left(\frac{3}{4}\pi d\right) = \frac{\pi (D + 3d)}{2},$$

et puisque la longueur L est supposée la même, ou au moins rapportée à celle de la chaudière, et que la surface de chauffe S est le produit de la partie de circonférence chauffée par la longueur, on trouvera cette dernière valeur en opérant la division de la surface effective 25 par l'expression précédente.

On aura donc pour l'exemple ci-dessus :

$$L = \frac{2 \times S}{\pi (D + 3d)} = \frac{50^{m.q.}}{3{,}1416\ (1^m + 3 \times 0{,}60)} = 5^m 68.$$

La longueur uniforme du générateur serait donc égale à $5^m 68$.

Nous lui avons donné $5^m 50$ pour le corps cylindrique principal et $6^m 00$ pour chacun des deux bouilleurs, ce qui revient à un résultat à peu près égal. Il n'est pas tenu compte des fonds de la chaudière ni des tubulures ou jambes de communication qui ajoutent à la superficie totale; car celle-ci se trouvant un peu diminuée par l'épaisseur de la cloison centrale, au-dessous de la chaudière, il en résulte une compensation suffisamment exacte pour qu'il ne soit pas nécessaire de compliquer davantage les opérations.

En faisant cette évaluation, nous avons considéré les diamètres comme donnés à l'avance, ce qui existe en effet le plus généralement; cependant ils ne sont pas complétement arbitraires; la pratique conduit, au contraire, à adopter des diamètres qui ne varient pas dans de grandes limites, surtout pour des générateurs à bouilleurs.

A ce sujet, nous ferons remarquer que des constructeurs se sont laissés trop souvent entraîner, pour les faibles puissances, à adopter le système à un ou deux bouilleurs, ce qui conduit à des dimensions trop petites, qui rendent le service plus difficile et augmentent d'ailleurs le prix de revient du générateur. Nous conseillons, dans ce cas, d'appliquer plutôt des chaudières sans bouilleurs, dont la construction est plus simple, et qui sont beaucoup plus faciles à entretenir.

Lorsque la puissance évaporatoire doit être considérable, on n'augmente pas pour cela démesurément les dimensions du générateur; on doit plutôt en appliquer deux ou trois, ce qui est toujours préférable pour un service régulier et plus ou moins continu.

Si donc on interroge les nécessités de la pratique, on ne tarde pas à reconnaître :

1° Que le diamètre du corps principal de la chaudière, à l'exception de petites

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

puissances, est rarement au-dessous de $0^m80$, dimension convenable pour une bonne fabrication et pour un service régulier;

2° Que ce diamètre ne s'élève généralement pas au-dessus de $1^m30$, attendu que les épaisseurs des parois devant augmenter, à pressions égales, avec le diamètre, on pourrait se trouver dans l'obligation d'employer des tôles trop fortes qui se travaillent plus difficilement et qui sont plus susceptibles d'éprouver des coups de feu que les tôles minces;

3° Que le diamètre d'un bouilleur ne peut pas être inférieur, en pratique, à $0^m40$, parce que le cintrage de la tôle devient trop prononcé, eu égard à la cohésion du métal, si les épaisseurs sont fortes, ce qui doit être quand on marche à de grandes pressions; que d'ailleurs cette dimension ne permet plus d'entrer dans le bouilleur soit pour le nettoyer, soit pour y faire une réparation; et qu'enfin l'épaisseur de la couche de dépôt qui se forme avec l'emploi des eaux plus ou moins calcaires étant la même pour tous les diamètres, la diminution de capacité qui en résulte est infiniment plus sensible pour un petit bouilleur que pour un grand;

4° Mais le diamètre des bouilleurs ne doit pas dépasser $0^m65$ à $0^m70$, car ces dimensions suffisent pour permettre d'y pénétrer aisément, et elles n'exigent pas des tôles trop épaisses; si on les faisait plus grands, on accroîtrait inutilement le volume d'eau bouillante et l'on ferait une plus forte dépense pour la partie du générateur qui se détruit beaucoup plus rapidement que les autres.

D'après cela, nous croyons être parfaitement en mesure d'établir des séries de générateurs dans des proportions convenables avec les puissances évaporatoires.

Nous formons à cet effet trois catégories distinctes qui sont :

1° Les chaudières cylindriques sans bouilleurs;

2° Les chaudières cylindriques avec un bouilleur;

3° Les chaudières cylindriques avec deux bouilleurs.

On fait quelquefois, pour de grandes puissances, des chaudières cylindriques à trois bouilleurs; mais c'est extrêmement rare, surtout aujourd'hui. D'ailleurs on arrive ainsi à un appareil beaucoup plus difficile à construire et à entretenir, sans compensation à l'égard de l'effet produit. La répartition du chauffage est également plus difficile à régler qu'avec les générateurs composés d'un moindre nombre de corps.

En recherchant les relations qui doivent exister entre les principales parties de ces générateurs, nous avons admis, d'une part, que la longueur, dans la première série, ne dépasse guère 6 mètres; que, dans la seconde, elle ne dépasse pas 7 mètres; et que, dans la troisième, elle puisse atteindre 10 à 12 mètres au plus.

D'autre part, nous admettons :

Que, pour les chaudières sans bouilleurs, établies pour des puissances inférieures à 10 mètres carrés de surface évaporatoire, le diamètre ne se trouve pas au-dessous de $0^m60$ et ne s'élève pas au-dessus de $1^m10$;

Que, dans les chaudières à un seul bouilleur, particulièrement appliquées dans les puissances de 8 à 20 mètres carrés, le diamètre du corps principal n'est pas inférieur à $0^m75$, ni supérieur également à 1,10, et que le diamètre correspondant du bouilleur est limité entre $0^m40$ et $0^m60$;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Qu'enfin, pour les chaudières à deux bouilleurs, que nous supposons employées depuis 15 jusqu'à 56 mètres de surface évaporatoire, le diamètre du corps principal se trouve compris entre 0,80 et $1^m30$ au plus, et ceux des bouilleurs entre $0^m45$ et $0^m70$.

Quant aux puissances supérieures à 56 mètres carrés, nous conseillons de créer plutôt deux générateurs ayant chacun des diamètres proportionnellement moindres : c'est infiniment préférable sous le double rapport du service et de la sécurité.

Lorsqu'on n'a qu'un seul corps de chaudière, on doit admettre que la moitié seulement de la surface extérieure est exposée à la chaleur; il en résulte naturellement que la surface de chauffe S est égale à

$$S = \frac{\pi D L}{2}.$$

Par conséquent, la longueur de la chaudière devient :

$$L = \frac{2S}{\pi D} = 0{,}636\,\frac{S}{D}, \qquad (A)$$

c'est-à-dire que, lorsqu'on se donne le diamètre D de la chaudière, on détermine la longueur qu'elle doit avoir : *en multipliant la surface de chauffe donnée par* 0,636, *et en divisant le produit par le diamètre exprimé en mètres.*

Exemple. — Supposons une chaudière sans bouilleurs devant avoir 6 mètres carrés de surface évaporatoire; quelle en sera sa longueur si on lui donne $0^m80$ de diamètre?

*Solution* (formule A). On a :

$$L = \frac{0{,}636 \times 6^{m.q.}}{0^m8} = 4^m80.$$

La même chaudière devrait avoir $5^m10$ de longueur si on lui supposait un diamètre de $0^m75$.

Pour une chaudière à un bouilleur, on admet que la surface de chauffe est également la moitié de la surface totale de l'une et les trois quarts de celle de l'autre; soit, par suite :

$$S = L\left(\frac{1}{2}\pi D + \frac{3}{4}\pi d\right);$$

d'où la longueur devient :

$$L = \frac{4S}{\pi\,(2D + 3d)} = 1{,}272\,\frac{S}{2D + 3d}. \qquad (B)$$

Ainsi, dans le cas d'une chaudière à un bouilleur, dont on connaît les diamètres D et *d*, on détermine la longueur correspondante, suivant la surface évaporatoire qu'elle doit avoir : *en multipliant celle-ci par* 1,272, *et en divisant le produit par le double du diamètre* D *de la chaudière, ajouté à trois fois le diamètre* d *du bouilleur.*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Exemple. — Soit un générateur à un bouilleur d'une puissance évaporatoire de 12 mètres carrés, quelle sera la longueur à lui donner, en admettant que le diamètre du corps de la chaudière soit de $0^m90$, et celui du bouilleur de $0^m50$?

*Solution* (formule B). On a :

$$L = \frac{1,272 \times 12^{m.q.}}{2 \times 0^m90 + 3 \times 0,50} = \frac{15,264}{1,80 + 1,50} = 4^m62.$$

Ce générateur devrait avoir 5 mètres de longueur si on n'adoptait que $0^m85$ et $0^m45$ pour les diamètres D et $d$.

On a vu plus haut que, dans le cas qui se présente le plus généralement en pratique, celui d'une chaudière à deux bouilleurs, la surface de chauffe utile est calculée sur la moitié de la surface totale du corps de la chaudière, et sur les trois quarts de celle des deux bouilleurs; ainsi, nous avons trouvé :

$$S = \frac{\pi (D + 3d)}{2},$$

d'où nous en avons déduit la longueur par l'expression suivante :

$$L = \frac{2S}{\pi (D + 3d)} = 0,636 \frac{S}{D + 3d}. \qquad (C)$$

C'est-à-dire que la longueur du générateur est déterminée : *en multipliant la surface de chauffe par le nombre* 0,636, *et en divisant le produit par le diamètre du corps de la chaudière, augmenté de trois fois celui de l'un des bouilleurs.*

Exemple. — Quelle est la longueur d'un générateur à bouilleurs qui doit présenter une surface évaporatoire de 30 mètres carrés, en admettant que le corps de la chaudière ait un diamètre de $1^m20$, et que les bouilleurs aient $0^m65$?

*Solution* (formule C). On a :

$$L = \frac{0,636 \times 30}{1^m20 + 3 \times 0,65} = \frac{19,08}{3,15} = 6^m06.$$

Ce générateur devrait avoir une longueur de $6^m80$ si les diamètres D et $d$ étaient de $1^m$ et $0^m60$.

Comme complément du sujet, nous donnons la table suivante calculée avec les formules précédentes pour les trois genres de générateurs cylindriques avec et sans bouilleurs, et en supposant que les diamètres varient dans les limites de la pratique que nous avons indiquées.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## TABLE DES DIMENSIONS PRINCIPALES

DES CHAUDIÈRES CYLINDRIQUES SANS BOUILLEURS ET AVEC UN BOUILLEUR, CALCULÉES A RAISON DE 12 KILOG. D'EAU VAPORISÉE PAR HEURE ET PAR MÈTRE CARRÉ DE SURFACE DE CHAUFFE.

| CHAUDIÈRES SANS BOUILLEURS. | | | | CHAUDIÈRES A UN BOUILLEUR. | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SURFACE de chauffe. | POIDS d'eau vaporisée par heure. | DIAMÈTRE de la chaudière. | LONGUEUR de la chaudière. | SURFACE de chauffe. | POIDS d'eau vaporisée par heure. | DIAMÈTRE de la chaudière. | DIAMÈTRE du bouilleur. | LONGUEUR de la chaudière et du bouilleur. |
| mèt. car. | kilog. | mètres. | mètres. | m. car. | kilogr. | mètres. | mètres. | mètres. |
| 1 | 12 | 0,60 | 1,05 | 8 | 96 | 0,75 | 0,40 | 3,77 |
| | | 0,65 | 0,98 | | | 0,80 | 0,40 | 3,64 |
| | | 0,70 | 0,91 | | | 0,85 | 0,45 | 3,34 |
| | | 0,75 | 0,85 | | | 0,90 | 0,50 | 3,08 |
| 2 | 24 | 0,65 | 1,96 | 9 | 108 | 0,80 | 0,40 | 4,09 |
| | | 0,70 | 1,82 | | | 0,85 | 0,45 | 3,75 |
| | | 0,75 | 1,70 | | | 0,90 | 0,50 | 3,47 |
| | | 0,80 | 1,60 | | | | | |
| 3 | 36 | 0,65 | 2,94 | 10 | 120 | 0,85 | 0,45 | 4,17 |
| | | 0,70 | 2,73 | | | 0,90 | 0,50 | 3,86 |
| | | 0,75 | 2,55 | | | 0,95 | 0,55 | 3,61 |
| | | 0,80 | 2,40 | | | | | |
| 4 | 48 | 0,70 | 3,64 | 11 | 132 | 0,85 | 0,45 | 4,59 |
| | | 0,75 | 3,40 | | | 0,90 | 0,50 | 4,26 |
| | | 0,80 | 3,20 | | | 0,95 | 0,55 | 3,97 |
| | | 0,85 | 3,00 | | | | | |
| 5 | 60 | 0,70 | 4,55 | 12 | 144 | 0,85 | 0,45 | 5,00 |
| | | 0,75 | 4,25 | | | 0,90 | 0,50 | 4,63 |
| | | 0,80 | 4,00 | | | 0,95 | 0,55 | 4,32 |
| | | 0,85 | 3,75 | | | | | |
| 6 | 72 | 0,75 | 5,10 | 13 | 156 | 0,85 | 0,45 | 5,42 |
| | | 0,80 | 4,80 | | | 0,90 | 0,50 | 5,01 |
| | | 0,85 | 4,50 | | | 0,95 | 0,55 | 4,69 |
| | | 0,90 | 4,20 | | | | | |
| 7 | 84 | 0,80 | 5,60 | 14 | 168 | 0,85 | 0,45 | 5,84 |
| | | 0,85 | 5,25 | | | 0,90 | 0,50 | 5,39 |
| | | 0,90 | 4,95 | | | 0,95 | 0,55 | 5,05 |
| | | 0,95 | 4,69 | | | | | |
| 8 | 96 | 0,80 | 6,40 | 15 | 180 | 0,90 | 0,50 | 5,78 |
| | | 0,85 | 6,00 | | | 0,95 | 0,55 | 5,42 |
| | | 0,90 | 5,66 | | | 1,00 | 0,55 | 5,23 |
| | | 0,95 | 5,37 | | | | | |
| 9 | 108 | 0,90 | 6,36 | 16 | 192 | 0,90 | 0,50 | 6,16 |
| | | 0,95 | 6,03 | | | 0,95 | 0,55 | 5,78 |
| | | 1,00 | 5,72 | | | 1,00 | 0,55 | 5,58 |
| | | 1,05 | 5,45 | | | | | |
| 10 | 120 | 0,95 | 6,70 | 17 | 204 | 0,90 | 0,50 | 6,55 |
| | | 1,00 | 6,35 | | | 0,95 | 0,55 | 6,14 |
| | | 1,05 | 6,00 | | | 1,00 | 0,55 | 5,92 |
| | | 1,10 | 5,78 | | | | | |
| | | | | 18 | 216 | 0,95 | 0,55 | 6,50 |
| | | | | | | 1,00 | 0,55 | 6,27 |
| | | | | | | 1,05 | 0,60 | 5,87 |
| | | | | 19 | 228 | 0,95 | 0,55 | 6,86 |
| | | | | | | 1,00 | 0,55 | 6,62 |
| | | | | | | 1,05 | 0,60 | 6,20 |
| | | | | 20 | 240 | 1,00 | 0,55 | 6,97 |
| | | | | | | 1,05 | 0,60 | 6,52 |
| | | | | | | 1,10 | 0,60 | 6,36 |

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## TABLE DES DIMENSIONS PRINCIPALES

DES CHAUDIÈRES CYLINDRIQUES A DEUX BOUILLEURS CALCULÉES A RAISON DE 12 KILOGRAMMES D'EAU VAPORISÉE PAR HEURE ET PAR MÈTRE CARRÉ DE SURFACE DE CHAUFFE.

| SURFACE de chauffe. | POIDS d'eau vaporisée par heure. | DIAMÈTRE de la chaudière | DIAMÈTRE des bouilleurs. | LONGUEUR de la chaudière et des bouilleurs. | SURFACE de chauffe. | POIDS d'eau vaporisée par heure. | DIAMÈTRE de la chaudière. | DIAMÈTRE des bouilleurs. | LONGUEUR de la chaudière et des bouilleurs. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| mèt. car. | kilog. | mètres. | mètres. | mètres. | mèt. car. | kilog. | mètres. | mètres. | mètres. |
| | | 0,80 | 0,45 | 4,43 | | | 1,10 | 0,60 | 7,87 |
| 15 | 180 | 0,85 | 0,50 | 4,03 | 36 | 432 | 1,20 | 0,65 | 7,27 |
| | | 0,90 | 0,50 | 3,58 | | | 1,30 | 0,70 | 6,73 |
| | | 0,80 | 0,45 | 4,72 | | | 1,10 | 0,60 | 8,20 |
| 16 | 192 | 0,80 | 0,50 | 4,32 | 38 | 456 | 1,20 | 0,65 | 7,68 |
| | | 0,90 | 0,50 | 4,14 | | | 1,30 | 0,70 | 7,11 |
| | | 0,80 | 0,45 | 5,32 | | | 1,10 | 0,60 | 8,73 |
| 18 | 216 | 0,85 | 0,50 | 4,86 | 40 | 480 | 1,20 | 0,65 | 8,08 |
| | | 0,90 | 0,50 | 4,67 | | | 1,30 | 0,70 | 7,48 |
| | | 0,80 | 0,45 | 5,90 | | | 1,10 | 0,60 | 9,15 |
| 20 | 240 | 0,85 | 0,50 | 5,40 | 42 | 504 | 1,20 | 0,65 | 8,48 |
| | | 0,90 | 0,50 | 5,20 | | | 1,30 | 0,70 | 7,85 |
| | | 0,90 | 0,50 | 5,73 | | | 1,10 | 0,60 | 9,58 |
| 22 | 264 | 0,95 | 0,55 | 5,39 | 44 | 528 | 1,20 | 0,65 | 8,89 |
| | | 1,00 | 0,60 | 5,00 | | | 1,30 | 0,70 | 8,23 |
| | | 0,90 | 0,50 | 6,26 | | | 1,10 | 0,60 | 9,80 |
| 24 | 288 | 0,95 | 0,55 | 5,88 | 45 | 540 | 1,20 | 0,65 | 9,09 |
| | | 1,00 | 0,60 | 5,45 | | | 1,30 | 0,70 | 8,42 |
| | | 0,90 | 0,50 | 6,53 | | | 1,10 | 0,60 | 10,02 |
| 25 | 300 | 1,00 | 0,60 | 5,68 | 46 | 552 | 1,20 | 0,65 | 9,49 |
| | | 1,10 | 0,60 | 5,48 | | | 1,30 | 0,70 | 8,60 |
| | | 1,00 | 0,60 | 5,90 | | | 1,10 | 0,60 | 10,45 |
| 26 | 312 | 1,05 | 0,60 | 5,80 | 48 | 576 | 1,20 | 0,65 | 9,50 |
| | | 1,10 | 0,60 | 5,70 | | | 1,30 | 0,70 | 8,98 |
| | | 1,00 | 0,60 | 6,36 | | | 1,10 | 0,60 | 10,95 |
| 28 | 336 | 1,05 | 0,60 | 6,24 | 50 | 600 | 1,20 | 0,65 | 10,30 |
| | | 1,10 | 0,60 | 6,13 | | | 1,30 | 0,70 | 9,35 |
| | | 1,00 | 0,60 | 6,82 | | | 1,10 | 0,60 | 11,38 |
| 30 | 360 | 1,10 | 0,60 | 6,58 | 52 | 624 | 1,20 | 0,65 | 10,71 |
| | | 1,20 | 0,65 | 6,06 | | | 1,30 | 0,70 | 9,72 |
| | | 1,10 | 0,60 | 7,00 | | | 1,10 | 0,60 | 11,81 |
| 32 | 384 | 1,15 | 0,65 | 6,56 | 54 | 648 | 1,20 | 0,65 | 11,11 |
| | | 1,20 | 0,65 | 6,46 | | | 1,30 | 0,70 | 10,10 |
| | | 1,10 | 0,60 | 7,43 | | | 1,10 | 0,60 | 12,03 |
| 34 | 408 | 1,15 | 0,65 | 6,97 | 55 | 660 | 1,20 | 0,65 | 11,31 |
| | | 1,20 | 0,65 | 6,87 | | | 1,30 | 0,70 | 10,29 |
| | | 1,10 | 0,60 | 7,65 | | | 1,10 | 0,60 | 12,24 |
| 35 | 420 | 1,20 | 0,65 | 7,07 | 56 | 672 | 1,20 | 0,65 | 11,42 |
| | | 1,30 | 0,70 | 6,55 | | | 1,30 | 0,70 | 10,47 |

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La première partie de cette table comprend le système de chaudières sans bouilleurs, employées principalement, comme nous l'avons dit, pour les plus petites forces, depuis 1 mètre carré de surface évaporatoire jusqu'à 10 mètres carrés (1).

La seconde partie embrasse les chaudières à un bouilleur, depuis 8 jusqu'à 20 mètres carrés de surface de chauffe, avec trois variétés de diamètres.

Et enfin la troisième partie, qui est la plus étendue, comme devant s'appliquer à un plus grand nombre, comprend les chaudières à deux bouilleurs, depuis 15 jusqu'à 56 mètres carrés; pour cette dernière limite, on arrive à des dimensions très-grandes, pour lesquelles il faut un emplacement considérable.

Dans tous les cas, nous avons supposé que la puissance évaporatoire de chaque chaudière est seulement de 12 kilogrammes d'eau par heure et par mètre carré.

Sans doute une telle table n'a rien d'absolu, puisque chaque dimension peut varier à volonté; mais nous avons pensé qu'elle servirait comme un guide très-utile dans la pratique, que l'on sera bien aise de consulter toutes les fois qu'il s'agira de faire le choix d'un générateur, ou d'en connaître approximativement la valeur.

A l'aide de cette table il sera toujours facile de connaître les dimensions très-approchées d'un générateur dont on donne la puissance évaporatoire, exprimée soit en mètres carrés soit en kilogrammes d'eau vaporisée à l'heure; on verra plus loin comment on peut en faire le rapport avec une puissance dynamique déterminée.

Remarque sur les volumes d'eau. — Bien que le volume d'eau contenu par un générateur, comparé à sa puissance vaporisatoire, ne soit plus guère une question en pratique, il ne sera peut-être pas inutile de se rendre compte de ce qui a lieu avec les chaudières cylindriques dont on vient d'examiner les dimensions, afin de répondre à une objection qui se présente lorsqu'on propose d'autres systèmes où le volume d'eau liquide permanent est presque complétement nul.

Si, d'un côté, posséder un générateur qui renferme un très-grand volume d'eau toujours prêt à passer en vapeur est certainement un danger sur lequel l'administration a compté, en classant les générateurs suivant plusieurs catégories caractérisées par les volumes d'eau plus ou moins grands qu'ils renferment; d'un autre côté, avoir une chaudière dont la capacité pour l'eau dépasse peu le volume vaporisé et dépensé à l'unité de temps, est aussi un grave inconvénient; car alors, si elle est moins susceptible d'explosions dangereuses, elle peut être aussi susceptible d'explosions fréquentes, et rend en outre très-difficile la conduite du foyer pour obtenir une vaporisation régulière. Un volume très-petit de liquide prêt à se vaporiser suppose, d'ailleurs, une fixité de marche et de dépense qui ne se rencontre guère en pratique.

Les tables précédentes nous permettent d'évaluer facilement les volumes de chaque générateur dont elles donnent en même temps la puissance vaporisatoire.

Ainsi, le premier générateur de la série, qui correspond à 12 kilogrammes d'eau

(1) Il y a des localités, comme en Belgique, où l'on emploie beaucoup de chaudières cylindriques sans bouilleurs, sur des dimensions très-grandes, à cause de la simplicité et de l'économie de construction.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vaporisée par heure, consiste en un corps unique qui a les dimensions suivantes :

Diamètre..... = $0^m60$
Longueur..... = $1^m06$

Étant rempli d'eau à moitié, plus environ 5 centimètres au-dessus de son centre, ce volume devient :

$$\left[\left(\frac{1}{2}\,0{,}7854 \times \overline{0{,}6}^{2}\right) + 0{,}05 \times 0^m60\right] \times 1^m06 = 0^{m.c.}182,$$

ou 182 litres; le rapport de ce volume à celui de la vaporisation par heure égale par conséquent :

$$\frac{182}{12} = 15{,}1.$$

Si nous prenons, au contraire, un des derniers générateurs de la série, celui de 600 kilogrammes ou litres d'eau vaporisée par heure, avec les dimensions suivantes :

| | | |
|---|---|---|
| *Chaudière*.. | Diamètre..... | 1,10 |
| | Longueur..... | 10,95 |
| *Bouilleur*... | Diamètre..... | 0,60 |

nous trouvons que le volume d'eau contenu sera environ :

*Chaudière*. $\left[\left(\frac{1}{2} \times 0{,}7854 \times \overline{1{,}1}^{2}\right) + 0^m1 \times 1^m10\right] \times 10{,}95 = 6^{m.c.}408$

*Bouilleurs*.. $2 \times 0{,}7854 \times \overline{0{,}6}^{2} \times 10{,}95 \ldots\ldots = 6^{m.c.}191$

$12^{m.c.}599$

Soit 12600 litres d'eau dont le rapport avec la vaporisation par heure égale :

$$\frac{12600}{600} = 21.$$

Par conséquent, la disposition des générateurs à corps cylindriques est telle que, dans les limites de dimensions les plus extrêmes, le volume d'eau contenu équivaut à 15 ou 20 fois celui vaporisé par heure.

Cette valeur est certainement un maximum; mais la réserve d'eau des chaudières tubulaires, qui est néanmoins suffisante, est de beaucoup inférieure, et ne dépasse guère, généralement, 5 à 6 fois la dépense d'eau par heure.

Nous pensons que c'est là au moins la limite qui ne devrait pas être franchie, et qu'un générateur ne devrait pas contenir moins de 5 fois la quantité d'eau qu'il est capable de transformer en vapeur par heure.

Pour s'exprimer d'une manière générale, on peut dire que le volume d'eau liquide correspond, pour les générateurs cylindriques, à environ 200 litres par mètre de surface de chauffe; et, au minimum, quel que soit le système d'appareil, ne doit pas être au-dessous de 60 litres par mètre carré.

Tredgold, dans son *Traité des machines à vapeur*, démontre qu'une chaudière cylin-



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

drique doit contenir 9 à 12 fois la quantité d'eau qu'elle peut vaporiser par heure, tout en disant que ce volume pourrait être réduit à 5 fois si l'appareil d'alimentation fonctionnait continuellement.

Si nos chaudières cylindriques contiennent davantage, cela tient à ce que nous donnons aux surfaces de chauffe une plus grande étendue pour un même poids d'eau vaporisée.

D'ailleurs, on a vu que le volume n'est pas la donnée primitive, mais seulement la conséquence de la forme et de l'étendue de surface à obtenir.

Résumons-nous donc en disant que le volume d'eau pourra être diminué autant que possible, suivant le système, mais sans descendre néanmoins au-dessous de 5 fois celui vaporisé par heure.

### DIMENSIONS DES GRILLES

La superficie d'une grille doit être mesurée par la quantité de combustible à brûler dans l'unité de temps, et cette quantité dépend, ainsi qu'on le sait, du poids d'eau correspondant à vaporiser. Mais, puisque, comme nous l'avons vu, la surface de chauffe lui est proportionnelle, on peut aussi rapporter la superficie de la grille à cette dernière.

Le premier point à déterminer sera la quantité de combustible que l'on peut brûler par unité de superficie de grille.

A cet égard, la théorie pure ne fournit pas de renseignements positifs; et d'autre part la pratique a démontré que, sur une même grille, on pouvait brûler des quantités bien différentes d'un même combustible; on a souvent brûlé aussi bien 100 kilogrammes de houille par mètre carré de grille que 50 et 40 : il est évident que ces conditions devaient dépendre à la fois de la qualité du combustible, de l'épaisseur de la couche et de la réglementation du tirage. Mais aujourd'hui que l'établissement des foyers a été perfectionné de façon à correspondre aux bonnes machines qui économisent si bien la vapeur, on possède des renseignements pratiques assez arrêtés sur ce sujet important.

Les constructeurs sont d'accord pour admettre que l'on ne doit pas dépasser 45 à 50 kilogrammes de houille brûlée par mètre carré de grille et par heure, autant pour l'économie du combustible que pour ne pas fatiguer le fourneau par une combustion trop active. Pour d'autres combustibles, cette valeur se modifie nécessairement d'après la rapidité plus ou moins grande avec laquelle ils brûlent.

Ce chiffre admis pour la houille moyenne, cherchons tout d'abord sa relation avec la production de vapeur pour le comparer à la surface de chauffe.

Nous avons examiné avec quelques détails (32) la méthode qui permet de trouver la quantité d'unités de chaleur à fournir à 1 kilogramme d'eau pour le réduire en vapeur, et d'autre part (33 et suiv.), la quantité de calories que peut donner 1 kilogramme d'un combustible déterminé.

Rappelons à ce sujet que, pour transformer un kilogramme d'eau à 0° en vapeur à une atmosphère, il faut en unités de chaleur utiles :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$$c = 100^{\circ} - 0^{\circ} + 537 = 637 \text{ calories ou unités de chaleur.}$$

Pour une pression plus élevée, celle qui correspond au maximum du générateur, soit 6 atmosphères, par exemple, la quantité serait un peu différente, et peut être déterminée en se reportant aux tables (9 et 31) des températures et du calorique latent de vaporisation.

Ces tables donnant 160° pour la température de la vapeur à 6 atmosphères et 494° pour son calorique latent de vaporisation, la relation ci-dessus fournit pour ce second cas :

$$c = 160^{\circ} - 0^{\circ} + 494 = 654 \text{ calories.}$$

Ainsi, on s'en tiendrait au premier résultat qu'on ne commettrait pas d'erreur pratique, en raison des pertes de chaleur forcées qui sont bien plus importantes, auxquelles il faut parer et qui sont presque inévitables.

En adoptant ce chiffre maximum, et celui de 7600 unités que peut fournir 1 kilogramme de houille moyenne, nous trouvons qu'un kilogramme de houille vaporiserait dans les mêmes conditions :

$$\frac{7600}{654} = 11{,}6 \text{ kilogrammes d'eau,}$$

de 0° à 6 atmosphères. (L'eau n'est jamais prise à 0°; mais nous pouvons adopter cette base, puisqu'il s'agit d'établir des dimensions qui doivent être plutôt fortes que faibles.)

Mais dans la pratique ordinaire on ne compte pas sur plus de 6 à 7 kilogrammes d'eau vaporisée par kilogramme de houille réellement brûlée ; puisqu'un mètre carré de surface de chauffe correspond à une vaporisation de 12 kilogrammes par heure, cela représente donc en moyenne

$$\frac{12}{6{,}5} = 1^{k}85 \text{ de houille}$$

consommée pour 1 mètre carré de surface de chauffe. Par conséquent, si la combustion s'opère à raison de 50 kilogrammes de charbon par mètre carré de grille, la quantité proportionnelle pour la surface de chauffe devient :

$$\frac{1^{m.q.} \times 1^{k}85}{50^{k}} = 0^{m.q.}037 ;$$

ce qui revient à dire que :

*La surface de la grille doit être les* 37/1000 *de la surface de chauffe totale; ou encore qu'elle doit correspondre à* 3,7 *décimètres carrés par mètre carré de surface de chauffe.*

La grille du générateur que nous prenons pour type (pl. 1) a $1^{m}20$ sur 0,90, ce qui fait 108 décimètres carrés ; c'est un peu plus que ne produirait cette règle, qui ne donne que :

$$25^{m.q.} \times 0{,}037 = 0^{m.q.}925,$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

au lieu de $1^{m.q.}08$, qui revient à prendre les 0,04, environ, de la surface de chauffe.

Déjà on a vu que ce léger excès, étant loin d'être nuisible, permettrait de pousser la vaporisation un peu au-dessus de sa valeur nominale. En effet, tout en conservant la quantité de combustible brûlé par unité de surface, on pourrait vaporiser :

$$\frac{50 \times 1{,}08 \times 6{,}5}{25} = 14 \text{ kilogrammes d'eau}$$

par heure et par mètre carré de surface de chauffe.

Mais on doit produire réellement, si le générateur est bien conduit, 7 kilogrammes de vapeur par kilogramme de houille brûlée; en maintenant, pour cela, la vaporisation à 12 kilogrammes par mètre de chauffe, la quantité totale de houille brûlée par heure sera seulement de

$$\frac{25 \times 12}{7} = 42^{k}86,$$

et par décimètre carré :

$$\frac{42^{k}86}{108^{d.c.}} = 0^{k}396,$$

soit 0,4 kilogramme de houille par décimètre et par heure.

Toutes ces conditions sont très-convenables pour un générateur chauffé avec de la houille ordinaire; mais on emploie aussi le coke, la tourbe, le bois et même la sciure de bois, pour lesquels combustibles les dimensions des grilles et leur construction diffèrent évidemment.

Ajoutons maintenant, quant à la puissance des grilles en général, que cette puissance ne dépend pas seulement de la dimension, mais qu'elle est surtout dépendante du tirage sous l'influence duquel il passe un volume d'air plus ou moins considérable au travers des barreaux. C'est pour cela que, dans l'hypothèse ci-dessus de la quantité de combustible brûlé, rapportée à l'unité de surface de grille, nous avons supposé le tirage réglé convenablement pour y correspondre, ce qui est toujours possible d'obtenir.

Par conséquent, pour brûler une même quantité de combustible, on peut établir un foyer avec une faible grille et un fort tirage, ou avec une grande grille et un tirage faible; on a dans le premier cas une combustion vive, et dans le deuxième, une combustion lente : c'est sur ce dernier principe que sont basées les relations données précédemment, principe qui est le plus généralement adopté pour les générateurs fixes et qui paraît donner de bons résultats.

Lorsque M. Péclet fit son savant traité de la chaleur, il était déjà de cet avis, que les grandes grilles étaient les plus favorables à l'économie, quoique un peu plus délicates à diriger que les petites. Il ajoutait, du reste, que les grandes grilles, donnant une combustion d'une intensité modérée, lui paraissaient indispensables pour ménager le métal du vase que l'on chauffe s'il ne doit pas atteindre une température élevée; c'est ce que la pratique justifie encore à l'égard des générateurs à vapeur qui sont précisément dans ce cas.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## SECTION DE LA CHEMINÉE ET DES CARNEAUX

Cheminée. — La section de la cheminée et celle des carneaux se déterminent aujourd'hui d'une manière aussi simple et pratique que les autres parties du générateur. Cependant, nous dirons quelques mots des principes rigoureux sur lesquels on pourrait s'appuyer s'il n'existait pas de faits pratiques acquis pour procéder à cette détermination.

La théorie indique que l'on doit considérer une cheminée comme un conduit offert à l'écoulement d'un gaz dans des conditions analogues à ce qui a été dit précédemment (51), à propos du calcul de la dépense de la vapeur ou d'un gaz quelconque par un conduit d'une longueur et d'un diamètre déterminés.

Il s'établit, en effet, dans la cheminée d'un générateur un courant d'air chaud dont la vitesse dépend à la fois de la hauteur totale de la cheminée comptée verticalement depuis l'entrée du foyer jusqu'à son sommet, de la légèreté spécifique du gaz en mouvement, et du rapport entre la dimension transversale minimum de la cheminée et sa hauteur, plus la longueur du circuit que l'air est obligé de parcourir avant de parvenir à la cheminée. Dans ce circuit complet, la hauteur verticale est la seule cause motrice de l'élévation de l'air chaud; l'autre partie du circuit, c'est-à-dire les carneaux et la grille, s'ajoute à la hauteur de la cheminée pour constituer le développement total des parois qui retardent la vitesse de l'air par son frottement contre elles.

Les causes qui modifient la vitesse théorique de l'écoulement de l'air sont donc les mêmes que lorsqu'il s'agit de l'écoulement d'un gaz, par un conduit, sous l'influence d'un excès de pression initiale sur celle du milieu où se fait l'écoulement.

De même aussi les volumes d'air chaud écoulés dans l'unité de temps seront exprimés par le produit de cette vitesse effective dans le même temps, par la section de l'orifice où on la considère.

Or, l'activité d'un foyer est mesurée par la quantité d'air froid qu'il faut lui fournir dans un temps donné pour opérer dans le même temps la combustion complète d'un poids déterminé de combustible; par conséquent, les éléments nécessaires à la détermination de la puissance d'une cheminée, ou de *son tirage*, se trouvent complétement déterminés, sauf le rapport à adopter entre sa hauteur et sa section transversale, qui pourraient varier réciproquement pour un même résultat à obtenir.

Mais outre qu'il est nécessaire de donner aux cheminées une hauteur suffisante pour rejeter les produits nuisibles de la combustion, dans une région de l'atmosphère assez élevée pour qu'ils n'incommodent pas, il est remarquable aussi que la cheminée a d'autant plus d'influence sur le tirage que sa hauteur forme une plus grande partie du parcours total depuis l'entrée du foyer, en raison de la résistance que ce dernier et les divers carneaux ou conduits présentent au mouvement de l'air.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ces considérations diverses conduisent à ne pas donner moins de 15 mètres de hauteur à la cheminée d'un générateur fixe, quelle que soit sa puissance; et cette hauteur atteint souvent une valeur beaucoup plus grande, soit 30 mètres et plus.

Partant de ces premières données générales, voici en quoi consiste la méthode enseignée par le physicien Péclet, pour déterminer les dimensions transversales d'une cheminée, connaissant sa hauteur ainsi que le poids et l'espèce de combustible que l'air doit alimenter dans un temps donné.

Il est nécessaire de fournir à 1 kilogramme de houille moyenne, pour en opérer la combustion complète, un volume de 18 mètres cubes d'air froid qui doit lui parvenir par la grille, et qui s'écoule par la cheminée à peu près transformé en acide carbonique, mais dont le volume augmente en raison de la dilatation qui résulte de l'élévation de température. Péclet admet que la moitié environ de ce volume d'air échappe à la combustion : c'est donc une valeur toute pratique.

Le meilleur effet et le maximum de tirage paraissent être obtenus quand l'air chaud conserve dans la cheminée une température voisine de 300 degrés centigrades; par conséquent, le volume Q d'air froid s'est dilaté et est devenu Q′.

Ce volume se détermine facilement en faisant le produit de Q par la somme de l'unité et du coefficient de dilatation $a$, multiplié par la température, coefficient qui est égal, pour l'acide carbonique (d'après M. Regnault), à 0,00369.

Soit alors :

$$Q' = Q\,at = 18\,(1 + [0{,}00369 \times 300^{\circ}]) = 37^{\text{m. c.}}926$$

qui doivent s'écouler par la cheminée par chaque kilogramme de combustible consommé.

La formule de Péclet, pour trouver la dimension transversale d'une cheminée, est alors celle-ci :

$$D^5 = \frac{A^2\,(13D + 0{,}05L)}{2gP},$$

dans laquelle,

A représente le volume d'air chaud, en mètres cubes, qui doit s'écouler par 1″, et calculé comme ci-dessus;

L » la longueur totale, en mètres, du circuit que l'air doit parcourir depuis le foyer jusqu'au sommet de la cheminée;

P » la hauteur génératrice de la vitesse égale au produit de la hauteur de la cheminée par la température de l'air chaud et le coefficient de dilatation; soit $P = Hat$;

$g$ » l'intensité de la pesanteur égale à 9,8088;

D » le côté de la section intérieure de la cheminée supposée carrée.

Exemple. — Comme premier exemple de l'application de cette formule, prenons celui choisi par Péclet lui-même.

Trouver le côté D de la section carrée d'une cheminée dont la hauteur H égale 20 mètres, et qui doit appeler au foyer l'air nécessaire à la combustion de 50 kilo-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

grammes de houille à l'heure ; le circuit total L étant de 40 mètres, et en admettant que la température moyenne de l'air chaud dans la cheminée soit maintenue à 300°.

*Solution.* Les notions précédentes nous permettent de déterminer ainsi chacune des quantités complexes $A^2$ et $2gP$ qui composent la formule principale.

A étant le volume de gaz dilaté qui s'écoule par seconde et le poids de combustible étant de 50 kilogrammes par heure, nous trouvons :

$$A = \frac{37,926 \times 50}{3600} = 0^{m.c.}526; \quad \text{d'où } A^2 = 0,277,$$

$2g$ étant toujours équivalent à 19,62, il reste à déterminer P ; on trouve :

$$P = 20^m \times 0,00369 \times 300 = 22,14;$$

d'où,

$$2gP = 19,62 \times 22,14 = 438,39.$$

Introduisant ces valeurs dans l'expression générale, il vient :

$$D^5 = \frac{0,277\,(13D + [0,05 \times 40])}{438,39}.$$

Pour résoudre cette équation, on peut opérer d'une façon analogue à ce qui a été enseigné (57) pour le diamètre des conduites d'air. En négligeant d'abord le terme $0,05 \times 40$ du numérateur, il reste :

$$D^5 = \frac{0,277 \times 13 \times D}{438,39}, \text{ qui se réduit à : } D^4 = \frac{0,277 \times 13}{438,39},$$

et qui donne pour première valeur de D :

$$D = \sqrt[4]{\frac{0,277 \times 13}{438,39}} = 0^m30.$$

On reprend alors l'équation principale en donnant à D du numérateur cette première valeur, et on lui en trouve une seconde beaucoup plus approchée ; si cependant la deuxième valeur diffère beaucoup de la première, on refait une troisième opération en employant la deuxième valeur trouvée : la troisième valeur qui en résulte sera ordinairement celle qui peut être adoptée sans erreur sensible pour la pratique.

Nous aurons donc, pour le cas présent :

$$D = \sqrt[5]{\frac{0,277\,(13 \times 0,30 + [0,05 \times 40])}{438,39}} = 0^m327.$$

Si nous répétons encore cette opération une fois en adoptant cette deuxième valeur 0,327, nous trouvons, pour une troisième valeur de D, 0,33, qui ne diffère de la précédente que de 3 millimètres, ce qui nous prouve que nous possédons mainte-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nant la véritable valeur pratique de D, que l'on peut adopter sans aucune erreur préjudiciable et qui correspond à celle du côté du carré figurant la section minimum intérieure de la cheminée proposée.

Si la section doit être circulaire, rien n'est plus facile que de connaître le diamètre D′ du cercle équivalent en superficie; on aurait en effet :

$$D' = 0{,}33 \times \sqrt{\frac{4}{3{,}1416}} = 0^{m}372.$$

(Nous négligeons, bien entendu, la petite erreur qui provient de la différence de contour entre les sections carrées et circulaires équivalentes en surfaces, la dimension du contour figurant comme résistance dans la formule de Péclet.)

En résumé, la dimension ainsi déterminée est attribuable, comme section, à la cheminée et aux carneaux. Mais il est important de remarquer que la section de la cheminée ne doit pas être réduite à sa valeur rigoureusement exacte, car il ne serait pas possible de satisfaire à une consommation de combustible momentanément supérieure ou qui exigerait un tirage plus actif. Il faut, au contraire, augmenter un peu, pour la cheminée, la dimension trouvée et régler l'ouverture à l'aide d'un registre qui, ainsi qu'on l'a vu, se place sur le canal de communication entre le fourneau et la cheminée.

Ce registre serait mieux, sans doute, au sommet de la cheminée, car l'écoulement de l'air s'y ferait à plein tuyau; mais il serait beaucoup plus difficile à manœuvrer, ce qui fait qu'on l'installe habituellement comme nous l'indiquons pl. 1 et 3. Cependant, on sait qu'il se place ainsi pour les cheminées qui reçoivent l'air à une très-haute température, attendu qu'une trappe métallique placée à l'intérieur serait bientôt détruite; étant, au contraire, établie au-dessus de la cheminée, elle est continuellement rafraîchie par l'air extérieur.

Maintenant que nous avons entrevu les principes théoriques du calcul d'une cheminée, nous allons voir comment on peut plus facilement résoudre ce problème.

La cheminée représentée pl. 3, fig. 1re, est celle qui correspond au générateur type pl. 1re. Elle est précisément dans les mêmes conditions que celle supposée ci-dessus par Péclet, pour son exemple. Ainsi la consommation de houille est encore de 50 kilogrammes par heure, ainsi qu'on l'a vu; la hauteur, depuis la grille jusqu'au sommet, est égale à 20 mètres, et le développement du circuit total égal à 40 mètres.

Mais sa section intérieure, qui est à peu près égale dans toute la hauteur, a été déterminée proportionnellement à la surface de chauffe, sans tenir compte de la hauteur. Elle correspond à 0,7 décimètre carré par mètre carré de surface de chauffe, c'est-à-dire qu'elle en est les 7 millièmes. Soit :

$$25^{m.q.} \times 0{,}007 = 0^{m.q.}175 = 17{,}5 \text{ décimètres carrés.}$$

Le diamètre du cercle qui correspond à cette section est égal à 470 millimètres, qui est, en effet, celui que notre cheminée possède au sommet, au lieu de 372 trouvés ci-dessus par la formule de Péclet, augmentation qui est, du reste, conforme à ce qui vient d'être dit tout à l'heure.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Mais pour ne pas laisser de doute sur la possibilité d'opérer avec la méthode que nous venons d'indiquer, et dans laquelle on ne tient pas compte de la hauteur de la cheminée, tandis que Péclet a le soin de la faire entrer dans sa formule, nous allons démontrer combien les diamètres de cheminées changent peu pour des hauteurs très-différentes, les autres données restant les mêmes.

En effet si, à l'aide de la formule de Péclet, avec laquelle on vient de déterminer le diamètre égal à $0^m372$, lorsque la hauteur est de 20 mètres, nous opérons de nouveau, mais en supposant la hauteur égale à 30 mètres, les autres données restant les mêmes, on trouve alors $0^m345$, c'est-à-dire seulement 27 millimètres de différence en moins pour une hauteur qui est moitié plus grande.

Ainsi, dans les limites ordinaires de hauteurs (20 à 30 mètres), la proportion simple adoptée n'aurait à subir qu'une différence tout à fait insignifiante en pratique.

Loin de nous la pensée de ne pas conseiller une vérification au moyen de la formule théorique quand on pourra le faire, surtout si on se trouve en dehors des limites ordinaires; mais, nous le répétons, la méthode simple et pratique que nous avons fait connaître peut suffire le plus souvent; dans tous les cas, nous conseillons, du reste, d'augmenter la valeur trouvée par le calcul théorique d'une certaine quantité toujours exigible pour la construction.

En comparant les passages libres de la grille à la section de la cheminée, on trouve un excès en faveur de la grille. Sa longueur de barreaux entre les talons des extrémités est de $1^m10$ (voir fig. 26 du texte), et la largeur totale $0^m90$; l'écartement des barreaux étant égal au tiers de leur épaisseur, les passages libres sont donc le quart de la superficie totale, ainsi que nous l'avons dit; soit :

$$\frac{1^m1 \times 0^m90}{4} = 0^{m.q}2475; \quad \text{ou } 24{,}75 \text{ décimètres.}$$

La section de la cheminée est égale à 17,5 décimètres.

Mais il est évident que la vitesse de l'air en traversant la grille est encore supérieure à celle qu'il possède en sortant de la cheminée, malgré son augmentation de volume par la dilatation, attendu que la grille est couverte de combustible qui réduit considérablement le passage.

Il ne paraît donc pas nécessaire, pour obtenir une grande vitesse d'entrée d'air, de serrer les barreaux plus que la ténuité du combustible ne l'exige, puisque, après tout, cette vitesse sera toujours très-augmentée quelle que soit la section du passage entre les barreaux, en raison de l'état d'agglomération du combustible et de l'épaisseur plus ou moins grande de la couche.

Carneaux. — Les carneaux faisant partie du même circuit de gaz en mouvement que la cheminée, pourraient en avoir exactement la section; mais il y a avantage à leur en donner une un peu plus forte. Ils sont, en effet, plus susceptibles qu'elle de s'encombrer de suie; les tubulures étranglent le passage; et s'ils se trouvent malgré cela encore un peu supérieurs, en section, à la cheminée, il en résulte que, tout en facilitant le tirage, on diminuera la vitesse du courant contre



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les parois du générateur, et l'échange de calorique n'en sera que plus facile et plus complet.

Cependant, on peut admettre, comme base, que la section *effective* des carneaux est égale à celle minimum de la cheminée ; mais pour que cette condition soit bien remplie, il faut les construire un peu plus grands en vue des obstructions accidentelles et de celle qui provient du passage des tubulures.

Les carneaux latéraux E et E″ du générateur (pl. 1) ont chacun une section maximum de 25 décimètres carrés, et nous venons de dire que celle de la cheminée en avait 17. Cependant, on ne pourrait pas les rendre moindres, puisqu'ici, à l'endroit de chaque tubulure C, le passage effectif se trouve réduit à moitié environ : soit à 12 décimètres. Toute passagère que soit cette obstruction, elle n'agit pas moins en formant une résistance au courant. Cependant, on peut éviter l'étranglement produit par les tubulures en évidant la paroi du carneau à l'endroit de leur passage. C'est ce qui se fait presque toujours : mais ce n'est pas un motif pour restreindre la section maximum des carneaux à celle de la cheminée.

Maintenant, si nous rapportons la section des carneaux à la surface de la grille, celle-ci ayant 108 décimètres carrés, on trouve :

$$\frac{25^{\text{d. q.}}}{108^{\text{d. q.}}} = 0{,}231.$$

Nous en concluons que l'on peut admettre sans inconvénient 0,25, ce qui revient à dire que la section des carneaux est égale au quart de la surface de la grille. Mais cette dernière étant elle-même évaluée aux 4/100 de la surface de chauffe, il s'ensuit qu'en y rapportant encore la section des carneaux on trouve que leur section est précisément le 1/100 de la surface de chauffe totale.

Ces proportions s'appliquent évidemment à chacun des deux carneaux E et E″ ; d'après cela, la dimension de celui inférieur s'en trouve implicitement déterminée par la disposition même du fourneau. En disposant la place pour les bouilleurs et en ménageant l'espace nécessaire au-dessus de l'autel B, il reste naturellement un vide qui a environ 1,5 fois la section des autres carneaux. Il y a aussi le canal G dont la section est beaucoup plus grande que celle des carneaux, puisqu'elle doit être réglée au moyen du registre. On lui a donné (pl. 1 et 3) 35 décimètres.

Cette remarque sur la grandeur des carneaux n'est point privée de précédents. Lorsqu'on a établi des générateurs avec des carneaux très-petits ou très-grands, l'expérience a toujours été en faveur de ce dernier mode.

Mais, tout en l'adoptant, il faut au moins s'arranger de façon que la section soit disposée, comme forme, suivant celle de la surface à échauffer, et que sa plus faible dimension se trouve, autant que possible, perpendiculaire à cette surface. Il est évident qu'on utilisera d'autant mieux la chaleur du courant de gaz que sa section aura le plus grand contour possible, et que la majeure partie de ce contour sera formée de la paroi au profit de laquelle le courant d'air chaud est créé.

Malheureusement, la disposition même du fourneau en brique et du générateur simple dont nous nous occupons ne satisfait pas complétement à cette condition,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

attendu que la plus grande partie du contour d'un carneau n'est pas la paroi de la chaudière qui n'en est environ que le tiers; il est vrai que la paroi de brique n'absorbe pas aussi rapidement la chaleur que celle de tôle, à laquelle elle en rend par rayonnement; mais il est vraisemblable aussi que, si le carneau peut être formé entièrement de surfaces à échauffer, l'utilisation de calorique n'en est pas plus mauvaise. C'est ce qui arrive, du reste, avec les chaudières tubulaires et à foyers intérieurs dont nous parlerons plus loin.

## RÉCAPITULATION DE TOUTES LES RÈGLES PRÉCÉDENTES

Pour permettre de saisir plus facilement le résultat d'ensemble de toutes les règles exposées précédemment, nous en faisons ici le résumé.

Surfaces de chauffe. — Les dimensions générales d'un générateur à corps cylindriques sont basées sur le poids d'eau à vaporiser par heure. Sans tenir compte, en pratique, de la pression où cette vaporisation doit être effectuée, la puissance de vaporisation se traduit en surface de chauffe qui devient alors la base nominale de détermination des autres parties.

On se rappelle que la surface de chauffe totale est comptée à raison de 12 kilogrammes d'eau, en moyenne, vaporisée par mètre carré et par heure; on obtient donc l'étendue S de surface de chauffe en divisant par 12 le poids total d'eau à vaporiser par heure. Dans les tables calculées nous avons admis que :

1° Lorsque le quotient de cette division ne dépasse pas 10, le générateur peut n'avoir qu'un seul corps, dont la moitié forme la surface de chauffe; le développement total de la tôle qui forme la chaudière est, par conséquent, le double de cette surface, sans les fonds;

2° Si le même quotient dépasse 8 sans atteindre 21, le générateur est formé d'une chaudière et d'un bouilleur dont l'un a toujours la moitié de sa circonférence comptée comme surface de chauffe, et l'autre les 3/4;

3° Quand le quotient dépasse 15, le générateur peut être néanmoins composé d'une chaudière et de deux bouilleurs, comptés respectivement pour la moitié et les 3/4 de leurs circonférences;

4° Enfin, si l'on atteint les limites de 50 mètres carrés, il vaut mieux adopter deux générateurs ayant chacun une puissance moitié moindre.

Nous ferons observer, surtout, quel que soit du reste la puissance du générateur, qu'il est prudent, pour les usines qui sont susceptibles de travailler sans interruption, d'en posséder un de rechange en cas d'accident ou de réparation.

Surface de la grille. — La surface de la grille est basée sur la combustion de $0^k5$ de houille brûlée par heure et par décimètre carré; d'après la quantité de combustible nécessaire pour vaporiser le poids d'eau correspondant à 1 mètre carré de surface de chauffe, on a vu que la superficie totale de la grille est à peu près égale

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

aux 0,04 de la surface totale de chauffe. On obtient donc la surface $s$ de la grille par la règle suivante :

$$s = 0{,}04\ \mathrm{S}.$$

La forme des barreaux pour brûler de la houille ordinaire est telle que les vides de la grille forment le quart de sa surface totale.

Section de la cheminée. — On obtient la section minimum $s'$ de la cheminée en prenant les 0,175 de la surface de la grille, ou directement les 7/1000 de la surface totale de chauffe, en admettant que la hauteur de cette cheminée, comptée depuis la grille, ne soit pas moindre que 15 mètres; soit,

$$s' = 0{,}007\ \mathrm{S}.$$

Mais cette proportion convient encore parfaitement en admettant une hauteur plus considérable.

Carneaux. — La section $s''$ des carneaux doit être égale, au minimum, à celle de la cheminée; on augmente cette valeur de sa moitié au moins pour obvier à l'encombrement, aux étranglements et aux résistances dues aux coudes brusques; soit,

$$s'' = 0{,}01\ \mathrm{S};$$

ou, littéralement, le centième de la surface de chauffe.

## RÉSUMÉ DES CONDITIONS DE MARCHE DU GÉNÉRATEUR REPRÉSENTÉ PLANCHE 1

Après avoir examiné les conditions qu'un générateur doit remplir et les principes qui servent à déterminer ses différentes parties, nous allons faire l'application de cette étude au générateur que nous avons choisi pour exemple.

Surface de chauffe. — Sa puissance évaporatoire donnée étant égale à 300 kilogrammes d'eau par heure, nous avons vu que sa surface de chauffe égale :

$$\frac{300}{12} = 25 \text{ mètres carrés.}$$

D'après les règles et la table (p. 139 à 143), il est compris dans la série des chaudières à deux bouilleurs.

Les dimensions de ses organes sont :

| | |
|---|---|
| Longueur de la chaudière | 5m50 |
| Diamètre moyen *id* | 1 00 |
| Longueur des bouilleurs (à l'intérieur du fourneau) | 6 00 |
| Diamètre moyen *id* | 0 60 |

Par conséquent, la surface de chauffe se partage ainsi :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

$$\textit{Chaudière}..... \quad \frac{1^m \times 3{,}1416 \times 5^m50}{2} = 8^{m.q.}64$$

$$\textit{Bouilleurs}. \quad \frac{0^m60 \times 3{,}1416 \times 6^m \times 3}{4} \times 2 = 16^{m.q.}96$$

$$\text{Surface totale}..... = 25^{m.q.}60$$

GRILLE ET CARNEAUX. — Nous avons vu que la grille présentait une superficie totale de 108 décimètres carrés, ce qui fait par rapport à la surface de chauffe :

$$\frac{108}{2500} = 0{,}0432.$$

La quantité normale de combustible à brûler étant par heure de $0^k5$ par décimètre carré, on doit pouvoir aisément consommer :

$$108 \times 0^k5 = 54 \text{ kilogrammes de houille par heure,}$$

et vaporiser, au maximum,

$$54 \times 7 = 378 \text{ kilogrammes d'eau par heure.}$$

On ne compte que sur une production ordinaire de 300 kilogrammes.

Quant à la section des carneaux, nous avons dit qu'elle était le centième de la surface de chauffe, soit 25 décimètres carrés, environ le quart de la grille.

VOLUME DE L'EAU. — Le volume d'eau liquide maintenu à la température de la vaporisation se compose de la moitié de la capacité de la chaudière, plus un excédant de 10 centimètres au-dessus du centre, et de la totalité de celle des bouilleurs (sans compter les communications).

Ce volume égale, par conséquent :

$$\textit{Chaudière}. \quad \frac{\overline{1^m}^2 \times 0{,}7854 \times 5^m50}{2} + 1^m \times 5^m5 \times 0{,}1 = 2^{m.c.}710$$

$$\textit{Bouilleurs}..... \quad \overline{0{,}60}^2 \times 0{,}7854 \times 6^m \times 2 = 3^{m.c.}390$$

$$\text{Ensemble}..... = 6^{m.c.}100$$

à quoi l'on peut ajouter 100 litres pour les quatre communications, d'où le volume total devient 6200 litres d'eau.

VOLUME DE LA VAPEUR. — La vapeur occupe la moitié de la chaudière moins l'excédant d'eau au-dessus du centre, plus la capacité du réservoir ou dôme H.

On trouve, par conséquent :

$$\textit{Chaudière}. \quad \left(\frac{\overline{1^m}^2 \times 0{,}7854 \times 5^m50}{2}\right) - (1^m \times 5^m50 \times 0^m1) = 1^{m.c.}610$$

$$\textit{Réservoir}..... \quad \overline{0{,}75}^2 \times 0{,}7854 \times 1^m05 = 0^{m.c.}464$$

$$\text{Volume total}..... = 2^{m.c.}074$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Soit, pour le volume total de vapeur, 2074 litres.

Hypothèses sur les capacités. — La connaissance de ces capacités nous permet d'établir d'utiles hypothèses comparatives sur les effets de la dépense de vapeur et sur l'alimentation.

Pour qu'un générateur qui alimente une machine motrice présente une capacité bien en rapport avec la dépense de vapeur correspondant à chaque coup de piston, il ne faut pas que cette dépense se fasse ressentir par une diminution notable de la pression, en supposant que la production se trouve suspendue pendant le même temps. Pour cela, il faut que le volume de vapeur constitue une réserve beaucoup plus considérable que cette dépense.

Or, le générateur dont nous nous occupons devant vaporiser 300 kilogrammes d'eau par heure, soit $0^k0833$ par seconde, le volume de vapeur correspondant, pour 5 atmosphères, dont 1 mètre cube pèse $2^k5682$ (tables p. 19 et 61), sera :

$$1000^{lit.}\,\frac{0^k0833}{2^k5682} = 32{,}43 \text{ litres.}$$

Si l'on prend ce volume de vapeur à la chaudière sans en produire en même temps, la quantité de vapeur restante augmente de volume de la valeur même de cette dépense, et la pression devra diminuer dans le même rapport inverse, suivant la loi de Mariotte (68).

Appelant V le volume occupé par la vapeur, et $a$ la quantité que l'on en retranche, le volume restant est égal à $V - a$, qui se dilate et devient V. Les pressions étant en raison inverse des volumes, celle P primitive, de 5 atmosphères, deviendra $P'$, que l'on trouve ainsi :

$$P' = P\,\frac{V - a}{V} = 5^{at.} \times \frac{2074^{l.} - 32^{l.}43}{2074} = 4^{atm.}92.$$

Par conséquent, l'abaissement de pression pour la dépense pendant 1 seconde, sans production, est insignifiant. Mais si la production devait cesser seulement pendant une 1/2 minute, le même calcul montre que la pression se trouverait réduite à moitié environ.

On peut conclure de là que, même pour un générateur tel que celui-ci, où le volume disponible de vapeur est à peu près 60 fois celui de la dépense par seconde, il ne faut pas que la production cesse, même pendant un temps très-court, si l'on veut que la tension reste bien invariable. A plus forte raison doit-elle être rigoureusement maintenue avec les générateurs dans lesquels ce volume est beaucoup moindre, ainsi que nous aurons l'occasion de le voir en décrivant ces derniers.

Il en est de même de l'alimentation d'eau froide qui doit être incessante, et suffisante pour remplacer exactement l'eau vaporisée et dépensée. Cependant le liquide occupe, à poids égal, beaucoup moins de place que la vapeur, et son volume n'ayant pas de rapport avec la tension, l'irrégularité dans l'alimentation n'aurait pas un résultat fâcheux aussi immédiat que celle qui pourrait exister entre la production et la dépense de la vapeur; le danger principal d'une alimentation mo-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mentanément insuffisante est dans l'abaissement du niveau d'eau au-dessous de la partie supérieure des carneaux : voyons dans quelles proportions ce danger est à craindre, avec un générateur disposé comme celui dont nous nous occupons et fonctionnant dans les mêmes conditions.

Si l'alimentation vient à être suspendue, le niveau dans la chaudière devra s'abaisser successivement de tous les volumes d'eau vaporisés. Il sera facile de calculer les premières phases de cet abaissement, attendu que la couche excédante d'eau au-dessus du centre de la chaudière plus celle d'une hauteur égale au-dessous peut être considérée, sans erreur sensible, comme un parallélipipède rectangle.

Par conséquent, puisque nous vaporisons 300 kilogrammes ou litres d'eau par heure, c'est 5 litres par minute; si l'on divise ce volume par la grande section horizontale de la chaudière, on aura l'abaissement pour une minute de production et de dépense de vapeur sans alimentation.

On trouve :

$$\frac{5^{d.\,c.}}{10^{d} \times 55^{d}} = 0^{d.\,c.}0091,$$

c'est-à-dire moins d'un millimètre d'abaissement pour une minute.

Or, d'après cela, le niveau normal se trouvant à 10 centimètres au-dessus de la naissance des carneaux, il faudrait cesser d'alimenter, tout en continuant de dépenser, pendant plus de $1^{h}1/2$ pour les atteindre. Il est évident que cet accident ne pourrait avoir lieu que par la plus grossière négligence, en admettant même que la quantité d'abaissement soit un peu plus sensible en pratique, à cause de l'eau non vaporisée que la vapeur entraîne toujours avec elle en quantité plus ou moins grande.

De ces raisonnements, il ressort clairement que, si les volumes d'eau et de vapeur n'ont rien d'absolu par rapport au chiffre de la vaporisation, celui de la réserve de vapeur ne devrait pas être moindre d'environ 60 fois celui de la dépense par seconde ou égale à la dépense par minute; tandis que le volume de l'eau peut être considérablement réduit, pourvu que la surface libre, susceptible en baissant de découvrir les carneaux, présente une étendue suffisante.

## PUISSANCE DE VAPORISATION COMPARÉE A LA PUISSANCE DYNAMIQUE

Jusqu'à présent nous n'avons considéré la puissance du générateur que sous le point de vue de la vaporisation qu'il est capable d'effectuer dans l'unité de temps; mais l'usage a consacré une méthode différente qui consiste à énumérer en chevaux-vapeur la force à laquelle il correspond. Il sera facile de démontrer, ainsi que nous l'avons dit, que ce système est non-seulement vicieux, mais réellement inadmissible, à moins que l'on indique en même temps le mode adopté pour l'emploi de la vapeur. Mais comme, après tout, l'industriel qui prend une machine motrice n'est pas tenu de connaître les conditions théoriques du générateur qui doit l'alimenter,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et que ce générateur lui est livré pour la force en chevaux qu'il réclame, nous allons essayer de concilier les deux méthodes en cherchant à établir le rapport (très-variable) entre la puissance évaporatoire et celle dynamique.

Nous prenons évidemment pour exemple le générateur représenté pl. 1, dont la base de production sera, dans tous les cas, 300 kilogrammes d'eau vaporisés par heure, sous la tension de 5 atmosphères absolues.

PREMIER EXEMPLE. *Emploi de la vapeur à pleine pression.* — Si la machine motrice que le générateur alimente est disposée pour dépenser la vapeur à pleine pression et sans condensation, c'est-à-dire la vapeur conservant toujours sa tension maximum pendant le travail et rejetée après dans l'atmosphère, le travail mécanique développé sera celui d'une même quantité de vapeur à 4 atmosphères, utilisée sans détente, d'après la définition qui en a été donnée (61).

Les tables (p. 19 et 81) indiquent que :

Le poids de 1 mètre cube de vapeur à 5 atmosphères = $2^{k}5682$;

Le travail sans détente de 1 mètre cube de vapeur = 10333 kilogrammètres par chaque atmosphère effective;

Par conséquent, 300 kilogrammes d'eau produiront :

$$\frac{300}{2,5682} = 117 \text{ mètres cubes de vapeur par heure.}$$

Le travail correspondant sera, pour 4 atmosphères :

$$117 \times 10333 \times 4 = 4835844 \text{ kilogrammètres;}$$

soit par seconde et en chevaux théoriques :

$$\frac{4835844}{3600 \times 75} = 17^{ch}9.$$

Enfin, en admettant un rendement égal aux 6/10 de l'effet théorique, rapport que nous conservons dans les exemples suivants, il vient :

$$17,9 \times 0,6 = 10,74 \text{ chevaux.}$$

En comparant, comme cela se fait ordinairement, la surface de chauffe qui représente la puissance en chevaux avec la puissance dynamique utile développée par la vapeur produite, on trouve :

$$\frac{25^{m.q.}}{10,74} = 2^{m.q.}32$$

de surface de chauffe par force de cheval, ce qui revient à dire :

*Que si l'on fait usage d'une machine motrice privée des organes nécessaires pour opérer la détente et la condensation de la vapeur, la dépense en vapeur sera telle que le générateur devra posséder une puissance évaporatoire d'environ* 2,32 *mètres carrés par force de cheval.*

DEUXIÈME EXEMPLE. — Si, toutes choses égales d'ailleurs, la machine motrice est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pourvue d'un condenseur, c'est-à-dire un milieu pour l'échappement de la vapeur où la pression résistante soit seulement de 0,1 d'atmosphère, le travail théorique développé sera :

$$117 \times 10333 \times 4{,}9 = 5923909 \text{ kilogrammètres par heure,}$$

soit par seconde et en chevaux utiles :

$$\frac{5923909}{3600 \times 75} \times 0{,}6 = 13^{\text{ch.}}16;$$

d'où la base de puissance du générateur est abaissée à :

$$\frac{25}{13{,}16} = 1^{\text{m. q.}}89 \text{ par force de cheval utile.}$$

Troisième exemple. — Enfin, si la machine motrice est pourvue d'une condensation et d'une distribution à détente permettant d'utiliser la force expansive de la vapeur jusqu'à 10 fois son volume à pleine pression (ce qui est possible, la contre-pression du condenseur ne dépassant pas $0^{\text{at.}}1$), on aura les résultats suivants :

Le travail de 1 mètre cube de vapeur, avec une détente 10 fois son volume primitif, égale, par atmosphère (72), 34127 kilogrammètres; la pression utile étant encore égale à $4^{\text{at.}}9$, le total du travail théorique par heure devient :

$$117 \times 34127 \times 4{,}9 = 19565009 \text{ kilogrammètres;}$$

soit par seconde et en chevaux utiles :

$$\frac{19565009}{3600 \times 75} \times 0{,}6 = 43^{\text{ch.}}5.$$

La base de vaporisation du générateur est alors réduite à :

$$\frac{25}{43{,}5} = 0^{\text{m. q.}}58 \text{ par force de cheval.}$$

Ainsi, le rapport entre la surface de chauffe et la puissance en chevaux est susceptible des plus grandes variations suivant la disposition même du moteur qu'il s'agit d'alimenter; il n'est pas possible, par conséquent, d'établir d'avance ce rapport sans préciser en même temps le système de machine à laquelle le générateur doit être appliqué. Il est donc bien plus rationnel de fixer et de déterminer, comme nous l'avons dit plus haut, la puissance d'un générateur par rapport à la quantité d'eau à vaporiser dans un temps donné, plutôt que par rapport de la force en chevaux.

Cependant, on a l'habitude, dans les ateliers de construction, de chaudronnerie principalement, de dire que les proportions d'un générateur doivent correspondre à une surface de chauffe de $1^{\text{m. q.}}20$ à $1^{\text{m. q.}}50$ par force de cheval; or qu'advient-il de cette manière d'apprécier la puissance d'un générateur?

Il advient nécessairement que :



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

1° Si la machine motrice se rapproche du système que nous avons admis dans notre premier exemple, la surface de chauffe sera faible, et il faudra pousser le feu ; le générateur en fatiguera davantage, et il ne sera pas possible de lui demander un excès de travail momentané ;

2° Si la machine est au contraire bien perfectionnée, comme il est dit précédemment au troisième exemple, la vaporisation se fera très-doucement et sans fatigue pour le générateur dont les dimensions seront excédantes ; on pourra très-facilement doubler la puissance au besoin.

Mais pour donner aux idées un point d'appui moins vague, nous ferons le même calcul en supposant la machine dans l'état de marche qui se présente le plus fréquemment : c'est-à-dire une pression de 4 1/2 atmosphères, la détente à 3 fois le volume primitif et une contre-pression de 0,1 atmosphère dans le condenseur.

Nous trouvons alors :

Volume de la vapeur produite :

$$\frac{300}{2{,}3345} = 128{,}5 \text{ mètres cubes par heure;}$$

Travail théorique correspondant :

$$128^{\text{m. c.}}5 \times 25875 \times 4^{\text{at.}}4 = 14629725 \text{ kilogrammètres;}$$

Travail utile par seconde :

$$\frac{14629725}{3600 \times 75} \times 0{,}6 = 32{,}51 \text{ chevaux;}$$

Surface de chauffe par force de cheval :

$$\frac{25}{32{,}51} = 0{,}80 \text{ mètre carré.}$$

Donc, lorsqu'une chaudière est livrée pour une étendue calculée à raison de $1^{\text{m. q.}}20$ de surface de chauffe par force de cheval, on devrait pouvoir, au besoin, élever le travail nominal dans le rapport de 8 : 12, ou de la moitié, si la machine se rapproche des dernières conditions supposées, et sans faire produire au fourneau plus de 12 kilogrammes de vapeur par mètre carré de chauffe.

Un bon constructeur de chaudière préfère généralement admettre $1^{\text{m. q.}}50$ par force de cheval : il ne faut pas trop l'accuser de vouloir augmenter la masse de marchandise livrée, car il n'est pas moins exact de dire que l'acheteur méconnaît souvent la véritable force dont il a besoin, et lorsque le générateur et la machine sont montés chez lui, il leur fait faire un travail qui dépasse parfois de beaucoup la puissance nominale qu'il supposait, soit par suite d'un mécompte, soit par l'addition de nouvelles résistances. Si le générateur ne répondait, comme dimensions, qu'à sa demande, il s'ensuivrait des contestations où le constructeur a rarement raison. Celui-ci fait donc bien de donner plus qu'on ne lui demande, pour éviter de fâcheuses éventualités.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

D'ailleurs, une maison de construction recommandable peut presque exclusivement se permettre cette méthode, attendu qu'en procédant ainsi elle livre un vaste champ à la concurrence des autres maisons qui peuvent offrir des conditions, en apparence plus avantageuses, en livrant des générateurs qui n'ont juste que la puissance demandée, lorsque la force de cheval est prise pour base.

Mais au reste, cette incertitude pourrait cesser immédiatement en n'achetant plus un générateur autrement que pour *sa surface de chauffe*.

Par conséquent, après avoir averti le manufacturier que 1 mètre carré de surface de chauffe peut largement satisfaire à la force de 1 cheval, si la machine motrice est dans de bonnes conditions ordinaires et bien conduite, nous ne l'engageons pas moins à supposer le générateur plus grand, et compter, pour la lettre d'un traité, sur 1,50 *mètre carré de surface de chauffe totale par force utile de cheval*, le rendement de la machine motrice compté à 60 pour 0/0 d'effet utile après déduction de la contre-pression dans le condenseur.

Tout ce qui précède peut suffire pour faire connaître les règles principales à suivre pour déterminer les proportions d'un générateur formé de corps cylindriques, et dont la planche 1 représente le type général (1). Nous allons examiner maintenant quelques dispositions analogues qui en diffèrent un peu, soit comme ensemble, soit comme détails de construction.

(1) Pour les dispositions et les proportions pratiques de ce générateur, nous devons beaucoup de renseignements à l'obligeance de M. Bardies aîné, constructeur de grosse chaudronnerie mécanique, à Paris.

FIN DU CHAPITRE DEUXIÈME.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

# CHAPITRE III

## DISPOSITIONS DIVERSES DE GÉNÉRATEURS A CORPS CYLINDRIQUES ET A FOYERS EXTÉRIEURS

(PLANCHE 2)

Les différents générateurs représentés sur cette planche sont à la fois caractérisés par leur composition, par leur construction de détails et par le mode de distribution du calorique. On y remarque d'abord des dispositions comprenant un corps principal de chaudière avec un ou deux bouilleurs, puis un autre sans bouilleurs, ceux-ci étant alors remplacés par des récipients qualifiés seulement de *tubes réchauffeurs*. Mais on y distingue également des systèmes où le courant de flamme est *renversé* ou *descendant*, c'est-à-dire qu'il s'élève d'abord pour agir directement sous le corps principal, et descend ensuite pour n'exercer son action qu'en dernier lieu sur les corps auxiliaires.

Nous pensons qu'on pourra se rendre un compte exact de ces différences essentielles dans les dispositions que peut avoir un générateur à corps cylindriques. Nous n'avons pas la prétention de donner dans ce recueil tous les systèmes qui ont été proposés jusqu'alors à ce sujet; ce serait évidemment prolixe et tout à fait inutile pour nos lecteurs; nous sommes persuadé que les différents modèles que nous avons choisis pourront bien suffire à montrer les dispositions qui peuvent être regardées comme les meilleures et les plus généralement appliquées.

### GÉNÉRATEUR COMPOSÉ D'UNE CHAUDIÈRE ET D'UN BOUILLEUR A FLAMME MONTANTE

(FIG. 1, 2 ET 3, PL. 1)

Cet appareil, dont la construction est due à MM. Ch. Thirion et de Mastaing, ingénieurs de mérite, peut être remarqué pour le soin qui a été apporté aux combinaisons de tous ses détails. Il est complétement analogue à celui représenté sur la pl. 1, quant au mode d'action du foyer; il en diffère en ce qu'il est beaucoup plus faible et n'a qu'un bouilleur. Aussi nous le présentons comme un bon modèle à suivre pour les générateurs de petite dimension.

La fig. 1 est une coupe longitudinale de l'ensemble passant par l'axe;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La fig. 2 en est une vue extérieure debout;

La fig. 3 est une coupe transversale faite suivant l'axe 1-2 du réservoir de vapeur.

Ensemble de la chaudière et du fourneau. — L'ensemble de la chaudière est composé d'un corps principal A, relié au bouilleur unique B par deux conduits ou communications C et C′; le corps principal est surmonté du réservoir ou dôme H pour augmenter la réserve de vapeur et surélever le point où se fait la prise.

La forme générale du fourneau est beaucoup simplifiée par le fait de n'avoir qu'un seul bouilleur. Les murailles latérales ne présentent pour ainsi dire que des parties verticales qui permettent de sortir le corps de chaudière tout entier sans leur faire subir de dégradations.

Le carneau inférieur est formé simplement de parois verticales et d'une voûte *b* qui passe exactement au-dessus du bouilleur; elle s'appuie sur les murailles latérales et peut être démolie sans compromettre la solidité du reste.

Les deux parties E du carneau supérieur sont aussi constituées par une cloison en brique construite entre la voûte et la chaudière, et suivant son axe de figure. Le raccord des carneaux avec la chaudière se fait par des briques qui s'étagent et se surplombent, ce qui est beaucoup plus économique qu'une partie de voûte et qui ne vaut pas moins. Mais en jetant les yeux sur la coupe longitudinale (fig. 1), ce raccord présente une particularité remarquable : le contact du sommet du carneau avec la chaudière est établi par deux rangs de briques *c*, qui peuvent jouer en rentrant dans la muraille. C'est une bonne précaution contre la dilatation du corps de chaudière et de la maçonnerie, qui donne lieu ordinairement à une poussée extérieure très-sensible.

Au lieu du vide ménagé au-dessus de la chaudière décrite précédemment, celle-ci est recouverte d'une forte couche de sable ou autre matière mauvaise conductrice de la chaleur qui s'élève, ainsi que la paroi supérieure du fourneau, jusqu'au point d'envelopper le réservoir H presque entièrement. C'est aussi un procédé qui paraît plus économique que la voûte dont nous avons parlé, surtout en vue des démolitions nécessaires pour une réparation.

L'établissement de la chaudière dans le fourneau se fait encore au moyen du chambranle ou plaque de foyer S et du chandelier en fonte *s*, reposant sur le piédroit inférieur *r*. Elle est, de plus, munie de six oreilles en fer G, qui s'étendent assez loin pour se reposer sur les murailles latérales en dehors de l'aplomb des carneaux. Nous avons dit (p. 132) quelle peut être l'utilité de ces organes, dont l'effet n'est réellement efficace que lorsqu'il est possible, comme on l'a fait ici, de les appuyer en plein sur les murailles, et non pas sur les voûtes des carneaux. Il arrive souvent que le vide des carneaux s'étend beaucoup de chaque côté de la chaudière, ce qui oblige de prolonger les oreilles d'une quantité très-notable.

Quant à la forme extérieure, on voit que ce fourneau est bâti pour être entièrement isolé; les parois latérales sont consolidées au moyen de fortes armatures de fonte K, reliées d'un côté à l'autre par des boulons qui traversent la maçonnerie.

Détails de construction de la chaudière. — La pièce *j* de couronnement du réservoir de vapeur est fondue avec le nombre nécessaire de tubulures pour pouvoir

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

y rattacher exclusivement les divers organes de service, sans pratiquer d'autres ouvertures sur le corps de chaudière qui n'est percé que pour la pose du réservoir H et pour la tubulure O de l'une des deux soupapes de sûreté, lesquelles doivent occuper toutes deux les extrémités de la chaudière conformément aux règlements en vigueur.

Le réservoir H occupant à peu près l'une des extrémités du générateur, son couronnement *j* porte une première tubulure O′ pour l'autre soupape de sûreté et pour recevoir le support du mouvement N du flotteur *h*, dont la tringle passe dans une petite garniture ménagée dans le cordon contre lequel s'appuie le tampon *k* du trou d'homme. La même pièce *j* porte aussi la tubulure *o* qui reçoit le robinet P de prise de vapeur. Il s'y trouve également les tubulures où s'adaptent le robinet I d'alimentation et celui *a* pour la vidange, ces deux organes étant ici complétement distincts et correspondant respectivement aux tuyaux J et J′.

Entre le robinet I et la tubulure les auteurs ont placé un petit appareil d'une très-grande utilité : c'est une boîte *d* contenant un clapet dit *de retenue*, et qui se ferme de lui-même si la pression dans la chaudière vient à prédominer. C'est afin d'éviter qu'il ne se fasse un retour de la vapeur vers la pompe alimentaire quand on arrête cette dernière, le robinet I ne pouvant être fermé qu'après, pour ne pas crever les tubes.

La séparation des organes d'alimentation et de vidange a pour objet la mise en pratique d'un principe dont nous avons déjà parlé (p. 118). Au lieu d'envoyer l'eau d'alimentation dans le bouilleur, elle est dirigée dans la chaudière, dans la partie où l'on doit admettre que la vaporisation est la plus faible. Le tuyau J, qui correspond au robinet I et qui amène l'eau froide, suit horizontalement le corps principal A et vient aboutir tout près du fond le plus opposé au foyer. Il se forme alors, conformément aux principes généraux d'un chauffage quelconque, un courant d'eau froide dans le générateur en sens contraire de celui de la vaporisation et de l'air chaud; la vapeur formée en grande quantité dans le bouilleur, dans la partie en regard du foyer, s'élève dans la chaudière par la première communication C, tandis que l'eau froide descend dans le bouilleur par la seconde C′ et remplace l'eau continuellement évaporée.

Les choses sont disposées de façon, en résumé, qu'il s'établisse un courant d'eau, remplaçant la vapeur, d'une communication à l'autre, de C′ en C; c'est pour favoriser cet effet que les manchons cylindriques qui les forment débordent dans les corps, excepté à l'entrée de la vapeur par la première tubulure C.

Autant pour rapprocher les tubulures C et C′ que pour éviter de placer la première C vis-à-vis le flotteur *h*, cette première tubulure se trouve très-éloignée de la tête du bouilleur comparativement aux dimensions générales. C'est en raison de cela que la première virole du bouilleur possède une forme conique très-prononcée qui rend plus facile le cheminement des bulles de vapeur vers la communication, en évitant aussi le vide permanent qui se forme au-dessus du foyer dans les bouilleurs cylindriques ordinaires. Cette disposition, si elle était généralement adoptée, ne pourrait avoir évidemment que de bons résultats; mais quelques constructeurs

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la repoussent comme difficulté d'exécution ; elle était indispensable ici, à cause de la position même des communications.

Le niveau d'eau M est posé suivant la méthode dont nous avons parlé (p. 121). Les raccords de bronze, qui s'assemblent avec le tube de cristal, sont ajustés avec des tubes en fer creux $g$ et $g'$ qui traversent directement la maçonnerie et pénètrent dans l'intérieur de la chaudière, l'un dans l'eau et l'autre dans la vapeur. Leur assemblage avec le fond en tôle se fait au moyen d'embases rapportées contre lesquelles on serre, intérieurement et extérieurement, des écrous vissés sur l'extérieur même des tubes $g$ qui sont filetés dans cette partie.

Ce mode de montage rend surtout nécessaires les briques à dilatation $c$ ; car s'il se fait un mouvement de la part de la maçonnerie ou de la chaudière, l'effet n'est pas ressenti par les tubes $g$ qui, sans cela, pourraient se rompre ou forcer leur assemblage avec le niveau ou avec la chaudière.

Remarquons, en terminant, que la grille D est inclinée vers l'autel R au lieu d'être horizontale, comme cela se fait généralement. On a pour but, en inclinant la grille, de rendre la couche de combustible plus épaisse vers l'autel, attendu que c'est là que la combustion est la plus intense et que la grille se dégarnit le plus rapidement. Lorsque la grille est complétement horizontale, le chauffeur doit avoir soin de repousser le combustible incandescent chaque fois qu'il apporte une charge de charbon frais, lequel est préalablement placé en avant.

Quand nous parlerons de la fumivorité des foyers, on verra, qu'en effet, il faut que les premiers produits de la combustion, qui sont presque le résultat d'une distillation à basse température, passent au-dessus du combustible en ignition complète, avant de quitter le foyer, pour ne pas produire de la fumée en excès.

## CONDITIONS DE MARCHE DU GÉNÉRATEUR REPRÉSENTÉ FIG. 1 A 3

Voici les principales dimensions du générateur que nous venons de décrire :

| | |
|---|---|
| Diamètre de la chaudière | $0^m$ 700 |
| Longueur de la chaudière | $3^m$ 300 |
| Surface exposée à la chaleur $= \pi \times 0{,}700 \times 3^m3 \div 2 =$ | $3^{m.q}$ 628 |
| Volume total $= \overline{0{,}700}^2 \times 0{,}7854 \times 3^m30 =$ | $1^{m.c}$ 254 |
| Volume d'eau $= \frac{1{,}254}{2} + (0^m700 \times 3^m3 \times 0{,}05) =$ | $0^{m.c}$ 742 |
| Volume de vapeur $= 1{,}254 - 0{,}742 =$ | $0^{m.c}$ 512 |
| Diamètre du réservoir de vapeur | $0^m$ 500 |
| Hauteur du réservoir de vapeur | $0^m$ 600 |
| Volume du réservoir de vapeur $= \overline{0{,}500}^2 \times 0{,}7854 \times 0{,}60 =$ | $0^{m.c}$ 148 |
| Diamètre du bouilleur dans la partie cylindrique | $0^m$ 500 |
| Longueur du bouilleur | $3^m$ 900 |
| Surface exposée au feu = (environ) $3/4\ \pi \times 0^m5 \times 3^m7 =$ | $4^{m.q}$ 594 |

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Volume = (environ) $\left(\overline{0,45}^{2} \times 0,7854 \times 1^{m}80\right) + \left(\overline{0,50}^{2} \times 0,7854 \times 2^{m}10\right) = 0^{m.c.}698$
Longueur de la grille..... $0^{m}$ 640
Largeur de la grille..... 0 460
Superficie de la grille = 0,64 × 0,46 = ..... $0^{m.q.}294$
Section des carneaux (environ)..... 0 140

RÉSUMÉ

Surface de chauffe totale = $3^{m.q.}6283 + 4^{m.q.}5942$ = ..... $8^{m.q.}223$
Rapport de la surface de la grille avec celle de chauffe = 0,2944 : 8,2225 = 0 035
Rapport de la section des carneaux *id.* = 0,14 : 8,2225 = 0 015
Poids d'eau à vaporiser par heure = 8,2225 × $12^{k}$ = ..... $98^{k}$ 670
Volume total de l'eau contenue = 0,742 + 0,698 = ..... $1^{m.c.}440$
Volume total de la vapeur = 0,512 + 0,118 = ..... 0 630

On voit que l'ensemble de ces conditions correspond presque exactement à ce que l'on trouverait au moyen des règles exposées précédemment.

## DISPOSITION PARTICULIÈRE D'UN GÉNÉRATEUR A DEUX BOUILLEURS

(FIG. 4, PL. 2)

Cette figure représente un mode particulier de construction de fourneau et d'assemblage des bouilleurs avec la chaudière. Cet exemple est emprunté à un ensemble formé de deux fourneaux pareils accolés et fonctionnant ensemble; l'un des deux est représenté en coupe transversale suivant l'axe des communications, et l'autre en vue extérieure de bout pour faire voir la disposition du chambranle en fonte qui recouvre presque entièrement la face de chaque fourneau.

Le caractère principal de cette construction est dans la voûte *b* qui forme le carneau inférieur en pleine courbe au-dessus des bouilleurs, sans les toucher; elle s'élève même assez pour que la chaudière A s'y repose. Cette voûte est construite tout entière en briques réfractaires montées de champ.

Les carneaux supérieurs E sont formés aussi de parois courbes voûtées s'appuyant sur la voûte inférieure et sur la chaudière. Quant à la voûte *p*, au-dessus de la chaudière, elle n'a pour objet, comme dans notre exemple (pl. 1), que d'isoler la chaudière en lui réservant un espace fermé rempli d'air qui empêche la déperdition de chaleur.

Ce mode de construction, qui est très-soigné, mais très-coûteux, a pour but, au moyen de la voûte *b*, d'utiliser l'étendue totale des bouilleurs comme surface de chauffe en les plongeant entièrement dans la flamme, ou au moins en profitant du rayonnement de la voûte qui devrait s'exercer même sur la partie supérieure des bouilleurs qui est entièrement opposée au foyer. Mais le résultat n'est pas complément atteint, attendu que le vide existant entre la voûte et chaque bouilleur, dans

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la partie la plus étroite, est bientôt encombrée de suie qui intercepte le passage aux rayons calorifiques ou au courant de gaz chauds.

Il est donc plus exact de ne compter que sur les 4/5, environ, de la circonférence des bouilleurs, pour la surface de chauffe, que sur la totalité.

En résumé, nous pensons que la disposition indiquée pl. 1, fig. 3, donne d'aussi bons résultats que celle actuelle, avec une construction évidemment moins dispendieuse; en effet, cette voûte exige, pour la monter, un cintrage préalable de douves en bois, et s'il s'agit d'une reconstruction après coup, par suite de réparation à la chaudière, la main-d'œuvre devient d'autant plus difficile que l'ouvrier doit se tenir dans les carneaux, où ses mouvements ne peuvent s'effectuer que très-péniblement. Si la même objection existe pour tout autre mode de construction, elle est d'autant moins sérieuse que la besogne exige le moins de soins par elle-même.

C'est ce qui arrive pour la disposition de la fig. 3, pl. 1, où la voûte est une simple cloison formée de briques qui ont les bouilleurs mêmes pour points d'appui. Une voûte, comme celle indiquée fig. 4, pl. 2, doit être faite, au contraire, avec beaucoup de soin, puisqu'elle ne puise sa solidité que dans elle-même.

À part ce premier caractère de construction, on remarque aussi le chambranle en fonte S, formé de deux parties qui se réunissent au centre des bouilleurs et qui garnissent la tête du fourneau dans toute son étendue. On en a aussi profité pour y ménager les regards $y$ par lesquels on opère la visite des carneaux; ces regards peuvent être fermés au moyen de tampons en fonte qui se démontent facilement.

D'autre part, le chambranle sert de plaque au niveau d'eau M qui est disposé tout d'une pièce comme on vient de le voir précédemment.

Tout cela serait parfait si la dilatation n'existait pas. Mais on ne peut l'éviter, et ses effets sont d'autant plus sensibles qu'ils s'exercent sur des surfaces d'une plus grande étendue. Aussi ce chambranle, du reste très-bien combiné de forme et d'emmanchement, est souvent tourmenté par sa propre dilatation et par la poussée des briques; en un mot, il est très-sujet à casser. Dans ses moindres mouvements, le niveau d'eau qui s'y rattache est aussi plus sensiblement affecté que s'il appartenait à une petite plaque isolée.

Enfin, le chambranle en fonte, indispensable jusqu'au centre des bouilleurs, est d'un moins bon effet quand il s'étend au-dessus : on peut s'en passer sans le moindre inconvénient.

Il ne reste que peu de chose à dire quant à la chaudière proprement dite et à sa réunion avec les bouilleurs. Il s'agit encore d'un mode d'assemblage que nous devions mentionner, mais qui doit s'employer de moins en moins : nous voulons parler des tubulures à joint de mastic.

Le corps de la chaudière et les bouilleurs portent chacun une partie de chaque communication C, et celle des bouilleurs est rivée avec une pièce de raccord en fonte et à épaulement $c$ qui doit pénétrer dans celle appartenant à la chaudière. Cette dernière partie est garnie d'un cercle qui augmente la résistance du bord qui doit s'appuyer contre l'épaulement du raccord $c$.

La réunion des deux parties se fait en bourrant du mastic de fonte dans le vide



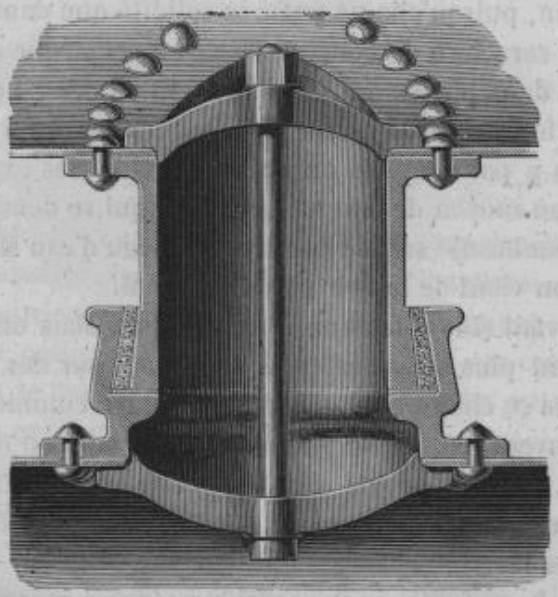
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

conservé entre la portée du raccord *c* et l'amorce en tôle dans laquelle elle pénètre; ce mastic est introduit et serré à coups de marteau et devient en peu de temps d'une très-grande dureté. Mais le mastic de fonte, qui réussit très-bien à basse température, se brûle souvent dans le cas actuel et occasionne des fuites qui exigent, pour être réparées, que la chaudière soit vidée entièrement. Et puis ces joints intérieurs sont difficultueux et peuvent être manqués par la gène que l'ouvrier éprouve à les faire.

Néanmoins, lorsqu'on adopte ce mode d'assemblage, il est indispensable de le munir d'une disposition, que le dessin fig. 4, pl. 2, n'indique pas, mais dont nous devons dire un mot : c'est-à-dire qu'il faut retenir la jonction des deux parties par un boulon qui traverse la communication et qui relie ensemble deux étriers placés aux extrémités, dans la chaudière et dans le bouilleur.

La fig. 27 ci-dessous montre cette addition et indique aussi une modification de l'assemblage au mastic.

Fig. 27.



Avec ce système le joint est extérieur et présente plus de facilité pour le faire. La communication est formée de deux pièces de fonte qui s'emboîtent l'une dans l'autre en laissant un jeu conique pour y loger le mastic. Mais si le mastic peut se brûler lorsqu'il est intérieur et presque en contact direct avec l'eau, à plus forte raison ceci aura-t-il lieu lorsqu'il se trouve à l'extérieur : c'est donc encore une disposition vicieuse.

Les constructeurs conseillent généralement d'adopter le système de tubulures d'une seule pièce rivée sur les deux parties, et, s'il faut absolument que les bouilleurs et la chaudière puissent se séparer facilement, de faire le raccord des deux parties par un bridage simple rivé. (Des boulons s'oxydent par leurs filets et ne peuvent souvent être démontés qu'en les brisant : il vaut donc mieux river.)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## GÉNÉRATEUR A CORPS CYLINDRIQUE, A BOUILLEURS LATÉRAUX ET SUPERPOSÉS A FLAMME DESCENDANTE

### SYSTÈME DE M. FARCOT

(FIG. 5 A 7, PL. 2)

Sous le double point de vue d'obtenir un courant calorifique en sens contraire de l'alimentation et d'exposer aussi le récipient de la vapeur à l'action la plus énergique du foyer, plusieurs constructeurs ont imaginé des dispositions de générateur dont le principe consiste à placer la grille du foyer directement sous le corps principal où se forme la vapeur, et à diriger ensuite les produits calorifiques gazeux autour des bouilleurs qui sont placés à côté ou en contre-bas de la chaudière, et remplissent réellement le rôle de *réchauffeurs*.

Déjà, en 1843, M. Cavé, à propos d'expériences que nous ferons connaître, a proposé une disposition analogue à celle représentée par la fig. 10 de la pl. 2.

Après sont venus MM. Farcot, Cail et C^ie^, qui ont imaginé celles que nous allons décrire successivement.

Le générateur, désigné sous le nom de son inventeur (1), se compose d'un corps principal A, isolé et établi dans un carneau particulier, et de deux ou plusieurs bouilleurs B, B′, se communiquant en manière de serpentin et disposés dans un même plan vertical dans les carneaux E, E′, construits sur le côté de la chaudière. Celle-ci est chauffée directement par le foyer D, dont les produits parcourent ensuite successivement les carneaux où sont logés les bouilleurs; l'alimentation se fait par le plus inférieur de ces derniers, tandis que celui supérieur est en communication avec la chaudière par un conduit en siphon IJL.

Voilà donc la circulation de l'eau froide établie très-régulièrement en sens inverse du courant de calorique. Amenée dans le bouilleur inférieur B′, l'eau s'échauffe et s'élève peu à peu dans celui supérieur B en passant par la tubulure C qui les met en relation. Du bouilleur B elle s'élève encore et, par la pression qu'elle subit de la part de la pompe d'alimentation, elle suit le siphon IJL dont la longue branche descend dans la chaudière au-dessous de la surface libre.

Tout en cherchant à remplir aussi bien que possible les conditions de la meilleure répartition du calorique, M. Farcot adopte aussi le principe de la combustion lente, c'est-à-dire de très-grandes grilles et des surfaces de chauffe considérables relativement au poids d'eau à vaporiser dans l'unité de temps.

Ainsi, ses grilles sont établies pour ne pas dépasser un 1/2 kilogramme de houille brûlée par heure et par décimètre carré; la surface de chauffe atteint près de 2 mètres carrés par force de cheval, bien que les machines de M. Farcot soient

(1) M. Farcot s'est fait breveter pour ce système de générateur en 1845.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

toujours dans les conditions de marche où nous avons vu (p. 161) que $1^{m.q}.50$ suffirait largement.

Les carneaux ont aussi une très-grande section, dans le but de ne donner au courant d'air chaud qu'une très-faible vitesse, et de faciliter le dépouillement de sa chaleur au profit des surfaces du générateur.

Somme toute, l'expérience a démontré qu'un générateur de ce système, étant bien conduit, peut produire plus de 7 kilogrammes de vapeur par kilogramme de houille de bonne quantité. Il est juste de dire qu'on devrait généralement produire bien près de 7 kilogrammes de vapeur par kilogramme de houille avec un générateur ordinaire, semblable à celui représenté pl. 1, en ne le chargeant pas d'un travail plus considérable que M. Farcot ne le fait; seulement, la conduite en serait nécessairement un peu plus minutieuse, les combinaisons en étant moins rationnelles que dans celui de ce dernier constructeur.

## DÉTAILS DE LA CONSTRUCTION

La fig. 7, de la pl. 2, représente une coupe verticale du fourneau, faite spécialement sur l'axe longitudinal 1-2 des bouilleurs, la partie véritablement caractéristique de ce système de générateur;

La fig. 5 est une coupe transversale sur l'axe 3-4 passant par le milieu de la grille;

La fig. 6 est une section parallèle à la précédente et suivant l'axe 5-6 du tube plongeur L.

Chaudière principale. — La construction de la chaudière A diffère peu de celles décrites précédemment : c'est absolument la chaudière représentée pl. 1, moins les deux bouilleurs placés au-dessous. On y remarque cependant un détail, que notre dessin ne permet pas de voir, qui n'est pas sans importance. L'extrémité du côté du foyer est terminée par une tubulure en tôle rivée avec un bouchon en fonte qui traverse la maçonnerie et vient reposer sur le chambranle en fonte ou plaque de foyer. Outre le point d'appui qui en résulte pour la chaudière, en plus des oreilles G dont cette dernière est munie, cette disposition permet aussi d'appliquer le niveau d'eau sans avoir à craindre l'influence des mouvements produits par la dilatation de la maçonnerie et du métal.

C'est un procédé applicable ici sans difficulté, attendu qu'il n'existe pas de carneau de circulation à cette extrémité de la chaudière. Les produits de la combustion font un seul passage en l'enveloppant à moitié de sa circonférence, et s'élèvent, arrivés à l'extrémité opposée, pour suivre l'ouverture F qui communique avec le carneau E du bouilleur supérieur.

Bouilleurs. — Les deux bouilleurs B et B′ sont aussi d'une construction analogue à celle ordinaire des autres générateurs. Il sont réunis, d'un bout, par la communication C et de l'autre par une entretoise en fer *a* avec laquelle ils se relient par des équerres en fer. L'ensemble des deux bouilleurs se trouve porté par une série de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

traverses en fer *c* scellées dans le carneau inférieur, où la température de l'air n'est plus assez élevée pour les oxyder et les détruire.

La tubulure C qui les met en communication est établie suivant le système de raccord au mastic de fonte dont nous avons parlé précédemment (p. 170). Mais on peut remarquer que les inconvénients que ce mode d'assemblage présente, quand il est très-près du foyer, disparaissent dans la situation actuelle où les tubulures sont placées dans un courant d'air relativement froid.

Le carneau E des bouilleurs est formé simplement d'une grande chambre séparée en deux par une cloison en brique *b*, interrompue en E'' pour établir la communication entre les deux parties.

L'extrémité des carneaux est fermée par un grand registre K qui se lève à volonté pour régler le passage à la cheminée; en lui donnant la hauteur des deux carneaux ensemble, on évite une cloison spéciale pour fermer l'extrémité du carneau supérieur.

Lorsque la surface totale du générateur est considérable, on adopte trois ou quatre bouilleurs superposés, se communiquant de l'un à l'autre de la même façon que ces deux-ci dans l'exemple que nous avons choisi. Les carneaux peuvent être alors séparés les uns des autres par de simples plaques métalliques au lieu de cloisons en briques comme ici. Par cette disposition particulière, qui permet de multiplier les bouilleurs, un générateur de ce système est moins long, à égalité de surface, qu'un autre du système ordinaire.

En résumé, outre la disposition de principe qui correspond à un emploi rationnel du combustible, ce générateur est aussi établi par le constructeur de façon à éviter le mieux possible les pertes accidentelles de calorique. Les murailles en sont très-épaisses; on a le soin d'envelopper soigneusement toutes les capacités et communications extérieures, etc.

Le cendrier est aussi muni d'une porte parfaitement ajustée que l'on ferme la nuit et, en général, lorsque l'on arrête la production, pour empêcher les rentrées d'air froid que la cheminée appelle, malgré la fermeture du registre, et qui emporte une partie de la chaleur concentrée dans le fourneau. Cette précaution, disent MM. Grouvelle et Jaunez, dans *le Guide du chauffeur*, suffit pour que la vapeur ne tombe pas de 2 atmosphères sur 5 pendant 12 heures d'arrêt.

## GÉNÉRATEUR A CORPS CYLINDRIQUE ET A FLAMME DESCENDANTE

### SYSTÈME DE MM. CAIL ET Ce

(FIG. 8 ET 9, PL. 2)

Les fig. 8 et 9 représentent, en sections longitudinale et transversale, un générateur double suivant la disposition proposée par MM. Cail et Cie. Quoique de petite dimension, ce générateur suffit pour donner une idée complète du principe (1).

(1) MM. Cail et Cie sont brevetés, pour ce système de générateur, depuis 1849.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La section transversale (fig. 9) est supposée faite, pour l'un des deux, sur l'axe 1-2 des tubulures de communication, et pour l'autre sur celui 3-4 passant par le foyer.

On voit que le premier passage de la flamme a lieu autour de la chaudière A qui présente la moitié de sa surface à son action. De ce premier carneau les produits de la combustion traversent, par une ouverture F, une voûte *b* qui recouvre deux carneaux inférieurs E dans chacun desquels se trouve un bouilleur. Après avoir parcouru l'un des deux, ils passent dans l'autre par l'ouverture E′, ouverte dans la cloison qui sépare les deux carneaux E et s'en vont à la cheminée par l'ouverture G ménagée à l'extrémité du carneau de deuxième passage.

Chaque bouilleur B n'est relié à la chaudière A que par une communication C, l'autre extrémité étant soutenue par l'autel R; mais ils sont inclinés tous deux de façon à faciliter l'ascension de l'eau qui s'échauffe et des bulles de vapeur qui peuvent s'y former.

Le corps principal A est construit comme le bouilleur des générateurs à flamme montante. L'extrémité du côté du foyer est fermée par une armature ordinaire avec trou d'homme; elle traverse la muraille du fourneau et se repose sur le chambranle en fonte S. L'autre extrémité doit être armée d'oreilles s'appuyant sur la maçonnerie pour supporter la partie postérieure de tout l'appareil.

Les fonctions de ce générateur, qui sont du reste analogues à celles de l'appareil décrit précédemment, sont faciles à comprendre. Tandis que le courant de calorique s'établit de la chaudière aux bouilleurs, le liquide s'échauffe et la vapeur se forme en sens inverse des bouilleurs à la chaudière.

En effet, l'eau froide d'alimentation arrive à la partie inférieure des bouilleurs, et au fur et à mesure qu'elle s'échauffe, elle s'élève et finit par pénétrer dans la chaudière, où elle ne tarde pas à être transformée en vapeur en raison de la haute température qui s'y fait sentir. La progression de la température de l'eau est donc parfaitement d'accord avec les milieux qu'elle traverse successivement, puisqu'elle arrive, relativement froide, dans une partie qui ne reçoit que la dernière action du calorique, et parvient échauffée dans un milieu encore plus chaud qu'elle ne l'est encore. Nous avons vu que le contraire a lieu dans les appareils à bouilleurs à flamme montante, où la vapeur formée en grande partie dans les bouilleurs est obligée, pour arriver au réservoir, de traverser l'eau de la chaudière qui ne reçoit que la dernière action du calorique.

En général, tout s'accorde dans ce système pour paraître très-rationnel, autant comme économie de combustible que comme promptitude et facilité de la vaporisation. On obtient aussi de la vapeur très-sèche, qui n'entraîne pas d'eau non vaporisée, puisque toute la masse au sein de laquelle elle se forme à pu acquérir tout son calorique latent de vaporisation, ne recevant jamais d'eau froide.

Cependant, il ne serait pas exact de dire que le système de chaudière à bouilleurs à flamme descendante se soit propagé à l'exclusion de celui ordinaire à flamme montante, qui est au contraire adopté généralement par la majeure partie des constructeurs. La raison en est qu'avec chacun des deux systèmes on obtient des résultats, à très-peu de chose près, identiques lorsqu'ils sont bien conduits, malgré la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

disposition, incontestablement plus logique, du générateur à flamme descendante.

Tant de causes peuvent concourir à faire perdre du calorique ou à en économiser que le résultat, qui devrait être déduit du système, peut être troublé par un motif quelconque dépendant de la conduite du foyer ou de l'emploi de la vapeur. Mais on pourrait répondre à cela : en supposant toutes les conditions semblables, le système le mieux combiné ne donne-t-il pas le meilleur résultat?

Oui; mais dans des proportions assez peu différentes pour que les irrégularités inévitables de la pratique et la difficulté des expériences précises suffisent souvent pour le masquer, et, la routine aidant, pour continuer d'employer le plus ancien, celui le plus généralement connu et sur lequel on possède les données d'expériences les plus nombreuses.

## GÉNÉRATEUR A UN SEUL CORPS, A FLAMME MONTANTE AVEC UN BOUILLEUR RÉCHAUFFEUR

(FIG. 10, PL. 2)

En dehors des systèmes perfectionnés qui viennent d'être décrits, on fait souvent usage d'un simple appareil réchauffeur dans lequel l'eau d'alimentation est amenée avant d'être envoyée dans la chaudière. Cet appareil consiste dans un récipient en tôle de petite dimension posé assez près du fourneau pour en recevoir la chaleur perdue; il est souvent placé sur la partie supérieure même de ce fourneau.

Mais il est préférable de le disposer, comme M. Cavé l'a fait, dans un carneau latéral faisant suite à ceux de la chaudière, comme cela a été indiqué dans l'exemple proposé fig. 10. C'est une chaudière à un seul corps A, et d'une dimension calculée pour un seul passage des produits de la combustion.

Ces produits quittent le premier carneau et passent dans le second E par une ouverture F. C'est dans ce canal E, tout près de la chaudière, que l'on place un petit bouilleur B dans lequel on dirige l'eau d'alimentation qui se rend ensuite dans le corps principal A par le conduit IJL. C'est une disposition avantageuse et employée depuis longtemps.

Souvent les pompes alimentaires puisent l'eau au réchauffeur et la prennent chaude pour l'envoyer à la chaudière. Outre une certaine perte de chaleur qui en résulte, l'eau chaude est nuisible à la marche d'une pompe dont elle altère les garnitures. En plaçant, au contraire, le réchauffeur entre celle-ci et la chaudière, le même inconvénient n'existe pas, puisque l'eau ne s'échauffe qu'après avoir quitté la pompe.

Ce procédé, si simple, est d'un excellent effet et sera toujours appliqué avec avantage, surtout pour les petits générateurs dans lesquels la surface de chauffe est quelquefois relativement restreinte. L'économie qu'il procure n'est pas douteuse, car il est évident que le réchauffeur se trouvant enveloppé par un courant d'air chaud qui est environ à 250 ou 300 degrés, l'eau prise froide à 12 degrés peut, sans

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

y séjourner longtemps, y acquérir facilement une température voisine de l'ébullition avant d'être introduite dans la chaudière.

Or, si la quantité de chaleur à fournir à chaque kilogramme d'eau pour la vaporiser à 5 atmosphères est égale, suivant ce que l'on a vu, à :

$$153 - 12 + 501 = 642 \text{ calories},$$

et que l'on élève *gratuitement* sa température d'environ 88 degrés, on gagne, en supposant l'utilisation du combustible égale seulement 0,7 :

$$\frac{88}{642} \times 0{,}7 = 0{,}096;$$

soit près de 10 pour cent sur la consommation brute de combustible.

Cette petite économie n'est pas à dédaigner, surtout si l'on remarque qu'une simple machine de la force de 10 chevaux pouvant consommer plus de 6000 fr. de charbon par an avec 12 heures de marche par jour, c'est une somme de 600 fr. toute nette à épargner.

## GÉNÉRATEUR DIT A SIPHON

Par **M. STRECKER**, de Manheim

Comme générateur cylindrique, à foyer extérieur, nous citerons un système pour lequel M. Strecker, un ingénieur allemand, s'est fait breveter en France en 1850, et dont la fig. 28 pourra donner une idée du principe.

On voit que ce générateur nouveau se compose d'un corps principal A disposé horizontalement, et muni de deux bouilleurs verticaux B et C d'inégales longueurs.

Le calorique qui se dégage du foyer D, dont l'entrée est en *a*, s'élève et circule d'abord autour du premier bouilleur B, puis ensuite autour du corps horizontal A; de ce dernier carneau le courant de chaleur enveloppe le second bouilleur C et s'échappe par le carneau G qui conduit à la cheminée H, dont un registre à bascule *d* sert à régler le passage.

Nous n'avons indiqué d'appareils accessoires que le niveau d'eau *c* et une tubulure *b* ménagée à la partie inférieure du bouilleur C pour en opérer la vidange.

En l'absence de résultats pratiques connus, nous pouvons dire seulement que ce système semble répondre aux meilleures conditions de marche autant qu'à une conduite facile.

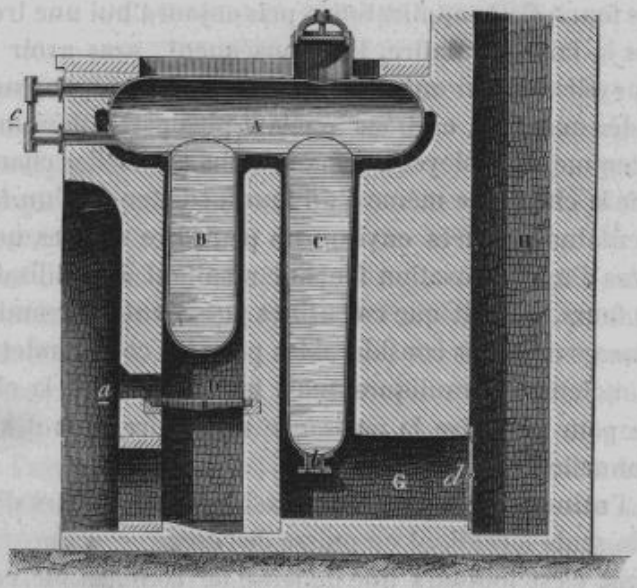
En effet, le courant de chaleur est très-bien établi en sens inverse de celui de l'eau froide qui est introduite dans l'appareil par la partie inférieure du bouilleur C qui est évidemment la partie la plus froide. Elle ne parvient donc au corps principal et au contact de la vapeur qu'après s'être élevée au fur et à mesure de l'augmentation de sa température. La vapeur formée n'éprouve aucune gêne pour s'élever dans le réservoir.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En comparant le développement total du générateur à la surface chauffée, on trouve que la proportion en est beaucoup plus grande que dans les autres générateurs à bouilleurs horizontaux. Par conséquent, le volume de l'eau liquide doit être aussi proportionnellement moindre sans être trop faible.

D'autre part, il est certain que l'ensemble possède toute la solidité désirable, et que la disposition des carneaux permet d'éviter l'encombrement et l'obstruction par la suie. Toutefois, on a objecté contre ce système l'inconvénient des dépôts calcaires qui restent au bas des tubes et font que ceux-ci brûlent rapidement lorsqu'on emploie des eaux impures, plus ou moins chargées de sulfate et de carbonate de chaux.

Fig. 28.




M. Beslay a proposé, il y a déjà une douzaine d'années, un générateur qui avait beaucoup de ressemblance avec celui-ci, et qui a été appliqué aux ateliers du chemin de fer d'Orléans. C'était aussi un corps cylindrique horizontal muni de plusieurs bouilleurs verticaux, mais proportionnellement plus petits et que l'on désignait sous le nom de *pis*, à cause de leur forme conique terminée en pain de sucre. L'inconvénient que nous venons de signaler ajouté à une construction délicate ont été probablement les motifs pour lesquels ce système ne s'est pas propagé.

On en trouve, au reste, tous les détails d'exécution dans le recueil de feu M. Leblanc, de bien regrettable mémoire.

FIN DU CHAPITRE TROISIÈME.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

# CHAPITRE IV

## GÉNÉRATEURS CHAUFFÉS PAR LES CHALEURS PERDUES DES HAUTS-FOURNEAUX ET DES FOURS

Nous ne croyons pas sortir de notre sujet en entrant dans quelques détails relatifs aux générateurs qui sont chauffés par les gaz ou les chaleurs perdues des hauts-fourneaux ou des fours. Cette application a pris aujourd'hui une trop grande extension pour ne pas la faire connaître. Par conséquent, sans avoir la prétention de montrer tous les systèmes qui ont été proposés, nous croyons néanmoins devoir en donner une idée générale, en nous arrêtant plus particulièrement sur une disposition plus récemment employée : nous voulons parler des chaudières verticales montées autour de la cheminée même d'un four à souder ou d'un four à réchauffer.

Depuis une trentaine d'années environ on peut dire que les usines métallurgiques ont été dotées d'une innovation féconde résultant de l'utilisation des chaleurs perdues de leurs fours. On sait que ces usines possèdent un grand nombre d'outils qui exigent des forces motrices considérables pour les commander. Plusieurs fonctionnent par des moteurs hydrauliques, mais le plus souvent, la chute d'eau devenant insuffisante pour produire la puissance nécessaire, il faut avoir recours à la puissance additionnelle de la vapeur.

Souvent aussi, l'usine ne se trouvant pas établie sur un cours d'eau, le moteur à vapeur est alors la seule force dont on puisse disposer.

Dans tous les cas, c'est toujours une dépense de combustible considérable pour des usines qui déjà en font, d'autre part, une prodigieuse consommation.

La profonde amélioration a consisté dans la remarque que précisément le combustible absorbé par les besoins directs de l'usine ne l'était pas tellement par la fabrication même qu'il n'existât aucune quantité perdue, et susceptible, par conséquent, d'être utilisée pour produire de la force motrice.

Puisant dans cette remarque un renseignement précieux, on imagina les chaudières à vapeur chauffées par les chaleurs perdues des hauts-fourneaux et des fours à puddler ou à réchauffer.

Citons des premiers MM. Thomas et Laurens, ingénieurs distingués (1), qui ont fait de grandes recherches sur ce sujet et ont obtenu de très-beaux résultats. L'application spéciale qu'ils ont faite des chaudières chauffées par la flamme perdue des hauts-fourneaux et des fours a eu beaucoup de succès.

(1) Le premier brevet, pris en France par ces ingénieurs pour utiliser la chaleur perdue des hauts-fourneaux, date de 1836. Depuis cette époque, ils ont établi dans diverses usines des appareils propres au chauffage des chaudières ou à d'autres usages.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Aujourd'hui, cette application est devenue générale. Le système qui est le plus en usage consiste dans des chaudières cylindriques horizontales disposées dans un fourneau qui fait suite au four ou au haut-fourneau, et qui est traversé par les flammes qui s'en échappent avant d'arriver à la cheminée.

Plus récemment, un ingénieur anglais, M. Nasmith, a imaginé de placer la chaudière verticalement en la disposant, comme une chemise, autour de la cheminée du four, laquelle conserve alors, par rapport à ce dernier, la place qu'elle occupait avant l'application d'un générateur.

Nous allons dire quelques mots des deux systèmes.

## CHAUDIÈRES A VAPEUR HORIZONTALES

### UTILISANT LES CHALEURS PERDUES

Les générateurs horizontaux appliqués aux fours des usines métallurgiques ne présentent guère d'autres particularités, à notre point de vue, que l'étendue de leurs surfaces de chauffe, qui sont beaucoup plus grandes, pour une même puissance à obtenir, que celles des générateurs dont une partie est soumise au rayonnement d'un foyer.

Les générateurs des fours ne sont chauffés que par les gaz enflammés qui s'en échappent après leur action sur le métal que l'on traite; la production de vapeur, par mètre carré de surface de chauffe, peut donc être regardée comme une moyenne entre celles qui correspondent, pour un générateur ordinaire, à la partie soumise au rayonnement du foyer et aux parties qui en sont le plus éloignées, lesquelles ne reçoivent que de l'air à une température moyenne de 250 à 300 degrés.

MM. Grouvelle et Jaunez, dans leur nouveau traité, *le Guide du chauffeur*, indiquent que ces chaudières doivent avoir une superficie environ triple de celle qui serait nécessaire si elle recevait l'action directe d'un foyer. Ils ajoutent que le produit en vapeur est de 4 ou 5 kilogrammes d'eau vaporisée à 5 atmosphères par kilogramme de charbon brûlé sur la grille d'un four à réchauffer, et 3 à 5 seulement si la chaudière est alimentée par les flammes issues d'un four à puddler.

Les mêmes ingénieurs sont d'avis que ces générateurs doivent être munis d'un réservoir de vapeur spécial, enfermé dans la maçonnerie, pour conserver la vapeur produite en excès à cause de la marche intermittente des appareils qui fournissent la chaleur.

Quant à la construction, les générateurs utilisant les flammes perdues consistent le plus souvent en un seul corps cylindrique entouré d'un carneau que les gaz parcourent avant d'arriver à la cheminée. Cependant, on en établit aussi avec des bouilleurs ordinaires.

Pour que le tirage nécessaire au foyer du four ne souffre pas de cette augmentation du parcours de l'air chaud et du refroidissement occasionné par l'absorption du générateur, les carneaux et la cheminée doivent être calculés comme si la quantité de combustible employée pour le four avait été brûlée directement sous le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

générateur; leurs sections sont donc très-grandes, et celles des carneaux vont en augmentant au fur et à mesure que l'on se rapproche de la cheminée, afin de contre-balancer le ralentissement du courant d'air par suite de la diminution progressive de température.

Ces générateurs doivent être aussi munis d'un foyer additionnel qui permette de les mettre en marche d'une façon indépendante en cas d'arrêt du four.

Distinction des deux classes différentes de ces générateurs. — Péclet s'exprime ainsi en parlant des différences qui existent entre les appareils dont on cherche à utiliser les flammes perdues :

« Les foyers métallurgiques peuvent se diviser en deux classes :

« La première comprend ceux dans lesquels le combustible est brûlé sur grille, et agit principalement par la flamme qu'il produit. L'air qui s'échappe de ces fours est presque entièrement brûlé, mais il est à une très-haute température.

« La seconde comprend les fourneaux dans lesquels les matières que l'on veut chauffer, réduire ou fondre, sont mêlées avec le combustible et forment des couches d'une grande épaisseur, circonstance qui occasionne toujours la formation d'une quantité d'oxyde de carbone et de différents carbures d'hydrogène.

« La première classe renferme tous les fourneaux à réverbère, les fours à réchauffer, les fours d'affinage et les fours à puddler. L'utilisation de la chaleur perdue dans ces fours, pour la formation de la vapeur, est très-simple; il suffit de faire circuler la flamme et l'air brûlé qui sortent du fourneau, autour de chaudières convenablement disposées, et de faire écouler dans l'atmosphère l'air brûlé réfroidi par une cheminée d'une section et d'une hauteur suffisantes...

« Dans les foyers de la seconde classe, la chaleur perdue ne consiste pas uniquement dans la haute température des gaz qui s'échappent, mais principalement dans la grande quantité de gaz combustibles qui sortent avec l'air brûlé; ainsi, il ne suffit pas, pour utiliser la chaleur perdue, de refroidir les gaz, il faut avant les brûler complétement. »

En effet, lorsqu'il s'agit d'appliquer un générateur à un haut-fourneau, c'est de sa partie supérieure, *du gueulard,* que se fait la prise de gaz dirigés au générateur. A leur entrée sous l'appareil vaporisatoire, les gaz sont rencontrés par des jets d'air atmosphérique qui les enflamment.

Sur cette donnée primitive, MM. Thomas et Laurens construisirent, il y a plus de vingt ans, des chaudières verticales dont l'entrée des carneaux se trouvait immédiatement à la partie supérieure du haut-fourneau dont on se proposait d'utiliser les chaleurs perdues.

Le corps principal du générateur, se composant d'un cylindre disposé verticalement, était muni d'une partie cylindrique plus faible de diamètre et placée horizontalement. A l'origine de cette dernière se trouvait une sorte de grille que devaient traverser les gaz sortant du fourneau, et où ils rencontraient des jets d'air atmosphérique pur qui venaient opérer leur inflammation. Un petit foyer additionnel, placé près de ce même point, avait pour objet de pouvoir chauffer la chaudière d'une façon indépendante, dans le cas où le haut-fourneau ne fonctionnerait pas.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Par conséquent, les gaz sortant du haut-fourneau étaient enflammés à leur issue du gueulard et parcouraient d'abord la partie horizontale du générateur, ensuite le contour extérieur du corps principal placé dans un carneau divisé en deux parties dans le sens de la section horizontale, afin d'établir une double circulation de haut en bas, *et vice versâ,* avant d'arriver à la cheminée.

Tout en conservant le principe de placer le générateur à la partie supérieure du haut-fourneau pour en recueillir immédiatement les gaz, M. E. Flachat a fait établir, en 1837, à Niederbronn, un double générateur cylindrique et à bouilleurs, mais horizontalement, au lieu de la disposition verticale de MM. Thomas et Laurens. Le principe du fonctionnement était identique. L'air inflammable sortant du haut-fourneau arrivait par un conduit bifurqué à chacun des deux générateurs où ils étaient encore enflammés comme précédemment.

Mais cette application présentait un inconvénient commun aux deux dispositions : c'était la nécessité d'établir le générateur à la partie supérieure du haut-fourneau afin de prendre le gaz à sa sortie immédiate.

En 1838, M. Robin fit connaître une autre façon d'envisager la question. Il pensa qu'il valait mieux perdre une partie de la chaleur propre des gaz inflammables en se donnant la facilité de les diriger par des tuyaux de conduite vers le générateur qui pourrait alors se trouver plus éloigné du haut-fourneau et à la hauteur du sol. Le cheminement que l'on ferait faire ainsi à ces gaz ne leur faisant pas perdre leur propriété d'être inflammables rendrait plus facile l'établissement du générateur où ils doivent être utilisés (1).

C'est en s'appuyant sur cette pensée que de nombreux appareils ont été établis depuis, et avec beaucoup de succès, par MM. Thomas et Laurens.

Le système que nous nous proposons de décrire spécialement ici n'appartient pas à ce mode d'utilisation de la chaleur perdue. Il fait partie de la première classe des fours, suivant Péclet, d'après ce qui a été dit précédemment; sa disposition est, du reste, entièrement particulière, ainsi qu'on pourra s'en convaincre.

## CHAUDIÈRE VERTICALE

### APPLIQUÉE A UN FOUR A RÉVERBÈRE A RÉCHAUFFER

(FIG. 5 A 9, PL. 3)

M. Nasmith, ingénieur très-distingué, est l'inventeur du système de chaudière verticale dont nous donnons ici un spécimen qui, déjà très-répandu en Angleterre, commence à recevoir en France quelques applications, particulièrement à Nantes, aux forges de Vierzon et ailleurs.

L'appareil représenté par la pl. 3 a été monté dans les ateliers de construction

(1) Ces différents modes d'utilisation de la chaleur et les appareils correspondants ont été décrits avec détails dans le IIe volume du recueil la *Publication industrielle*.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de M. Nillus, au Havre, où la vapeur qu'il produit est utilisée pour faire marcher un marteau-pilon.

Le principe de la construction de ce nouveau générateur est très-simple et peut être aisément défini. Il consiste, en quelque sorte, à envelopper la cheminée du four d'un cylindre de tôle qui forme la chaudière dont la paroi intérieure est la cheminée même et la surface de chauffe.

C'est ce qu'indique la pl. 3 par les fig. 5 à 9, qui sont :

Fig. 5. Section verticale de l'ensemble de l'appareil par l'axe longitudinal du four;

Fig. 6. Vue extérieure, regardée par le bout du four;

Fig. 7. Coupe horizontale de la cheminée et du corps de chaudière, faite suivant la ligne 1-2, au-dessus du four;

Fig. 8. Détail d'un système particulier de soupape de sûreté appliqué aux chaudières verticales;

Fig. 9. Détails d'un assemblage modifié suivant les conditions indiquées plus bas.

Ensemble de la construction. — On sait que, dans un four du système de celui A représenté ici, le combustible est brûlé sur une grille composée de barreaux en fer *a* que l'on peut retirer un à un lorsqu'ils atteignent un certain degré de déformation, ce qui arrive promptement, à cause de la haute température, et ce qui les fait préférer en fer comme pouvant être plus facilement réparés que remplacés s'ils étaient en fonte.

La flamme, partant du foyer, s'infléchit suivant la forme intérieure du four, vient agir sur les matières déposées sur la sole *b*, et s'abaisse par le carneau *c* qui se termine à la cheminée B dont la partie inférieure est une amorce cylindrique en brique réfractaire.

Lorsqu'il n'y a pas de chaudière adaptée au four, la cheminée est continuée en brique dans toute sa hauteur. Mais dans le cas présent, où la chaleur des gaz qui s'y élèvent doit être reprise en partie pour vaporiser de l'eau, il faut que la cheminée soit établie en tôle, de façon à laisser facilement passer la chaleur.

Celle-ci est, en effet, formée d'un cylindre de tôle B qui se raccorde avec l'amorce en brique et se trouve assemblé, par une cornière en fer, avec un disque en tôle *d* qui constitue le fond de la chaudière, et repose lui-même sur quatre colonnes en fonte *e*.

Au point de la hauteur qui doit correspondre à la limite commune de l'eau et de la vapeur, la cheminée en tôle est modifiée et doit se continuer en brique, afin que la vapeur ne soit pas en contact avec une surface métallique chauffée directement. Pour cela, le cylindre intérieur B est rivé avec une cornière en double équerre *f*, rivée de la même façon avec un second cylindre en tôle C qui, plus grand de diamètre, forme avec celui B une retraite de la dimension d'une demi-brique. On a construit, en effet, sur cette retraite une chemise de brique B′ qui forme la continuation de la cheminée et la complète jusqu'en haut.

Maintenant le corps extérieur de la chaudière est formé du cylindre de tôle D qui s'assemble, comme le cylindre intérieur B, avec le fond *d*, et se trouve fermé en

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

haut par un fond semblable $g$ auquel vient aussi s'assembler et se terminer le cylindre en retraite C.

Pour résumer cette première définition, disons que la chaudière est constituée, en définitive, par les cylindres B, C, D et les fonds annulaires $d$ et $g$, et qu'elle vient se poser d'une seule pièce sur les quatre supports $e$. On monte ensuite à l'intérieur la partie en brique B′ que l'on prolonge à l'extérieur de la quantité voulue pour la hauteur de la cheminée. Cette partie extérieure est consolidée par des armatures en fer $h$, et elle est couronnée d'un chapiteau en fonte $i$ qui reçoit lui-même le registre E et les pièces de son mécanisme.

Le raccord de la partie de brique B′ a été exécuté comme il vient d'être dit; mais on le fait aussi d'une façon un peu différente, comme nous allons le faire connaître.

Au lieu de disposer deux cylindres de tôle B et C en retraite l'un de l'autre, on a continué le cylindre B dans toute la hauteur de la chaudière, et l'épaisseur de brique a été posée en ressaut intérieur sur une cornière en simple équerre $f'$ (fig. 9) pour la recevoir.

Cette modification est indiquée par les fig. de détails 8 et 9, dont l'une montre aussi, en traits ponctués, le premier mode de disposition représenté sur la figure d'ensemble fig. 5.

En comparant ces deux modes de dispositions, nous constatons les particularités suivantes:

Avec la première disposition, fig. 5, l'intérieur de la cheminée est parfaitement régulier dans toute sa hauteur, mais le réservoir de vapeur est considérablement réduit.

Avec la seconde, fig. 8 et 9, la section du réservoir de vapeur est égale à celle de la capacité de l'eau; mais il faut augmenter le diamètre de l'ensemble, puisque le diamètre effectif de la cheminée doit être compté à l'endroit du rétrécissement.

Appareils de service. — La prise de vapeur se fait par une boîte à soupape F correspondant avec un conduit intérieur G qui s'élève jusqu'à la partie supérieure du réservoir de vapeur, afin de prendre de la vapeur bien sèche. De la boîte F la vapeur est dirigée sur le moteur à alimenter par un conduit $j$. La machine est le plus souvent un marteau-pilon.

L'alimentation se fait, d'une façon analogue, par un conduit extérieur $k$ adapté à la boîte à clapet de retour d'eau H, qui correspond à un petit tube plongeur $l$ disposé à l'intérieur de la chaudière.

La vidange de la chaudière s'opère au moyen d'un robinet I placé au fond $d$ du générateur.

Celui-ci doit être également muni des appareils de service ordinaires, tels que manomètres, soupapes de sûreté et niveaux d'eau.

La soupape de sûreté est disposée ici sur une tubulure en fonte J placée à la partie supérieure de la chaudière, ainsi que le montre la fig. 6. Au lieu d'un poids suspendu à son levier $m$, c'est une tringle $n$ qui descend jusqu'à la partie inférieure et vient traverser une boîte à ressort K disposée comme cela se fait pour les locomotives où les poids des soupapes sont remplacés par des ressorts à boudin.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On s'est réservé, de cette façon, la faculté de régler le jeu de la soupape quoiqu'elle se trouve placée hors de la portée de la main.

Cependant, une autre disposition de soupape a été employée pour ce système spécial de générateur.

Cette autre disposition est indiquée en détail sur la fig. 8, qui montre que le siége *o* de la soupape est ménagé en tête d'une petite colonne de fonte L fixée sur le dessus *g* du corps de chaudière. La soupape M est assemblée avec une longue tringle *p* qui descend jusqu'à la partie inférieure de la chaudière où elle y porte un très-fort poids entièrement plongé dans l'eau.

Il est évident que le fonctionnement de cette soupape n'est pas différent de celui des autres où l'action du poids se fait sentir par l'intermédiaire d'un levier multiplicateur. Celle-ci doit se soulever lorsque la vapeur appuie suffisamment sous sa face inférieure pour vaincre l'effort du poids suspendu à la tringle, moins la perte qu'il subit par son immersion, et plus la pression atmosphérique sur l'extérieur de la soupape.

Seulement, le poids étant direct doit être très-considérable; et puis les mouvements doivent être plus saccadés en raison de la lourde masse que la vapeur déplace pour se frayer un passage. Somme toute, nous ne connaissons pas les avantages que pourrait présenter cette disposition sur celle ordinairement employée.

A l'égard de la vérification du niveau d'eau dans la chaudière, si l'espace libre à la partie supérieure ne permet pas d'y placer le mécanisme d'un flotteur ordinaire, on peut adopter des robinets d'épreuve dont les clefs sont rattachées à des tringles de renvoi qui descendent à la portée de la main.

Pour tous ces fours à haute température, on sait que le tirage se règle à l'aide d'un registre en forme de clapet, placé à la partie supérieure de la cheminée. Nous avons dit (p. 152) que si le registre se trouvait engagé dans la maçonnerie, il serait promptement détruit par la chaleur.

Le registre E de ce four, pl. 3, est suspendu à l'une des extrémités d'un balancier en fer *q*, que l'on fait osciller du bas au moyen de la tringle *r*. Une crémaillère d'accrochage doit être ménagée pour arrêter la tringle à divers points de l'ouverture du clapet E. Il suffit qu'on le soulève d'une hauteur égale au quart du diamètre de la cheminée pour que l'aire d'échappement soit égale à la section de cette dernière.

## CONDITIONS DE MARCHE DE LA CHAUDIÈRE VERTICALE

La cheminée-chaudière que nous venons de décrire présente un diamètre extérieur de $1^m54$, et le conduit intérieur, ou la cheminée même, a $0^m72$ dans toute sa hauteur, moins l'amorce inférieure en brique réfractaire, dont le diamètre intérieur égale $0^m50$.

La hauteur totale de la cheminée est de $12^m23$ : soit à peu près 12 mètres au-dessus de la grille du four.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le corps de la chaudière a une hauteur de $7^m90$ sur laquelle la colonne d'eau qui détermine la surface de chauffe est seulement de $4^m90$.

Par conséquent, la partie correspondante du corps intérieur ayant 0,72, on trouve pour l'étendue de surface vaporisatoire :

$$0{,}72 \times 3{,}1416 \times 4^m90 = 11{,}08 \text{ mètres carrés.}$$

Cette superficie est beaucoup moindre que ce qu'elle devrait être pour utiliser la même quantité de chaleur perdue avec une chaudière horizontale, dont on peut augmenter le développement presque à volonté. Mais, dans le cas présent, chaque mètre de surface doit produire beaucoup plus de vapeur que dans les conditions ordinaires, puisqu'il reçoit la première action de l'air chaud en quittant le four.

Il est donc présumable que la production de vapeur serait théoriquement la même ; mais il reste à décider s'il en est de même de l'utilisation de la chaleur.

En effet, si l'on voulait que les gaz ne quittassent la cheminée qu'à la température de 300 degrés, environ, qu'ils possèdent dans les générateurs où ils effectuent un parcours horizontal, qui n'augmente pas leur vitesse avant d'arriver à la cheminée, il faudrait ici retarder cette vitesse dans la cheminée même, ce qui pourrait très-bien ne pas convenir au tirage nécessaire à la marche du four.

Tel est au moins le reproche adressé *à priori* au système de cheminée-chaudière, reproche qui paraît justifié sous la réserve des résultats d'expérience qui nous sont communiqués au sujet de l'appareil même dont nous avons donné la description, et le dessin pl. 3.

### RÉSULTATS D'EXPÉRIENCES DE LA CHAUDIÈRE VERTICALE

Le four à réchauffer sur lequel cette chaudière est appliquée est établi, ainsi que deux autres semblables, dans les ateliers de M. Nillus, du Havre, qui a bien voulu nous faire part des conditions où elle se trouve et des résultats obtenus.

Le four est employé à chauffer les paquets de fer destinés à la confection des pièces de forge d'une certaine importance. La vapeur produite par la chaleur, qui est utilisée au lieu d'être perdue, alimente le marteau-pilon où sont travaillés les paquets chauffés dans le four.

Le marteau-pilon ne dépense de vapeur que pour la levée, c'est-à-dire que la vapeur n'est introduite qu'au-dessous du piston. Voici les dimensions du cylindre à vapeur d'après lesquelles on pourra juger de la quantité de vapeur dépensée :

| | |
|---|---|
| Diamètre du piston moteur du marteau..... ... | $0^m$ 45 |
| Superficie *id.* (en décimètres carrés)..... | $15^{d.q.}$ 9 |
| Course du piston ou du marteau..... | $1^m$ 50 |
| Volume, en litres, engendré par le piston pour une levée du marteau. | $385^{d.c.}$ 5 |

Le poids du marteau est de 2500 kilogrammes, y compris la tige et le piston.

La chaudière verticale fournit de la vapeur à 5 atmosphères pour satisfaire à cette



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dépense; elle en produit même davantage, attendu que tout le temps que dure *la chaude*, ou le temps de repos du marteau, on serait obligé de perdre une partie de cette vapeur si on ne trouvait pas à l'utiliser en la dirigeant sur une autre machine qui commande spécialement un ventilateur employé à activer le feu des fours.

Pour donner une idée du travail complet de tout l'appareil, nous citerons les chiffres qui nous ont été communiqués à ce sujet par M. Nillus fils.

Le poids des paquets de fer soumis à la chauffe dans le four représenté pl. 3 s'est élevé à 4500 kilogrammes, pour laquelle quantité on a consommé 12 hectolitres de houille (de Newcastle) en 11 heures de travail (12 hectolitres correspondent environ à 1000 kilogrammes).

En résumé, ces données sont toutes pratiques et ne permettent réellement pas d'en tirer la valeur purement scientifique du système de chaudière en question, attendu qu'il faudrait pour cela connaître exactement le nombre de coups de marteau correspondant au travail énoncé ci-dessus, afin d'en conclure le volume exact de vapeur produite, et surtout établir une comparaison à l'aide d'une chaudière horizontale fonctionnant dans les mêmes conditions.

Mais ces renseignements, par la raison même qu'ils sont pratiques, suffiront aux personnes qui ont des connaissances spéciales sur l'emploi du matériel de forge pour faire une utile appréciation de ce mode de générateur qui, au dire des industriels qui l'emploient, remplit parfaitement les conditions proposées.

Du reste, le simple aspect de sa disposition générale permet déjà de reconnaître qu'il a sur le système de chaudières horizontales l'avantage de n'occuper relativement aucune place dans l'atelier et de n'exiger aucune construction de maçonnerie.

D'autre part, la production active de la vapeur par la surface exposée à une haute température a bien son mérite pour alimenter des outils, comme les marteaux-pilons, dont la marche est absolument intermittente. Il n'est plus nécessaire alors de ménager de très-grands réservoirs de vapeur qu'il faut aussi entourer avec beaucoup de soin afin de les soustraire au refroidissement.

FIN DU CHAPITRE QUATRIÈME

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

# CHAPITRE V

## GÉNÉRATEURS TUBULAIRES ET A FOYERS INTÉRIEURS

### ORIGINE DES GÉNÉRATEURS TUBULAIRES

On a vu précédemment que la condition essentielle d'un appareil de production de vapeur n'est pas dans le rapport entre la quantité d'eau qu'il renferme et la somme de vapeur à produire, mais bien entre cette dernière condition et l'étendue de surface chauffée en contact avec l'eau.

Or, ce principe très-simple, reconnu depuis longtemps, devait donner naissance un jour *aux appareils tubulaires,* c'est-à-dire aux générateurs dans lesquels les produits de la combustion traversent la masse de liquide même à échauffer, et par un grand nombre de passages de sections très-petites; car il est évident que, par cette condition, on obtient, à égalité de section, un développement de surface qui pourrait être presque indéfiniment augmenté.

Supposons, en effet, que la section nécessaire pour le passage de l'air chaud ou la section du carneau soit un carré dont le côté égale 1, la section transversale sera égale à $1^2 = 1$, et le développement du contour tubulaire égale à 4.

Si, au lieu d'un seul conduit, nous en supposons deux d'une section moitié moindre chacun, le développement total des côtés des carrés sera :

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \times 8 = \frac{8}{1,4142} = 5,6568;$$

autrement dit, les développements seront entre eux comme 4 : 5,6568 ou comme 1 : 1,4142.

Résumant ce dernier point, on peut établir cette remarque générale que :

*Si l'on divise la section donnée d'un carneau en un certain nombre de passages partiels équivalents et de même forme, le développement des surfaces de chauffe augmente comme la racine carrée du nombre de ces passages.*

Ainsi, l'avantage des carneaux divisés est évident, chaque surface partielle étant en contact avec l'eau.

Cependant, ce n'est que récemment que des générateurs ont été établis sur ce principe, quoiqu'il eût été proposé depuis longtemps.

En effet, un sieur Barlow, citoyen des États-Unis d'Amérique, a obtenu un brevet d'importation en France, en 1793, pour des appareils évaporatoires tubulaires dont le principe de la construction est presque entièrement analogue à ce qui se fait

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

actuellement. On en pourra juger par une reproduction exacte que nous allons faire de son importante invention.

Le brevet du sieur Barlow avait pour motif des moyens de propulsion appliqués aux bateaux à vapeur et des perfectionnements à leurs générateurs.

Il a pour titre :

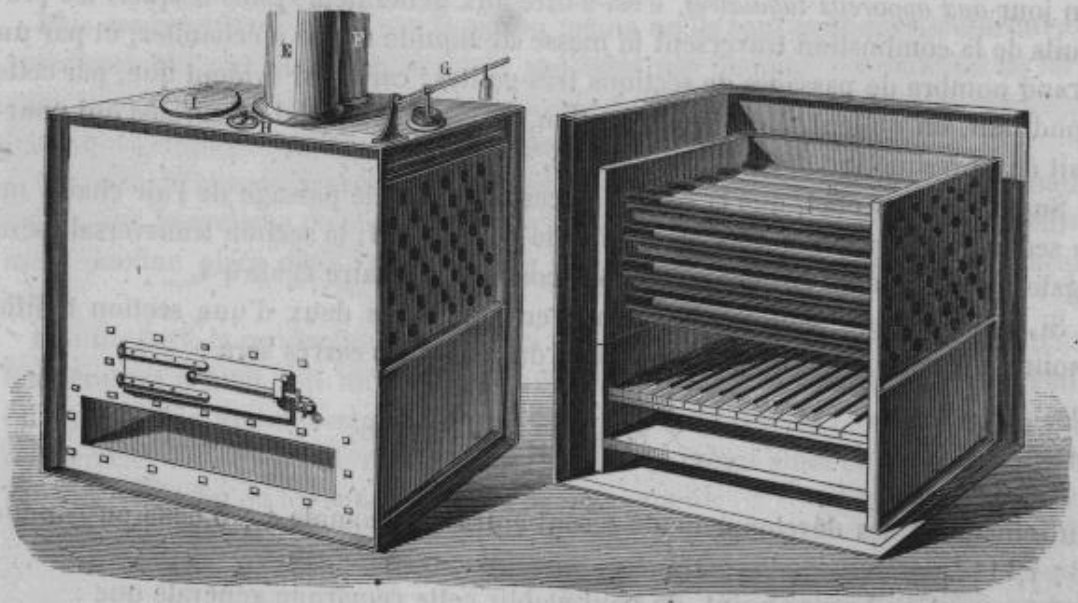
*Appareils dits* FOURNEAUX A CHAUDIÈRES *et moyen propre à faire mouvoir les bateaux par la vapeur.*

L'inventeur s'énonçait ainsi en commençant :

« L'objet de ces appareils est de présenter à l'action du feu *la plus grande étendue de surface possible.* Pour cela, on fait passer l'eau dans des tuyaux ou cylindres, et ceux-ci dans le foyer même; on le peut encore en faisant passer la flamme du foyer à travers des petits tuyaux répandus dans l'eau à échauffer. » (1)

Laissant de côté les moyens de propulsion proposés par Barlow, nous parlerons seulement de la chaudière dont les fig. 29 et 30 sont une reproduction rigoureuse d'après le brevet original.

Fig. 29. Fig. 30.




Ces figures sont expliquées par la courte légende suivante :

« Fig. (29). Vue perspective d'un fourneau et d'une chaudière où l'on voit un grand nombre de tuyaux multiplier les surfaces en contact avec le feu;

« E, cheminée du fourneau;

« F, tuyau qui porte la vapeur dans le cylindre de la machine;

« G, soupape de sûreté;

(1) Voir *Brevets expirés*, IIe vol., page 252, pl. 58. Date du brevet : 24 août 1793; durée, 15 ans. Ce brevet est expiré en 1808; depuis cette époque, l'emploi des chaudières tubulaires est naturellement dans le domaine public. La publication légale en a été faite en 1818.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

« Fig. (30). Vue de l'intérieur de ce fourneau et de cette chaudière. »

On voit à l'inspection seule des figures que cette invention, toute ébauche grossière qu'elle puisse paraître à côté des chaudières tubulaires actuelles, n'en renfermait pas moins le principe complet. L'auteur avait prévu les deux cas possibles du passage de l'eau ou de l'air chaud dans les tubes.

Cependant, cette innovation, à laquelle un si brillant avenir était destiné, n'a pas été appliquée en France par son auteur; elle est restée oubliée, si ce n'est complétement ignorée, jusqu'en 1828, époque à laquelle M. Séguin, le neveu de l'illustre Montgolfier, se fit breveter pour des chaudières tubulaires applicables aux locomotives (1). On sait, en effet, que la réduction du volume de la chaudière pour cet admirable système de machine est pour ainsi dire la condition *sine quâ non* de son existence : aussi l'apparition du système tubulaire fut-il salué avec enthousiame, et le nom de M. Séguin à jamais célèbre pour ce qui passait, à bon droit en ce moment, pour sa découverte. On doit encore, du reste, à M. Séguin un grand nombre d'autres inventions qui lui ont acquis une réputation justement méritée.

Il est certain que c'est M. Séguin qui fit le premier, en France, l'application des chaudières tubulaires aux machines locomotives sur le chemin de fer de Saint-Étienne à Lyon; et depuis il ne s'est pas construit une bonne locomotive, en Europe, qui ne fût établie sur ce système; on pourrait même ajouter qu'il a été apporté peu de modifications aux dispositions indiquées dans le principe par l'inventeur français.

Aujourd'hui, le système tubulaire est étendu aux appareils de navigation, aux machines dites locomobiles, qui se transportent, et même à des machines fixes.

Toutefois, pour ces dernières, on paraît hésiter jusqu'à présent à en multiplier les applications soit à cause du plus haut prix de revient, soit à cause du plus de soin qu'un tel système exige pour la conduite et l'entretien. Chaque fois que la dimension n'est pas un obstacle, on préfère généralement encore les appareils cylindriques.

Comme modification importante apportée à ce mode ordinaire, désigné généralement sous le nom de générateur *à foyer extérieur*, nous avons à citer les chaudières *à foyer intérieur*, où la grille est en effet placée à l'intérieur d'une capacité renfermée dans le corps principal du générateur et complétement entourée d'eau. Il y a longtemps qu'en Amérique les chaudières de bateaux ont été ainsi disposées; et il s'en fait aussi depuis des années, en Angleterre, un grand nombre pour les usines et manufactures, malgré les accidents qui arrivent assez fréquemment avec ce système.

Le premier exemple de chaudière tubulaire que nous allons décrire peut être considéré comme réunissant les deux systèmes, en ce qu'il comporte également les foyers intérieurs : ce sont les magnifiques appareils qui alimentent les machines motrices du chemin de fer atmosphérique de Saint-Germain. Nous allons examiner en détail la construction de cet important générateur.

(1) Brevet Séguin en date du 22 février 1828.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## GÉNÉRATEURS TUBULAIRES, A FOYER INTÉRIEUR

### DES MACHINES DU CHEMIN DE FER ATMOSPHÉRIQUE DE SAINT-GERMAIN

Construits dans les ateliers de **MM. DEROSNE** et **CAIL**

(FIG. 1 A 6, PL. 4)

On sait que la ligne du chemin de fer de Paris à Saint-Germain se termine par une portion, de peu d'étendue, formant une rampe que les trains remontent à l'aide d'un piston moteur poussé par la pression atmosphérique dans un tube où l'on fait le vide en avant de ce piston. Le vide s'opère au moyen de deux immenses pompes aspirantes mises en mouvement par des machines à vapeur d'une force collective totale de 400 chevaux-vapeur (1).

Par la nature même de ce service, les générateurs qui alimentent les machines motrices ont, comme elles, une marche intermittente, correspondant à l'arrivée des trains qui se succèdent généralement d'heure en heure. Il faut donc que ces générateurs possèdent des dispositions spéciales pour produire de la vapeur rapidement et la retenir sous pression, sans pertes sensibles, dans les moments d'arrêt, qui sont environ de 55 minutes par heure, le temps employé pour élever un train du bas au haut de la rampe n'étant que de 5 minutes.

Les moyens employés pour obtenir ce résultat sont l'emploi de corps tubulaires, l'accélération de la combustion par un vent forcé fourni à l'aide d'un ventilateur, et de grands réservoirs de vapeur bien protégés contre le refroidissement extérieur.

Autant pour le chiffre total de vapeur à produire que pour n'alimenter au besoin qu'une partie à la fois des machines motrices, l'ensemble du générateur est composé de six paires de corps cylindriques formant chacune un générateur complet qui peut au besoin fonctionner isolément.

La similitude complète des six appareils nous a permis de n'en représenter qu'un seul, dont la pl. 4 montre les différentes vues.

La fig. 1 en est une vue extérieure du côté de l'entrée du foyer;

La fig. 2 représente le même appareil suivant une coupe longitudinale passant par l'axe des réservoirs de vapeur;

La fig. 3 est une section perpendiculaire à la précédente, faite sur l'axe du corps tubulaire.

Les douze corps simples se trouvent ainsi disposés à côté l'un de l'autre comme les deux que ces figures représentent.

(1) Tout l'ensemble du chemin de fer atmosphérique et de ses appareils de service se trouve décrit avec beaucoup de détails dans le VIe volume de la *Publication industrielle*.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

### DISPOSITION D'ENSEMBLE D'UN APPAREIL COMPLET

Chaque système complet comprend, comme nous venons de le dire, deux corps cylindriques séparés A et A′, dont l'un A est muni d'une capacité intérieure B renfermant la grille C du foyer, et l'autre A′ est traversé intérieurement par un grand nombre de tubes en laiton *a* d'un faible diamètre. Tous deux sont remplis d'eau qui enveloppe le corps du foyer et les tubes, laissant à la partie supérieure une partie vide dans laquelle vient se loger la vapeur. Mais ce n'est qu'une petite partie de l'espace réservé à cette dernière, car les deux corps sont munis chacun d'un très-grand réservoir de vapeur K d'un volume à peu près équivalent à leur propre capacité.

Ces corps sont en libre communication, pour l'eau, par une tubulure V (fig. 2), et pour la vapeur, par une autre tubulure M qui réunit les réservoirs deux à deux.

Le corps cylindrique B qui contient la grille est ouvert à la partie opposée à la porte du foyer, de façon à laisser passer librement les produits de la combustion; ceux-ci s'échappent, en effet, directement par cette ouverture et circulent en enveloppant d'abord le premier corps A; du premier carneau ils passent dans le second qui entoure le corps tubulaire A′; enfin, après le second passage, ils traversent les tubes *a* et s'échappent par le conduit O qui débouche dans le canal commun O′ allant à la cheminée.

Les surfaces de chauffe se composent donc de :

1° Une partie (soit un peu plus de la moitié) de la surface intérieure du corps B du foyer;

2° Les 3/4 de la surface extérieure du premier corps A;

3° Les 3/4 de la surface extérieure du corps tubulaire A′;

4° La surface totale des tubes *a*.

En tout quatre passages de calorique pour l'appareil entier.

La vapeur formée remplit les réservoirs qui communiquent entre eux deux à deux, ainsi que nous l'avons dit. La prise de vapeur se fait donc sur l'un des deux seulement à l'aide d'un conduit recourbé P présentant son extrémité ouverte à la partie supérieure du réservoir, afin d'obtenir de la vapeur aussi sèche que possible et éviter les entraînements d'eau non vaporisée.

Ce tube P communique extérieurement avec un long conduit collecteur N par l'intermédiaire d'une boîte à soupape N′ qui permet d'isoler à volonté chaque réservoir de la conduite commune. Cette conduite dirige la vapeur aux machines et permet ainsi de fonctionner avec une partie quelconque des générateurs.

L'alimentation d'eau froide se fait aussi par une conduite commune S qui possède une prise spéciale pour chaque double système. On voit, à cet effet, une boîte à soupape T, posée sur le corps A′ et munie d'un bout de tube *l′* qui pénètre à l'intérieur, au-dessous de la surface libre du liquide. La position de l'arrivée d'eau froide est justement celle la plus éloignée du foyer, et par conséquent, celle aussi où la vaporisation est la moins énergique, ainsi que cela doit avoir lieu.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour résumer l'ensemble de ces diverses fonctions, qu'il nous suffise de faire remarquer tout ce qui a été fait en vue d'atteindre le résultat proposé : vaporisation prompte et conservation de la vapeur formée.

Pour la vaporisation prompte, il est évident que la surface de chauffe est très-étendue, comparativement aux proportions générales de l'appareil et du volume d'eau liquide qu'il renferme.

Mais, en dehors de cette première condition essentielle, on a aussi adopté un système de soufflerie qui permet d'activer beaucoup la combustion, quand on veut remettre en marche et faire remonter la pression de ce qu'elle a pu baisser pendant le temps d'arrêt.

La soufflerie se compose d'un ventilateur mis en mouvement par la machine motrice, et qui souffle son air par un canal cylindrique E placé sous le sol en avant des foyers avec lesquels il communique par des buses F.

Quant à la conservation de la vapeur, ou plutôt de sa pression et de sa température, on a eu le soin d'envelopper chaque réservoir de vapeur d'une chemise en tôle mince L, laissant un espace pour une couche d'air chaud entre elle et la paroi du réservoir.

## DÉTAILS DE LA CONSTRUCTION DES GÉNÉRATEURS

Corps du foyer. — Le corps principal A est complétement enfermé dans le fourneau en brique dont il est isolé par l'espace ménagé pour la circulation de l'air chaud. Mais le corps intérieur B, qui renferme la grille, traverse la paroi antérieure du fourneau, garnie à cet effet des plaques de foyer en fonte I. Ces plaques, comme on l'a vu dans d'autres cas, portent toutes les pièces de service, telles que les portes *c* pour l'accès de la grille.

Au-dessous de ces portes se trouve également un registre G monté à coulisse et muni de contre-poids dont les chaînes passent sur des poulies de renvoi *e*. Ce registre sert à fermer, en tout ou en partie, une tubulure F adaptée sur le conduit E qui amène l'air soufflé par le ventilateur pour activer la combustion du foyer. En raison de sa fonction, le registre G représente à peu près une *boîte* qui épouse la forme de la tubulure F et la ferme complétement à sa partie supérieure, lorsqu'il est entièrement abaissé.

La plaque I porte également les trois robinets d'épreuve $j$, $j'$ et $j^2$, qui communiquent chacun, par un tube spécial, avec l'intérieur de la chaudière. En parlant spécialement des appareils de sûreté, nous verrons que ces robinets servent à juger exactement de la position du niveau de l'eau dans le générateur, l'un de ces robinets devant correspondre, comme hauteur, avec ce niveau même et les deux autres au-dessus et au-dessous.

Corps tubulaire. — La forme extérieure de ce deuxième corps A′ et sa position dans le fourneau sont identiques à ce qui vient d'être dit pour celui A. Mais l'intérieur diffère par les tubes *a*, le sujet principal de la description actuelle. Ces

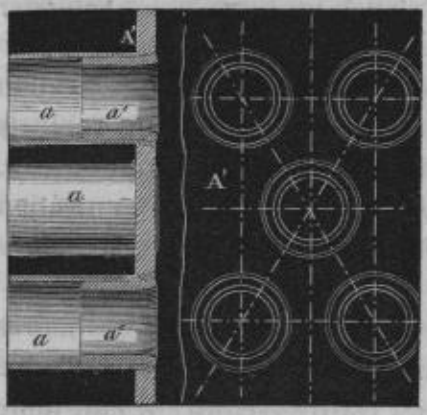
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tubes *a*, au nombre de trente-sept, sont en laiton et portent 10 centimètres de diamètre extérieur, avec une épaisseur d'environ 3 à 4 millimètres. Cette épaisseur dépend évidemment de leur diamètre et de la pression extérieure qu'ils ont à supporter. Ils sont disposés longitudinalement à l'intérieur du corps cylindrique A′ et rivés dans les deux fonds plats qui le ferment à ses extrémités; ces fonds sont en tôle d'une épaisseur bien supérieure à celle qui forme la partie cylindrique, à cause justement de l'assemblage des tubes, autant pour la solidité de la rivure que pour la proximité des trous, qui ne laissent entre eux que peu d'épaisseur.

Comme notre figure d'ensemble est à une échelle trop faible pour que l'on puisse bien apercevoir ce mode d'assemblage, nous donnons celle ci-jointe, à une plus grande échelle.

La fig. 31 représente l'assemblage des extrémités de plusieurs tubes *a* avec le fond A′ du corps de chaudière. La fig. 31 *bis* est une vue de face correspondante qui fait connaître la disposition relative de ces mêmes tubes.

Fig. 31. Fig. 31 *bis*.




On voit que chaque tube pénètre dans ce fond par un trou qui a été ouvert avec un peu d'évasement à l'extérieur. Il est fixé simplement au moyen d'une virole ou bague en fer *a′* que l'on chasse fortement de l'extérieur, et que l'on mate de façon à produire une rivure légère. Comme le nombre de tubes est considérable par rapport à la dimension du fond, la résistance de chacune des viroles suffit largement pour tenir contre la pression intérieure qui tend à repousser les fonds; les tubes forment, par conséquent, autant d'entretoises.

La répartition des tubes se fait suivant des lignes horizontales superposées, mais formant des quinconces les unes avec les autres. Les axes de ces lignes, prises dans tous les sens, sont justement disposés suivant des triangles équilatéraux. On a quelquefois disposé ces tubes suivant des axes perpendiculaires dans tous les sens, et présentant des rangées verticales, dans le but de rendre le nettoyage des dépôts calcaires plus aisé, ou encore pour faciliter l'ascension des bulles de vapeur entre eux. Mais il est remarquable que la disposition en quinconces est celle qui permet d'adopter le plus grand nombre de tubes pour une même surface, en conservant la plus grande épaisseur de métal entre les trous qu'il faut percer pour les recevoir.

C'est en cela que la disposition en quinconces est préférable, et c'est en effet la méthode généralement en usage aujourd'hui pour toutes les chaudières tubulaires appliquées soit aux machines fixes, soit aux locomotives ou aux appareils de navigation. Seulement, le diamètre des tubes diffère beaucoup dans ces différents cas suivant la nature du combustible employé.

Avec les combustibles comme le coke, qui ne donnent pas de flamme, on réduit beaucoup le diamètre des tubes, afin de profiter du principe énoncé plus haut, et qui établit que la surface de chauffe augmente en même temps que le nombre



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de tubes pour une même section de passage. Mais lorsque les combustibles produisent de la flamme et de la fumée, des tubes trop petits s'engorgent facilement, et surtout éteignent la flamme presque dès son entrée.

Ainsi, pour les générateurs de Saint-Germain, avec lesquels on devait brûler de la houille, on a donné aux tubes 10 centimètres de diamètre, tandis que pour les locomotives, où l'on emploie du coke, ces tubes ne dépassent guère 4 à 5 centimètres de diamètre intérieur.

Pour terminer ce qu'il peut être utile de décrire quant à la construction du corps tubulaire A′, nous ferons remarquer la disposition de l'avant-bout qui est garni d'une plaque en fonte J, percée d'une ouverture que l'on ferme au moyen d'un vantail circulaire H fixé par des tourniquets *g*. Cette porte ferme la capacité ménagée à l'extrémité des tubes, ou *la boîte à fumée;* c'est en effet par là que passe la fumée en sortant des tubes pour gagner le canal d'échappement O.

C'est aussi en ouvrant le vantail H que l'on peut visiter les tubes et les ramoner au moyen d'un long ringard.

Sur la plaque J se trouve placé le niveau d'eau en cristal *k*, en communication directe avec le corps A′. C'est, à la vérité, un double emploi avec les robinets d'épreuve *j* à $j^2$; mais nous avons dit que cet appareil était encore obligatoire; et, d'ailleurs, il est urgent que les deux corps A et A′, quoique en communication permanente par le coude V (fig. 2), soient aussi munis chacun de leurs appareils d'épreuve, afin d'éviter toute chance d'accidents.

En effet, si le manque d'eau présente des dangers avec les chaudières ordinaires qui en contiennent une très-grande masse, cet accident est encore plus probable avec les chaudières tubulaires où le volume de l'eau est très-réduit; il faut donc très-bien surveiller le niveau d'eau et éviter que jamais les tubes soient découverts, ce qui amènerait leur destruction.

Faisons remarquer que nous ne disons pas que la réduction du volume d'eau augmente la gravité d'une explosion, ce qui serait le contraire de la vérité; mais nous disons qu'il y a le plus grand danger à laisser les tubes se découvrir d'eau, et qu'arrivé en ce point d'abaissement, le niveau descendra d'autant plus rapidement que l'espace occupé par les tubes est plus considérable.

Réservoirs de vapeur. — On a vu plus haut comment on avait été conduit à adopter de très-grands réservoirs de vapeur; ceux-ci constituent, en effet, la presque totalité de l'espace réservé à la vapeur. Ils sont composés d'un premier corps K et d'une enveloppe L pour les garantir du refroidissement extérieur. Ils sont aussi munis d'une ouverture X fermée par un bouchon comme un trou d'homme.

Chaque corps possède un réservoir particulier, et les deux, d'un système complet, sont mis en communication permanente à l'aide du conduit M, ainsi que nous l'avons dit précédemment.

La boîte N′, qui forme le raccord de la prise de vapeur P et de la conduite générale N, renferme une soupape que l'on soulève verticalement au moyen d'une vis *q*, manœuvrée à l'aide d'une manivelle *m* qui forme écrou à la vis; ce mécanisme est disposé sur le couvercle de la boîte et composé de deux petites colonnes *p* et de deux

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

traverses $r$, dont celle supérieure sert de guide vertical à la vis, et l'autre est disposée pour l'empêcher de tourner.

Cet appareil est tout à fait analogue à celui que nous avons décrit à l'égard du générateur type (pl. 1). Seulement, ici la boîte est ouverte de part en part pour se raccorder avec la grande conduite, et permettre la libre communication permanente de la vapeur, de l'un quelconque des appareils, à la machine en passant au travers des boîtes qui ne seraient pas en fonction.

C'est sur les réservoirs de vapeur qu'ont été placés les divers appareils de sûreté dont nous dirons un mot plus loin.

Alimentation et vidange. — L'eau d'alimentation est envoyée dans les générateurs par des pompes spéciales, au moyen d'un tube commun S, qui est muni, devant chaque corps tubulaire, de boîtes à soupapes T, analogues à celles de l'admission de vapeur dont nous venons de parler.

La boîte d'alimentation est représentée par la fig. 4, en coupe transversale, et son mécanisme par les fig. 5 et 6, pl. 4. Elle renferme un clapet $e'$ qui se manœuvre à l'aide d'une vis de rappel $f'$, suspendue à l'extrémité d'un levier $g'$, et qui porte une manivelle $h'$ montée sur l'écrou $i'$.

Le support $k'$ de ce mécanisme est posé sur la plaque J du fourneau, entièrement à la portée du chauffeur, qui peut ainsi régler l'alimentation de chaque appareil à volonté. Il lui suffit pour cela, quand il veut alimenter, de desserrer l'écrou $i'$, qui laisse alors l'eau soulever le clapet et pénétrer dans la chaudière. Nous avons dit que l'alimentation avait été placée sur chaque corps tubulaire, et tout près de la boîte à fumée comme étant le point où la vaporisation est le moins intense. C'est en effet un principe général à suivre dans tous les cas.

Lorsqu'il s'agit de remplir les chaudières, après qu'elles ont été vidées pour un nettoyage ou une réparation, on fait usage d'un robinet spécial $m'$ en communication directe avec le conduit de connexion V et avec un tuyau U aboutissant à un réservoir commun.

Pour la vidange, on emploie le tuyau Y muni de son robinet $p'$, et débouchant dans le conduit d'évacuation Z.

Appareils de sureté. — Ces appareils sont de la même nature que ceux attribués au générateur type (pl. 1); ils consistent toujours en soupapes de sûreté, flotteurs à sifflet, etc. Mais la forme différente de l'ensemble des chaudières exigeait des modifications dans leurs dispositions.

Chaque réservoir de vapeur porte à son sommet une boîte en fonte P′, qui forme le siége de ces appareils. Il s'y trouve la soupape de sûreté dont on voit le levier $u$ et le poids $v$. A son centre passe aussi la tige $b'$ du flotteur R dont le contre-poids $x'$ est suspendu à une chaîne s'appuyant sur une poulie $x$. La chaîne porte un index qui correspond à un tableau divisé $y$ sur lequel on peut connaître au juste la position du niveau.

La même boîte est munie d'une tubulure S′ pour le raccord d'un tuyau Q, qui communique exclusivement avec l'intérieur d'une cloche enveloppant la soupape de sûreté et qui traverse, en s'élevant, la toiture du bâtiment. Cette disposition a

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pour but de diriger au dehors la vapeur qui s'échappe par la soupape, lorsqu'il y a un excès de pression dans la chaudière.

Outre les indications fournies par l'index sur le cadre divisé $y$, les mouvements du flotteur font aussi agir un sifflet $d'$ placé sur la paroi verticale du réservoir de vapeur. Ce sifflet doit fonctionner lorsque le flotteur atteint un abaissement maximum. Pour établir la relation entre ces deux organes, la tige $b'$ est assemblée avec deux leviers $c'$ et $c^2$, qui forment d'abord avec elle un parallélogramme articulé pour qu'elle conserve sa verticalité, mais dont celui $c'$ est en outre contre-coudé de façon à maintenir la soupape du sifflet. Lorsque le flotteur s'abaisse suffisamment, cette soupape devenant libre, en raison de l'oscillation du levier $c'$, la vapeur peut s'échapper et faire marcher le sifflet.

## CONDITIONS DE MARCHE DES GÉNÉRATEURS DE SAINT-GERMAIN

Pour que l'on puisse se rendre bien compte des dispositions de ces générateurs, nous rappellerons en peu de mots quels en ont été les motifs.

Il faut produire de la vapeur d'une façon intermittente et conserver celle produite et non dépensée à la plus haute pression possible pendant les moments d'arrêt.

On a pensé, avec raison, que le moyen d'atteindre ce but était l'emploi du système tubulaire et d'une soufflerie à l'aide de laquelle on donnerait une très-grande activité au foyer lorsque le moment de faire fonctionner les machines serait venu. D'autre part, on se réservait d'alimenter pendant l'arrêt, à l'aide d'une machine à vapeur auxiliaire, ce qui, combiné avec la suspension de la ventilation, devait suffire pour empêcher la production de vapeur de continuer, alors qu'on n'en dépenserait plus que la faible quantité nécessaire pour faire mouvoir la pompe d'alimentation.

C'est sur ces prévisions que des expériences ont été faites en vue de connaître exactement comment les choses se passeraient, et quelle quantité de vapeur serait produite par kilogramme de houille.

Ces expériences ont permis de reconnaître qu'il était très-possible de satisfaire aux conditions du problème, et que la production de vapeur pourrait s'élever à 6 kilogrammes de vapeur par kilogramme de houille. S'appuyant sur ce résultat, il était facile de déterminer les dimensions des générateurs d'après celles des machines qu'ils devaient alimenter.

Ces machines sont de la force de 200 chevaux chacune, soit en tout 400 chevaux; pour laquelle puissance il faut fournir de la vapeur, en admettant qu'elle soit utilisée tout entière (ce qui n'arrive que les jours où l'on élève des trains très-lourds).

La dépense de vapeur ayant été évaluée à $0^k00325$ environ par $1''$ et par force de cheval utile (en comprenant la dépense des petites machines auxiliaires), c'est une production totale de vapeur à obtenir par heure, égale à :

$$0^k00325 \times 3600 \times 400 = 4680 \text{ kilogrammes.}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En se basant sur un rendement minimum de 6 kilogrammes de vapeur par kilogramme de houille, c'est une consommation totale de :

$$\frac{4680}{6} = 780 \text{ kilogrammes de houille par heure.}$$

Voici maintenant les dimensions des générateurs, tels que la pl. 4 les représente.

Surfaces de chauffe pour un système complet. — Le premier passage de la flamme s'effectue par le bouilleur B qui forme le foyer. En ne comptant que la moitié de son développement, comme chauffe, on trouve :

Diamètre intérieur..... = $0^m700$
Longueur..... = 3 000

$$\textit{Surface de chauffe} = \frac{1}{2}(0{,}700 \times 3{,}1416 \times 3^m) = 3^{m.q.}30.$$

Le deuxième passage a lieu à l'extérieur du premier corps A, et le troisième autour du second A' ; ces deux chaudières ont les dimensions suivantes :

Diamètre extérieur..... = $1^m100$
Longueur..... = 3 000

Les 3/4 environ de leur développement étant soumis à l'action de la chaleur, moins une faible partie de la longueur engagée dans la maçonnerie, on peut compter, pour les deux ensemble :

$$\textit{Surface de chauffe} = \frac{3}{4}(1^m100 \times 3{,}1416 \times 2^m8 \times 2) = 14^{m.q.}51.$$

Le dernier passage a lieu par les 37 tubes qui ont chacun les dimensions suivantes :

Diamètre extérieur..... = $0^m100$
Longueur..... = 3 000

$$\textit{Surface de chauffe des } 37 \textit{ tubes} = 0^m1 \times 3{,}1416 \times 3^m \times 37 = 34^{m.q.}87.$$

Par conséquent, la surface de chauffe totale correspondant à un double système complet devient :

| | |
|---|---|
| Bouilleur du foyer..... | $3^{m.q.}30$ |
| Les corps principaux..... | 14 51 |
| Les tubes..... | 34 87 |
| Total..... | $52^{m.q.}68$ |

Les six systèmes doubles, appliqués dans le même groupe à Saint-Germain, produisent donc :

$$52{,}68 \times 6 = 316{,}08 \text{ mètres carrés.}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Puisque la production totale de vapeur peut atteindre 4680 kilogrammes par heure, c'est une vaporisation égale, par mètre carré de surface de chauffe, à :

$$\frac{4680}{316,08} = 15 \text{ kilogrammes.}$$

C'est une valeur qu'on n'atteint que rarement, attendu que les deux machines ne marchent pas souvent ensemble, et aussi que le temps de marche étant très-court par rapport à celui où la dépense est suspendue, la pression a tout le temps nécessaire pour se produire. Cependant, pour le projet, les ingénieurs ont supposé une production de 18 kilogrammes de vapeur par mètre de surface de chauffe en fixant les dimensions de ces générateurs.

Surface de grille. — Chaque grille a les dimensions suivantes :

| | | |
|---|---|---|
| Longueur | $2^{m}$ | 00 |
| Largeur | 0 | 70 |
| Superficie | $1^{m.q.}$ | 40 |
| Soit pour les 6 grilles | 8 | 40 |

Si la consommation de combustible s'élève au chiffre déclaré ci-dessus, 780 kilogrammes par heure, c'est une combustion, par décimètre carré de grille, de :

$$\frac{840^{d.q.}}{780^{k}} = 1,08 \text{ kilogramme de houille.}$$

Cette valeur correspond, ainsi qu'on l'a dit plus haut, à ce que l'on désigne par *la combustion vive;* mais il est important de remarquer aussi que c'est le travail maximum que ces grilles soient appelées à produire, et qu'il eût été inutile de les faire plus grandes. Et puis la soufflerie qui s'y trouve appliquée permet de produire une combustion à volonté, plus rapide qu'avec un tirage simple à l'aide de la cheminée.

## CONSIDÉRATIONS SUR LE SYSTÈME TUBULAIRE

Si l'on prenait pour base du produit d'un générateur tubulaire les résultats annoncés pour les appareils qui viennent d'être décrits, on ferait certainement une erreur au désavantage de ce système perfectionné; car la marche intermittente des chaudières de Saint-Germain ne permet pas toute l'économie que l'on peut attendre d'un appareil dont les fonctions sont constantes et régulières : c'était même cette circonstance exceptionnelle qui a motivé les expériences préalables qui ont été faites avant l'établissement des machines de Saint-Germain. On voulait connaître, non pas le meilleur système de générateur, mais celui qui donnerait les meilleurs résultats dans les conditions difficiles proposées.

Le système tubulaire présente le double avantage d'augmenter l'étendue de la surface de hauffe pour une même section de carneau, et de faire du développement

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

complet des conduits de flamme une surface de chauffe. Cette dernière condition surtout doit avoir pour résultat une plus complète utilisation du calorique, puisque chaque paroi chauffée est en contact avec du fluide qui doit se l'approprier; la première y concourt également en permettant plus facilement d'étendre le chemin parcouru par l'air chaud du foyer à la cheminée.

Mais la conséquence immédiate de ce résultat est l'abaissement de la température de l'air chaud à la sortie des passages; il est évident que l'on ne peut admettre une plus grande utilisation du combustible sans concevoir en même temps un refroidissement plus grand de la fumée, puisque l'une est la conséquence de l'autre.

Si donc la fumée arrive à la cheminée à une température plus basse qu'on ne l'admet avec les générateurs ordinaires, le tirage s'en ressent, et il peut arriver que le foyer ne reçoive pas la quantité d'air nécessaire à une combustion complète. Si les choses se passaient ainsi, on pourrait éprouver une perte plus que correspondante, en sens inverse, à l'économie réalisée par la meilleure répartition de la surface de chauffe.

D'autre part, les tubes présentent une très-grande résistance à la vitesse de l'air, et plus ils sont faibles de diamètre, plus cette résistance est considérable. Il est cependant nécessaire de faire ces diamètres petits; car si la veine d'air conserve une dimension un peu forte, la partie extérieure seule se refroidit notablement et forme à la partie intérieure une enveloppe non conductrice qui empêche le refroidissement de se produire avec la même intensité.

Par conséquent, le tirage du foyer d'une chaudière tubulaire doit être organisé d'une façon particulière en prévision du retard qu'éprouve la fumée dans son passage par les tubes, en raison de la plus grande étendue des surfaces frottantes pour une même section, de leur peu de diamètre et du refroidissement de la fumée au profit de la vaporisation. De quelque façon que ce problème soit résolu, il est certain qu'il doit l'être et qu'on cherche en effet à le résoudre.

Nous rencontrerons l'application de ventilateurs envoyant de l'air forcé au foyer, de façon à ne pas avoir besoin de donner à cet air une grande vitesse dans la cheminée. Nous venons déjà de constater ce fait, mais créé dans le but de la marche intermittente.

On augmente aussi l'appel de la cheminée au moyen d'un jet de vapeur, ce qui donne le même résultat, mais d'une façon inverse; c'est-à-dire que, dans les deux cas, un plus grand volume d'air froid est fourni au foyer que par la simple ascension de l'air chaud; seulement, cet effet se produit par refoulement avec le ventilateur et par aspiration à l'aide de l'injection de vapeur dans la cheminée.

Lorsque M. Séguin fit, en 1829, l'application du système tubulaire aux locomotives, il imagina en même temps l'emploi du ventilateur pour augmenter le tirage. Mais on sait que ces machines ne peuvent pas recevoir de cheminée assez haute pour que l'on puisse se passer d'un tirage artificiel. Ce qui est indispensable pour les locomotives est au moins nécessaire pour les machines fixes. Seulement, on a remplacé avec avantage, pour les locomotives, le ventilateur par l'injection de va-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

peur dans la cheminée, procédé dont on attribue l'idée première à Mannoury d'Ectot.

En résumé, il paraît probable qu'une chaudière tubulaire fixe, bien conduite, peut produire généralement 8 à 9 kilogrammes de vapeur par kilogramme de houille de bonne qualité au lieu de 6, que l'on espérait obtenir seulement avec les générateurs à fonction intermittente de Saint-Germain, et au lieu de 7 que l'on produit avec les bons générateurs cylindriques ordinaires.

Nous décrivons plus loin un système perfectionné qui, comme on le verra par les expériences, a même donné davantage.

## GÉNÉRATEURS A FOYER INTÉRIEUR

### SYSTÈME DIT DE CORNWALL

(FIG. 7 A 9, PL. 4)

Il existe en Angleterre et en Amérique un système de générateur très-répandu et surtout en grande faveur dans le premier de ces deux pays : c'est le système dit *à foyer intérieur*, dont nous venons de voir une application mixte aux chaudières du chemin de fer atmosphérique de Saint-Germain.

Les fig. 7 à 9 de la pl. 4 représentent l'un des exemples les plus remarquables de l'application de ce système dans un établissement hydraulique des environs de Londres.

C'est l'une des chaudières qui alimentent une puissante machine employée à l'élévation des eaux distribuées à une partie de cette ville. La désignation de *Cornwall* (en français *Cornouailles*) prend son origine dans les applications qui en furent faites aux grandes machines à vapeur qui font mouvoir les pompes d'épuisement des mines situées dans le comté de ce nom.

Le moteur, que ces chaudières alimentent, est une majestueuse machine à balancier d'une puissance de 135 chevaux qui fait mouvoir une énorme pompe foulante dont le piston n'a pas moins de $1^m04$ de diamètre et $2^m745$ de course, et qui donne 8 coups par minute. Le produit de cette remarquable pompe est donc d'environ 1100 mètres cubes d'eau par heure élevés à une hauteur de 33 mètres.

Les chaudières sont au nombre de quatre, disposées parallèlement à côté l'une de l'autre, et semblables à celle représentée pl. 4.

La fig. 7 est une coupe longitudinale par l'axe de la chaudière;

La fig. 8 est une section transversale correspondante, faite sur le foyer, et une vue extérieure de face du fourneau correspondant à la chaudière voisine;

La fig. 9 est une autre section transversale faite sur la chaudière située du côté opposé, et sur le tube réchauffeur de l'eau d'alimentation.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## ENSEMBLE DE LA DISPOSITION D'UN GÉNÉRATEUR

## (SYSTÈME DE CORNWALL)

Chaque générateur se compose d'un corps cylindrique extérieur A, qui sert à la fois de réservoir d'eau et de vapeur et qui contient un gros tube intérieur B à la tête duquel se trouve la grille C du foyer, suivant la même disposition que celle précédemment décrite.

Ce tube, ou bouilleur-foyer, contient aussi un bouilleur plus petit D, qui s'appuie sur l'autel en maçonnerie *a* et se prolonge en dehors des deux corps principaux A et B. Il est rempli d'eau et en communication, par la tubulure E située derrière l'autel, avec le corps extérieur A, lequel renferme aussi de l'eau qui s'élève suffisamment pour envelopper complétement et recouvrir le bouilleur-foyer B.

La combustion s'opérant sur la grille C, la flamme se dégage et parcourt d'abord l'intérieur du tube B en enveloppant tout à fait le petit bouilleur D. En quittant ce premier passage, les produits de la combustion débouchent dans le carneau F qui se divise et longe extérieurement, des deux côtés, le principal corps A du générateur en faisant retour du côté de la grille; les deux parties de ce carneau F se réunissent et forment un canal central inférieur G allant à la cheminée. Ce canal est occupé de place en place par les supports *f* de la chaudière, lesquels supports sont à jour pour maintenir la communication.

La section (fig. 8) est faite précisément sur l'axe 1-2, à l'endroit où les carneaux latéraux F se réunissent pour former le canal G que la fig. 9, qui est une section sur la ligne 3-4, fait également voir. La même section (fig. 9) indique aussi un bouilleur O, placé dans le prolongement du canal G, et qui reçoit l'eau d'alimentation avant que celle-ci ne pénètre dans la chaudière; c'est le tube réchauffeur dont il a été question plus haut (p. 175).

La circulation du calorique ainsi expliquée, il sera facile de comprendre la direction de la vaporisation et le mode d'arrivée que l'on doit adopter pour l'eau d'alimentation.

La première action du calorique a lieu avec une grande intensité sur la partie supérieure du bouilleur B et sur la superficie totale du tube additionnel D. Celui-ci n'est en effet mis là que pour diviser la veine calorifique qui parcourt le bouilleur B, et profiter des filets d'air chaud du centre qui pourraient s'échapper sans s'être trouvés en contact immédiat avec les surfaces des corps principaux.

La vapeur dégagée directement de l'eau qui enveloppe le bouilleur B s'élève naturellement dans la chambre ménagée au-dessus de la surface libre. Celle formée à l'intérieur du tube D s'élève aussi, à la faveur d'une certaine inclinaison donnée à ce dernier, et peut se rendre dans la chaudière principale par un tube en siphon *b* qui met les deux capacités en communication par leurs parties supérieures.

L'alimentation se fait toujours, comme on sait, par la partie la moins susceptible de produire de la vapeur. Pour le cas présent, la machine envoie, à l'aide d'une



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pompe, de l'eau dans le tube réchauffeur O, d'où elle s'écoule par un conduit *c* commun aux quatre chaudières, et pénètre ensuite dans chacune par un conduit particulier *d* qui s'adapte au fond du corps principal A, à l'extrémité opposée au foyer. La communication des conduits *c* et *d* a lieu par l'intermédiaire d'une boîte à soupape *e*, qui a pour fonction d'empêcher le retour de l'eau de la chaudière dans le conduit pendant les moments d'aspiration de la pompe. La même boîte doit être munie d'une valve qui permette d'isoler l'une des chaudières de l'alimentation générale, en cas de réparation.

L'eau introduite dans la chaudière descend à la partie inférieure, en raison de sa plus grande densité; mais en s'échauffant, elle s'élève peu à peu, et une partie pénètre par le conduit E dans le petit bouilleur D, en réparant les pertes que la vaporisation lui fait subir.

La prise de vapeur se fait sur ces chaudières d'une façon analogue à ce que nous avons vu à l'égard des chaudières de Saint-Germain. Chaque appareil est muni d'une boîte à soupape M en communication avec une conduite commune L qui peut réunir la vapeur des quatre chaudières pour la diriger sur la machine.

Il existe une autre conduite N, se raccordant avec des boîtes à soupapes, qui a pour mission de former un retour à la vapeur qui a circulé dans l'enveloppe du cylindre de la machine. Nous verrons bientôt en quoi consiste cette disposition spéciale, qui a pour objet, ainsi qu'on le sait, de conserver au cylindre d'une machine à vapeur une très-haute température. Disons, quant à présent, que dans celle dont nous décrivons les chaudières, on s'est arrangé de façon à faire retourner directement à la chaudière la vapeur qui a été employée à cet usage.

Il nous reste peu de chose à dire des détails de ces chaudières, dont les appareils de service sont analogues à ce qui se fait généralement.

Après avoir cité les soupapes de sûreté K, nous ferons remarquer une tubulure P placée sur le bout extérieur du petit bouilleur D. C'est une prise destinée à recevoir divers appareils tels que manomètres, flotteurs, etc.

Il existe aussi, à l'avant des foyers, une conduite commune J pour la vidange, qui peut s'opérer par le tuyau particulier H, muni de sa boîte à clapet d'interception I.

Pour la machine ainsi que pour les chaudières, il a été pris de grandes précautions contre les pertes de chaleur par le refroidissement extérieur. A l'égard des chaudières, on les a recouvertes d'une épaisse couche de substance non conductrice de la chaleur, telle que du sable, qui s'élève même assez pour enterrer les appareils de sûreté placés sur la chaudière. La situation de cette couche de sable est indiquée par une ligne ponctuée sur les fig. 7 à 9. Le résultat en a été complet; car, contrairement à ce qui a généralement lieu, nous avons pu nous convaincre nous-même que la température n'était pas sensiblement plus élevée dans la chambre de ces chaudières qu'à l'extérieur du bâtiment.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

### CONDITIONS DE MARCHE DES CHAUDIÈRES A FOYER INTÉRIEUR DE CORNWALL

En mesurant les dimensions du générateur représenté pl. 4, fig. 7 à 9, et en ne comptant que les 3/4 de la superficie du corps principal A, on reconnaît que la surface de chauffe totale est d'environ 70 mètres carrés; comme il y a quatre appareils semblables dans le même établissement, c'est une puissance vaporisatoire totale de 280 mètres carrés de surface de chauffe pour suffire à l'alimentation d'une machine de 135 chevaux de force nominale minimum; soit par force de cheval :

$$\frac{280}{135} = 2{,}08 \text{ mètres carrés.}$$

C'est une très-grande surface pour cette machine dont le système perfectionné, à détente, permet de ne dépenser que 11 kilogrammes de vapeur environ par force de cheval et par heure, c'est-à-dire en totalité :

$$11 \times 135 = 1485 \text{ kilogrammes}$$

dans le même temps; chaque mètre de chauffe n'a donc à produire en eau vaporisée, par heure, que :

$$\frac{1485}{280} = 5^{k}3,$$

tandis que nous avons vu que l'on pouvait, avec la plus grande facilité et dans de bonnes conditions, maintenir la vaporisation dans une moyenne de 10 ou 12 kilogrammes d'eau par mètre carré de surface de chauffe.

Ces chaudières ont été, de la part de M. Wicksteed, l'ingénieur anglais qui les a fait établir, l'objet d'expériences très-suivies par lesquelles il a voulu connaître leur rendement en procédant tantôt par le système de *la combustion lente* et tantôt par celui de *la combustion rapide*. Mais, par rapport à ce qui se fait généralement, c'était bien, dans les deux cas, de la combustion lente, *et extrêmement lente,* car on ne brûlait que 13 à 20 kilogrammes de houille par mètre carré de grille, au lieu de 50 kilogrammes, ce qui passe cependant pour de la combustion lente.

Quoi qu'il en soit, le résultat a été 8 kilogrammes d'eau, prise à 27°, vaporisée par kilogramme de houille, avec une légère différence en plus à l'avantage de la combustion rapide (nous conservons cette expression de l'ingénieur anglais pour dénommer le cas où la combustion s'élevait à 23 kilogrammes par mètre de grille).

Ce résultat est certainement avantageux, comparativement aux bons générateurs à bouilleurs ordinaires, où l'on a de la difficulté à obtenir plus de 7 kilogrammes de vapeur pour 1 kilogramme de combustible. Mais des expériences faites au même moment sur des chaudières en tombeau de Watt ayant donné aussi près de 8 kilogrammes de vapeur, avec les mêmes modes de combustion, on est forcé d'en conclure que le système de chaudières, dit de Cornwall, avec foyer intérieur, n'a pas tous les avantages que l'on supposait, puisqu'il n'a donné que des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

résultats très-peu supérieurs aux chaudières de Watt, les deux systèmes étant appliqués à des machines à basse pression, c'est-à-dire marchant à une pression absolue de 2 atmosphères.

Il reste à peu près démontré que le grand mérite des générateurs de Cornwall consiste surtout dans leurs grandes dimensions comparées au travail qu'on leur fait produire. En effet, en ne brûlant que 15 à 20 kilog. de houille par mètre carré de grille, et en ne poussant la vaporisation qu'à 5 ou 6 kilog. d'eau par mètre carré de surface de chauffe, ces conditions correspondent à un générateur de proportions plus que doubles de celles généralement adoptées.

Nous aurons l'occasion de rapporter plus loin de nouvelles expériences faites en Angleterre sur ce système de chaudière. Nous n'ajouterons donc que peu de chose à ce sujet, quant à présent, si ce n'est que le système à bouilleur intérieur n'est pas très-répandu en France, où les ingénieurs ne lui accordent qu'une médiocre confiance, surtout en raison des dangers d'explosion qu'on lui attribue.

Si l'on examine, en effet, avec un peu d'attention comment les diverses parties d'un semblable générateur supportent la pression de la vapeur, on ne tarde pas à reconnaître que le bouilleur-foyer éprouve une pression extérieure, de dehors en dedans, qui peut le faire s'aplatir s'il n'est pas parfaitement rond ou armé convenablement, ou qu'une partie de la paroi cylindrique présente une résistance différente des autres. Or, l'aplatissement brusque de ce bouilleur peut avoir pour effet sa disjonction d'avec le corps extérieur, et par conséquent, la fuite de l'eau qui produit ordinairement une explosion en se transformant brusquement en vapeur.

Le savant Péclet cite quelques accidents arrivés en Angleterre à des chaudières à foyer intérieur; tous présentent à peu près cette particularité que le corps extérieur ne subit aucune détérioration au moment de l'explosion qui provient exclusivement du déchirement du bouilleur intérieur qui laisse échapper l'eau et la vapeur dans le foyer.

Cet accident s'est reproduit sous nos yeux, il y a quelques mois, sur une chaudière locomobile à foyer intérieur, montée sur un bateau, et d'une force d'environ 5 à 6 chevaux. Le bouilleur intérieur s'est complétement aplati dans toute sa longueur, ce qui a fait lâcher la clouure qui l'assemblait avec le coffre du foyer. L'eau et la vapeur s'échappant par cette déchirure, il en est résulté une pression réactive sur le fond du bateau qui a suffi pour lancer en l'air, à plus de 10 mètres, et jeter à l'eau l'ensemble de la chaudière et de la machine d'un poids d'au moins 4000 kilogrammes.

Nous avons pu constater, lorsque l'appareil a été relevé, que le corps extérieur de la chaudière n'avait pas subi la plus légère altération.

Mais ce qui prouve encore la méfiance des ingénieurs à l'égard de ce système, c'est que la chaudière dont nous venons de parler avait toutes les proportions extérieures convenables pour marcher à 5 ou 6 atmosphères, et qu'elle n'avait été timbrée qu'à 4 seulement, pression qui a probablement été dépassée, si l'on s'en rapporte au résultat.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

# GÉNÉRATEUR TUBULAIRE A VENT FORCÉ

Par **MM. MOLINOS** et **PRONNIER**, ingénieurs

CONSTRUIT A OULLINS DANS LES ATELIERS DE MM. PARENT ET SCHAKEN

(PLANCHE 5)

Le générateur tubulaire représenté par ce dessin (pl. 5) est, à notre avis, l'un des plus beaux spécimens de construction de chaudronnerie pour la perfection de son ensemble et de ses divers détails, abstraction faite, pour l'instant, des résultats du système et de son degré plus ou moins grand de simplicité.

Les auteurs (1), MM. Molinos et Pronnier, ont eu pour but, en imaginant cette disposition, de réaliser la meilleure économie possible de combustible et de brûler la fumée. Pour ce dernier caractère, notre description aurait dû trouver place plus loin à l'article spécial des foyers dits *fumivores*. Mais l'importance du sujet, à part ce point particulier, nous conduit à classer ce nouveau générateur dans les appareils tubulaires en général, la fumivorité n'étant pour ainsi dire qu'une conséquence du but principal que les inventeurs se sont proposé : la parfaite utilisation du combustible et la plus grande production de vapeur pour un volume minimum d'appareil.

## PRINCIPES FONDAMENTAUX DU SYSTÈME

Avant de fixer les dispositions de leur système, MM. Molinos et Pronnier ont ainsi envisagé la question qu'ils désiraient résoudre :

Les gaz qui s'échappent d'un foyer en combustion sont un mélange d'acide carbonique, d'oxyde de carbone, de vapeur d'eau, d'air non brûlé et de divers hydrogènes carbonés qui, par leur décomposition à certaines températures, contribuent sans doute dans une grande mesure, avec le charbon entraîné mécaniquement, à produire la fumée proprement dite. Une combustion parfaite de la houille devrait réduire tous les éléments à de l'acide carbonique, de l'eau et de l'azote.

Mais pour obtenir cette combustion complète, il faudrait augmenter de beaucoup la quantité d'air amenée sous la grille et reconnue nécessaire pour l'alimentation d'un foyer, quantité fixée expérimentalement par Péclet à 18 mètres cubes d'air par kilogramme de houille à brûler (p. 150). Si on dépasse cette quantité, il se perd par

(1) Il est juste de dire que tous les perfectionnements de ce générateur sont dus à **MM.** Thirion et de Mastaing, ingénieurs à Paris, qui sont chargés exclusivement des études et de l'exploitation de cet appareil, et auxquels nous devons toutes les notes relatives à sa description.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la cheminée un volume d'air en excès qui n'a pas été brûlé, mais qui est échauffé et qui emporte avec lui une grande quantité de chaleur.

D'autre part, en réduisant ce volume d'air, on peut n'obtenir que de l'oxyde de carbone dont la formation ne dégage qu'environ 1/3 de la quantité de chaleur qui aurait été développée si la transformation complète en acide carbonique avait eu lieu. Cette perte de calorique est réelle si l'oxyde de carbone se trouve enlevé par le tirage de la cheminée sans avoir été de nouveau enflammé sous le générateur.

Pour éviter la formation de l'oxyde de carbone, on dispose ordinairement le combustible en couche mince sur la grille, ce qui oblige à réitérer souvent l'alimentation du foyer; et comme c'est au moment d'un nouveau chargement qu'il se produit de la fumée, à cause de la distillation rapide du combustible introduit, cet inconvénient se reproduit d'autant plus souvent.

Si, au contraire, la couche de combustible était épaisse, chaque charge nouvelle aurait beaucoup moins d'importance par rapport au volume en ignition, et le charbon nouveau serait distillé moins vite. La production de fumée serait d'autant moins considérable.

Mais il faudrait alors fournir une quantité d'air pur plus uniforme aux gaz combustibles formés pour les brûler et utiliser la chaleur correspondante.

Ce principe, consistant à introduire des quantités d'air additionnelles autrement qu'au travers de la couche de combustible, a été réalisé bien des fois. Mais ce qui importe, pour obtenir un bon résultat, c'est le choix du point d'introduction de l'air, afin de rencontrer les gaz inflammables dans un endroit où ils soient encore assez chauds pour achever de se brûler à la faveur de l'air introduit.

Et puis, si l'on envoie de l'air froid au-dessus d'un foyer, il faut avoir à sa disposition les moyens d'en bien régler la quantité en rapport avec la nature du combustible à brûler; il faut, de plus, obtenir un mélange bien intime de l'air additionnel et des gaz combustibles, sans quoi il arrive que les veines d'air et de gaz cheminent parallèlement sans se mélanger, surtout sous la simple action du tirage d'une cheminée.

Telles sont, dans leur ensemble, les considérations générales qui ont servi de guide aux auteurs du générateur qui nous occupe, pour en combiner les dispositions et vaincre les difficultés du problème.

Si nous examinons les principes de la combustion dans l'appareil de MM. Molinos et Pronnier, nous remarquons qu'ils y brûlent le combustible sur une couche épaisse, de façon à atténuer, autant que possible, l'influence des charges; ils produisent ainsi de l'oxyde de carbone, dont ils opèrent la combustion au moyen d'une injection d'air latérale placée sur les côtés de la grille. Cet air, lancé par un ventilateur, se mélange intimement avec les gaz combustibles par suite des tourbillons produits par la rencontre des veines gazeuses dont les directions sont perpendiculaires; l'inflammation se produit et doit nécessairement se produire, puisque le mélange a lieu à l'endroit de la plus haute température du foyer.

La combustion du charbon et des gaz s'opère dans un foyer de très-grande di-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mension, et qui présente à peu près le caractère d'un foyer de locomotive. C'est une boîte à feu, rectangulaire, divisée en deux compartiments par un autel en briques réfractaires très-élevé, et qui a pour effet principal de forcer les veines flammes à faire un très-long trajet depuis le moment où elles quittent la surface de la grille jusqu'à celui où elles s'introduisent dans les tubes, pour que le phénomène chimique de la combustion ait le temps de s'accomplir entièrement avant que ces flammes soient soumises à une action refroidissante qui pourrait les éteindre.

Le tirage du foyer est également confié au ventilateur qui peut envoyer de l'air simultanément sous la grille et sur les côtés de la couche en ignition. La haute cheminée peut être alors remplacée par un conduit en tôle de peu de hauteur et adhérent au générateur, de la même façon que pour les locomotives.

Par la description qui suit, on pourra juger de quelle façon toutes les parties du générateur ont été combinées pour utiliser convenablement la chaleur que l'on s'est efforcé à faire développer le mieux possible au combustible.

L'objection qui peut être faite au sujet du mérite de ce système est sur la nécessité d'un ventilateur qui exige lui-même une force motrice spéciale. A cela, on peut répondre qu'il est rare qu'un générateur à vapeur ne soit pas destiné à alimenter un moteur sur lequel on pourra toujours prendre la puissance requise. D'autre part, si ce générateur est employé uniquement à produire de la vapeur pour une fabrication ou pour un chauffage, le ventilateur peut être mis en mouvement par un petit moteur adhérent qui devient du reste nécessaire, dans ce cas, pour commander une pompe alimentaire.

Il ne reste donc plus qu'un point à déterminer : c'est de savoir si la force absorbée par le ventilateur laisse néanmoins un bénéfice produit par une plus grande utilisation du combustible.

A cet égard, on devra remarquer que, de toutes façons, le tirage exige une dépense de force motrice, que ce soit par la température conservée à l'air pour obtenir son ascension directe dans la cheminée et un fort tirage, soit que le courant se trouve établi par une action mécanique qui refoule de l'air dans le foyer.

Or, des expériences de Péclet il résulte que la dépense de force motrice est beaucoup plus grande par le tirage simple de la cheminée que par le second procédé : c'est-à-dire que la quantité de calorique enlevée par le tirage produirait plus de vapeur qu'il n'en faut dépenser pour faire mouvoir un appareil mécanique soufflant qui fournirait un égal volume d'air au foyer.

Ainsi, Péclet trouve que la quantité de chaleur enlevée par le tirage d'une cheminée, en prenant sa différence de température entre l'air chaud à 300° et celle de l'air ambiant, serait capable de produire en vapeur, *théoriquement*, plus de 90 fois la puissance motrice qu'il est nécessaire de développer mécaniquement pour amener un même volume d'air au foyer.

Sans s'arrêter à cette valeur, purement théorique, il reste néanmoins démontré qu'on gagne en employant un ventiateur pour alimenter un foyer, d'abord par cette considération même, et ensuite parce qu'il permet de refroidir la fumée le plus possible au moyen de surfaces de chauffe convenablement disposées.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## DESCRIPTION DU GÉNÉRATEUR TUBULAIRE A VENT FORCÉ

(FIG. 1 A 5, PL. 5)

Les figures de notre dessin représentent principalement un générateur tubulaire du système de MM. Molinos et Pronnier, et une application de leur système de foyer à une chaudière cylindrique ordinaire à flamme descendante.

La fig. 1 est une section longitudinale du générateur tubulaire, passant par l'axe normal de l'appareil;

La fig. 2 en est une section horizontale passant par l'axe du corps tubulaire;

La fig. 3 est une section transversale faite sur le foyer par l'axe du réservoir de vapeur.

DISPOSITION D'ENSEMBLE. — Le générateur tubulaire se compose de trois parties principales qui sont : la boîte à feu A, le corps cylindrique tubulaire B et un second corps cylindrique C qui forme réservoir de vapeur et d'eau à la plus haute température.

La boîte à feu est formée de deux caisses en tôle de fer, réunies ensemble par des rivets entretoises. La réunion des deux parties a lieu, à la partie inférieure, sur un cadre en fer *a* qui constitue la fermeture étanche de l'intervalle compris entre elles, et sert aussi à l'ensemble de base par laquelle il repose sur le bord d'un socle en fonte D, qui lui-même s'appuie sur la maçonnerie de fondation.

La paroi intérieure *b* de la boîte à feu possède une forme légèrement pyramidale, de façon que l'espace entre les deux parois, qui est complétement rempli d'eau et où il se forme beaucoup de vapeur, s'ouvre en montant pour en faciliter le dégagement.

La boîte à feu est rivée, par son enveloppe extérieure, avec le corps cylindrique B qui est traversé par un grand nombre de tubes en fer *c*, lesquels sont assemblés, d'un bout dans la plaque tubulaire *b* de la boîte à feu, et de l'autre avec la plaque tubulaire *d* de la boîte à fumée. De l'autre côté de ce fond le corps B est prolongé de façon à former la boîte à fumée E, établissant la communication des tubes avec la cheminée.

Nous avions dit que cette cheminée, qui n'a que les proportions relatives d'une cheminée ordinaire de locomotive, pouvait se placer directement sur le corps du générateur. Mais pour se conformer à la lettre de l'arrêté qui défend de placer les cheminées dans l'axe du fourneau, les constructeurs ont cru devoir la reporter sur le côté en la faisant communiquer avec le générateur par le canal renversé F.

La capacité supérieure C est rivée avec la boîte à feu, et sa paroi cylindrique en forme le ciel. Pour que cet assemblage se fasse bien, les parois latérales se terminent en haut par une partie cylindrique de façon que le raccord avec le cylindre C ait lieu normalement à sa surface.

La communication est établie entre les deux corps B et C par une tubulure ordi-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

naire G. Mais elle est également établie avec l'intervalle des parois de la boîte à feu A, au moyen d'une série d'ouvertures *e* percées dans la paroi cylindrique, vis-à-vis de cet intervalle même. La forme oblongue de ces ouvertures, dont le grand axe est pris suivant la circonférence, permet d'avoir une grande section ouverte, sans affaiblir sensiblement la résistance tangentielle du cylindre C. Quant à sa résistance longitudinale, elle est plus que compensée par celle des deux pinces des parois latérales qui sont clouées sur lui.

D'après ce qui précède, il est clair que toutes les parties de l'appareil qui renferment de l'eau sont en libre communication, la boîte à feu avec le corps B par l'intervalle des tubes, et le réservoir C avec ces deux parties par les ouvertures *e* et la tubulure G.

Passant maintenant à la disposition du foyer, nous voyons qu'il comprend une grille H et un autel en brique réfractaire I qui sépare sa capacité en deux parties inégales, dont l'une sera *la chambre de combustion* et l'autre une sorte de carneau intermédiaire entre le foyer proprement dit et l'entrée des tubes.

L'autel en brique, descendant jusque sur la fondation, détermine, avec le coffre en fonte D, une capacité vide au-dessous de la grille, laquelle capacité ne présente d'abord aucune communication avec l'extérieur, excepté au travers de la grille, et constitue un cendrier bien étanche, mis en rapport exclusif avec le ventilateur qui doit fournir l'air à la combustion.

A cet effet, le vent fourni par ce ventilateur arrrive d'abord, au moyen de conduits quelconques, dans un premier cylindre en tôle J placé au-dessous du corps tubulaire. Ce tube, que nous appellerons, si l'on veut, *antichambre de vent,* se raccorde par une tubulure méplate avec une autre semblable fondue avec le coffre D; un prolongement en fonte *f,* de la même tubulure, traverse l'autel I, débouche dans le cendrier étanche et lui amène ainsi l'air envoyé par le ventilateur.

Le même réservoir J est mis en communication par ses extrémités, au moyen de deux conduits à section carrée K, avec deux coffres en tôle L accolés aux côtés du foyer. Dans les parties correspondantes la muraille du foyer est traversée par une série de petits tubes *g*, rivés avec les doubles parois comme des entretoises. L'air fourni par le ventilateur remplit les boîtes L, et pénètre dans le foyer par les tubes *g*, au-dessus de la couche de combustible.

L'air envoyé par le ventilateur se trouve donc divisé en trois parties, dont l'une constitue l'alimentation du foyer et s'introduit par la grille, tandis que les deux autres parties servent à enflammer l'oxyde de carbone et les autres gaz qui se dégagent de l'épaisse couche de combustible.

Les volumes d'air introduits en ces trois parties sont réglés à volonté, au moyen du papillon *h* placé dans la tubulure *f* du cendrier, et de ceux *i* disposés à l'entrée des boîtes L. Un papillon principal *j* se trouve également ménagé à la tubulure d'entrée J′, à laquelle s'adapte le conduit de vent du ventilateur, et qui forme la prise d'air sur le réservoir J. Chacun de ces papillons peut être manœuvré aisément à la main par des tringles *k* et *l*, placées de chaque côté de la boîte à feu et se rattachant aux petits leviers montés sur les axes des papillons; des dents de crémail-



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lères ménagées après ces tringles permettent de les arrêter à divers degrés d'ouvertures des papillons.

L'intérieur du foyer est desservi par deux portes M que les fig. 4 et 5 représentent en détail à une plus grande échelle.

Nous ferons remarquer que l'emploi de deux portes est exceptionnel et dû à la grande puissance du générateur qui correspond à 100 mètres carrés de surface évaporatoire. Dans la plupart des cas, il vaut mieux établir deux générateurs d'une surface moitié moindre lorsqu'on atteint cette limite de puissance : alors une seule porte est suffisante.

La construction de ces portes a été l'objet, de la part des auteurs, de soins tout particuliers en vue d'empêcher les fuites de gaz et de fumée qui se manifestent souvent dans des foyers analogues où il existe une soufflerie forcée, fuites qui ne peuvent pas exister lorsque l'air nécessaire à la combustion est appelé par le simple tirage de la cheminée.

Les fuites sont empêchées ici au moyen d'une introduction d'air forcé dans une gorge $m$ ménagée autour de la porte, du côté où elle s'applique contre la muraille du foyer. L'air est pris sur les conduites principales par un conduit $n$ qui vient s'ouvrir contre une courte tubulure $n'$ fondue avec la porte, communiquant avec la gorge intérieure $m$ et avec l'espace ménagé entre la porte même en fonte et la plaque isolante $o$ rivée avec elle. Le conduit $n$ n'est aucunement solidaire de la porte que l'on peut ouvrir, par conséquent, comme dans tout autre cas; la communication d'air ne se trouve établie que lorsque la porte est fermée.

Ainsi, l'air refoulé par le ventilateur établit entre la paroi extérieure du foyer et les rebords de la porte une pression équivalente à celle de l'intérieur, de façon que, s'il se produit une fuite à l'extérieur, ce n'est ni de l'air chaud ni de la fumée, mais seulement de l'air pur amené par le ventilateur. D'autre part, cet air, continuellement renouvelé, empêche les portes de rougir et même de s'échauffer sensiblement.

Après cette description du foyer, lequel présente le plus de caractères essentiels, il nous reste à dire quelques mots des corps qui renferment l'eau et où se forme la vapeur.

Comme dans tous les appareils que nous avons examinés jusqu'ici, l'alimentation d'eau froide se fait dans la partie du générateur qui est aussi à la plus basse température et où la production de vapeur est à peu près nulle.

Notre dessin indique que l'eau d'alimentation est amenée par la tubulure N placée tout près de la boîte à fumée et à la partie inférieure du générateur. L'eau, d'abord froide, s'échauffe peu à peu, et doit s'élever au fur et à mesure qu'elle s'échauffe. Mais pour la forcer à ne s'approcher du foyer que d'une façon exactement correspondante à son élévation de température, on a ménagé à l'intérieur du corps B une plaque étanche O que traversent les tubes, et qui ne laisse de communication entre les deux bouts de ce corps que par la partie supérieure. L'eau froide ne peut donc franchir cette plaque que lorsque sa légèreté spécifique lui permet d'atteindre la paroi supérieure de la chaudière. Après avoir passé la cloison, elle rencontre de l'eau plus chaude et s'abaisse d'abord, pour remonter ensuite peu à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

peu, au fur et à mesure qu'elle se rapproche du foyer. Enfin, elle est assez chaude pour se vaporiser, et vient affluer autour du foyer par la tubulure G; finalement, elle ne parvient au réservoir de vapeur que vaporisée ou sur le point de l'être. Il ne peut donc exister dans le réservoir C que de l'eau qui a pris toute la chaleur nécessaire pour passer immédiatement en vapeur, et l'inconvénient des entraînements d'eau à la machine motrice nous semble, en raison de cela, assez peu possible.

Cependant, le réservoir C, comme tous les autres appareils de vaporisation, est surmonté d'un dôme P où se fait la prise de vapeur en *p*. Ce dôme porte lui-même l'une des soupapes de sûreté Q; l'autre, Q′, est placée à l'extrémité du corps cylindrique C.

En général, nous ne nous sommes pas autant préoccupé des appareils accessoires, qui sont à peu de chose près les mêmes que partout ailleurs, que des parties caractéristiques du générateur. Cependant, on peut remarquer sur notre dessin un niveau d'eau R et un tampon S pour la visite et le nettoyage.

Faisons remarquer encore que le générateur n'a d'autres relations avec les constructions avoisinantes que son repos sur une fondation solide en maçonnerie, d'une part, par le socle D du foyer, et ensuite par un support intermédiaire T, et par celui U qui est creux pour former le raccord entre la boîte à fumée E et le conduit F allant à la cheminée; un registre en papillon *q* s'y trouve placé à l'intérieur pour régler le tirage.

Marche de l'appareil. — Après l'exposé de principes qui a précédé la description de ce générateur, il reste peu de chose à dire pour faire comprendre entièrement sa marche.

Les gaz, développés dans le foyer par la première phase de la combustion, consistant dans le passage au travers de la grille et du charbon de l'air fourni par le ventilateur, sont enflammés aisément en raison de l'injection latérale d'air pur par les boîtes à vent L et les tubes *g*. Les flammes peuvent se développer facilement par la grande élévation du ciel du foyer; elles s'élèvent, en effet, mais s'inclinent ensuite, sous l'influence du tirage, pour franchir l'autel I et atteindre l'entrée des tubes *c*. L'autel a pour objet d'augmenter le développement des flammes en augmentant la distance à parcourir pour atteindre les tubes.

La position des tubes *g* injecteurs d'air et celle des portes du foyer permettent de maintenir la couche de combustible à une épaisseur minimum d'environ 30 centimètres au-dessus de la grille, tandis que, dans les foyers ordinaires où l'injection d'air additionnelle fait défaut, on ne peut guère dépasser 15 à 20 centimètres. Péclet conseillait même de ne pas dépasser 10; mais les personnes habituées à la conduite d'un foyer savent qu'il serait assez difficile de maintenir la marche régulière d'un feu avec une masse de combustible en ignition aussi peu considérable : il faudrait à chaque instant fournir du combustible frais, et l'ouverture fréquente des portes du foyer n'est pas sans inconvénient, surtout si le feu n'est pas en pleine activité. Si le mode de combustion par couche extrêmement mince peut être praticable, disons même le meilleur, ce n'est qu'au moyen de dispositions mécaniques qui distribuent le combustible d'une façon continue et sans ouvrir le foyer, autre

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mode qui a bien aussi ses inconvénients, et dont nous dirons un mot plus tard à propos des foyers fumivores.

Pour le générateur qui nous occupe, du reste comme avec tout autre, on doit maintenir l'épaisseur de la couche aussi constante que possible, et cela en multipliant suffisamment les charges; mais nous avons fait remarquer que la plus grande masse de combustible en ignition permet d'espérer que les charges un peu fortes de charbon frais se font moins ressentir sur la température générale du foyer, et que la quantité de fumée produite est aussi moins considérable, attendu que le nouveau combustible est distillé moins vite.

Nous avons dit tout ce que les auteurs espèrent de cet ingénieux appareil et ce que nous en pensons nous-même; mais nous ne pouvons qu'attendre pour savoir comment l'industrie l'accueillera, et si les détails assez minutieux de sa construction ne seront pas un obstacle à sa propagation. Quoi qu'il en soit, les résultats d'expériences faites sur ce générateur font espérer une utilisation extraordinaire du combustible : nous allons en faire mention dans un instant, après avoir résumé les principales conditions de marche du type représenté pl. 5, et avoir montré comment on peut l'appliquer, comme système de foyer, à un générateur cylindrique ordinaire.

Dimensions principales. — Le générateur représenté pl. 5 est établi pour 100 mètres carrés de surface de chauffe évaporatoire; comme la surface de chauffe directe est très-grande, que l'activité du foyer peut être très-considérable, et qu'en outre le calorique est supposé très-complétement utilisé, chaque mètre de surface de chauffe est compté pour un plus grand poids d'eau vaporisée qu'avec les générateurs cylindriques non tubulaires.

Il en résulte qu'il correspond à une puissance dynamique de 100 chevaux pour un moteur réglé dans de bonnes conditions de marche. Nous avons vu (p. 162) qu'en effet, un mètre carré de surface de chauffe pourrait suffire pour une puissance de 1 cheval, ou 75 kilogrammètres par 1″, même avec un générateur ordinaire lorsque la machine motrice est combinée de façon à bien utiliser la vapeur. A plus forte raison celui-ci doit-il avoir une étendue suffisante pour produire cet effet.

La répartition de la surface de chauffe a lieu de la façon suivante :

La boîte à feu est comptée pour 14 mètres carrés de surface, celle qui reçoit la première action du foyer, et presque entière par rayonnement;

Les tubes *c* qui traversent le corps cylindrique sont au nombre de 136 et sont comptés pour les 86 mètres qui complètent les 100 mètres de surface de chauffe. Cette superficie est celle minimum que puissent présenter les tubes, c'est-à-dire la superficie de la surface intérieure en contact avec le calorique.

En effet, chacun de ces tubes a 50 millimètres de diamètre intérieur et une épaisseur de 3 millimètres, d'où le diamètre extérieur égale 56 millimètres. Leur longueur étant égale à 4 mètres, ils ont donc, pour superficie maximum, celle enveloppée d'eau :

$$0{,}056 \times 3{,}1416 \times 4 = 0^{m.q.}7037;$$

et ensemble :

$$0{,}7037 \times 136 = 95^{m.q.}7032.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En ne comptant que leur superficie intérieure, on trouve par le rapport des diamètres :

$$95,7032 \times \frac{50}{56} = 85^{m.q.}45.$$

La grille a pour dimensions :

$$1^{m}40 \times 1^{m}80 = 2^{m.q.}52,$$

ou 252 décimètres carrés : soit $2^{d.q.}52$ par force de cheval, puisque la puissance du générateur est estimée à 100 chevaux.

Par conséquent, en admettant que la machine motrice dépense de la vapeur à raison de 3 kilogrammes de combustible par force de cheval et par heure, au maximum, cette grille doit pouvoir brûler dans le même temps 300 kilogrammes de houille; soit par décimètre carré :

$$\frac{300}{252} = 1^{k}111,$$

c'est-à-dire en moyenne 100 kilogrammes par mètre carré de grille, pour laquelle consommation totale de 300 kilogrammes le ventilateur doit fournir environ 3400 mètres cubes d'air dans le même temps. Nous avons dit que cette consommation appartenait au principe de la combustion vive, qui peut et doit être obtenue facilement avec un foyer à vent forcé.

La relation que nous donnons plus loin des résultats d'expérience fera connaître ce que ces prévisions ont d'exact.

## APPLICATION DU MÊME PRINCIPE DE FOYER A UNE CHAUDIÈRE CYLINDRIQUE ORDINAIRE

(FIG. 6, PL. 5)

La fig. 6 est destinée à faire connaître la disposition que les auteurs ont adoptée pour faire l'application de leur système de foyer et de soufflerie à un générateur cylindrique à bouilleurs, non tubulaire et à courant de flamme descendant.

A étant cette chaudière et B l'un des bouilleurs, le cendrier, ou capacité réservée au-dessous de la grille H, est soigneusement fermé sur le devant du fourneau par une porte en fonte M', appliquée contre le chambranle qui garnit la face du fourneau. Le même chambranle reçoit de même la porte M du foyer, mais qui est à coulisse au lieu d'être à charnière, ce qui n'empêche pas de lui appliquer le bourrelet d'air qui doit empêcher les fuites, ainsi que dans le grand appareil qui vient d'être décrit.

Le ventilateur amène l'air sous la grille par un conduit *f* qui arrive par l'un des côtés de la maçonnerie du fourneau et traverse l'autel I. L'air confiné dans le cendrier traverse la grille et le combustible, et passe aussi par deux conduits latéraux K qui viennent aboutir à deux boîtes en tôle logées dans la brique, de chaque côté du foyer. Ces boîtes remplissent le même rôle que celles L du grand généra-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

teur; elles sont munies d'un grand nombre de petites tubulures *g* qui injectent de l'air au-dessus de la couche de combustible en ignition. Quant à la porte du foyer, l'air lui parvient par un petit tube *n* qui le prend aussi dans le cendrier.

A part ces dispositions spéciales du foyer, la marche du courant d'air chaud ou des produits de la combustion est la même que pour le générateur précédemment décrit et représenté pl. 2, fig. 8.

### RÉSULTATS DES EXPÉRIENCES FAITES SUR LE GÉNÉRATEUR DE MM. MOLINOS ET PRONNIER

Au moment où nous traçons ces lignes, les applications, quoique encore peu nombreuses de ce système de générateur (environ 1000 chevaux), ont néanmoins donné lieu à des expériences qui sont assez décisives pour permettre d'entrevoir l'avenir qui lui est réservé. Nous abandonnerons pour l'instant l'appréciation du mode plus ou moins compliqué de sa construction de détail, attendu que les résultats, comme utilisation du combustible, dépendent moins de la forme même de l'ensemble que de la disposition particulière du foyer et du mode d'introduction de l'air. Si cette dernière combinaison est bonne, il est évident qu'elle pourra produire des résultats identiques avec des corps de chaudière de formes différentes.

Nous citerons trois séries principales d'expériences exécutées sur autant de générateurs différents établis à l'Exposition universelle de 1855 à Paris, aux ateliers d'Oullins et à la manufacture des tabacs de Paris (ce dernier générateur est destiné à la manufacture des tabacs de Dieppe). Ces trois générateurs, de puissances différentes, représentent 25, 117 et 50 mètres de surface de chauffe.

Générateur de l'Exposition. — L'appareil présenté à l'Exposition universelle par MM. Molinos et Pronnier a été, de la part du jury, comme les autres également exposés et fonctionnant, l'objet d'expériences que l'on a dû s'efforcer de rendre aussi rigoureuses que possible. En voici le résultat sous la forme d'une moyenne de 25 expériences faites du 10 septembre au 10 novembre :

#### RÉSUMÉ DES EXPÉRIENCES

FAITES A L'EXPOSITION UNIVERSELLE DE 1855 SUR LE GÉNÉRATEUR DE MM. MOLINOS ET PRONNIER

| SURFACES | | DURÉE totale des expériences non compris celle de la mise en pression. | POIDS TOTAL | | POIDS MOYEN DE VAPEUR PRODUITE | | POIDS de houille brûlée par décimètre carré de grille et par heure. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| de chauffe. | de la grille. | | d'eau vaporisée. | de houille brûlée. | par kilogramme de houille. | par mètre carré de surface de chauffe et par heure. | |
| 24m.q.686 | 0m.q.65 | 418h45 | 94358k | 9529k | 9k69 | 34k19 | 4k237 |

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour procéder à ces expériences, on a compté à partir du moment où la mise en vapeur à 5 atmosphères était atteinte, afin de ne pas confondre la quantité de combustible nécessaire à la mise en train avec celle réellement dépensée pour chaque kilogramme de vapeur produite. Les cendres n'ont pas été déduites, le combustible employé étant du Charleroi qui en produit peu.

En examinant le détail des 25 expériences, dont le tableau précédent n'est que le résumé moyen, on reconnaît que la quantité de vapeur produite par mètre carré de surface de chauffe a varié de 17 à 40 kilogrammes par heure, et le poids de combustible brûlé par décimètre carré de grille, entre 0k85 et 1k40 dans le même temps.

Enfin, le poids d'eau vaporisée par kilogramme de houille, dont la moyenne égale 9,69, s'est élevé généralement à 10k5 dans les dernières expériences, au moment desquelles l'on peut admettre, qu'en effet, le chauffeur était plus exercé dans la conduite de son fourneau.

Générateur des ateliers d'Oullins. — Cet appareil, dont la puissance est de 117 mètres de surface évaporatoire, a donné les résultats suivants :

**RÉSUMÉ DES EXPÉRIENCES**

EXÉCUTÉES EN 1858, A OULLINS, SUR LE GÉNÉRATEUR DE MM. MOLINOS ET PRONNIER.

| NOMBRE des expériences. | DURÉE de chaque expérience. | POIDS | | EAU VAPORISÉE. | | CHARBON BRULÉ | | PRODUCTION de vapeur par mètre de surface de chauffe et par heure. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | du combustibe. | des cendres. | Poids total. | Par 1 kilog de charbon. | par heure. | par décimètre carré de grille et par heure. | |
| 13 | 11 h. | 36901 | 5242 | 341287 | 9,82 | 254,41 k. | 1,19 | 18,37 |
| 24 | 11 | 62120 | 8792 | 536080 | 10,05 | 239,06 | 1,12 | 17,19 |
| 24 | 11 | 57567 | 8741 | 546376 | 10,59 | 217,12 | 1,01 | 15,79 |
| 26 | 11 | 56784 | 5950 | 554849 | 10,91 | 198,28 | 0,89 | 12,61 |
| 25 | 11 | 53776 | 9206 | 530141 | 11,86 | 93,81 | 0,92 | 16,31 |
| | | | | | moyenne 10k65 | | | |

Dans ces expériences, on a jugé convenable de retrancher le poids des cendres, qui s'élève à 15 pour 100 du poids total de combustible employé, afin de connaître la production de vapeur pour du charbon pur.

Par conséquent, puisque la moyenne de cette production, ainsi estimée à 0,85 du poids de combustible réellement dépensé, est égale à 10k65 de vapeur pour 1 kilogramme de houille pure, il en résulte qu'en faisant la réduction au point de vue du combustible brut, et tel qu'il est acheté et payé, cette production serait égale à :

$$10^{k}65 \times 0,85 = 9^{k}05.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Nous faisons cette remarque afin de mettre en garde contre les erreurs que l'on pourrait faire si l'on pensait obtenir ce résultat exceptionnel sans tenir compte des parties non combustibles de la houille. S'il est juste de rechercher le rendement dû à un combustible réellement pur, il est également équitable de faire remarquer que l'on fait souvent rapporter une expérience au poids brut de houille dépensée, sans se préoccuper des déchets qu'elle peut fournir. C'est d'ailleurs de cette façon que l'on a déterminé le chiffre moyen 7600 (36) de la puissance calorifique, chiffre qui suppose néanmoins que la houille ne produit pas plus de 10 pour 100 de cendres (1).

Générateur de la manufacture des tabacs. — Un appareil semblable, mais d'une puissance de 50 mètres de surface vaporisatoire, a été fourni à cette grande administration, où sa réception a été précédée d'expériences extrêmement précises exécutées sous les yeux des ingénieurs des manufactures des tabacs.

Le mode de procéder était le même que pour les expériences citées précédemment.

Après avoir très-exactement tenu compte des quantités de combustible absorbées pour la mise en pression, ainsi que de la température de l'eau d'alimentation ramenée à la température de 15 degrés, et fait la déduction des scories, on a obtenu, en trois expériences finales d'une durée totale de 29 heures, les résultats suivants :

**RÉSUMÉ DES EXPÉRIENCES**

EXÉCUTÉES EN 1859 A LA MANUFACTURE DES TABACS DE PARIS, SUR UN GÉNÉRATEUR DE MM. MOLINOS ET PRONNIER.

| ORDRE des expériences | DURÉE de la marche. | POIDS D'EAU à 15 degrés évaporée par 1 kilogramme de combustible. | POIDS D'EAU évaporée par mètre carré de surface de chauffe et par heure. |
|---|---|---|---|
| 1 | 7h 10′ | 9k 60 | 32k » |
| 2 | 10h 45′ | 9k 72 | 22k 96 |
| 3 | 11h 15′ | 10k » | 22k 56 |

Les quantités de scories déduites se sont élevées, en moyenne, à 6 pour 100 du poids total du combustible brûlé, d'où il résulte que les rendements ci-dessus ne subiraient qu'une faible réduction s'ils étaient ramenés au charbon brut.

Comme ces chiffres de rendement, très-élevés, pouvaient laisser quelques doutes, eu égard à une certaine quantité d'eau non vaporisée que la vapeur pouvait entraîner avec elle, les expérimentateurs usèrent d'un procédé très-ingénieux afin d'avoir une idée aussi exacte que possible de cette situation, qui était, de toutes façons, très-difficile à déterminer.

Ils firent mélanger à l'eau contenue par le générateur une certaine quantité de

(1) Voir les expériences citées par Péclet dans son *Traité sur la chaleur*, pages 101 à 103, tome Ier, 1843.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sel, et analyser l'eau à des moments d'expériences suffisamment rapprochés. Il est évident que si la vapeur n'entraîne pas d'eau, le degré de saturation de celle restant dans la chaudière doit rester fixe, en raison de celle qui est continuellement injectée pour correspondre à la vaporisation. Mais si la vapeur entraîne de l'eau non vaporisée, elle entraîne aussi du sel avec elle, et le degré de saturation doit diminuer (1).

En procédant ainsi, on put estimer que l'eau entraînée par la vapeur ne dépassait pas, en moyenne, 1/158 de celle vaporisée.

Par conséquent, tout approximative que puisse être cette méthode, son application permet de conclure que les indications qu'elle a fournies suffisaient pour établir que l'entraînement d'eau était assez faible, et que les résultats obtenus comme utilisation du combustible pouvaient être maintenus.

Quant au degré de fumivorité de cet appareil, les mêmes expériences ont démontré qu'il ne produit de fumée qu'au moment des charges, lorsque l'action du ventilateur est nécessairement suspendue.

Nous n'ajouterons rien à ces notions sur ce générateur, pensant qu'elles suffiront à ceux de nos lecteurs qui voudraient se former une conviction sur la façon dont la pratique a répondu aux appréciations des inventeurs.

Disons encore cependant qu'au concours tout récent qui vient d'avoir lieu à Mulhouse, dans l'établissement de M. Émile Dolfus, on a pu constater, après des expériences réitérées et faites avec le plus grand soin, que ce système de chaudière se trouve en première ligne, sous le rapport de la production de la vapeur et l'économie de combustible.

Nous devrions parler aussi des générateurs tubulaires à foyer intérieur de MM. Cail et Ce, qui en construisent en effet un grand nombre pour les usines; mais comme ils ont la plus grande analogie avec les chaudières des locomotives et surtout des locomobiles, nous croyons préférable de renvoyer à cet égard à la description de ces dernières que nous donnerons dans le second volume de ce traité.

La maison Cail, qui apporte tant de précision dans toutes les constructions mécaniques, a compris, mieux que personne, l'avantage des générateurs tubulaires en général, et s'y est adonnée d'une manière toute spéciale; mais elle a compris aussi que pour qu'un tel système puisse se répandre dans les manufactures, comme il est plus difficile à exécuter, qu'il exige plus d'attention, et qu'il revient forcément plus cher, il était indispensable qu'on y portât plus de soin que dans le système ordinaire de générateur cylindrique avec ou sans bouilleurs.

(1) On doit à M. Corbin-Desboissières un procédé très-simple pour éviter et mesurer l'entraînement de l'eau par la vapeur dans les cylindres. Ce système, expérimenté au chemin d'Orléans par M. C. Polonceau, de regrettable mémoire, consiste en un peigne métallique composé d'une nombreuse quantité de fils de laiton très-minces et très-rapprochés qui sont dirigés verticalement au-dessus du niveau supérieur de l'eau; de telle sorte que, quand la chaudière est en fonction, la vapeur qui se dégage étant forcée, pour sortir, de traverser toute la longueur du peigne, se dépouille des molécules d'eau qu'elle a entraînées avec elle, et qui retombent dans une sorte de gouttière inclinée disposée à quelques centimètres au-dessus du niveau.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

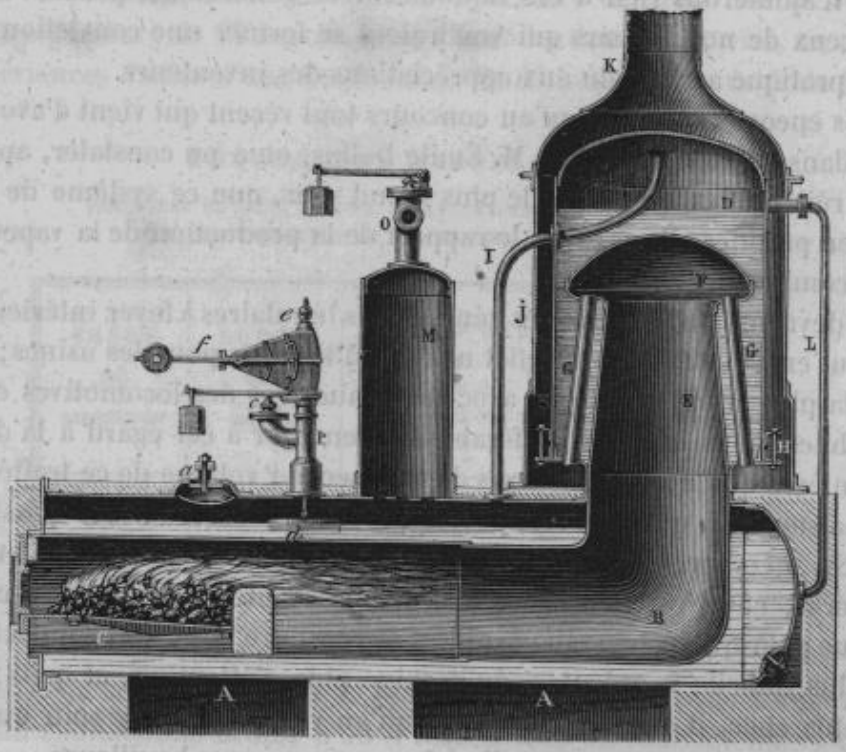
## GÉNÉRATEUR A FOYER INTÉRIEUR A CIRCULATION RATIONNELLE

Par **M. E. BOURDON**, ingénieur-mécanicien à Paris

Le générateur représenté fig. 32 est de l'invention de M. Eugène Bourdon, qui a cherché à apporter des perfectionnements utiles dans la construction de ces appareils et des parties accessoires qui les accompagnent.

Cet appareil est fondé sur le principe du foyer intérieur, comme ceux de Cornwall, et d'un système particulier de réchauffeur pour l'eau d'alimentation. La longueur de la chaudière se trouve réduite, tout en conservant néanmoins une circulation d'une étendue suffisante aux produits de la combustion.

Fig. 32.




Échelle de 1/40.

On y remarque le corps principal A muni à l'intérieur du bouilleur-foyer B et de sa grille C. Mais ce corps intérieur, au lieu de traverser le bout du cylindre principal, se relève d'équerre et prend une forme légèrement conique en E, avec un chapeau sphérique F qui semble le boucher complétement. Ce chapeau est garni d'une série de tubes G, qui sont disposés tout autour du corps conique E, et se terminent sur une collerette H, qui forme le fond d'une capacité cylindrique D, entourant complétement l'extrémité verticale du bouilleur-foyer BE. La cloche D est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

elle-même enveloppée par un dôme J d'une forme semblable, mais qui, s'appuyant sur la maçonnerie du corps principal, n'est autre chose qu'une boîte à fumée au sommet de laquelle commence la cheminée K.

Par conséquent, la marche des gaz chauds et de la fumée s'effectue par le conduit intérieur B, son prolongement E, et enfin, de haut en bas, par les tubes G qui débouchent dans la boîte à fumée J, où ils se relèvent en circulant autour de la cloche D, et s'échappent ensuite par la cheminée K.

L'eau est répartie dans deux capacités distinctes qui sont le corps principal A et l'intervalle compris entre le conduit conique E et la cloche D, espace aussi traversé par les tubes G. L'eau d'alimentation est envoyée directement dans cette partie, où elle prend la chaleur fournie par les gaz à la fin de leur passage. Au fur et à mesure qu'elle s'échauffe, elle s'élève, et, le réservoir D étant suffisamment rempli, cette eau atteint l'orifice d'un tube L qui communique avec celle contenue dans le corps principal A. L'écoulement a lieu naturellement et sous la simple action de la pesanteur de la colonne d'eau dans le tube L, au-dessus du niveau de la surface libre dans la chaudière A, attendu que les deux réservoirs sont aussi en communication de vapeur par l'autre tube I, ce qui fait que les deux surfaces libres en A et en D sont sous la même pression.

La vaporisation la plus énergique a donc lieu dans la chaudière A où la vapeur remplit l'espace libre au-dessus de l'eau, ainsi qu'un réservoir très-élevé M dont le sommet est muni d'une tubulure O pour y faire la prise.

Quant à la vapeur qui se dégage de la masse d'eau confinée dans le réservoir D, elle en occupe la partie supérieure et se trouve en relation constante avec le corps principal par le conduit I, ainsi que nous l'avons dit. L'orifice de ce dernier s'ouvre le plus haut possible, afin d'éviter les entraînements d'eau non vaporisée.

Résumant cette combinaison, nous trouvons que la séparation est complète entre l'eau froide d'alimentation et la masse qui est à la plus haute température; nous reconnaissons également que cette eau ne peut entrer dans la chaudière principale que lorsqu'elle est déjà très-chaude, après avoir absorbé la chaleur de la fin du circuit par trois parois : celle du cône E, des tubes G et celle du réservoir D.

Cette disposition est ingénieuse, comme toutes les idées de M. Bourdon. Les résultats pratiques, comme utilisation du combustible, ont du reste justifié les prévisions de l'inventeur. Mais ne peut-on pas lui reprocher la difficulté d'exécution, et peut-être les embarras que cause l'entretien ou une réparation fortuite?

Du reste, l'ensemble du générateur a le mérite incontestable de ne point exiger de construction spéciale et d'être en quelque sorte locomobile par la facilité qu'il présente pour l'établir et le déplacer.

Il est presque superflu de faire remarquer que cet appareil est muni de tous les accessoires ordinaires, tels que soupapes de sûreté P, flotteur à sifflet *e*, du système particulier de M. Bourdon (1), etc.

La fig. 32, qui est dessinée à l'échelle, permet de juger des dimensions de ce

(1) Voir pour les détails de cet appareil, le chapitre VIII, concernant les *Appareils de sûreté et d'observation*.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

générateur, dont la base correspond à 11 mètres carrés de surface de chauffe réduite, c'est-à-dire déduction faite des parties les moins chauffées. Le volume total de l'appareil est de $6^{m.c.}900$; celui occupé par l'eau égale $1^{m.c.}600$.

## GÉNÉRATEUR TUBULAIRE VERTICAL

Par **M. BESLAY**, ancien constructeur à Paris

Ce système de chaudière, proposé par M. Beslay, il y a environ douze ans, pour la marine de l'État, avait pour objet principal d'obtenir la plus grande surface de chauffe possible sous le moindre volume, et de n'exiger aucune construction qu'une base solide pour la recevoir. Une application, entre autres, en a été faite dans les ateliers du chemin de fer d'Orléans, à la gare d'Ivry.

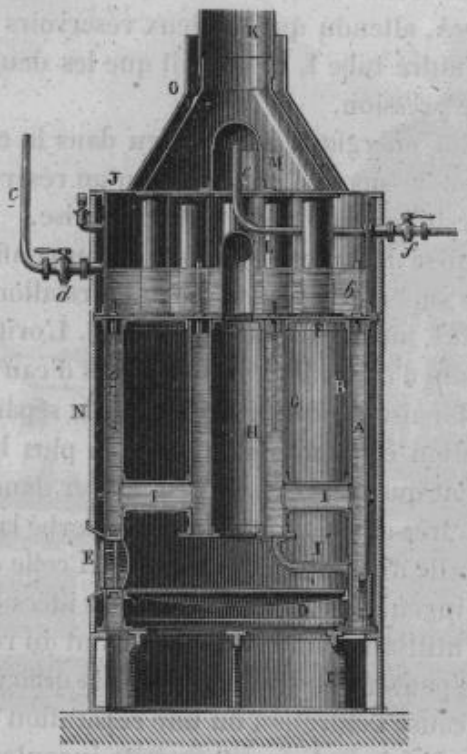



Fig. 33. Échelle de 1/40.

Si ce système, tel qu'il est représenté par la fig. 33, n'a pas pris une très-grande extension, il n'est pas moins vrai de dire que la disposition verticale paraît être néanmoins adoptée par quelques constructeurs. On construit aujourd'hui un grand nombre de petites machines à vapeur, directement montées sur la chaudière, qui est analogue extérieurement à celle de M. Beslay. Seulement, l'intérieur est quelquefois moins compliqué.

Ce générateur se compose de deux cylindres en tôle A et B, concentriques l'un à l'autre, et placés verticalement sur un socle en fonte C, qui les élève à quelques déci-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

mètres au-dessus du sol et sert de cendrier. La capacité comprise entre ces deux cylindres est entièrement pleine d'eau. La grille D, placée à la partie inférieure, un peu au-dessus du socle, occupe la base entière du cylindre intérieur B; on y jette le combustible par la porte d'entrée à double paroi E. La base supérieure des deux cylindres est formée par la cloison horizontale F, qui est également en tôle. A cette cloison sont suspendus verticalement les deux gros tubes concentriques G et H, dont l'intervalle est aussi plein d'eau et en communication avec la capacité existant entre les deux corps cylindriques A et B, au moyen de tubes horizontaux I et du tube recourbé I'.

Le cylindre extérieur A se prolonge au-dessus de la cloison horizontale F, et se trouve fermé par une seconde cloison parallèle J, sur laquelle se pose la cheminée d'appel K. La base de celle-ci présente la forme d'un tronc de cône et s'élargit pour recevoir la fumée et les gaz brûlés qui se dégagent en même temps du conduit central H et de chacun des tubes verticaux L.

Lorsque le charbon jeté sur la grille est en combustion, la flamme et l'air chaud, remplissant entièrement l'espace compris entre les cylindres B et G et l'intérieur du conduit central H, lèchent toute leur surface et celle des tubulures I, et s'échappent à la partie supérieure, en vaporisant l'eau contenue dans les capacités annulaires, et qui s'y renouvelle sans cesse; obligés de passer par les conduits L pour aller à la cheminée, ils vaporisent également l'eau contenue dans la chaudière A, au-dessus de la cloison F, et chauffent en même temps la vapeur à mesure qu'elle se forme et qu'elle arrive dans la capacité libre.

Pour mettre cette capacité chauffée en communication avec celle inférieure, le constructeur a disposé une suite de tubes en cuivre *a* et *b*, dont les uns, partant du fond horizontal F, descendent à 50 centimètres au-dessous, et les autres, désaffleurant sous la plaque de quelques centimètres seulement, s'élèvent au-dessus du niveau supérieur de l'eau, afin de former une circulation continue en permettant à la vapeur de monter dans le réservoir supérieur, et à l'eau d'alimentation de descendre vers le bas. Cette eau arrive à la chaudière par le tuyau *c*, qui est muni d'un robinet *d*; la vapeur est prise vers le sommet de la cloche M, qui surmonte la cloison J, par le tube *e* qui est également muni d'un robinet *f*.

Le corps de la chaudière est enveloppé d'une chemise en bois N, cerclée en plusieurs points, et laissant entre elle et le cylindre A un petit espace annulaire que l'on remplit d'une matière quelconque non conductrice de la chaleur, telle que du sable. La base de la cheminée est munie, dans le même but, d'une enveloppe O en tôle mince.

Il n'est guère probable que la disposition verticale, qui oblige de placer le réservoir de vapeur dans la partie la plus froide, relativement, des passages de la chaleur, soit favorable à l'économie du combustible; elle ne permet pas non plus d'établir la circulation rationnelle de l'eau d'alimentation. Cette dernière doit, en effet, suivre une marche contraire à ce qui convient le mieux, puisqu'il faut l'admettre, soit en haut et tout près de la chambre de vapeur, soit en bas, dans la partie où cette vapeur se forme le plus énergiquement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ce générateur présente évidemment une grande surface de chauffe directe, et a pu produire, dit-on, avec les dimensions de celui indiqué par la figure ci-dessus, environ 550 kilogrammes de vapeur par heure.

Le volume total extérieur de l'appareil n'étant que de 4 mètres cubes environ, la surface de chauffe est néanmoins de 12 mètres carrés; mais la capacité pour l'eau est faible et n'atteint pas 1 mètre cube. Celle pour la vapeur est moitié moindre.

Si l'on produit plus de 500 kilogrammes de vapeur par heure, c'est en raison de la grande étendue de surface de chauffe directe, mais nous ne sommes pas convaincu qu'il n'y a pas une certaine quantité d'eau entraînée.

C'est en effet ce que l'on doit craindre le plus avec les chaudières verticales, dont la surface libre de l'eau est très-petite, comparativement à la grande surface de chauffe. La production de la vapeur étant très-active et celle-ci ne trouvant pour se dégager qu'une superficie restreinte, produit des bouillonnements considérables, et sort dans l'espace vide en enveloppant et entraînant des molécules d'eau qui ne sont pas encore vaporisées.

Les ingénieurs et la plupart des constructeurs ont reconnu cet inconvénient et plusieurs ont cherché à y porter remède. Nous citerons en particulier M. Zambeaux, dont le système de chaudière se compose aussi d'un corps cylindrique vertical reposant, comme la précédente, sur un socle en fonte et renfermant, à partir du foyer ménagé à la partie inférieure, une série de tubes parallèles très-rapprochés, dans lesquels passent la flamme et la fumée, et qui sont enveloppés d'eau de toute part. L'ébullition, qui s'opère convenablement d'abord, devient bientôt tumultueuse, et alors, pour éviter que la vapeur, qui se forme rapidement, n'entraîne avec elle une certaine quantité d'eau, M. Zambeaux a proposé de placer entre le corps cylindrique de la chaudière et la série de tubes verticaux rangés dans toute sa partie centrale, une sorte de chemise qui, partant de la porte du foyer, s'élève à quelques décimètres au-dessous de la base supérieure qui reçoit les tubes, et une seconde chemise plus courte, mais d'un diamètre plus grand que la précédente, adaptée à cette base, et descendant jusque près du niveau de l'eau sans la toucher.

Il résulte de cette disposition que l'eau contenue dans la première enveloppe étant toujours mêlée à une certaine quantité de vapeur, qui se forme sans cesse à une pesanteur spécifique moindre que celle qui se trouve à l'extérieur, rompt par suite l'équilibre, et alors il s'établit une circulation continue.

De plus, l'eau qui descend du sommet de cette enveloppe ne doit jamais pénétrer dans la prise de vapeur, à cause de la seconde chemise, de sorte que la vapeur sortante est, suivant l'auteur, complétement sèche.

Ce résultat a été constaté devant une commission de la marine, sur une chaudière verticale de $1^m10$ de diamètre, ayant 3 mètres de hauteur, et 88 à 90 tubes de 2 mètres. M. Zambeaux a aussi concouru à Mulhouse, où il paraît avoir obtenu également de bons résultats.

FIN DU CHAPITRE CINQUIÈME.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

# CHAPITRE VI

## GÉNÉRATEURS A PRODUCTION INSTANTANÉE

Les générateurs, qui ont été décrits jusqu'ici dans cet ouvrage, ont pour caractère principal, quel que soit leur système particulier, la formation de la vapeur dans le sein d'une masse liquide dont la température est égale, pour ainsi dire, à celle de la vaporisation : il ne lui manque, en effet, pour changer d'état que la quantité de chaleur latente nécessaire. D'autre part, la formation de la vapeur a lieu en dehors de toute surface métallique chauffée à une température plus élevée que celle de cette vapeur : nous avons dit que c'était même là une condition *sine quâ non* de l'établissement des générateurs, de ne jamais présenter de parties susceptibles de se découvrir de liquide, et par conséquent de s'élever de température beaucoup au delà de celle de la vaporisation.

Il est, en effet, très-dangereux de se trouver dans une pareille situation où une formation brusque de vapeur, par des surfaces presque rouges, peut amener une déchirure à la chaudière, ce qui fait passer immédiatement en vapeur toute l'eau qu'elle contient et cause des accidents terribles.

La gravité d'une explosion est donc en raison de la masse d'eau renfermée par le générateur, d'où l'on peut dire que si ce volume était nul, l'explosion serait non pas sans effet, mais au moins peu intense, attendu que le volume de vapeur toute formée est très-faible comparativement à celui qui correspondrait au volume total de l'eau.

Or, ce fait connu et constaté, on a pu construire, et l'administration a pu autoriser des générateurs où la vapeur se forme, au contraire, sur des surfaces presque rouges, mais où il n'existe pas, par conséquent, de réserve d'eau liquide et même de vapeur, autrement dit la vapeur est formée au fur et à mesure qu'on l'emploie, les deux fonctions devant toujours avoir lieu ensemble.

Basé sur ce principe, un générateur peut être infiniment moins volumineux, à égalité de surface, qu'un autre, puisque l'espace occupé par l'eau liquide peut l'être par des parois ou diaphragmes quelconques constituant autant de surfaces de chauffe.

Plusieurs personnes se sont occupé de résoudre ce problème et ont atteint le but proposé plus ou moins heureusement. Parmi elles, nous citerons un savant chimiste et ingénieur, M. Boutigny (d'Évreux), auquel on doit non-seulement un système particulier de générateur, mais aussi des recherches très-curieuses sur la *catéfaction* ou la théorie des liquides à *l'état sphéroïdal*. Avant de décrire l'appareil de M. Boutigny, nous dirons quelques mots de cette théorie.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ÉTAT SPHÉROÏDAL DES LIQUIDES. — Tout le monde a pu observer que, lorsqu'on projette quelques gouttes de liquide sur une surface métallique à une température beaucoup plus élevée que celle qui convient à l'ébullition de ce même liquide, sous la pression du milieu ambiant, le liquide, au lieu de s'évaporer promptement se forme en bulles à peu près sphériques, qui se meuvent rapidement sur la plaque chauffée; c'est ce qui arrive si l'on jette des gouttes d'eau sur un poële de fonte fortement chauffé, presque à la température rouge.

Si l'on projette quelques grammes d'eau sur une capsule métallique chauffée au rouge, le liquide prend immédiatement cet état sphéroïdal, suivant l'expression de M. Boutigny, et ne s'évapore que très-lentement; mais si la capsule se refroidit, l'état sphéroïdal ne peut plus se maintenir; le liquide s'étale, mouille la surface chauffée et se vaporise alors avec violence.

D'après les observations de plusieurs savants et particulièrement de celles dues à M. Boutigny, on est conduit à penser que ce singulier phénomène, de voir un liquide qui ne se vaporise pas immédiatement quoique en présence d'une source de chaleur surabondante, résultait de ce que la goutte d'eau se trouvait réellement isolée du corps chauffé par la vapeur formée et maintenue à une petite distance, d'où, ne recevant plus la chaleur par contact, mais seulement par rayonnement, la vaporisation devait en être très-refroidie, ainsi que l'expérience l'indique. Mais la température du corps s'abaissant, le contact avec l'eau s'établit et la vaporisation s'effectue alors très-promptement.

Le phénomène de la caléfaction de l'eau fournit l'explication de l'une des causes qui produisent les explosions de chaudières à vapeur. En effet, dans l'hypothèse qu'une partie de la paroi vienne à rougir, l'eau qui la mouillait s'en isole d'abord en prenant l'état sphéroïdal et donne ensuite lieu à une violente explosion lorsque cette paroi s'est assez refroidie. De là l'immense danger que l'on court en alimentant brusquement un générateur que par négligence on aurait laissé presque complétement manquer d'eau.

C'est en s'occupant de l'étude de la caléfaction des liquides que M. Boutigny eut l'idée de construire le générateur que nous allons décrire, dont ce phénomène n'est pas néanmoins le principe essentiel.

## GÉNÉRATEUR A PRODUCTION INSTANTANÉE

Par **M. BOUTIGNY** (d'Évreux)

En partant de ces principes, savoir : 1° que la vaporisation de l'eau la plus rapide a lieu par son contact avec les surfaces chauffées, et qu'elle est proportionnelle à leur étendue; 2° que les dangers d'explosion proviennent surtout de la masse liquide maintenue à la température de la vaporisation que renferme un générateur, M. Boutigny a imaginé le générateur représenté par la fig. 34, et qui a en effet pour caractère, que les surfaces vaporisatoires sont très-grandes, comparati-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vement au volume total de l'appareil, et que le volume d'eau liquide qu'il renferme est nul ou à peu près.

Le dessin que nous en donnons ici est, en principe, la reproduction d'un appareil qui a fonctionné à titre d'essai à la Villette, dans la grande fabrique de bougies stéariques de MM. Jaillon, Moinier et Cᵉ.

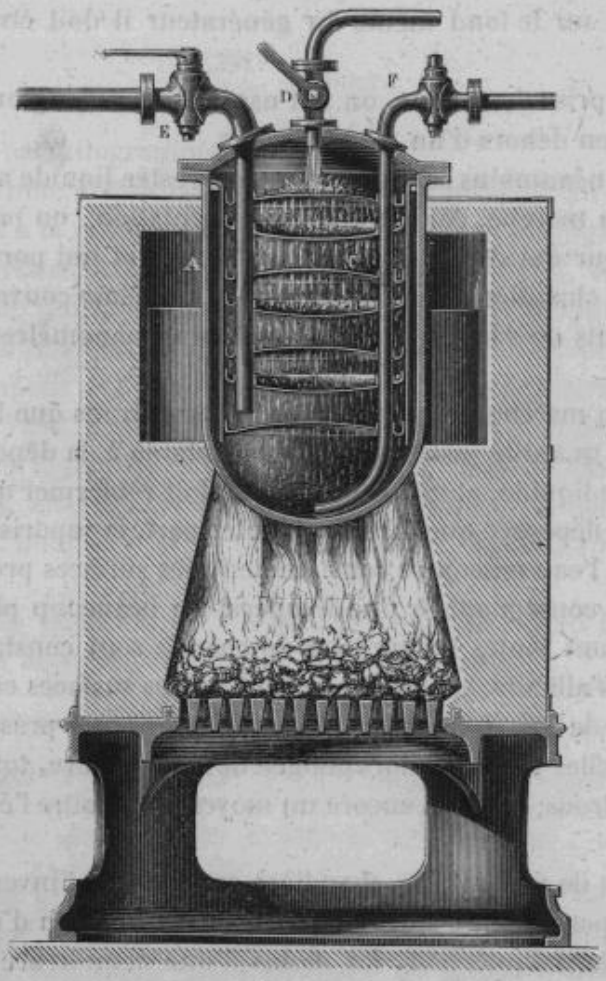



Fig. 34 Échelle de 1/15ᵉ.

Ce générateur se compose d'un vase principal A, en fonte, ayant la forme d'un cylindre terminé à sa partie inférieure par un fond hémisphérique, et fermé en dessus par un couvercle d'une forme analogue, solidement boulonné. Il est entièrement engagé dans un fourneau en maçonnerie qui laisse autour de lui un carneau circulaire pour le passage des produits de la combustion. L'ensemble de la masse de maçonnerie et du vase A se trouve élevé sur un socle qui porte aussi la grille du foyer.

L'intérieur du générateur est garni de plusieurs disques ou diaphragmes en cuivre B et C, les uns concaves et les autres convexes, et tous percés d'un grand nombre de petits trous pour laisser passer l'eau qui pénètre dans la chaudière par sa partie supérieure.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'eau d'alimentation arrive, en effet, refoulée au moyen d'une pompe, par un conduit supérieur muni du robinet D. L'ensemble du générateur étant porté à une haute température, l'eau qui arrive rencontre le premier diaphragme, qui est évidemment le moins chaud, s'y vaporise en partie, tandis que la partie restée liquide le traverse et rencontre celui inférieur où la vaporisation se continue. Au fur et à mesure que le liquide s'écoule, il rencontre des disques de plus en plus chauds, et lorsqu'il parvient sur le fond même du générateur il doit être totalement transformé en vapeur.

Pour opérer la prise de vapeur, on fait usage d'un tube plongeant jusqu'auprès du fond et muni en dehors d'un robinet E.

Comme il peut néanmoins se trouver de l'eau restée liquide après un temps d'arrêt, ou pendant la marche, par un excès d'alimentation, on peut l'épuiser à l'aide d'un tuyau purgeur qui descend jusque sur le fond et qui porte un robinet F sur le couvercle de la chaudière. Il est évident que ce même couvercle doit être muni des divers appareils de sûreté, tels que soupapes, manomètres, trop-plein de vapeur, etc.

Pour résumer la marche de ce générateur, nous dirons que l'eau d'alimentation étant amenée en quantité justement correspondante à la dépense, il ne se forme pas de magasin de liquide, et que l'appareil ne doit renfermer que de la vapeur qui se trouve aussitôt dépensée que formée. D'autre part, la vaporisation doit être très-prompte, puisque l'eau rencontre constamment des surfaces presque sèches, et qui peuvent être, par conséquent, à une température beaucoup plus élevée que dans les générateurs dont toutes les surfaces de chauffe sont constamment en contact avec du liquide. D'ailleurs, le développement de ces surfaces est ici très-grand; et c'est dans le but de les augmenter que les diaphragmes présentent des surfaces courbes sur lesquelles l'eau est alors obligée de se répandre, tout en se formant en pluie à cause des trous, qui sont encore un moyen d'accroître l'étendue des surfaces de chauffe.

Quant à la façon de mettre cette chaudière en fonction, l'inventeur dit qu'il suffit de chauffer à sec pendant quelques minutes, puis au moyen d'une pompe à main, envoyer de l'eau dans l'intérieur. En moins d'une demi-heure la vapeur a atteint la pression requise, et l'on peut mettre en marche.

L'appareil essayé à la Villette avait les dimensions suivantes :

| | |
|---|---|
| Hauteur totale au centre | $0^m64$ |
| *Id.* de la partie cylindrique | $0^m54$ |
| Diamètre | $0^m32$ |

Ces dimensions, indépendamment des diaphragmes intérieurs, donnent $0^{m.q}55$ pour surface de chauffe extérieure, celle directement exposée au feu du foyer et au courant de calorique par le carneau circulaire.

Voici, d'après M. Boutigny, les résultats d'une expérience faite par lui-même le 18 décembre 1851 :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

| | |
|---|---|
| Durée de l'expérience..... | 9 heures. |
| Quantité de houille brûlée..... | 81 kilog. |
| Quantité d'eau évaporée..... | 351 kilog. |
| Température initiale de l'eau..... | 39 degrés cent. |
| Pression..... | 10 atmosphères. |

En comparant ce résultat avec ce que produit un générateur ordinaire, nous trouvons :

$$\frac{351^k}{81^k} = 4^k33$$

de vapeur produite par kilogramme de houille.

Bien que dans la note ci-dessus on n'indique pas qu'il ait été tenu compte des diverses pertes dues à la mise en train, et que, suivant M. Boutigny, la houille qu'il a employée fût mauvaise, donnant à peine 6000 calories (36), ce résultat n'en est pas moins très-faible, puisque nous savons que l'on peut produire assez aisément près du double avec le mode ordinaire de génération de la vapeur. Il est vrai que la pression de la vapeur était double de celle qui sert ordinairement de base aux expériences; mais l'eau d'alimentation était aussi très-chaude. D'ailleurs, nous pouvons établir une hypothèse approximative sur les effets que l'on obtiendrait dans ces conditions, avec un générateur qui produirait 7 kilogrammes de vapeur par kilogramme de houille à 7500 unités de chaleur, l'eau d'alimentation étant à 20 degrés.

Un kilogramme de vapeur à 5 atmosphères, engendré avec de l'eau ayant 20°, doit rigoureusement absorber en calories utiles (9, 32 et 33) :

$$n = (153 - 20 + 501) = 634 \text{ calories.}$$

Opérant de la même façon pour 10$^{at.}$, l'eau d'alimentation étant à 39°, on trouve :

$$n = (181 - 39 + 479) = 621 \text{ calories.}$$

Par conséquent, le générateur qui produit 7 kilogrammes de vapeur à 5 atmosphères, dans la première condition, avec de la bonne houille fournissant 7500 calories par kilogramme, produirait, par hypothèse, en vapeur à 10$^{at.}$, dans la seconde condition, avec de la mauvaise houille donnant 6000 calories :

$$7 \times \frac{634}{621} \times \frac{6000}{7500} = 5^k71$$

soit près de 6 kilogrammes de vapeur par kilogramme de houille au lieu de 4$^k$33.

Ainsi, il n'est pas probable que le générateur décrit précédemment soit remarquable par l'économie du combustible, et cela tient, du reste, au peu de parcourt des gaz qui doivent s'échapper dans la cheminée à une température plus élevée que dans les autres systèmes.

Il semble, en effet, qu'il faille chauffer très-fortement l'extérieur pour que les diaphragmes acquièrent la température nécessaire à une prompte vaporisation,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

attendu que ces diaphragmes ne reçoivent guère leur chaleur que par rayonnement, puisque la vapeur seule établit leur contact immédiat avec le vase directement chauffé.

Laissant de côté la question d'économie, nous dirons donc avec M. Boutigny que ce générateur offre au moins l'avantage d'occuper peu de place, de pouvoir s'établir presque aussi facilement qu'un poêle, et de ne pas présenter de chances d'explosions dangereuses, puisqu'il ne renferme que peu ou point d'eau liquide.

Mais en cela il présente cet autre inconvénient, comme tous ceux à vaporisation instantanée, de n'avoir point de réservoir de vapeur suffisant (p. 158) pour subvenir aux irrégularités inévitables de la marche d'un moteur et des machines qu'il est appelé à commander.

## GÉNÉRATEUR EN FORME DE SERPENTIN

Par **M. ISOARD**, mécanicien à Paris

M. Isoard s'est occupé depuis plusieurs années de nouvelles dispositions à donner aux moteurs à vapeur. Un de ses premiers essais a consisté en une machine à vapeur rotative qui se composait d'un anneau creux, tournant horizontalement au-dessus d'un foyer, et qui recevait l'eau par son axe et l'un de ses bras; l'eau parvenue dans l'anneau s'évaporait et s'échappait dans l'atmosphère par une petite ouverture pratiquée près d'une cloison ménagée à l'intérieur de l'anneau. Le principe du mouvement était la réaction.

Cette machine, qui pourrait être un instrument curieux de démonstration, ne pouvait avoir d'effet pratique utile : aussi fut-elle promptement abandonnée.

Plus tard, en 1849, le même inventeur se fit breveter pour une autre machine dans laquelle on distingue un récepteur et un générateur particuliers.

Le récepteur n'est autre que la roue à palettes de Branca (p. 89) : nous n'en parlerons pas. Le générateur est un tube en fer tourné en serpentin (fig. 35), dans lequel on envoie de l'eau qui s'y vaporise instantanément; les spires sont exactement en contact les unes avec les autres. Il est disposé au-dessus d'un foyer et à l'intérieur d'une cloche en brique C, enveloppée elle-même par une chemise en tôle mince D qui constitue la boîte à fumée.

Les produits de la combustion s'élèvent directement à l'intérieur du serpentin et circulent ensuite entre lui et la cloche en brique d'où ils s'échappent par des ouvertures *a* ménagées à sa partie inférieure, et communiquant avec l'intérieur de l'enveloppe en tôle D; de ce dernier espace ils s'écoulent directement dans la cheminée d'appel E.

Le serpentin ainsi maintenu à une température voisine du rouge naissant, un filet d'eau est refoulé dans son intérieur à l'aide d'une pompe communiquant avec son extrémité inférieure A qui traverse horizontalement le fourneau. L'eau remplissant le serpentin ne tarde pas de se réduire en vapeur, laquelle se trouve

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dirigée à la machine motrice par l'extrémité de cet appareil qui s'élève verticalement et se recourbe en B.

Dans ce générateur, comme dans celui de M. Boutigny, l'eau ne fait qu'un très-court séjour, et doit être vaporisée aussitôt qu'introduite. On peut y développer sans danger de très-hautes pressions par l'absence de réservoir d'eau ou de vapeur et par la grande résistance du récipient. Le tuyau en fer qui constitue le serpentin a en effet 6 centimètres de diamètre extérieur, tandis que celui du vide n'est que de 3, soit 15 millimètres d'épaisseur de fer. On a pu élever la pression jusqu'à près de 50 atmosphères.

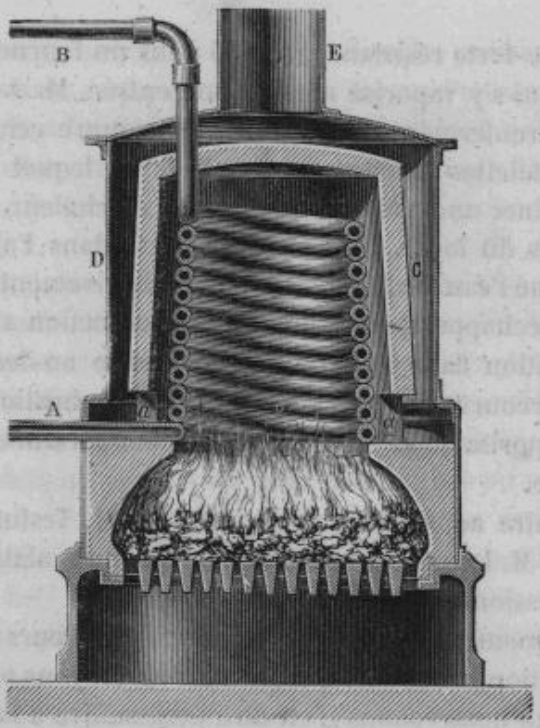



Fig. 55. Échelle de 1/30e.

Mais pour qu'un tel générateur fonctionne convenablement, il faut une bonne pompe alimentaire, munie d'une soupape de sûreté qui constitue le moyen de régler la pression, et qui fournisse l'eau constamment en proportion de la dépense de vapeur, condition importante et difficile à obtenir.

La machine motrice est aussi munie de quelques accessoires de détails appropriés à la haute température de la vapeur. Toutes les garnitures des pièces mobiles se font à l'aide de bagues élastiques en bronze, comme des ressorts, au lieu d'étoupe qui se dessécherait et brûlerait promptement.

En somme, il est présumable que cette disposition présente quelques avantages sur l'appareil précédent, à cause du récipient ou serpentin qui reçoit plus directement, et par contact, l'action de la chaleur; nous ne possédons pas, néanmoins, de résultats d'expériences assez positifs pour être en mesure de donner une affirmation dans un sens ou dans l'autre, abstraction faite, d'ailleurs, du défaut inhé-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rent au mode de production instantané et de l'absence de réservoir de vapeur.

Tout ce que nous pouvons affirmer, c'est qu'il s'en est fait diverses applications.

Un ingénieur de Paris, M. Belleville, s'est beaucoup occupé de la même question, pour laquelle il a pris successivement divers brevets à partir de l'année 1850, en variant les dispositions et la forme du récipient et de son fourneau, et en cherchant à l'appliquer en grand aux appareils de navigation, aux machines locomobiles et aux locomotives.

Nous ne devons pas omettre M. Testud de Beauregard, qui s'est également occupé de la production instantanée de la vapeur, et qui, dès le commencement de l'année 1848, s'est fait breveter pour un système de générateur dont on a beaucoup parlé.

C'est un vase, d'une forte résistance, monté dans un fourneau, et dans lequel on fait arriver de l'eau qui s'y vaporise aussitôt son entrée. Mais ce vase est complétement vide au lieu de renfermer des diaphragmes comme celui de M. Boutigny, et l'eau tombe par gouttelettes directement sur le fond, lequel a une grande épaisseur afin d'emmagasiner une très-grande quantité de chaleur et rendre moins sensibles les irrégularités du foyer. On remarque aussi dans l'appareil de M. Testud cette particularité, que l'eau d'alimentation est très-vivement réchauffée, d'abord par la vapeur qui s'échappe après avoir produit son action sur le moteur, et ensuite par une circulation dans un serpentin qui passe au-dessous du cendrier et dans les carneaux parcourus par les produits de la combustion. Elle pénètre donc déjà dans le vase vaporisateur à une très-haute température, tout en conservant l'état de fluide liquide.

La pompe alimentaire adjointe au générateur de M. Testud de Beauregard est, comme dans celui de M. Isoard, munie d'une soupape régulatrice dont le poids est calculé suivant la pression à obtenir.

Nous aurions certainement encore bien d'autres inventeurs à citer, au sujet des générateurs à production instantanée, mais nous ne croyons pas utile de prolonger ce chapitre, car ce que nous venons d'en dire peut suffire à faire bien comprendre ce qui a été tenté à cet égard, et les difficultés que les inventeurs ont à vaincre pour atteindre la solution pratique. Il serait très-intéressant de voir un tel problème résolu, car alors on aurait des chaudières d'un très-petit volume, d'un faible poids, qui, dans un grand nombre de cas, seraient d'une très-grande utilité.

FIN DU CHAPITRE SIXIÈME.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

# CHAPITRE VII

## FOYERS FUMIVORES

Le problème de la suppression de la fumée dans les puissants appareils de vaporisation, et en général, du reste, dans tous les foyers d'usines qui consomment de grandes quantités de combustible, a pris une importance qui ne peut que grandir comme l'extension même des fabriques ou manufactures. Il est évident que pour les usines situées près de localités un peu populeuses, la fumée offre des inconvénients très-graves.

Mais il est sans doute plus facile de désirer la suppression de la fumée que d'en obtenir réellement l'extinction; car il n'a pas moins fallu que des réclamations incessantes et plusieurs ordonnances en France et en Angleterre pour décider les industriels à s'occuper sérieusement de la résolution du problème.

D'abord, la plupart des appareils proposés pour produire la combustion de la fumée étaient généralement beaucoup plus compliqués ou plus délicats que réellement efficaces, ou au moins exigeaient des soins et un entretien en dehors des possibilités pratiques; et puis s'il se présentait une disposition d'un succès probable, elle donnait lieu souvent à des modifications trop importantes dans les appareils établis pour qu'il fût possible de l'imposer purement et simplement à un manufacturier.

Nous nous proposons de donner un mot d'explication sur la cause de la fumée et sur les divers appareils qui ont été imaginés pour la détruire.

Avec nos renseignements particuliers à cet égard, nous ne pouvons mieux faire que de nous appuyer sur les travaux de M. Combes, dont la Société d'encouragement a publié un résumé très-instructif dans son LIVe volume, avec une notice, par M. Viollet, au sujet de l'application des foyers fumivores.

### PRINCIPES GÉNÉRAUX DES FOYERS FUMIVORES

On sait que la combustion d'un corps est sa combinaison avec l'oxygène, phénomène qui doit s'accomplir, pour les combustibles industriels, à une haute température, et dans lequel l'air atmosphérique fournit l'oxygène qui entretient la combustion. Les combustibles étant formés en grande partie de carbone, ce corps simple se combine avec le corps comburant, l'oxygène, forme en partie de l'acide

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

carbonique et de l'oxyde de carbone, suivant que la quantité d'oxygène est plus ou moins suffisante pour que la combustion s'opère en totalité ou partiellement. Mais un combustible n'est pour ainsi dire jamais formé de carbone pur : il renferme généralement des gaz, de l'hydrogène particulièrement, qui est combustible comme le carbone, et brûle si la quantité d'air fournie à la combustion est suffisante.

Par conséquent, lorsqu'on brûle un combustible dans un foyer, si nous en exceptons la partie terreuse incombustible qui forme les cendres, la masse totale serait consommée et transformée surtout en acide carbonique, corps incolore et sans odeur, si la combustion était parfaite.

Mais, la plupart du temps, loin que cette combinaison ait lieu complétement, l'insuffisance des volumes d'air fournis et la trop basse température du foyer au moment d'une charge de combustible froid, font qu'une partie seulement brûle complétement, tandis qu'une autre partie se dégage en produits résultant d'une simple distillation qui donne naissance à des vapeurs résineuses ou schisteuses, suivant la nature du combustible, et à de l'oxyde de carbone, gaz essentiellement combustible, mais qui se dégage sans brûler, faute d'une température suffisante et d'un volume d'air convenable pour le rallumer. Ces produits passifs de la combustion entraînent avec eux du carbone non brûlé à un état extrême de division, et constituent *la fumée*.

Il arrive, d'ailleurs, que par un mode vicieux de l'entrée d'air dans le foyer, cet air chemine en veines parallèles à celles des gaz qu'ils devraient enflammer s'ils s'y trouvaient mélangés et si leur température était assez élevée. Dans ce cas, l'introduction d'air pourrait être suffisante, sans que la combinaison de son oxygène avec les gaz combustibles pût avoir lieu.

Quelques expériences tendent à prouver que le carbone échappé à la combustion, et qui s'en va *en fumée*, ne constitue pas une perte véritablement sensible, et que la quantité de chaleur qu'il faut dépenser pour brûler cette fumée, quand elle est formée, est plus grande que celle qui résulte de sa combustion même. Mais il n'en est pas de même de l'oxyde de carbone, qui est très-combustible, et qu'on doit pouvoir rallumer lorsqu'un foyer en dégage beaucoup, si l'on veut réellement utiliser le combustible dépensé.

Parmi les combustibles industriels on distingue, comme susceptibles de produire le moins de fumée, ceux dont la composition est la plus pure en carbone : le charbon de bois, le coke et les anthracites; et comme produisant le plus de fumée, ceux qui renferment le plus d'autres corps étrangers : les houilles grasses, la tourbe et le bois.

Si donc, nous adoptons pour terme de comparaison le système de foyer ordinaire d'un générateur, et que nous voulions nous rendre compte de ce qu'il faudrait faire pour diminuer la quantité de fumée en brûlant un combustible qui en produit notablement, nous arrivons aux conclusions suivantes :

1° On ne peut pas éviter la fumée au moment de l'allumage, alors que le foyer est froid et qu'aucune partie du combustible n'est incandescente;

2° Mais lorsque la charge complète de charbon est bien en feu et que la fumée

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

est nulle, on peut réduire beaucoup celle qui résulte de l'alimentation du foyer, en opérant par charges très-faibles et fréquentes;

3° Toutes choses égales d'ailleurs, les passages entre les barreaux de la grille doivent être suffisants pour laisser passer l'air nécessaire à la quantité de combustible que l'on veut employer dans un temps déterminé. Les carneaux doivent aussi avoir une section proportionnée suivant ces mêmes données.

D'après les expériences auxquelles il s'est livré, M. Combes en a conclu que, pour rendre autant que possible fumivore un foyer ordinaire, la grille ne devait pas avoir moins de 1,5 décimètre carré par kilogramme de houille à brûler par heure; la somme des vides entre les barreaux doit être le quart de l'aire totale de la grille; la section de la cheminée, le tiers de cette aire et la section des carneaux égale à celle de la cheminée. Il conclut également en disant que ces dimensions doivent être calculées sur une quantité de combustible notablement supérieure à celle qui correspond à une marche normale, afin d'éviter les inconvénients qui résulteraient d'une surcharge momentanée.

Basés sur les considérations qui précèdent, voici à peu près les différents systèmes principaux de foyers fumivores qui ont été proposés :

1° Grilles mobiles tournantes ou fixes, recevant le combustible d'un distributeur mécanique, qui permet l'alimentation continue en faibles charges, et sans ouvrir la porte du foyer, manœuvre qui a pour résultat d'abaisser momentanément sa température;

2° Systèmes composés de deux foyers, l'un des deux destiné à brûler la fumée dégagée par l'autre;

3° Dispositions dans lesquelles le combustible est transformé en gaz combustible avant son introduction dans les carneaux;

4° Foyers alimentés par la couche inférieure, laissant celle supérieure toujours incandescente et à la plus haute température;

5° Introduction de jets d'air ou de vapeur dans le but de parachever la combustion incomplète des corps volatils dégagés.

De ces divers procédés, nous en décrirons quelques-uns et nous mentionnerons seulement les autres, en les distinguant suivant trois classes principales :

1° Distributeurs mécaniques;

2° Transformation des combustibles en gaz et foyers combinés;

3° Introduction d'air, formes spéciales des grilles et emploi de jets de vapeur.

## APPAREILS FUMIVORES A DISTRIBUTEURS MÉCANIQUES

Nous décrivons en détail les dispositions proposées par MM. Moulfarine et Tailfer, comme foyers fumivores imaginés suivant le principe des distributeurs et de la mobilisation de la grille. Mais nous ferons auparavant une mention succincte des différents systèmes analogues qui les ont précédés ou suivis.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Grille tournante de Brunton. — Vers 1819 on a appliqué aux chaudières, en Angleterre, un système de grille tournante imaginée par un ingénieur nommé Brunton. Cette application a été faite à quelques-uns des générateurs du système de Watt.

Cette disposition consistait en une grille circulaire en fer forgé, montée sur un axe vertical auquel la machine motrice communiquait un mouvement de rotation très-lent, d'un tour en trois ou quatre minutes. Le combustible, réduit en morceaux d'une grosseur convenable, était disposé dans une trémie placée au-dessus de la grille, à l'extérieur du fourneau; cette trémie étant terminée par une ouverture garnie d'une trappe qui la démasquait à des intervalles de temps réguliers, le charbon s'écoulait sur la grille qui, en tournant, l'amenait peu à peu vers le fond du foyer.

Le résultat de cette combinaison et de toutes celles analogues est de représenter, en quelque sorte, deux foyers à la suite l'un de l'autre, le premier recevant le combustible frais qui commence alors à brûler, tandis que le deuxième, où le charbon est tout à fait incandescent et ne donne plus de fumée, reçoit la fumée du premier et la consomme. A la vérité, ces deux foyers ne sont que fictifs, puisque le mouvement circulaire de la grille est continu et que ce n'est que successivement que toutes ses parties se présentent devant le foyer et vers l'autel; mais nous conservons cette expression pour mieux faire comprendre d'autres dispositions où les deux foyers existent réellement, et qui ne deviennent ainsi qu'une modification du précédent.

Pour compléter cette mention de l'appareil Brunton, nous ajouterons qu'on avait eu le soin de munir la circonférence de la grille d'un rebord qui plongeait et tournait dans un bain de sable fin, afin d'éviter qu'aucune partie de l'air affluent passât autre part qu'au travers des barreaux et du combustible. Cependant, plus tard on a percé des trous dans les portes pour permettre l'entrée d'une certaine quantité d'air frais qui se mélangeait avec la fumée et traversait avec elle la partie incandescente du combustible.

On s'était aussi arrangé de façon que le mécanisme du distributeur de combustible se trouvât relié avec celui des registres afin de rendre solidaires l'alimentation du charbon et l'introduction de l'air dans le foyer.

D'après Tredgold, cette grille pouvait brûler environ 1 kilogramme de houille par décimètre carré, et produisait une économie sensible de combustible. Mais Péclet, tout en reconnaissant que sa fonction, comme fumivore, était satisfaisante, ajoute que cette économie n'était pas assez sensible pour compenser la surveillance et l'entretien que ce système exigeait.

Tout récemment, un manufacturier français, M. Ch. Sébille (de Nantes), a proposé un système analogue, mais modifié en ce sens que la grille, au lieu de tourner continuellement et par un mouvement mécanique, doit être mue à la main, en lui faisant faire un demi-tour à la fois. Le combustible est alors déposé sur la partie antérieure de la grille, et à chaque nouvelle charge on opère ce mouvement qui reporte le combustible, déjà en feu, dans le fond du foyer, tandis que l'on dépose

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le charbon frais sur le devant de la grille. L'effet théorique est évidemment le même qu'avec l'appareil Brunton; mais le double foyer est ici tout à fait caractérisé.

Distributeur Collier. — M. John Collier, mécanicien bien connu en France, avait construit, en 1823, un distributeur de combustible dont il a fait l'application dans ses propres ateliers à un générateur alimentant une machine de 6 chevaux-vapeur.

Ce distributeur se composait d'abord de deux cylindres en fonte, taillés en pointes de diamant, et qui, en tournant, servaient à concasser le combustible en très-petits morceaux; en sortant des concasseurs, le charbon tombait entre deux disques horizontaux, à ailettes, qui, étant animés d'un mouvement de rotation d'environ 200 tours par minute, le projetaient sur la couche incandescente du foyer; la rotation rapide de ces disques formait une ventilation légère qui contribuait, dans une certaine mesure, à la bonne fonction de ce système.

Un rapport très-favorable sur le distributeur Collier a été présenté, en 1837, à l'Académie des sciences, rapport qui établissait néanmoins que son mécanisme absorbait à peu près 1/2 cheval, soit 1/12 de la puissance nominale du moteur.

Quels que soient les avantages de ce système, sa complication devait être un empêchement à sa propagation, ce qui a eu lieu en effet. Nous constatons, au moins, que l'idée de projeter le combustible continuellement et à un très-grand état de division est très-juste; d'ailleurs, des appareils plus récents ont été disposés suivant ce principe et ont également donné des résultats satisfaisants.

Mais il ne faut pas oublier que, dans ce cas, la grille doit être disposée en vue de la ténuité du combustible, qui pourrait très-bien la traverser sans brûler, si les vides des barreaux étaient trop considérables.

Distributeur de M. Payen. — Le savant chimiste a fait établir, il y a déjà longtemps, à sa manufacture de Grenelle, un appareil distributeur et concasseur dont les résultats paraissent avoir été tout à fait satisfaisants. Supprimant toutes les pièces mécaniques qui seraient exposées à une température trop élevée, M. Payen a rendu la grille fixe et a placé au-dessus, mais en dehors du fourneau, trois trémies dans lesquelles le combustible se trouvait brisé par des cylindres garnis de dents de rochet, et tombait, ainsi divisé, directement et d'une façon continue, sur la grille. La partie réellement mécanique de tout cet appareil se réduisait donc au mouvement des broyeurs, et ses diverses pièces se trouvaient assez éloignées du foyer pour ne recevoir, comparativement, qu'une faible partie de son action.

M. Payen déclare qu'une expérience de plus de dix années lui a permis de constater l'efficacité de cette disposition, comme fumivorité et économie du combustible, comparativement aux résultats que l'on obtient avec les moyens ordinaires de conduite des foyers

En dehors du but principal à atteindre, il est évident qu'avec un distributeur qui fournit le combustible peu à peu et en morceaux menus, d'égale grosseur, la combustion sera toujours très complète et beaucoup plus facile à s'effectuer que par fortes charges et en morceaux inégaux.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## APPAREIL FUMIVORE A DISTRIBUTEUR ET GRILLE TOURNANTE

Par **M. MOULFARINE**, ancien ingénieur-mécanicien

(FIG. 4, PL. 6)

La disposition adoptée par M. Moulfarine est beaucoup plus récente que les divers appareils qui viennent d'être mentionnés, et doit en résumer, suivant nous, les caractères généraux, mais avec des perfectionnements de détail. C'est, en principe, l'appareil de Brunton composé du distributeur et de la grille circulaire tournante, mais très-modifié dans les détails de construction.

La fig. 4 de la pl. 6, qui représente ce système de foyer, est une section longitudinale partielle faite sur l'axe de la grille et de tout le mécanisme de distribution.

DISPOSITION DE LA GRILLE. — On peut reconnaître, à l'aide de la fig. 4, que la grille proprement dite A est circulaire et se trouve à l'entrée du fourneau, au-dessous de la tête des bouilleurs B, comme dans les foyers ordinaires; entre elle et le chambranle en fonte S se trouve une plaque horizontale pour recevoir le combustible dans le cas où la grille devrait être momentanément chargée à la main.

Tous les barreaux qui composent la grille forment exactement un cercle à jour et reposent sur la couronne horizontale E, fondue d'une seule pièce avec plusieurs bras H et un moyeu central dans lequel est rapportée une crapaudine *a* en bronze. Cette crapaudine porte sur le sommet d'un axe fixe F, qui lui sert de pivot, et qui est creux dans toute sa hauteur pour permettre d'amener dans cette partie un petit filet de vapeur, que l'on fait venir de la chaudière par un tube *b*, afin de lubrifier ou rafraîchir constamment les deux surfaces en contact, au lieu d'une graisse quelconque qui ne pourrait pas se maintenir à cause de la chaleur. Il paraît que cette méthode a donné de bons résultats et que les mouvements, qui sont du reste très-lents, conservaient bien leur liberté, sans usure trop considérable.

A la circonférence de la couronne E se trouve rapportée une enveloppe conique en tôle G qui forme un entonnoir dont la base est terminée par une partie cylindrique G′, entièrement ouverte, donnant passage à l'air extérieur pour l'introduire sous la grille. Cet appendice cylindrique porte aussi une roue d'angle N par laquelle nous verrons tout à l'heure que le mouvement de rotation lui est communiqué.

Pour terminer ce qui regarde l'installation de l'ensemble de la grille, nous ferons remarquer que le cône ou entonnoir G est garni d'une collerette K dont la fonction est identique à ce qui avait lieu dans le système de Brunton. Elle sert, en effet, à empêcher les passages irréguliers de l'air en pénétrant dans une gorge circulaire remplie de cendre ou de sable fin; cette gorge se trouve ménagée dans une plaque L fixée dans la maçonnerie, et qui constitue un guide à l'appareil tournant.

D'autre part, on voit que l'ensemble mobile repose et tourne sur l'extrémité de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la tige fixe F, qui est solidaire avec un croisillon à plusieurs branches I, lui-même rattaché à une plaque analogue J, scellée dans la maçonnerie et servant aussi de support à une partie de la commande.

Le mouvement de rotation est communiqué à la grille par un arbre horizontal *h* posé en dehors du fourneau, et dont une extrémité porte deux poulies R, l'une recevant le mouvement du moteur, et l'autre transmettant ce mouvement, par une courroie *i* et une poulie R′, à un autre axe placé au-dessous du foyer. Cet axe porte aussi un pignon O correspondant à la roue d'angle N, laquelle, ainsi qu'on l'a vu, est solidaire du cône et de la grille. Le premier axe *h* sert en même temps à faire mouvoir le distributeur, ainsi que nous allons l'expliquer.

Distributeur. — Le mécanisme destiné à alimenter le foyer se compose d'un tronc de cône cannelé V, qui tourne sur lui-même, et qui est placé au bas d'une trémie en métal X, dans laquelle on verse le combustible. Cette trémie est échancrée à sa base et munie d'un registre ou porte à coulisse *c* dont on règle la position exacte par la vis de rappel *d*.

Le cône V présente sa plus grande base au-dessus de la circonférence extérieure de la grille, et la plus petite, au contraire, du côté du centre. Suivant la pensée de l'auteur, cette disposition doit avoir pour résultat de donner plus de charbon vers le pourtour de la grille que vers la partie centrale, et d'éviter qu'il ne s'amoncelle dans cette partie, dont la vitesse est nécessairement beaucoup plus faible que celle de la circonférence.

Le combustible déposé dans la trémie, et débité par le mouvement du cône V, tombe directement sur la grille en suivant le conduit vertical ménagé dans la maçonnerie entre les deux bouilleurs. Un registre horizontal Y, placé sur ce conduit, permet, au besoin, d'arrêter l'alimentation sans suspendre la marche du mécanisme.

Quant au mouvement du cône distributeur V, on voit qu'il est donné par l'axe *h* et les roues d'angle *f* et *g*.

Résumé du fonctionnement. — Nous avons vu précédemment en quoi consiste les fonctions des foyers à grille tournante et distributeur : il reste donc peu de chose à dire à l'égard de celui-ci pour faire connaître les points qui le distinguent.

C'est principalement l'entonnoir conique G qui dirige l'introduction de l'air et permet qu'il se répartisse très-exactement sous la grille. L'entrée de cet air dans le foyer a lieu, dès l'origine, par une grille fixe U, placée en avant du fourneau, d'où il résulte que celui-ci peut être entièrement clos par devant.

Ensuite, le distributeur est caractérisé par le cône V qui remplace les concasseurs des autres dispositions. Celle-ci est, en effet, combinée pour marcher avec du charbon concassé ou criblé d'avance

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## FOYER FUMIVORE A GRILLE MOBILE PAR TRANSLATION

Inventé par **M. JUCKES** et importé en France par **M. TAILFER**

(FIG. 5, PL. 6)

L'appareil qui a peut-être jusqu'ici, et de nos jours, reçu le plus d'applications sérieuses, est celui représenté sur cette planche (fig. 5), et connu sous le nom de *grille-mobile-Tailfer*. L'invention primitive en est due à M. Juckes, un ingénieur anglais, qui s'est fait patenter pour cela en 1842. L'importation de ce système a été faite en France par M. Tailfer, mécanicien français, qui l'a doté aussi de divers perfectionnements.

Il est facile de reconnaître que cet appareil a pour principe l'inflammation successive du combustible au fur et à mesure qu'il s'avance vers le fond du foyer; l'effet théorique sera donc le même qu'avec les grilles tournantes: mais le résultat pratique doit en être plus rapproché, en raison du mouvement parallèle de la grille, plus rationnel, par cela même, pour cette application, qu'un mouvement circulaire.

Le principe de la distribution est un peu différent en ce que cette fonction s'accomplit par la grille même, sans mécanisme spécial. Voici, au surplus, en quoi consiste l'ensemble de l'appareil Juckes-Tailfer.

ENSEMBLE DE LA DISPOSITION. — La grille, proprement dite, est composée d'un très-grand nombre de petits barreaux $a$, articulés entre eux et formant une chaîne sans fin qui s'enroule sur deux tambours polygonaux A et A'. Deux séries de rouleaux $c$ et $d$ servent à supporter la chaîne entre les deux tambours et la maintiennent très-plane, mais avec une certaine obliquité par rapport à l'horizon.

Le tambour A, qui donne le mouvement de translation à la chaîne, est commandé par son axe au moyen d'un système d'engrenages mis en jeu à l'aide d'un moteur quelconque par une courroie qui correspond à la poulie B. L'axe $b$ de cette poulie est terminé par un carré sur lequel on peut placer une manivelle pour faire marcher la grille à la main, soit pour la faire rétrograder, soit pour lui communiquer momentanément une vitesse différente de celle fournie par le moteur. Il faut, du reste, la mener à la main tant que la vapeur n'a pas acquis la pression nécessaire pour mettre le moteur en train. Un débrayage ordinaire permet d'isoler le mécanisme de la grille de sa commande principale.

L'ensemble de ce mécanisme est monté sur un bâti en fonte formé de deux flasques latérales C entre lesquelles la chaîne se meut. Le tout forme donc un appareil indépendant du fourneau, et repose, par les galets $e$, sur des rails $f$ qui partent de l'intérieur du foyer et se prolongent à l'extérieur d'une quantité suffisante pour, au besoin, sortir entièrement la grille.

Par conséquent, la mise en place de tout l'appareil se résume à le faire avancer

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

sur ces rails $f$ dans l'espace laissé libre au-dessous des bouilleurs D, espace occupé, dans les dispositions ordinaires, par la grille fixe simple et par le cendrier. Seulement, l'autel est remplacé ici par le prolongement de la sole qui se termine par une partie mince laissant la grille pénétrer au-dessous d'elle. En raison de son peu d'épaisseur, cette partie est consolidée par des tubes en fonte E dans lesquels on fait circuler un courant d'eau pour les empêcher de brûler.

Il sera facile maintenant d'expliquer comment le combustible se trouve entraîné par la grille, en vertu de son mouvement de translation, et comment cet effet peut en même temps régler la quantité à en brûler.

Le charbon, préalablement divisé en morceaux assez menus et sensiblement égaux, on le dépose dans une trémie F dont les parois sont formées des cloisons $g$ et $g'$, réunies aux flasques C du bâti. La paroi verticale $g$ laisse nécessairement une ouverture à sa partie inférieure pour le passage du combustible; mais cette ouverture est en partie masquée par un registre G qui peut être maintenu à des hauteurs différentes à l'aide d'un mécanisme d'encliquetage H dont l'axe porte des poulies sur lesquelles s'enroulent les chaînes qui supportent le registre.

Il résulte de cette combinaison que la chaîne de barreaux, en s'avançant, entraîne d'abord la masse du charbon qui repose entièrement sur elle. Mais arrêté par le registre G, qui lui forme un obstacle fixe, il peut suivre néanmoins la chaîne, mais seulement suivant une épaisseur de couche égale à la levée du registre. C'est ainsi qu'en combinant cette épaisseur avec la vitesse de translation de la chaîne, on peut arriver à dépenser telle quantité de combustible qu'il peut être nécessaire avec un même appareil.

Fonctionnement de l'appareil. — Si nous supposons qu'une première charge de combustible ait été amenée à l'incandescence au début de l'opération, et que l'on mette ensuite en train l'alimentation continue, il est clair que le nouveau charbon amené par la grille commencera à s'échauffer dès qu'il aura traversé le registre G; s'il en résulte une certaine distillation et une production de gaz combustible, ces produits, en passant au-dessus de la partie incandescente du foyer, achèveront de s'y brûler; puis, avançant peu à peu, le nouveau combustible sera lui-même transformé en coke et enfin entièrement brûlé.

Il ne doit donc rester sur la grille, à son extrémité postérieure, que peu de résidus, dont une partie tombe au travers des barreaux et l'autre à l'extrémité même; un bassin I est spécialement disposé pour les recevoir, les recueillir et les sortir du foyer.

Note sur les résultats d'expérience. — La vitesse de translation de la grille est évidemment variable suivant la nature des combustibles employés et l'activité du foyer, que l'on règle au moyen du registre de la cheminée. De toute façon, ce mouvement est très-lent et moyennement égal à 2 mètres par heure, ou moins de 30 millimètres par minute : soit un demi-millimètre par seconde environ.

Tous les hommes spéciaux qui ont fait des expériences sur ce système de grille à mouvement de translation sont d'accord pour dire qu'elle est complétement fumivore. Quant aux particularités de son fonctionnement, voici à peu près le résumé

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'une opinion de M. Combes, le savant ingénieur des Mines, qui a, ainsi que nous l'avons dit, spécialement étudié la question des fumivores :

D'après les expériences faites par cet ingénieur sur une grille Tailfer, essayée à la Manufacture des tabacs, cet appareil est complétement fumivore, sauf le cas d'une cheminée trop petite;

Le charbon menu doit être employé de préférence : il faut casser les gros morceaux qui n'auraient pas le temps de brûler dans le trajet de la grille;

Le charbon doit être sec, et l'on ne doit pas le mouiller avant la charge, comme cela se pratique souvent pour les grilles fixes;

Les grandes vitesses avec de faibles épaisseurs de houille donnent de meilleurs résultats, sous le rapport de la suppression de la fumée, que les faibles vitesses avec de fortes épaisseurs. Il n'y a de limite à la vitesse que le point où l'inflammation latérale ne peut se propager assez rapidement pour éviter qu'une partie du charbon n'arrive à l'état noir jusqu'à une assez grande distance du registre, ce qui oblige, soit à lever fréquemment ce dernier pour ramener le charbon avec un ringard, soit à débrayer de temps en temps la grille;

Généralement, il convient d'employer une vitesse d'autant moins considérable que le charbon est plus gros. Pour le charbon d'Anzin, la vitesse de 32 millimètres par minute, avec une épaisseur de couche de 8 centimètres 1/2, est celle qui a donné les meilleurs résultats, etc., etc.

Les applications de la grille Tailfer commencent à se multiplier, et bientôt nous connaîtrons les résultats de celles qui viennent d'être appliquées de nouveau à la Manufacture des tabacs de Paris.

## FOYER FUMIVORE A ALIMENTATION INFÉRIEURE

Par **M. DUMÉRY**, ingénieur

(FIG. 1 A 3, PL. 6)

Le système de foyer de M. Duméry a pour principe l'allumage et la combustion par la partie supérieure de la couche de charbon, tandis que l'alimentation de combustible frais a lieu par la partie inférieure. Ce principe est certainement rationnel, et peut-être le meilleur; mais il a le grave inconvénient pratique d'exiger des combinaisons mécaniques un peu compliquées, de telle façon que l'on s'y prenne, surtout si l'on se reporte aux dispositions si simples du foyer vulgaire à grille plate.

Mais il est aisé de concevoir qu'en amenant le charbon frais par dessous, et en laissant toujours découverte la partie incandescente, on n'interrompt jamais le rayonnement, de façon que les produits issus de la première distillation du combustible se dégagent dans cette même partie incandescente où ils achèvent facilement de se brûler.

M. Duméry considère la fumée comme un corps non utilement combustible,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

c'est-à-dire ne rendant pas, par sa combustion, une plus grande somme de chaleur que celle dépensée pour l'opérer, d'où il conclut en disant qu'on ne doit pas laisser cette fumée se produire, pour la brûler ensuite au-dessus de la couche de charbon à l'aide d'une addition d'air frais, mais bien éviter qu'il s'en forme, en forçant les premiers produits de l'inflammation du combustible à traverser la couche en complète ignition.

C'est, du reste, ce que nous exprimions ci-dessus en disant que diverses expériences tendaient à prouver que la fumée n'est pas un corps *utilement combustible*.

Tout récemment, en 1858, M. Émile Burnat, ingénieur, a communiqué à la Société industrielle de Mulhouse les résultats de recherches très-intéressantes sur ce sujet (1).

Ce travail, qui mentionne d'abord les recherches qui ont pour objet les volumes d'air pratiquement absorbés par la combustion dans les foyers de générateurs à vapeur, donne également des notions relatives à la question des fumivores.

M. Burnat a trouvé, qu'en considérant la fumée aux trois états moyens où elle se présente : *fumée noire*, *fumée légère*, *fumée nulle ou incolore*, et en tenant compte du temps pendant lequel elle se montre sous ces trois états, par rapport à la durée totale de la combustion, il a trouvé, disons-nous, que la quantité de carbone emportée sans avoir produit son effet, par suite d'une combustion imparfaite, ne représentait pas, en unités de chaleur, plus de 5 pour 100 de la quantité de chaleur totale développée sur la grille; et en outre que, si l'on tient compte de l'impossibilité probable d'annuler jamais la dernière période de fumée presque insensible, la perte réelle due à une combustion vicieuse, accompagnée au début d'une fumée très-chargée de noir, ne dépasse pas 3 pour 100.

Mais, en résumé, la question principale de la fumivorité est surtout la salubrité; et si la fumée est un combustible presque neutre, en évitant d'en former, on évite néanmoins une perte, si faible qu'elle soit.

Pour en revenir au foyer Duméry, cet ingénieur a cherché, non pas à brûler la fumée, mais à éviter sa production, résultat qu'il obtient à l'aide d'une disposition qui permet d'opérer les charges au-dessous de la couche incandescente, et sans ouvrir la chambre de combustion.

Examinons la construction de cet appareil.

Disposition d'ensemble du foyer Duméry. — Les fig. 1 à 3 de la pl. 6, qui le représentent, correspondent aux vues essentielles pour s'en faire une juste idée.

La fig. 1 en est une vue de face extérieure par le bout du fourneau;

La fig. 2 est une coupe longitudinale faite suivant l'axe 1-2;

La fig. 3 est une section transversale par l'axe 3-4, passant par le milieu de la grille.

L'ensemble de l'appareil se compose d'un coffre en fonte A, qui tient la place ordinaire d'un foyer au-dessous des bouilleurs B, et en renferme en effet les trois parties ordinaires : la chambre de combustion, la grille et le cendrier. Ce coffre est

(1) Voir le no 146 du *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, 1859.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

fermé, par devant, par deux portes C, correspondant au cendrier proprement dit, au-dessous de la grille, et par deux autres portes, plus petites, D, au-dessus de cette dernière.

La grille ne comprend réellement en largeur que les deux barreaux E du milieu d'une grille ordinaire, tandis que les deux parties latérales vides constituent les ouvertures de deux vastes cornets F dont les entrées opposées sont situées en dehors du coffre A.

Ceci nous permet déjà de définir le principe du fonctionnement de l'appareil. Le combustible est déposé dans les deux cornets jusqu'à la hauteur de la grille dans l'intérieur; une partie est réservée pour mettre une charge de coke nécessaire pour l'allumage; puis, à l'aide des moyens ordinaires, on l'enflamme par sa couche supérieure qui se présente à l'ouverture intérieure des cornets. Une fois le feu bien allumé, on continue l'alimentation en chargeant par les cornets, et on fait arriver successivement le nouveau charbon à la hauteur de la couche incandescente en le poussant au moyen de pistons ou presseurs en segments G, qui ont un axe fixe de rotation et peuvent pénétrer dans les cornets en les faisant tourner de quantités suffisantes.

Il est facile de comprendre maintenant que la combustion s'opère toujours à l'extrémité de la masse opposée à celle du chargement, d'où naissent les propriétés principales du système. Non-seulement la fumée est évitée, mais on peut compter sur une vaporisation plus constante, puisque la surface en ignition complète ne se trouve jamais recouverte de combustible froid, et que le rayonnement n'est pas non plus masqué. Quant aux fonctions des barreaux du centre, elles se résument à peu près à établir la réunion des deux parties du foyer et à recevoir les parties de charbon, dont la combustion s'achève, et qui s'écoulent des cornets, poussées par de nouvelles charges.

On sait qu'il avait été fait auparavant des foyers dits *à flamme renversée*, où les charges s'opérant par-dessus, comme à l'ordinaire, le tirage était dirigé du dessus au-dessous, de façon à obtenir le même effet qu'avec le foyer Duméry. Mais alors on perdait tout l'effet dû au rayonnement; et puis l'action la plus énergique ayant lieu au contact même de la grille, celle-ci était promptement détruite. Suivant Péclet, ce système de foyer pouvait néanmoins réussir pour le bois, tandis qu'il donnait de mauvais résultats avec la houille, par la haute température qu'elle peut développer près de la grille, et par ses éléments constitutifs qui en accéléraient la destruction.

Détails du foyer Duméry. — La partie la plus importante du mécanisme est celle qui constitue le mouvement des pousseurs G. C'est un axe horizontal H portant deux vis sans fin *a* qui engrènent avec les deux secteurs I, montés sur les axes de rotation *b* des pousseurs. On communique le mouvement à ces organes, pour les faire pénétrer dans les cornets F, soit à l'aide d'un moteur, soit à la main en agissant sur une manivelle J appartenant à un bout d'arbre *c*, lequel porte un pignon d'angle K qui engrène avec une roue semblable L montée sur l'axe H. On voit, par cela même, que les mouvements des presseurs sont égaux et simultanés, ce qui signifie

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

que les charges se font aussi de chaque côté, ensemble et en quantités égales.

On remarque encore que les cornets F sont munis, à l'intérieur du coffre A, d'une porte *d* par laquelle on en dégage les résidus, ou le combustible lui-même, si l'on veut arrêter le feu. Ces portes se manœuvrent de l'extérieur à l'aide des leviers *e* servant à dégager les mentonnets *f* qui les maintiennent ordinairement fermées. Tout un système de contre-poids et de chaînes se trouve adapté à ce mécanisme pour en régulariser les fonctions.

Quant à l'introduction de l'air, elle a lieu sur le devant du coffre par une ouverture M qui le distribue au-dessus et au-dessous de la grille. L'air afflue ainsi en pénétrant au sein même de la couche en ignition, et dans la masse contenue dans les cornets, par les nombreuses ouvertures dont ceux-ci sont percés.

Outre cela, il existe encore une entrée d'air disposée de façon à rafraîchir les portes D, qui ne doivent s'ouvrir qu'accidentellement pour la visite du foyer, un regard spécial N se trouvant destiné à permettre d'observer la combustion sans rien ouvrir. Ces portes se présentent en avant-corps, laissant un espace libre *g* entre elles et une double porte *h* directement placée sur l'ouverture de la chambre de combustion. C'est dans cet espace, en *g*, entre les deux portes, que l'on fait arriver de l'air extérieur par une sorte de grille ménagée comme plafond de cet avant-corps.

Telles sont, au moins dans leur ensemble, les dispositions du foyer fumivore de M. Duméry (1), dispositions qu'il suffit d'examiner pour apprécier l'importance des recherches qu'elles ont dû coûter à l'inventeur avant d'arriver à cet état harmonieux et perfectionné.

Personne ne conteste la réalité des résultats obtenus avec ce système de foyer, sous le rapport de sa fumivorité et des variations considérables qu'il peut supporter, sans perte d'effet, dans les quantités de combustible qu'on peut y brûler pour une même surface. Cependant, il serait peut-être nécessaire de lui ajouter comme perfectionnement des entrées d'air spéciales dans l'intérieur du foyer, dans le but d'aider à la combustion des gaz dégagés, gaz incolores, il est vrai, mais qui peuvent s'échapper sans brûler, faute d'une addition d'air pur qui n'ait pas traversé le combustible.

De toute façon, il est bien fâcheux que la structure de cet appareil ne soit pas plus simple, et les pièces qui le composent moins nombreuses; car cette circonstance suffira sans doute pour en limiter notablement l'extension, malgré ses qualités incontestables.

(1) Voir, pour la description complète du foyer Duméry, le LIVe volume du *Bulletin de la Société d'Encouragement*, année 1855.

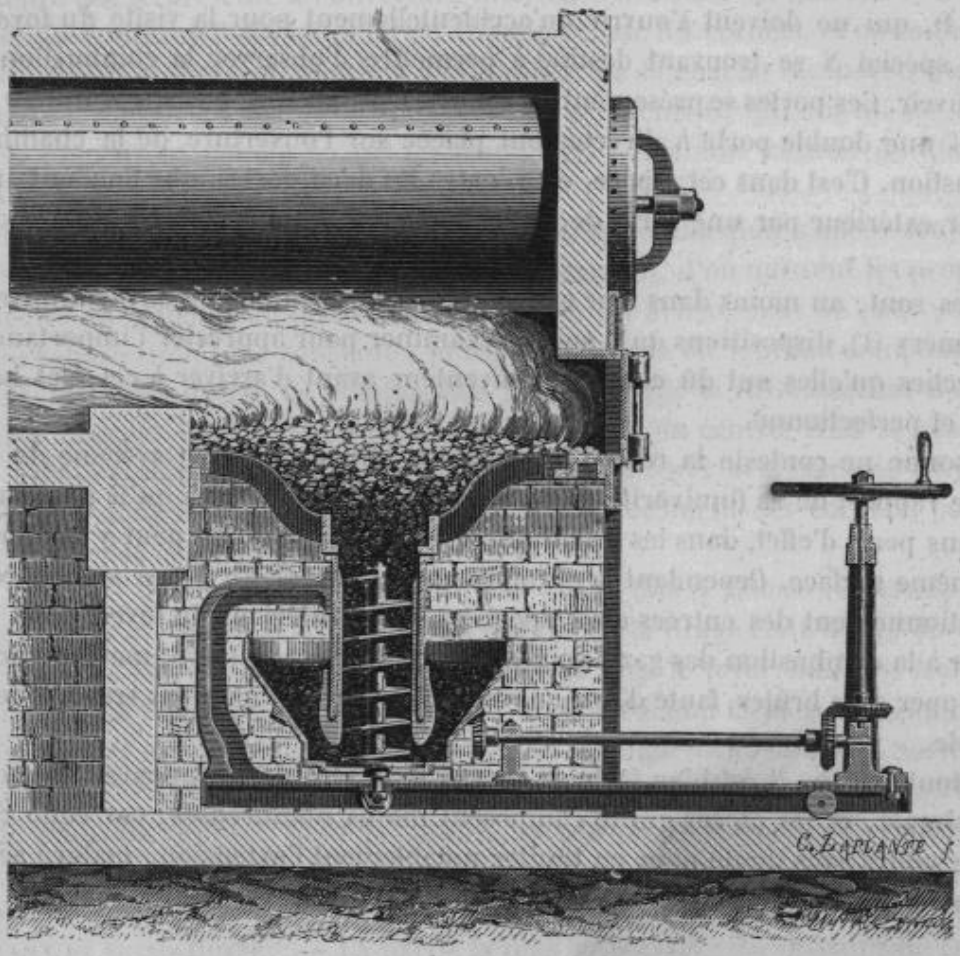
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## FOYER FUMIVORE A ALIMENTATION INFÉRIEURE

Par **M. GEORGE**, ingénieur à Paris

M. George, ingénieur qui s'est distingué pour diverses recherches dans la construction mécanique, s'est occupé de la question des foyers fumivores, et, à ce titre, a proposé deux dispositions dont l'une présente un certain intérêt comme on peut le voir par la description que nous en donnons ci-après.

Fig. 36.




La première consistait, en principe, dans une combustion à flamme renversée, identique en cela à ce qui a été dit précédemment.

La seconde revient à l'idée de l'alimentation inférieure qui laisse la couche incandescente toujours découverte et permet au rayonnement d'exercer son action sur le générateur, tout en conservant à la grille une fraîcheur qu'elle ne peut avoir avec le renversement de la flamme. Ce principe étant connu, l'invention de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

M. George réside dans le mécanisme qu'il a proposé pour sa réalisation, qui, ainsi que nous l'avons dit, présente de certaines difficultés pour ne pas tomber dans des complications impraticables.

Le mécanisme dont il s'agit a pour base la vis sans fin employée à l'élévation du combustible directement au centre de la grille et à sa partie inférieure. Voici, du reste (fig. 36), le dessin qui représente ce mécanisme, d'après M. George lui-même, qui a bien voulu le mettre à notre disposition.

Cette figure permet de reconnaître que la grille est formée, vers sa partie centrale, de quelques barreaux courbes qui constituent comme une cuvette percée d'une large ouverture circulaire à son centre.

Cette ouverture correspond à une vis sans fin qui tourne dans un conduit fixe et sert à élever du combustible que l'on jette dans un récipient évasé, solidaire de la vis et tournant avec elle. La cuvette et la vis ont pour point d'appui un bâti en fonte qui porte aussi la transmission à l'aide de laquelle on les met en mouvement, soit à la main, soit au moyen d'un moteur si l'on veut rendre l'alimentation continue et incessante. On voit que cette transmission se compose de deux axes d'équerre, mis en rapport par une paire de roues d'angle, l'axe horizontal muni d'un autre pignon semblable qui engrène avec une couronne dentée fixée après la cuvette tournante.

Le bâti, portant aussi la potence à laquelle le conduit vertical est attaché, et reposant sur le sol du foyer par des roulettes, il s'ensuit que le tout est complétement indépendant de la construction du fourneau, et même de la grille, et se met en place simplement en l'y introduisant.

Pour faire comprendre l'ascension du combustible, il est nécessaire d'ajouter que le conduit dans lequel tourne la vis est garni intérieurement de cannelures qui s'opposent à ce que le charbon participe au mouvement de rotation, d'où il est forcé de s'élever. D'ailleurs, ces cannelures, ainsi que d'autres semblables appartenant à la cuvette conique, et quelques dents ménagées au conduit fixe, ont encore pour but d'achever le concassage des morceaux de houille trop gros pour pouvoir s'engager entre les filets de la vis.

Cette simple description, jointe aux notions précédentes relatives à ce mode de combustion, permettront de faire apprécier tout le parti que l'on peut tirer de cette invention, qui a au moins pour elle une simplicité relative, eu égard à la difficulté du problème.

Quant à la manœuvre, elle s'effectue en jetant du combustible dans la cuvette tournante, de temps en temps et en quantité convenable pour satisfaire à l'alimentation, puis en faisant tourner la cuvette et la vis. Seulement, cette dernière opération doit être renouvelée plus fréquemment que la première, attendu que la meilleure condition serait de rendre l'alimentation continue, sans interruption.

Le combustible frais, ainsi élevé, repousse lentement la masse déposée sur la grille en faisant écouler, de chaque côté du centre, la partie supérieure de la couche en ignition déjà épuisée et réduite à l'état de coke. Les parcelles de combustible qui traversent la grille retombent dans le récipient, d'où elles sont de nouveau élevées et achèvent de brûler si elles ne le sont pas complétement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Comme dans toutes les dispositions analogues, les portes du foyer ne sont ouvertes que pour l'entretien de la grille et pour sortir le mâchefer qui s'y serait attaché et aggloméré.

On estime qu'avec un appareil semblable, dont la vis aurait 15 centimètres et faisant environ 5 tours par minute, on peut alimenter un foyer correspondant à un générateur d'une puissance moyenne égale à 15 mètres de surface évaporatoire. Pour des puissances supérieures ou pour des foyers plus profonds, on pourrait employer plusieurs appareils commandés simultanément.

Le système de foyer de M. George peut donc posséder les mêmes qualités fumivores que celui de M. Duméry, mais avec une disposition beaucoup plus simple; pour tous deux, il paraît utile néanmoins, sous le rapport de l'économie, de disposer au-dessus de la grille des entrées d'air que l'on pourrait régler à volonté, et qui permettraient d'aider à brûler les gaz combustibles qui se dégagent en quantité d'autant plus grande que la combustion est elle-même plus complète, à moins que ces gaz ne se trouvent entièrement réduits dans le sein de la masse incandescente, ce qui n'est pas probable, quel que soit le système de foyer.

## TRANSFORMATION DES COMBUSTIBLES EN GAZ ET FOYERS COMBINÉS

Sous ce titre, qui ne rend peut-être pas complétement l'idée qu'il représente, nous entendons renfermer les dispositions dans lesquelles le combustible est employé sans mécanisme de distribution, et dans lesquelles la combustion s'opère, soit préalablement dans une chambre séparée où le combustible est transformé en gaz que l'on brûle ensuite directement sous le générateur, soit au moyen d'un seul foyer disposé de façon à en rendre les phases distinctes et successives.

Le système qui correspond à la première de ces deux conditions est celui de M. Beaufumé, et celui que nous pouvons citer comme faisant partie de la seconde est de M. Corbin Desboissières.

### APPAREIL A COMBUSTION FUMIVORE

### PAR M. BEAUFUMÉ

Le système de M. Beaufumé revient assez sensiblement au mode adopté dans les usines métallurgiques pour l'utilisation des gaz échappés du gueulard des hauts-fourneaux, c'est-à-dire qu'il consiste dans la transformation du combustible en gaz que l'on dirige sous le générateur où il est alors rallumé et consumé.

Nous ne croyons pas devoir donner ici une description complète de ce système, qui a été très-amplement décrit par MM. Grouvelle et Jaunez, dans leur nouveau traité *le Guide du chauffeur*. Nous allons essayer seulement d'en exposer l'idée.

Le générateur proprement dit est entièrement distinct de l'appareil à combus-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tion qui consiste en un coffre à double paroi remplie d'eau, assez semblable au foyer d'une locomotive, et qui est *le producteur de gaz*. C'est en effet dans cet appareil que le combustible est renfermé et brûle en couche très-épaisse. La combustion est activée au moyen d'un ventilateur qui envoie aussi de l'air dans la partie du générateur où les gaz combustibles sont dirigés et doivent y être enflammés. L'air, traversant la couche de combustible, rencontre d'abord la partie la plus élevée de température, traverse ensuite les couches supérieures et parvient dans le vide du foyer à l'état d'oxyde de carbone, mélangé de quelques produits gazeux d'une distillation partielle.

De l'appareil producteur, ces gaz sont, comme nous l'avons dit, dirigés dans les carneaux du générateur et mélangés à de l'air qui a été préalablement chauffé par son passage dans un canal contigu au carneau où brûlent les gaz; enfin ils sont rallumés et brûlent sans fumée.

D'un côté, d'après MM. Grouvelle et Jaunez, des expériences faites sur un appareil monté à l'établissement des pompes de Chaillot auraient démontré qu'il permet d'obtenir plus de 10 kilogrammes de vapeur à 3 atmosphères par kilogramme de houille, dite gaillette de Charleroi.

Ce serait le même rendement que celui obtenu avec le générateur Molinos et Pronnier, avec lequel l'appareil Beaufumé présente quelque analogie sous le rapport de la combustion. Dans les deux systèmes, on retrouve, en effet, une production d'oxyde de carbone à la faveur d'une épaisse couche de combustible et une introduction d'air forcé en dessous et en dessus de la grille.

D'un autre côté, cependant, si l'on s'en rapporte aux expériences faites avec beaucoup de soin, en Alsace, chez MM. Dolfus-Mieg et C^e^, et citées par M. Émile Burnat (1), on n'aurait obtenu, à l'aide de l'appareil Beaufumé, que 5^k^60 de vapeur par kilogramme de houille, l'eau d'alimentation réduite à 0°.

Il existe là une contradiction qu'il importerait d'éclaircir dans l'intérêt de la science et de l'inventeur lui-même, dont les travaux, quel qu'en soit le résultat, méritent d'être justement appréciés.

## FOYER FUMIVORE A COMBUSTION MIXTE

Par **M. CORBIN-DESBOISSIÈRES**, ingénieur-métallurgiste

(FIG. 6 A 8, PL. 6)

M. Corbin, ingénieur justement estimé pour ses travaux métallurgiques, et pour la pyrotechnie en général, a résolu le problème des foyers fumivores d'une façon simple et facile à appliquer, sans modifier sensiblement le mode de construction le plus usité, et sans exiger de nouveaux procédés de conduite.

(1) *Société de Mulhouse.* — Voir le 146^e^ Bulletin. Année 1859.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La fig. 6 de la pl. 6 est une coupe longitudinale d'un foyer de ce système appliqué à un générateur ordinaire à deux bouilleurs;

La fig. 7 en est une section transversale sur le milieu de la longueur de la sole;

La fig. 8 est une vue extérieure de face de la tête du fourneau, représentant spécialement l'entrée du foyer.

Ce foyer comprend principalement une sole plate, occupant la même position qu'une grille ordinaire, mais divisée ici en trois parties égales, dont celles latérales A sont formées de barreaux, et celle B du centre est pleine et construite en brique. La tête du foyer est garnie d'un tablier en fonte C qui présente trois ouvertures étroites *a* et *a'* correspondant aux trois parties de la sole; au-dessus de chacune d'elles se trouvent les portes *b* et *b'* pour le chargement et l'entretien du feu. Quant à la chambre de combustion, elle présente ici un ciel en voûte qui ne découvre que peu les bouilleurs D; sa communication avec le premier carneau E est établie par une ouverture *c* de peu de dimension. Mais nous allons voir tout à l'heure comment l'auteur a cru devoir modifier cette disposition, quant à la forme de la voûte.

Laissant de côté pour l'instant les détails de la construction, voici comment s'opère le chauffage :

Après avoir procédé à l'allumage, comme à l'ordinaire, à l'aide de coke et de bûchettes, opération qui s'effectue sur les parties latérales A garnies de barreaux, on dépose le combustible frais sur la partie pleine centrale; puis on ferme les portes.

Alors la chaleur développée par la partie incandescente de la masse chauffe peu à peu le charbon frais déposé sur la sole pleine ou *avant-foyer* B, et en opère lentement la distillation. Puis au fur et à mesure que les masses latérales s'épuisent, on les alimente du combustible de la partie centrale au moyen d'un tisonnier et par les ouvertures *a*. Ce n'est que lorsque cette masse centrale diminue qu'on introduit de nouveau charbon, soit par l'ouverture *a* du milieu, soit par la porte correspondante *b*.

Cette simple disposition permet d'obtenir tout ce que l'on attend d'un bon foyer, sous le double rapport de l'utilisation du combustible et de la fumivorité. On voit que la combustion active s'y trouve bien ménagée, puisque l'air qui afflue au travers des barreaux n'a pas à traverser une épaisse couche de charbon en partie cru, ainsi que cela a lieu dans les foyers ordinaires. En un mot, on peut lui appliquer les mêmes raisonnements qu'à la grille Tailfer, sous le rapport de la préparation du combustible avant l'état d'incandescence, si ce n'est qu'ici le charbon est introduit d'avance dans le foyer où il peut éprouver déjà une température très-élevée qui rend sa distillation préalable d'autant plus complète.

Si le phénomène de la combustion se trouve ainsi bien réalisé, le foyer ne doit laisser écouler dans les carneaux qu'un courant de gaz chauds ne contenant plus de parties combustibles, puisque l'opération se complète entièrement au-dessus de la grille, sans entrées d'air additionnelles. Le passage de ces gaz a lieu par l'ouverture *c*, qui n'a que la dimension justement nécessaire, afin de ramener les flammes et les gaz vers le centre et mieux envelopper la masse de combustible déposée sur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

l'avant-foyer B. Une fois engagé dans le carneau E, le courant circule comme à l'ordinaire, en enveloppant successivement les bouilleurs D et la chaudière D′.

Quant aux détails de construction, ils présentent peu de particularités. La face du fourneau est garnie d'un chambranle en fonte F, dans lequel la tête des bouilleurs est engagée. Les barreaux reposent exclusivement sur trois traverses G, qui sont elles-mêmes soutenues par les colonnes H, et supportent de même la sole en brique B. Une quatrième colonne I sert à soutenir le tablier C, dont la saillie est destinée à y déposer le charbon avant de le pousser dans l'intérieur du foyer.

Modification de la disposition précédente. — L'expérience a montré à M. Corbin que cette méthode, d'envelopper les bouilleurs en partie par la maçonnerie qui forme le ciel du foyer, était défectueuse, en ce sens que, les parties découvertes se chauffant notablement plus que les autres, le bouilleur éprouve une dilatation très-inégale, et est susceptible de se détruire promptement. Il s'est alors arrêté à une modification dont la fig. 37 pourra donner une idée tout à fait exacte.




Fig. 37. Échelle de 1/40.

La cloison qui constitue le ciel du foyer est formée simplement de briques réfractaires posées de champ au-dessus des bouilleurs. Ceux-ci sont alors isolés dans un carneau, construit comme à l'ordinaire, et qui les maintient découverts sur plus des 3/4 de leur circonférence.

Cependant, le foyer conserve en partie la forme de voûte qu'il avait dans la disposition primitive. Les côtés présentent, en effet, deux parties courbes qui correspondent en hauteur avec le sommet de l'autel, lequel est formé d'un plan incliné dont la pente commence à quelques centimètres au-dessus de la sole du foyer.

Quant à celle-ci, elle est toujours formée de trois parties : celles latérales A, composées de barreaux en fonte, et la partie centrale B construite en brique, pour recevoir les charges de combustible frais.

Les applications que M. Corbin a faites sur plusieurs générateurs, à Paris et en Belgique, avec ce système de foyer, ont donné de très-bons résultats, et démontrent que la question de fumivorité pour les chaudières cylindriques ordinaires est bien résolue, d'une manière pratique, avec une économie notable sur la consommation du combustible.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## DIVERSES DISPOSITIONS FUMIVORES

En dehors des dispositions mécaniques spéciales, il a été imaginé un grand nombre de systèmes ayant pour base l'introduction de jets d'air supplémentaires, soit dans les carneaux après la grille, soit au-dessus de cette grille même, tout en conservant la disposition ordinaire du foyer. Généralement, ces moyens ont permis d'atteindre le but proposé, c'est-à-dire la combustion de la fumée; mais souvent aussi la réglementation des entrées d'air était difficile, ou bien, par la direction donnée au jet d'air, on pouvait brûler la chaudière, lui faire subir un coup de feu, comme agirait la flamme du chalumeau.

Nous ne citerons que pour mémoire les systèmes de foyers combinés, l'un recevant les produits de la combustion de l'autre, ces dispositions étant généralement abandonnées. Mais nous dirons quelques mots du foyer de M. Combes, qui semble résumer, dans sa meilleure acception, le système d'introduction de jets d'air.

### FOYER FUMIVORE PAR INTRODUCTION ADDITIONNELLE D'AIR

Par **M. COMBES**, inspecteur en chef des mines

A une époque où l'on se préoccupait vivement, en France et en Angleterre, des moyens propres à l'extinction de la fumée, l'administration française chargea M. Combes, inspecteur et directeur de l'École des mines, d'une enquête à cet égard. Voici quelle fut la nature des expériences exécutées par ce savant ingénieur et les conclusions qu'il en tira.

M. Combes adopta, pour l'objet de ses recherches, un générateur à vapeur composé d'un corps principal et de deux bouilleurs. Le foyer étant disposé à la manière ordinaire, on pratiqua dans la maçonnerie du fourneau deux canaux de chaque côté de la grille et qui venaient déboucher dans le carneau inférieur, un peu au delà de l'autel. L'autre extrémité débouchant à l'extérieur sur la face du fourneau, ces canaux lançaient, dans le courant de gaz chauds, deux jets d'air froid horizontaux et perpendiculaires à la marche des produits de la combustion.

Sous le rapport de la fumivorité, cette disposition eut un plein succès. Aussitôt que les canaux étaient débouchés et les jets d'air établis, la fumée, d'abord noire et opaque, disparaissait complétement.

Mais M. Combes ne s'en tint pas là; il voulut connaître les conditions exactes de la combustion de la fumée ainsi opérée, et pour cela il fit l'analyse des gaz sortant de la cheminée, avec et sans fumée, et rechercha également les volumes d'air fournis dans les deux cas.

D'ailleurs, la quantité de vapeur produite n'étant pas modifiée par l'application du procédé qui permettait de supprimer la fumé, il fallait bien en conclure que la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

quantité de charbon perdue à l'état de fumée et utilisée, au contraire, par l'extinction de celle-ci, constituait un bénéfice compensé par une perte d'une autre nature.

En effet, lorsqu'on supprimait les jets d'air et qu'il se produisait de la fumée noire, les gaz recueillis dans la cheminée renfermaient, en volume, 10 à 12 2/3 pour 100 d'acide carbonique, et 6, 4 à 8,05 pour 100 d'oxygène libre, plus de l'azote et point ou peu de gaz combustibles. Dans le cas contraire où la fumée avait disparu, soit dans la dernière période de la combustion d'une charge et les jets d'air supprimés, soit pendant le temps de la combustion d'une charge par le fonctionnement des jets d'air, le courant de gaz chauds ne contenait plus qu'environ 6 pour 100 d'acide carbonique et 12 à 13 pour 100 d'oxygène libre.

M. Combes en a conclu que l'extinction de la fumée n'était obtenue que par une notable augmentation de l'air introduit sous la grille, d'où il devait résulter une perte de calorique, par le fait d'un plus grand volume d'air à échauffer et qui s'échappe en cet état dans l'atmosphère. Du reste, il a reconnu, par des expériences directes, que les volumes d'air introduit par la grille, qui n'étaient environ que 5 mètres cubes 1/3 par minute, au commencement d'une charge, s'élevaient à la fin jusqu'à 17 mètres cubes 2/3.

En résumé, la combustion de la fumée, si elle ne coûte rien, ne rapporte rien, que le fait lui-même, qui est, du reste, le but principal à atteindre et celui que nous considérons actuellement. Mais on sait que sans la fumée il peut exister des gaz combustibles qui s'échappent sans brûler. Ce sont ceux-là qu'il est important de ne pas laisser échapper avant leur combustion complète.

Telles sont, dans leur relation la plus sommaire, les résultats des expériences de M. Combes sur son appareil spécial. Il s'est également occupé d'autres dispositions proposées, et nous avons dit plus haut dans quelles circonstances (1).

## APPLICATION DE JETS DE VAPEUR

On a tenté, dans ces temps derniers, des essais sur un système fumivore d'un principe déjà très-ancien du reste, et qui consiste dans l'introduction de jets de vapeur à l'intérieur d'un foyer et au-dessus de la couche de combustible.

A part les détails particuliers de construction, nous dirons que ces appareils se composent généralement de tubes percés de petits trous, qui s'étendent sur les côtés intérieurs du foyer, hors de son action directe, et qui se trouvent en communication avec le générateur. Au moyen de robinets placés extérieurement, on établit le lancement de la vapeur dans le foyer ou on l'interrompt à volonté.

Pour rendre compte de l'action fumivore de la vapeur introduite dans un foyer, on a dit que c'était sa décomposition en oxygène et en hydrogène, sous l'influence de la haute température, lesquels gaz concouraient à la combustion, l'un comme

(1) Voir, pour le détail des expériences de M. Combes : *Annales des Mines*, 4e série, t. XI, p. 149. — *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XXIV, p. 379, 1847. Et les *Bulletins de la Société d'Encouragement*, t. XLIV, p. 348, et t. LIV, p. 146.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

corps comburant et l'autre comme combustible. Mais des personnes spéciales ont émis une autre opinion qui nous semble plus exacte et plus conforme à ce qui doit avoir lieu réellement.

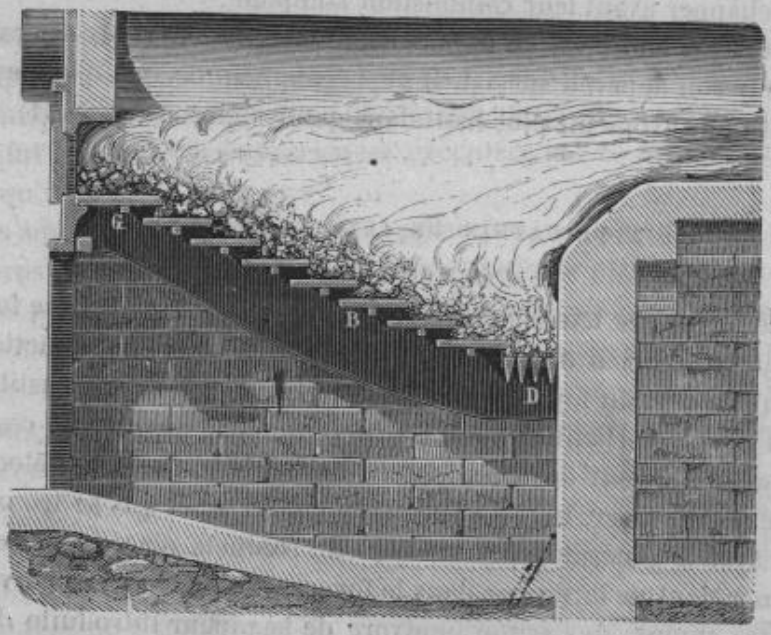
On sait que l'introduction d'un jet de vapeur, dans une cheminée, active notablement le tirage d'un foyer en donnant au courant d'air une vitesse considérable, laquelle en augmente proportionnellement le volume qui traverse la grille. Or, un excès de fumée provenant surtout de l'insuffisance de l'air fourni au foyer au moment d'une charge nouvelle, on comprend que l'injection de la vapeur en cet instant doit en effet atténuer la production de fumée en activant le tirage.

Mais il ne paraît pas douteux que l'adoption de ce moyen, s'il n'est pas complétement efficace avec les combustibles très-gros, présente au moins quelque économie de combustible comparativement aux autres dispositions où l'appel de l'air a lieu purement et simplement par le tirage de la cheminée. Nous avons dit (p. 207) combien un tirage artificiel était plus avantageux qu'un appel simple, à volumes égaux fournis au foyer.

### GRILLE EN GRADINS

Il y a quelques années, un ingénieur distingué de l'Administration des mines, M. de Marsilly, a fait établir en France un système de grille dit *en gradins*, originaire de la Russie par son principe.

Fig. 38.




Échelle de 1/25.

Ce système, perfectionné depuis par un autre ingénieur, M. Chobrzinski, a été appliqué par lui, sur une assez vaste échelle, principalement aux machines locomotives.

La fig. 38, ci-dessus, indique la disposition générale de ce système de grille appliqué à ün foyer de générateur fixe.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Cette grille est, en effet, composée d'une série de barreaux ou de plaques B, étagées, qui reposent en deux ou plusieurs points de leur longueur, suivant la largeur du foyer, sur des sommiers en fonte, lesquels sont fixés par leurs extrémités contre le chambranle du foyer et contre l'autel. Les barreaux ou plaques B ont environ 20 centimètres de largeur et se recouvrent réciproquement d'à peu près le tiers de cette largeur; ils laissent entre eux un intervalle d'une hauteur moyennement égale à 4 centimètres, suivant l'espèce de combustible à employer. Le sommet de la grille est formé d'une plaque G, plus large que les autres, et qui est destinée à recevoir le combustible froid avant de l'introduire plus avant dans le foyer. La partie inférieure est composée de quelques barreaux D du système ordinaire, mais placés, comme les autres plaques B, perpendiculairement au courant des produits de la combustion.

Par cette disposition, outre les larges intervalles ménagés entre les barreaux pour l'introduction de l'air, on obtient encore la fumivorité en plaçant d'abord le combustible cru à la partie supérieure de la grille pour ne le pousser plus loin qu'au moment d'une nouvelle charge, alors qu'il se trouve déjà très-avancé en combustion et que la plus grande partie de la couche, dans toute l'étendue de la grille, est incandescente.

Il paraît que l'effet de cette grille est assez complet pour que l'on ait pu, avec elle, substituer complétement la houille au coke dans les locomotives où elle a été appliquée.

Quant à ses proportions, elles diffèrent peu des autres grilles. On calcule sa superficie sur environ 60 kilogrammes de houille brûlée par heure et par mètre carré. Comme elle est inclinée et que la charge de combustible doit être à une température peu élevée à la partie supérieure, on ne laisse que 25 à 30 centimètres entre le sommet de la grille et les bouilleurs, cet écartement devenant égal à environ 60 centimètres au-dessus de la partie la plus basse.

## CONCLUSION SUR LES APPAREILS FUMIVORES

Tout en ne nous proposant que de donner une idée sur ce qui a été fait à cet égard, la multiplicité des systèmes et des idées nous a entraîné peut-être un peu loin; et pourtant nous n'avons pas tout dit. Il nous a fallu passer sous silence bien des dispositions qui, à part le mérite de leurs auteurs, n'ont eu aucun succès. Nous avons omis, par exemple, les procédés de *lavage de la fumée*, procédés peu appliqués, mais qui viennent néanmoins d'être encore récemment expérimentés en Angleterre.

Si nous essayons de résumer les moyens proposés pour l'extinction de la fumée, nous remarquons que la plupart tendent à la réalisation de certains faits peu nombreux, et qui sont à peu près les suivants :

1° Alimenter un foyer par charges faibles, mais fréquentes;

2° Maintenir la couche incandescente toujours découverte;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

3° Fournir des volumes d'air frais en quantité toujours bien en rapport avec la masse de combustible à brûler;

4° Avoir des passages de flamme suffisants pour que le tirage ne soit jamais altéré;

5° En général, disposer le combustible dans le foyer de façon que toutes les parties en soient également soumises au courant d'air qui alimente la combustion.

De ces considérations, nous déduisons que, même avec un fourneau qui ne serait pas muni d'appareils fumivores spéciaux, on pourrait sensiblement annuler la production de fumée par les seuls soins du chauffeur et par des proportions bien entendues, c'est-à-dire avec une grille et des carneaux suffisamment grands.

Telle est l'opinion de M. Combes, que nous avons cité au commencement de cet article, et que l'on peut résumer ainsi :

La grille doit avoir au moins 1,5 décimètre carré par kilogramme de houille à brûler par heure;

La somme des vides des barreaux égale au quart de la superficie de la grille;

La section de la cheminée, ainsi que celle des carneaux, égale au tiers de l'aire totale de la grille, soit à 0,5 décimètre carré par kilogramme de houille brûlée par heure.

(C'est un peu plus que ce que nous avons proposé [p. 152], où la valeur attribuée à cette section correspond à environ 0,4 décimètre carré par kilogramme de houille brûlée par heure.)

Enfin, telle était encore l'opinion de Péclet, qui disait, dans son excellent *Traité de la chaleur* (1) :

« Au reste, il ne faut pas s'exagérer l'importance d'un appareil spécial pour brûler la fumée de la houille. Un foyer bien construit, dont la grille aurait une étendue suffisante, qui serait alimenté par un combustible dont les fragments ne s'agglomèrent pas trop, et qui surtout serait dirigé par un chauffeur intelligent, donnerait en général peu de fumée, et un effet utile peu différent de celui qu'on pourrait obtenir d'un bon appareil fumivore. »

Dans certains centres industriels, on a tellement compris l'importance d'employer de bons chauffeurs, pour conduire et alimenter les générateurs à vapeur, que l'on a institué à ce sujet des cours spéciaux et gratuits dans lesquels on explique avec toute la lucidité possible les règles pratiques à suivre, les précautions à prendre pour obtenir des foyers les meilleurs résultats économiques. Nous croyons que, dans l'intérêt actuel des progrès de l'industrie, on ne devrait pas engager un chauffeur dans les usines et manufactures à vapeur sans qu'il présentât une sorte de diplôme ou de certificat constatant qu'il possède les connaissances nécessaires, comme on l'exige dans les compagnies des chemins de fer, pour les machines locomotives, et dans la marine impériale pour les appareils de navigation.

(1) *Traité de la chaleur*, par Péclet, 1er vol., p. 263. — Édition de 1843.

FIN DU CHAPITRE SEPTIÈME.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

# CHAPITRE VIII

## APPAREILS D'OBSERVATION ET DE SURETÉ

Les instruments appliqués aux générateurs à vapeur, et que nous désignons par le titre d'appareils *d'observation et de sûreté*, ont, ainsi que nous l'avons dit, trois fonctions distinctes qui sont :

1° Observation de la pression de la vapeur, soit dans l'appareil où elle se produit, soit dans l'organe récepteur où elle exerce son action;

2° Indication du niveau de l'eau dans le générateur, et moyens d'en prévenir les variations anormales;

3° Échappement libre de la vapeur du générateur en cas d'excès capable d'occasionner des accidents.

Les appareils correspondants sont : *les manomètres*, *les niveaux* et *les soupapes de sûreté*. Nous verrons bientôt que chacun d'eux comprend des systèmes différents dont nous ferons connaître les plus importants, et surtout les plus généralement employés.

A ces appareils principaux viennent s'en joindre d'autres qui sont d'un usage plus récent. Ce sont :

1° *Les indicateurs de vide*, qui servent aussi à mesurer des pressions, mais plus faibles que celle de l'atmosphère; on les applique, dans les moteurs à vapeur, aux appareils de condensation;

2° *Le thermo-pyromètre*, qui peut servir à mesurer des températures élevées comme celles de la vapeur à de très-hautes pressions. Si l'emploi de ce dernier n'est pas indispensable dans les conditions ordinaires, il peut, au contraire, devenir très-utile avec le mode d'emploi de la vapeur surchauffée, dont la température ne suit plus la même relation avec la pression que lorsque cette vapeur est issue directement du liquide producteur et qu'elle reste en contact avec lui.

### MANOMÈTRES

La disposition des manomètres repose sur plusieurs principes qui ont donné lieu à bien des formes et des constructions diverses mais qui se réduisent aujourd'hui à un petit nombre de types.

Les premiers manomètres, dits *à mercure*, ont été fondés exactement sur le principe du baromètre, c'est-à-dire sur les conditions d'équilibre des fluides de densités

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

différentes renfermés dans des vases communiquants. Cependant, dans cette catégorie se trouvent compris les manomètres à air comprimé où l'élasticité de l'air, comme ressort, modifie un peu le principe ci-dessus énoncé. Nous avons déjà vu (9) en quoi consiste cet appareil.

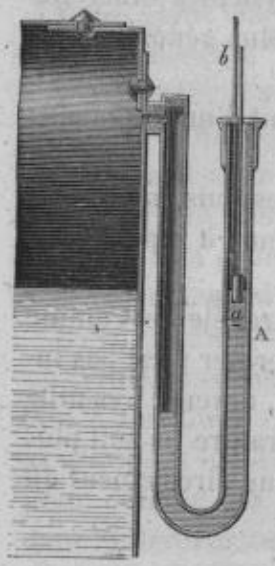
Plus tard, les manomètres ont été basés sur le principe pur de l'élasticité métallique qui peut en effet servir de mesure aussi bien à une pression engendrée par la vapeur qu'à tout autre effort d'une espèce différente. C'est sur ce dernier principe que sont fondés les manomètres actuellement en usage.

## MANOMÈTRES A MERCURE

MANOMÈTRE A FLOTTEUR A BASSE PRESSION. — Lorsque la pression de la vapeur à mesurer dépassait peu celle de l'atmosphère, ainsi que cela avait lieu pour les chaudières dites à basse pression de Watt, on faisait usage d'un manomètre exactement disposé de la même façon que l'instrument que nous avions supposé (46) en parlant de la vitesse d'écoulement des gaz.

La fig. 39 représente cet appareil tel qu'il se trouvait appliqué aux chaudières de Saint-Ouen qui ont été décrites précédemment (p. 109).

Fig. 39.




C'est un tube en fer A, recourbé en U, dont l'une des extrémités est fixée à la paroi de la chaudière par un ajutage horizontal, et l'autre librement ouverte à l'atmosphère; elle est, en effet, surmontée d'un chapeau vissé qui laisse néanmoins l'air s'introduire dans le tube. Ce caractère fait distinguer cet appareil, ainsi que tous ceux établis sur le même principe, sous le nom de *manomètre à air libre*.

Le tube contient du mercure qui doit être de niveau dans les deux branches quand la pression est la même dans la chaudière qu'à l'extérieur.

Mais aussitôt que la tension de la vapeur augmente, le mercure s'abaisse dans l'une des branches et s'élève dans l'autre; un flotteur *a* suit ce mouvement et permet de l'observer de l'extérieur au moyen de sa tige qui sort du tube, auprès d'une échelle graduée *b*.

En se reportant à ce qui a été dit déjà (46), il sera très-facile de se rendre compte de la nature d'une semblable indication.

Puisque la pression de la vapeur est estimée en atmosphères, équilibrées chacune par une colonne de mercure de 76 centimètres de hauteur, il est évident que si, par exemple, l'excès de hauteur de l'une des colonnes de mercure sur l'autre, dans les deux branches du tube, atteint 76 centimètres, c'est que la vapeur aura une atmosphère de plus que la pression ambiante, soit deux atmosphères en totalité. Mais comme cet accès de hauteur provient d'un déplacement des deux colonnes, égal et inverse dans les deux branches par rapport au niveau normal du mercure,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

il s'ensuit que le flotteur $a$ ne s'est réellement élevé que de la moitié de 76 centimètres, les deux branches supposées d'une égale section intérieure.

Par conséquent, la graduation de l'échelle $b$ est faite à raison de 38 centimètres par chaque atmosphère de pression, à partir du point où le mercure est au même niveau dans les deux branches. Ce point peut avoir pour indication 1 ou zéro. Dans le premier cas, le manomètre marque la pression *absolue* de la vapeur, et dans le second cas il exprime sa pression relative ou son excès sur celle de l'atmosphère. On préfère généralement le premier mode qui évite de faire la correction.

Nous avons supposé les deux branches du tube de sections égales, ce qui a lieu en effet avec cette forme de manomètre; mais comme il en est d'autres où l'on cherche, au contraire, à les rendre inégales, dans un but que nous dirons tout à l'heure, voyons dès à présent le changement qui en résulte pour la graduation.

Si la section de la branche où se trouve le flotteur est plus grande que l'autre, la différence de hauteur entre les deux colonnes, pour une même tension de la vapeur, sera la même que si les sections étaient égales, en vertu du principe d'égalité de pression; mais l'abaissement de la petite colonne au-dessous du niveau normal sera plus grand que l'élévation de l'autre au-dessus du même point : d'où cette élévation sera plus faible que la moitié de la différence totale des deux niveaux. Par conséquent, 38 centimètres ne représenteront pas une atmosphère sur l'échelle : cette pression sera indiquée par une hauteur moindre.

Pour graduer l'échelle dans ces conditions, il suffira de faire le raisonnement suivant : désignons par

$d$, le diamètre intérieur de la branche en communication avec la chaudière;

D, le diamètre de l'autre branche ouverte à l'atmosphère;

$h$, la différence de hauteur totale des deux colonnes;

$x$, l'élévation du mercure dans la branche D, au-dessus du niveau normal, et correspondant au point d'où la hauteur $h$ est comptée;

$h - x$, l'abaissement du mercure à partir du même niveau dans la branche $d$.

Il est évident que le déplacement du mercure sera égal, en volume, dans les deux branches, mais suivant des hauteurs en raison inverse des carrés de leurs diamètres, c'est-à-dire que l'on trouve :

$$\mathrm{D}^2 \times x = d^2\,(h - x); \quad \text{d'où } x = h \times \frac{d^2}{\mathrm{D}^2 + d^2}.$$

Cette relation nous permet de résoudre le problème suivant :

Exemple. — Par quelle hauteur une pression atmosphérique serait-elle représentée sur l'échelle si le diamètre de la branche du flotteur était double de l'autre?

*Solution*. On aurait :

$$x = 76^{\text{cent.}} \times \frac{1}{(2)^2 + 1} = 15^{\text{c}}2.$$

Il peut exister une autre erreur qui provient de ce que la branche en relation directe avec la vapeur est ordinairement pleine d'eau; mais cette erreur est peu considérable et peut être facilement appréciée.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En effet, si nous supposons cette branche pleine d'eau, les pressions intérieures et extérieures égales, et le point de départ de l'échelle correspondant à cette situation, qui dénivelle d'une certaine quantité les sommets des colonnes de mercure, il suffit, pour opérer la graduation, de considérer que les différences de hauteur futures devront être diminuées de la hauteur de mercure nécessaire pour équilibrer les abaissements de la colonne d'eau.

Ainsi, pour chaque centimètre d'abaissement de cette colonne, il faut, en supposant les tubes de même grosseur, une colonne de mercure égale à :

$$\frac{1^c}{13{,}598};$$

autrement dit, l'élévation $x'$, de la colonne de mercure, spécialement afférente à l'excès de tension de la vapeur, sera égale à :

$$x' = x - \left(x \frac{1}{13{,}598}\right) = 0{,}926\ x.$$

Ce résultat nous conduit à dire que dans tous les cas, quel que soit le rapport du diamètre des deux branches, la hauteur de graduation $x$ trouvée précédemment, en tenant compte de ce rapport, devra être multipliée par 0,926 pour opérer la correction relative à la colonne d'eau contenue par la première branche.

Ainsi, une atmosphère étant représentée sur l'échelle par $15^c2$, le rapport des diamètres des branches égal à 1 : 2, la hauteur rectifiée par rapport à l'eau devient :

$$x' = 15^c2 \times 0{,}926 = 14^c08.$$

Manomètre a flotteur a haute pression. — Lorsqu'il s'est agi d'appliquer le manomètre à air libre aux machines à haute pression, avec lesquelles la vapeur est susceptible d'atteindre 5 atmosphères et plus, on a cherché des formes plus convenables aux grandes dimensions que l'instrument devait alors avoir, puisque chaque atmosphère de plus est mesurée par une colonne de mercure de 76 centimètres. Cependant, comme on n'employait pas encore les tubes de cristal, dont la transparence permet de faire directement les observations, le flotteur devait être conservé.

Souvent même on se servait du flotteur pour faire agir une sonnerie à la pression limite, et d'autres fois on le reliait au registre de la cheminée pour obtenir automatiquement la règlementation de la pression. Ces ingénieux moyens ne pouvaient pas avoir une réussite complète, à cause de la difficulté de mettre en jeu ces divers mécanismes avec un moteur aussi délicat que les fluctuations d'une colonne de mercure.

L'appareil représenté fig. 40 est le type de manomètre à air libre et à flotteur qui a le plus d'analogie, par sa disposition, avec ceux en cristal employés depuis.

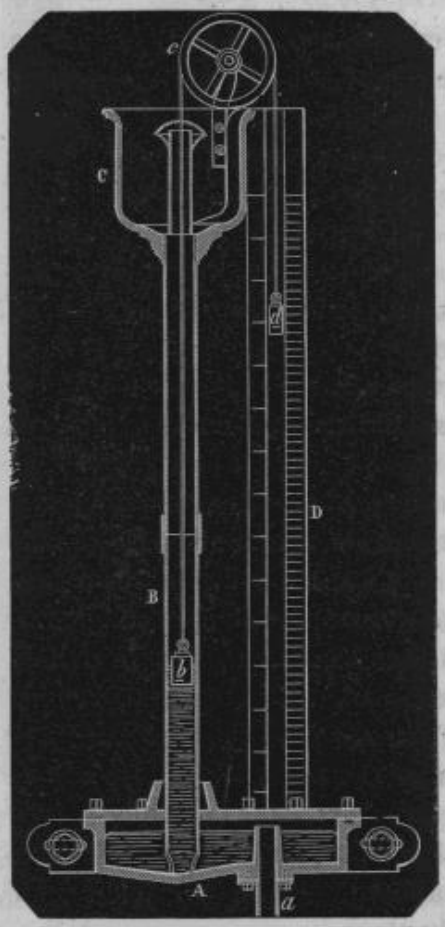
Il se compose d'une cuvette en fonte A, parfaitement close, et à laquelle s'ajuste un tube vertical en fer B qui y pénètre par une garniture bien étanche, et dont l'extrémité supérieure est ouverte à l'air libre. L'ensemble de l'instrument peut

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

être fixé dans un endroit quelconque, peu distant de la chaudière, avec laquelle il est en communication par un tube *a* qui vient s'ajuster à la cuvette en un point où elle est munie d'un ajutage rentrant.

La cuvette contient du mercure qui s'y maintient au même niveau que dans le tube lorsque la pression dans la chaudière est égale à celle de l'atmosphère; on voit, en effet, que la pression intérieure de la chaudière vient s'établir dans la cuvette A, au-dessus du bain de mercure, soit directement par l'air ou la vapeur qu'elle renferme, soit par l'intermédiaire d'une colonne d'eau remplissant le tube de communication *a*.

Fig. 40.




Mais lorsque la pression dans la chaudière augmente, son influence se fait ressentir dans la cuvette sur le mercure qui s'élève alors dans le tube B. L'élévation de la colonne de mercure est indiqueé, comme précédemment, au moyen d'un flotteur *b*, qui est ici suspendu à une chaîne légère passant sur une poulie de renvoi *c*, et à l'autre extrémité de laquelle se trouve suspendu un contre-poids *d*, qui descend le long d'une échelle graduée D.

Afin de prévenir la projection du mercure hors de l'instrument, par suite d'une élévation brusque de la pression, le tube est terminé par une espèce de champignon, et il est garni d'une cuvette C, d'où il résulte que le métal liquide qui serait trop vivement soulevé serait arrêté par le champignon et retomberait dans la cuvette.

Ce tube B doit donc avoir une hauteur correspondant à autant de fois $0^m76$, moins une, que la vapeur doit atteindre d'atmosphères. L'échelle graduée indique ces hauteurs, mais de haut en bas, puisque l'index *d* se meut en sens inverse de la colonne de mercure.

Quant au rapport entre la graduation et les hauteurs réelles de la colonne de mercure au-dessus du niveau dans la cuvette, il se rapproche d'autant plus de l'unité que la section du tube B est plus petite que l'étendue de la surface du mercure dans la cuvette.

En effet, si cette étendue était infinie, le niveau resterait fixe, quel que soit le volume de mercure élevé dans le tube, et l'index *d* se déplacerait sur l'échelle de quantités exactement égales aux accroissements de la hauteur totale de la colonne de mercure. Mais comme cette surface est limitée, le niveau s'abaisse au fur et à mesure que le sommet de la colonne s'élève, d'où il résulte que la graduation subit une modification comme pour l'instrument décrit précédemment.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Toutefois les choses se passent au rebours de la supposition que nous avons faite : c'est le tube qui représente la branche à petite section, tandis que la cuvette représente la grande. Il faut donc modifier en ce sens la formule ci-dessus et déterminer ainsi le coefficient de graduation $x$ :

$$x = h \frac{D^2}{d^2 + D^2}.$$

Supposons, pour exemple, que la surface de la cuvette soit 10 fois la section du tube, par quelle étendue $x$ devra-t on représenter sur l'échelle une élévation de 76 centimètres?

*Solution.* On trouve :

$$x = 76^c \times \frac{100}{1 + 100} = 75^c 24,$$

ce qui démontre que, plus la cuvette sera grande, et plus les divisions de l'échelle se rapprocheront de la valeur des hauteurs qu'elles représentent.

En résumé, sauf le flotteur remplacé par la transparence du tube, ce qui précède est complétement applicable aux manomètres à air libre qui ont été employés depuis et dont nous allons dire quelques mots.

MANOMÈTRES A AIR LIBRE A TUBES DE CRISTAL. — Nous avons dit que, sur la donnée des deux instruments précédemment décrits, on a imaginé divers systèmes de manomètres dans lesquels les tubes métalliques sont remplacés par des tubes en cristal permettant la suppression du flotteur, dont l'agencement mécanique est incompatible avec la délicatesse d'un appareil qui doit être extrêmement précis. Mais une partie des recherches de tous les ingénieurs et physiciens qui se sont occupés de ce sujet a eu aussi pour objet de remédier à l'inconvénient de la grande hauteur d'un manomètre à air libre, qui doit marquer des tensions de quelques atmosphères. Il est évident, en effet, que si l'on n'avait eu recours, dans l'origine, au système à air comprimé, il eût été de toute impossibilité d'adapter un manomètre aux locomotives où la pression s'élève parfois à 6 ou 8 atmosphères, dans lequel cas un manomètre à air libre atteindrait 5 à 6 mètres de hauteur.

Même pour une chaudière fixe, un tube de cristal d'une aussi grande longueur présente peu de sécurité, à cause de sa fragilité. Il faut parfois le former de plusieurs parties réunies, ce qui augmente encore les chances de bris ou de fuites.

Quoi qu'il en soit, le manomètre à air libre a été largement appliqué. Nous ajouterons même que c'est encore à l'aide de cet instrument que l'on gradue les manomètres métalliques modernes, dont la nature ne permet pas de lire avec exactitude la pression qu'ils ressentent si on ne l'a pas notée préalablement au moyen d'un appareil étalon.

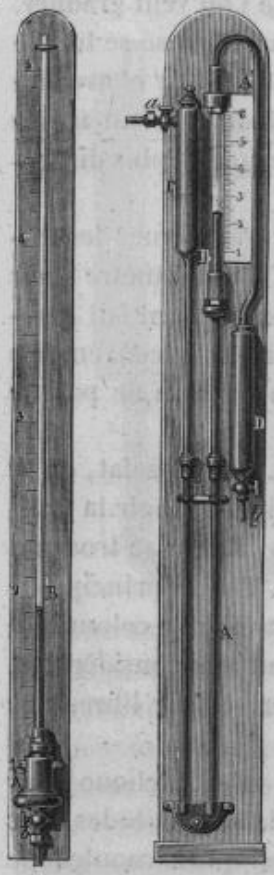
Les figures suivantes, 41 et 42, représentent deux systèmes de manomètres à air libre qui ont reçu de nombreuses applications.

Le premier (fig. 41) est l'appareil le plus simple, et qui a été aussi le plus employé.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il se compose d'un tube en cristal B engagé dans une cuvette en fonte A contenant du mercure. L'ensemble est fixé sur une planche en bois portant la graduation et qui est elle-même posée sur la muraille la plus voisine du générateur.

Fig. 41. Fig. 42.



Par une disposition analogue à ce qui a lieu pour le précédent manomètre, la cuvette A est mise en communication avec lachaudière par un tube *b* qui part de la cuvette, se relève et repasse ordinairement derrière la table du manomètre avant d'atteindre la chaudière. C'est aussi de l'eau que renferme le tube *b* et qui vient transmettre au mercure la pression de la vapeur.

Ce manomètre a donc l'analogie la plus complète avec celui représenté fig. 40, excepté la suppression du flotteur et la lecture directe des hauteurs de colonnes de mercure à travers le cristal. La loi de la graduation est la même, en donnant au tube une section bien inférieure à celle de la cuvette.

L'autre manomètre (fig. 42) a été imaginé par M. Desbordes, suivant une disposition qui a pour but de supprimer les longs tubes de cristal, tout en conservant néanmoins la lecture par transparence qui évite les flotteurs. Comme théorie, on peut lui appliquer entièrement celle du premier instrument ci-dessus (fig. 39).

Il est formé de deux tubes métalliques A qui sont mis en communication, à leur partie inférieure, par une pièce de raccord permettant, tout simplement, d'employer deux tubes droits au lieu d'un seul recourbé en U. L'une des branches de l'appareil, que nous considérons en effet comme un seul tube recourbé, est terminée en haut par un réservoir C muni d'un robinet *a* par lequel s'établit la communication avec la chaudière. L'autre branche se termine par un tube de cristal B de peu de longueur, mais d'un diamètre plus grand que celui du tube A : c'est l'extrémité ouverte à l'air libre ; c'est là que les pressions doivent être lues à l'aide d'une échelle graduée placée tout près du tube.

Cette même partie supérieure est en communication avec un récipient D pour recevoir le mercure qui aurait été projeté au dehors. Un robinet *b* permet de le recueillir. Cet ajustement n'empêche pas de réserver une petite ouverture pour que l'air extérieur établisse sa pression sur le sommet de la colonne.

Le tube A contenant alors du mercure, comme fig. 39, la pression de la vapeur déprime directement ou par de l'eau la colonne dans la première branche et la fait s'élever dans la deuxième. On suit le mouvement du sommet de la colonne dans le tube de cristal B, et les divisions de l'échelle font connaître le degré de pression.

D'après ce qui précède, il est facile de concevoir que le tube métallique ayant la longueur suffisante pour représenter autant de fois 76 centim. qu'il y a d'atmosphères, les mouvements de la colonne auront une étendue aussi réduite qu'on le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

voudra en augmentant à volonté le diamètre du tube de cristal. Nous avons dit comment on calcule la graduation dans cette circonstance; mais ajoutons que, pour plus de sûreté et de précision, on opère cette graduation au moyen d'un manomètre étalon à hauteur de colonnes réelles et auquel on fait supporter simultanément, à l'aide d'une pompe, les mêmes pressions qu'à celui que l'on veut graduer.

Cette description suffit pour faire comprendre comment le but proposé se trouve atteint : conserver les propriétés du manomètre à air libre sans flotteur et avec un tube transparent très-court; mais le peu d'amplitude des divisions le rend moins sensible pour l'œil de l'observateur. Ce système est d'ailleurs beaucoup plus dispendieux que le manomètre formé d'un simple tube de cristal.

Manomètre a air libre de M. Galy-Cazalat. — L'impossibilité d'appliquer les manomètres à air libre aux locomotives, et le désir de remplacer le manomètre à air comprimé dont les indications sont peu sensibles et sujettes à erreur, ont fait chercher un système qui possédât les avantages de l'un sans avoir les inconvénients de l'autre; on s'occupa, en un mot, de créer un manomètre à air libre de peu de hauteur.

Il y a une quinzaine d'années, un physicien bien connu, M. Galy-Cazalat, en fit un qui atteignait les conditions proposées. Pour y parvenir, il faisait agir la pression de la vapeur sur un petit piston à bases inégales, la plus grande se trouvant en relation avec la colonne de mercure indicatrice soulevée. Par le principe de l'égalité de pression transmise par les fluides, il arrivait ainsi, avec une colonne de mercure de peu de hauteur, à équilibrer une pression de vapeur très-considérable. Ainsi, une hauteur de 40 centimètres suffisait pour marquer, à l'air libre, une pression de plusieurs atmosphères.

Mais cette combinaison exigeait des diaphragmes élastiques en caoutchouc pour séparer les milieux reliés par le piston transmetteur, et de là des incertitudes dans les effets, et des causes de réparations fréquentes. Il arrivait aussi que le caoutchouc n'était pas complétement imperméable et laissait communiquer partiellement l'eau avec le mercure. Il est juste de dire que si, à cette époque, on avait eu le caoutchouc dans les conditions de fabrication d'aujourd'hui, on aurait peut-être tiré un meilleur parti de cette ingénieuse invention.

Manomètre a air libre de M. Richard. — Il y a également une quinzaine d'années, M. Richard, habile opticien de Paris, alors résidant à Lyon, a construit un manomètre à air libre, de petite hauteur, auquel il ne manquait que peu de chose pour réussir complétement, et qui se propageait déjà très-rapidement, lorsque parurent les manomètres métalliques devant lesquels tout devait disparaître, à cause de leur plus grande simplicité et du bon marché de leur établissement.

Nous ne pensons pas devoir reproduire entièrement le dessin du manomètre Richard : il nous suffira d'en démontrer le principe.

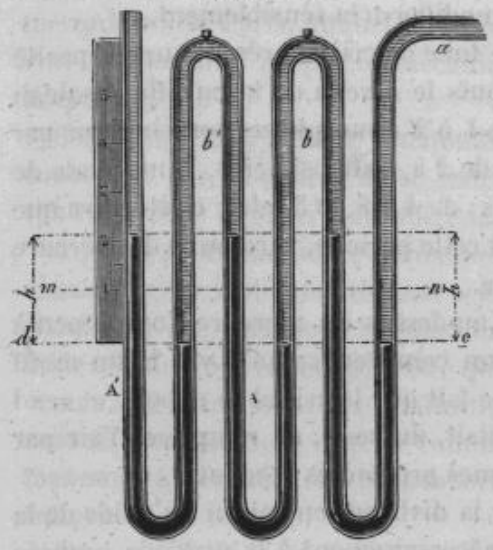
Supposons un tube en fer A, qui se replie plusieurs fois sur lui-même comme l'indique la fig. 43, en communication avec la chaudière par son extrémité $a$, et avec l'atmosphère par sa branche ouverte A′, qui est en cristal pour permettre l'observation. Ce tube contient du mercure qui se met de niveau, suivant $m$-$n$, dans

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

toutes les branches, et les parties supérieures $b$, $b'$, sont complétement remplies d'eau.

Si, dans cette situation, on établit la communication avec la chaudière, la pression déprimera la colonne de mercure d'une certaine quantité qui déterminera une dénivellation totale $h$ dans la branche suivante; mais, par l'intermédiaire de l'eau, cet effet se répercutera dans chacune des branches en abaissant et en soulevant alternativement les colonnes de mercure; celle de la branche A′ s'élèvera de la même hauteur $h$ qui pourra y être observée, puisque cette dernière branche est en cristal.

Fig. 43.




Il ne s'agit plus que de se rendre compte du chiffre de la pression qui a produit le déplacement du mercure exprimé par cette hauteur $h$ dans la branche où on l'observe, ainsi que dans les autres, deux à deux.

Pour cela, il suffit de remarquer qu'en se soulevant, la deuxième colonne repousse la troisième d'une même quantité, ce qui détermine une même élévation dans la suivante, etc. Par conséquent, chaque sommet de colonne devient une surface libre qui supporte la somme de toutes les élévations de colonnes dans les branches qui le suivent : d'où, en résumé, la pression sur le premier sommet, dans la branche $a$, est égale à la somme de toutes les hauteurs $h$ au-dessus de $c$-$d$ dans toutes les branches de l'instrument.

En vertu de ce principe, il devient très-facile de réduire à volonté l'étendue des accroissements de hauteur dans la branche indicatrice A′, puisqu'il suffit de multiplier le nombre des doubles replis du tube.

Si, par exemple, on veut que chaque atmosphère soit représentée par une hauteur de mercure de 76 millimètres, l'instrument devra se composer de 20 branches, d'où 10 atmosphères n'exigeront pas une échelle plus étendue que pour une seule. Mais l'instrument devra posséder la même hauteur au-dessus de la ligne de niveau pour correspondre à cette indication.

En d'autres termes, les pressions exprimées en colonne de mercure, que ce manomètre permet d'observer, sont égales à la moitié de sa hauteur multipliée par la moitié du nombre de ses branches : soit la moitié du produit de sa hauteur entière par le nombre total de branches simples. Bien entendu qu'une correction est à faire pour le poids des colonnes d'eau, ainsi que nous l'avons vu précédemment.

Tel est, en principe, l'appareil Richard, mais qui diffère essentiellement par la forme, en ce que les replis du tube A sont disposés les uns sur les autres comme les spires d'un serpentin ordinaire, au lieu d'être développés sur un même plan, ainsi que nous l'avons admis pour la figure de principe.

MANOMÈTRE A AIR COMPRIMÉ. — Nous ne parlerons ici de ce système de manomètre

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

que pour en examiner les défauts; on a déjà vu, dans les notions préliminaires (fig. 4), sur quel principe sa construction repose.

Sans compter d'abord les causes qui altéraient sa précision, on a pu remarquer que la graduation devenait justement de moins en moins sensible au fur et à mesure que la pression de la vapeur atteignait au contraire la période où quelques degrés de plus ou de moins suffisent pour la modifier très-sensiblement.

Si nous admettons, comme exemple, que le tube de cristal présente une capacité cylindrique de 60 centimètres de hauteur depuis le niveau de la cuvette jusqu'au sommet fermé, le premier accroissement de 1 à 2 atmosphères sera indiqué par une colonne de mercure de 30 centimètres; de 2 à 4 atmosphères, l'amplitude de cette hauteur n'aura plus que 15 centimètres; de 4 à 8, 7c5, etc.; c'est-à-dire que pour un accroissement de 1 atmosphère, dans cette période, la colonne de mercure ne s'élève pas de plus de 1 1/2 ou 1 centimètre.

Si nous ajoutons à cela que l'air confiné au-dessus du mercure l'oxyde peu à peu et diminue par conséquent de volume, on comprendra qu'il y a là un motif grave de dérangement; et puis la même cause fait que le cristal se dépolit et rend difficile la lecture des indications. On conseillait, du reste, de remplacer l'air par de l'hydrogène pur qui ne possède pas les mêmes propriétés oxydantes.

Il existait aussi une difficulté pour corriger la division, en raison du poids de la colonne de mercure soulevée qui s'ajoutait nécessairement à la pression accusée par la réduction du volume d'air dans le manomètre. Pour obvier à ce dernier inconvénient, on a aussi essayé de placer le tube horizontalement, ce qui annule le poids du mercure, qui n'agit plus que comme un simple piston foulant.

Cependant, malgré ces défauts, il fallait bien faire usage de cet instrument, puisqu'on n'en possédait pas d'autres dans des circonstances où le manomètre à air libre n'était pas applicable par sa grande étendue et sa fragilité. Il était déjà remplacé, néanmoins, par le manomètre Richard, lorsque ce dernier le fut à son tour par les manomètres métalliques que nous allons faire connaître.

### MANOMÈTRES MÉTALLIQUES

L'idée de remplacer les instruments fonctionnant par le principe de l'équilibre des fluides, pour mesurer la pression des gaz, n'est pas absolument nouvelle; mais ce n'est que depuis peu d'années que l'on est réellement parvenu à y substituer les appareils métalliques.

L'ingénieur français Conté avait bien imaginé, il y a environ un demi-siècle, de construire un baromètre qui avait pour principe la flexion d'une paroi mince, et dont l'aspect rappelait à peu près celui d'une montre; mais son invention est restée sans usage jusqu'au moment où M. Vidi, avocat français, a mis au jour les baromètres dits *anéroïdes*, qui consistent aussi dans une boîte ronde, dans laquelle on fait le vide, et dont la paroi supérieure est mince et fléchissante, fonction qui est favorisée par une certaine ondulation du métal; un mécanisme disposé pour mesu-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rer sa flexion, sous l'influence des variations atmosphériques, permet d'en déterminer l'intensité.

Cependant, rien encore ne paraissait qui fût capable de servir à mesurer utilement la pression de la vapeur. Cette grande innovation ne fut faite que vers 1849, en Allemagne, par M. Schirnz, et en France, par M. Eugène Bourdon, ingénieur-mécanicien de Paris, auquel le hasard peut-être, ou plutôt l'esprit d'observation, vint révéler une propriété mécanique jusqu'alors inconnue, ou mieux, restée inaperçue.

Cette propriété, c'est le phénomène que présente un tube, non cylindrique et contourné sur lui-même, de se redresser si l'on augmente la pression à son intérieur, et de se courber davantage, au contraire, quand on diminue cette pression.

A partir de ce moment, le manomètre métallique fut créé; car on pouvait ainsi construire des instruments aussi sensibles que suffisamment résistants, et capables d'indiquer des variations de pressions très-étendues, avec une amplitude considérable. Néanmoins à cet appareil, qui ne paraissait pas susceptible de rivaux, est venu s'adjoindre, dans les applications, le manomètre à lame simple, fléchissant sous la pression de la vapeur comme celle d'un dynamomètre ordinaire : c'est le manomètre que construit M. Desbordes, et qui trouve aussi de nombreuses applications.

Nous allons décrire successivement ces deux systèmes, qui sont aujourd'hui universellement répandus et autorisés dans tous les pays du monde.

## MANOMÈTRES MÉTALLIQUES A TUBE

Par **M. E. BOURDON**

(FIG. 1 A 3, PL. 7)

Si l'on prend un tube dont la section transversale soit une ellipse, ou à peu près, et que l'on vienne à augmenter la pression du fluide liquide ou gazeux qu'il renferme, il tendra *à se mettre au rond*, et, de plus, si ce tube est contourné au lieu d'être droit, il tendra en même temps à se redresser. Ajoutons encore qu'une cause contraire produira l'effet inverse, c'est-à-dire que si la pression intérieure dans le tube aplati diminue, il s'aplatira davantage, et sa courbure générale augmentera.

Là réside complétement le principe du manomètre de M. Bourdon, ainsi que nous l'avons dit ci-dessus. Armons le tube en question d'un organe indicateur capable de faire connaître la valeur de ses mouvements pour toutes les pressions différentes qu'on lui fait subir, et nous aurons en définitive l'instrument complet.

Les fig. 1 et 2, de la pl. 7, représentent, en coupes transversale et longitudinale, la disposition la plus usuelle de ce manomètre, qui peut évidemment en affecter de bien différentes.

Il est formé d'une boîte ovale A dans laquelle se trouve disposé le tube B indicateur de pression. Ce tube, dont la section n'est pas tout à fait une ellipse, est con-



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tourné circulairement de façon à former un tour et demi d'hélice. Son extrémité inférieure est exactement rattachée à un petit ajutage *a*, qui lui-même fait partie d'un robinet C auquel s'adapte le tube *b* venant de la chaudière; l'autre extrémité du tube manométrique B, qui est libre, est parfaitement close et porte une aiguille *c* disposée pour suivre les divisions d'un cadran *d*, fixé à l'intérieur de la boîte. Celle-ci porte évidemment sur sa face une ouverture circulaire vitrée pour permettre de suivre les mouvements de l'aiguille.

La mise en rapport de cet instrument avec la chaudière se fait ainsi par le conduit *b*, qui permet à la vapeur d'établir sa pression à l'intérieur du tube B, soit directement, soit par une colonne d'eau, ce qui vaut mieux.

Le tube ayant été établi et clos sous la pression atmosphérique, la position correspondante de l'aiguille *c* sur la division est le chiffre 1, c'est-à-dire qu'elle conservera cette position, le générateur au repos ou en marche, tant que la vapeur ne dépassera pas cette pression. Mais au fur et à mesure que celle-ci augmente, elle se manifeste à l'intérieur du tube B, tend à ramener sa section au rond, et par conséquent à le faire se développer suivant un cercle d'un diamètre plus grand que celui qu'il possédait lorsqu'il a été fermé sous la pression atmosphérique. C'est en vertu de ce mouvement que l'aiguille *c*, qui appartient à l'extrémité libre du tube, se déplace et s'avance successivement sur le cadran en même temps que la pression s'élève dans le générateur et par suite dans le tube.

La fig. 3, qui représente le manomètre vu extérieurement, indique aussi une légère addition que lui apporte le constructeur quand on veut qu'il accuse un maximum, c'est-à-dire qu'il conserve la trace de la plus haute pression à laquelle le générateur aura marché dans une limite de temps déterminée.

C'est simplement une aiguille folle *e*, montée sur une fusée *f*, dans la paroi antérieure de la boîte, et qui porte une goupille transversale que l'aiguille principale rencontre lorsqu'elle vient à se croiser avec elle. Il est évident que l'aiguille folle doit s'avancer tant que l'autre la pousse en allant de la plus faible à la plus haute pression ; mais elle n'est pas entraînée en sens contraire et reste, par conséquent, au chiffre le plus élevé où l'aiguille *c* est parvenue. Lorsque la personne chargée de cette constatation l'a faite, elle remet l'aiguille *e* à sa place par la fusée *f*, qui est ordinairement recouverte d'une garde fixée par un cadenas *g*.

Ce système de manomètre se prête très-bien à la mesure de très-hautes pressions, jusqu'à 20 atmosphères, par exemple, sans parler des applications qui en ont été faites aux presses hydrauliques, où la pression atteint ordinairement plusieurs centaines d'atmosphères. Mais il est évident qu'il reçoit alors dans ce cas des modifications particulières qui consistent, en principe, à disposer plusieurs tubes les uns dans les autres pour en augmenter la résistance.

Dans les limites ordinaires, jusqu'à 20 atmosphères environ, il faut seulement donner au tube des proportions convenables pour que le métal conserve parfaitement son élasticité et reprenne exactement sa position du point de départ après qu'il a fléchi sous une forte pression. Quant à la graduation, elle se fait au moyen d'un manomètre étalon, à air libre et à mercure.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il serait presque inutile d'insister davantage pour faire comprendre la supériorité pratique de cet instrument sur les manomètres à mercure qui sont si susceptibles de se briser, et dont les dimensions rendent le plus souvent l'application impossible. Celui-ci avait, du reste, sa place toute trouvée chaque fois qu'il s'agissait de hautes pressions où le manomètre à air libre devait être lui-même remplacé par celui à air comprimé.

Aujourd'hui, le manomètre Bourdon est très-généralement répandu, et rend de véritables services. Le temps qui s'est écoulé depuis ses premières applications permet de reconnaître que sa précision n'est pas éphémère et qu'elle se conserve, au contraire, malgré un travail constant et longuement prolongé.

Manomètre métallique étalon (fig. 4 et 5, pl. 7). — Sous l'initiative de M. Bourgarel, garde-mines délégué dans le département de la Seine, pour la surveillance et la réception des appareils à vapeur, le manomètre de M. Bourdon a été appliqué aux expériences ayant pour but l'essai et la réception légale des générateurs ou autres appareils destinés à fonctionner sous de hautes pressions. On sait que ce genre d'essai se fait à l'aide d'une pompe qui refoule de l'eau dans le récipient en expérience, jusqu'à une pression voulue que l'on doit mesurer exactement.

Au lieu de la soupape de sûreté ordinaire qui remplissait cette fonction, on fait usage maintenant d'un manomètre métallique qui peut s'adapter très-simplement sur l'appareil soumis à l'essai. Tout en pouvant marquer avec précision des pressions de 20 atmosphères cet instrument est assez petit pour qu'il puisse se loger dans un étui que l'on met dans la poche afin de le transporter aisément aux endroits où une expérience est requise.

La fig. 4 représente cet instrument, à moitié de sa grandeur d'exécution, en vue extérieure, et la fig. 5, en coupe transversale passant par son axe.

Le principe de la disposition du tube indicateur B est tout à fait le même que ci-dessus, mais la traduction des mouvements par l'aiguille est un peu différente, attendu que le tube n'a qu'un seul tour et que ses mouvements doivent être très-amplifiés pour être sensibles.

Pour cela, l'aiguille indicatrice $c$ est montée sur un centre fixe d'oscillation, en $e$, comme un levier du premier genre dont les branches sont très-inégales de longueur; la plus courte se rattache alors à l'extrémité libre du tube B par l'intermédiaire d'une petite bielle $f$, et lorsque ce tube B s'ouvre, il entraîne ainsi l'aiguille. Mais comme la grande branche de celle-ci a environ 6 fois la longueur de la petite, un léger mouvement du tube en produit un très-sensible à l'extrémité de l'aiguille, ce qui permet de donner au cadran $d$ une assez grande étendue.

Comme construction générale, c'est une boîte circulaire A en métal, fermée de même qu'une montre, à l'aide d'un verre épais D, serti dans un cercle ouvrant à charnière. La boîte est fondue avec une tubulure $a$ percée du petit canal $b$ qui doit établir la communication du liquide refoulé avec l'intérieur du tube B. Cette tubulure est terminée par une bride plate par laquelle on peut fixer le manomètre au moyen de petites presses en fer sur une partie correspondante de l'appareil en essai. Ce mode convient mieux qu'un taraudage qu'il serait difficile de faire raccorder partout.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

INDICATEUR DE VIDE (fig. 12 et 13, pl. 7). — Lorsqu'il s'agit de mesurer des pressions inférieures à celle de l'atmosphère, l'instrument prend le nom *d'indicateur de vide;* sa construction est celle indiquée par les fig. 12 et 13 de la pl. 7, qui en sont une vue de face, le cadran et l'aiguille enlevés, et une coupe transversale.

Le tube B a ses deux extrémités closes, et sa communication avec le récipient a lieu par le milieu de sa longueur où il est soudé au raccord *a* du robinet C.

Ces deux extrémités du tube B, qui sont alors libres, sont reliées par les petites bielles *f* à un levier simple *i*, monté par son centre sur un axe horizontal *e* qui porte également fixé avec lui un secteur denté *g*. Ce dernier engrène avec un petit pignon *h* monté sur le même axe que l'aiguille indicatrice *c*, qui répète ainsi, en les amplifiant beaucoup, les mouvements des extrémités du tube B.

Pour établir la graduation de cet instrument, il faut, lorsque le tube B est plein d'air atmosphérique, placer l'aiguille à un point de départ que l'on désigne par le chiffre indiquant la valeur en millimètres de la pression atmosphérique observée au baromètre au moment de l'expérience, puis ensuite faire le vide dans le tube aussi parfaitement que possible. La pression diminuant à l'intérieur du tube B, ses extrémités se rapprochent, par la même raison qu'elles s'écartent quand la pression augmente, et l'aiguille *c* s'éloigne du point de départ. Lorsque le vide est obtenu, on marque zéro au point où l'aiguille s'est arrêtée, et il ne reste plus qu'à tracer les divisions, entre les points de départ et d'arrivée, en centimètres ou en fractions d'atmosphères, suivant le cas.

Sur la fig. 12, l'indicateur est représenté dans la position qu'occupent les pièces sous la pression atmosphérique, les extrémités du tube B à leur maximum d'écartement.

Pour les machines à vapeur, l'indicateur de vide est mis en communication avec l'appareil de condensation qui, lorsqu'il fonctionne, doit posséder une pression intérieure bien plus faible que celle de l'atmosphère. Hors de l'état de marche, l'appareil est plein d'air et l'indicateur marque la pression atmosphérique. Mais aussitôt que la machine a marché, le vide s'y fait en partie, et l'aiguille de l'indicateur se met en mouvement pour se rapprocher de zéro.

Il est aisé de comprendre que cet instrument a donné lieu à une application très-intéressante, c'est-à-dire le véritable *baromètre métallique,* qui remplace avec un grand avantage aujourd'hui, dans les usages de la vie, le baromètre à mercure ordinaire.

On emploie également pour les machines à vapeur l'indicateur de vide à mercure, qui est aussi sensible que le précédent, mais bien plus fragile. C'est exactement le même instrument que celui appliqué aux machines pneumatiques pour déterminer le degré du vide obtenu.

C'est tout simplement un tube A contourné en siphon, fig. 44, l'extrémité supérieure fermée et l'autre ouverte, communiquant avec le récipient dans lequel on observe le degré du vide.

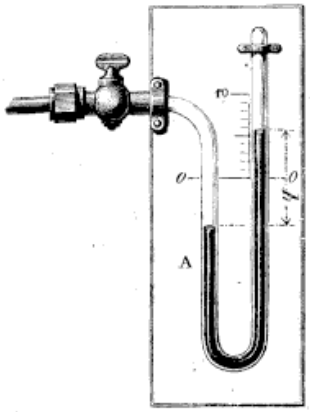
Le tube A renferme du mercure qui a dû y être introduit sans qu'il reste d'air dans la branche fermée. Par conséquent, si cette branche est plus haute que 76 centimètres, il n'y existe que le vide parfait au-dessus de la colonne de mercure comme

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dans le baromètre, et si elle est d'une hauteur moindre, le mercure la remplit complétement lorsque la branche ouverte communique avec l'atmosphère.

Mais si le vide se fait dans le récipient en rapport avec la branche ouverte, la colonne de mercure soulevée dans la branche fermée devient trop lourde, et elle s'abaisse tandis que celle de l'autre branche s'élève. Enfin si le vide est obtenu dans le récipient, les colonnes de mercure se mettent exactement de niveau dans les deux branches.

Fig. 44.




La graduation de l'instrument est faite sur la planchette même où le tube se trouve fixé; son point de départ est zéro, qui correspond au niveau égal du mercure dans les deux branches ou au vide parfait. Au-dessus de zéro, l'échelle est divisée en centimètres d'une étendue moitié de la grandeur réelle, si les deux branches sont égales en section, pour le même motif que celui exposé plus haut (p. 237), à propos du premier manomètre à air libre. Par conséquent, la colonne de mercure, dans la grande branche, marque au-dessus de zéro autant de fois 5 millimètres que la dénivellation totale $h$ a de centimètres.

Comme dans l'application de cet instrument aux appareils de condensation, on n'observe le degré de vide que 10 centimètres au maximum au-dessus de zéro, il est inutile de lui donner une grande hauteur; il suffit que la branche fermée ait 10 à 12 centimètres au-dessus de zéro, tandis qu'il lui en faudrait au moins 38, si l'on voulait observer l'abaissement de la pression depuis celle de l'atmosphère.

L'indicateur métallique a donc sur celui-ci l'avantage de marquer depuis la pression atmosphérique jusqu'à zéro sans plus de complication. De plus l'indicateur à mercure, outre sa fragilité, a aussi l'inconvénient d'osciller continuellement sous l'influence de l'action intermittente de la pompe employée à faire le vide ou à l'entretenir, ce qui rend plus difficile la lecture de ses indications.

## MANOMÈTRES A LAME MÉTALLIQUE

Par **M. DESBORDES**

(FIG. 6 A 9, PL. 7)

Le manomètre de M. Desbordes a pour principe un ressort métallique qui fléchit sous la pression du fluide que l'on observe, et dont on mesure les flexions.

Les particularités de sa construction résident dans les moyens de mesurer ces flexions avec toute la précision désirable, et d'établir convenablement la relation entre le fluide pressant et le ressort fléchissant.

La disposition en usage est celle représentée, comme ensemble, par les fig. 6 et 7, et comme détail, par les fig. 8 et 9.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les fig. 6 et 7, qui représentent ce manomètre en coupes verticale et horizontale, montrent qu'il est composé d'une boîte métallique A de forme circulaire, dans laquelle s'ajuste une platine B qui porte le mécanisme complet.

L'organe principal est la lame d'acier C qui est fixée aux talons *a* de la platine, et qui doit fléchir sous la pression du fluide, soit de la vapeur.

On établit la relation entre la vapeur et la lame par une tige cylindrique D, dont la tête, d'un diamètre plus grand que le corps, se présente vis-à-vis le tube *b* qui communique avec le générateur, et est en effet poussé comme le serait un piston. Seulement, pour éviter les fuites, cette pression a lieu par l'intermédiaire d'une membrane en caoutchouc *c*, qui est prise entre les pièces de raccord E et E′, et constitue une cloison étanche, mais flexible.

La lame C, en fléchissant, agit contre l'une des branches d'un secteur en équerre F, dont la denture correspond à un petit pignon G monté sur le même axe *d* que l'aiguille indicatrice *e*. Celle-ci tourne alors, et la valeur de ses mouvements peut être appréciée à l'aide des divisions exécutées sur le cadran *f*.

Tous les détails de ce mécanisme peuvent être parfaitement compris en examinant particulièrement les fig. 8 et 9, qui le représentent en grandeur d'exécution.

On y voit très-bien la forme du secteur F, remarquable surtout par sa branche en contact avec la lame. Cette branche est tout justement taillée en forme de camme, de façon à être toujours attaquée dans les mêmes conditions, quels que soient les changements de position que les flexions de la lame font prendre au secteur qui tourne sur un centre fixe en *g*.

Mais, soit pour favoriser les mouvements de retour, soit pour équilibrer le poids des pièces susceptibles de se mouvoir, soit enfin, et surtout pour assurer le contact parfait et continu de la camme avec la lame C, on a disposé un ressort léger H qui presse continuellement contre une goupille *i* (fig. 9), implantée dans le secteur F, et oblige ce dernier à revenir sur lui-même chaque fois que la lame C se redresse par l'effet d'un abaissement de pression.

Comme ensemble, ce manomètre est d'une construction assez analogue à quelques-uns des appareils décrits précédemment.

La boîte est close au moyen d'un couvercle à verre I qui permet d'apercevoir le cadran *f* monté entre lui et le mécanisme. Le cadran est lui-même percé, à son centre, d'une ouverture circulaire pour le passage de l'aiguille, et qui est assez grande pour laisser voir et examiner le mécanisme.

Quant à la graduation, elle se fait comme pour tous les instruments analogues qui ne fonctionnent pas par le principe direct de la pesanteur, c'est-à-dire au moyen d'un appareil étalon.

Ce manomètre à lame simple est peu coûteux, facilement réparable ; les flexions, relativement considérables de la lame, quant à son degré d'élasticité, sont assez faibles néanmoins pour exiger un mécanisme amplifiant qui n'indique avec précision qu'autant que l'usure ne s'y est pas encore trop fait sentir.

Manomètre a diaphragme (fig. 10 et 11, pl. 7). — M. Desbordes a construit, d'après MM. Schœffer et Budenberg, constructeurs en Allemagne, un manomètre dans lequel

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la séparation entre le manomètre et le récipient de la pression est opérée au moyen d'un disque circulaire en métal dont la flexion peut être aussi utilisée comme indice de la pression. D'ailleurs, pour rendre cette flexion plus facile et plus manifeste, le disque présente des ondulations circulaires qui permettent en effet une plus grande extension de son étendue.

La fig. 10 de la pl. 7 pourra donner une idée de ce manomètre, dont la construction diffère peu de celui décrit précédemment.

Le mécanisme étant renfermé, comme ci-dessus, dans une boîte A, la pression que l'on veut estimer s'exerce directement sur le disque métallique ondulé C, dont la fig. 11 est une projection horizontale particulière. Ce disque est pincé entre deux boîtes E et E′, montées à vis et dépendant, l'une de la boîte A et l'autre du raccord appartenant au tube d'arrivée *b*. Il constitue donc une fermeture absolue entre les deux parties comme cela a lieu dans l'appareil précédent au moyen de la rondelle de caoutchouc *c* (fig. 6).

Mais, outre que les flexions de ce disque pourraient être utilisées directement pour mesurer la pression, une lame fléchissante B lui est superposée et reliée avec lui par le premier organe de transmission. La relation, entre la flexion commune du disque C, de la lame B et de l'aiguille *e*, est établie à l'aide du pignon G et du secteur F, lequel est attaqué, par un mouvement d'équerre, par une tige *d*, assemblée à rotule sphérique dans une crapaudine *a* soudée avec la lame B; cette petite tige est elle-même surmontée d'une tête *f* articulée avec le secteur F.

Pyromètre (fig. 14, pl. 7). — M. Desbordes s'est aussi fait le propagateur d'un instrument destiné à mesurer pratiquement les températures plus élevées que celles ordinairement appréciables à l'aide du thermomètre à mercure, instrument qui peut être, du reste, considéré comme très-délicat et fragile pour un emploi journalier dans une manufacture.

A vrai dire, quant au sujet qui nous occupe, le thermomètre n'est pas un instrument dont le besoin se fasse vraiment ressentir pour les machines à vapeur, surtout depuis que l'on possède des manomètres à haute pression d'une application facile, et avant lesquels on avait recours aux thermomètres ou plutôt à des *thermomanomètres,* faute de bons indicateurs de pression.

Cependant, nous ferons remarquer que l'on ne néglige la question de température dans l'emploi de la vapeur qu'autant que l'on peut compter sur sa relation exacte avec la pression, qui devient alors par induction l'indice de sa température. Mais admettons, pour un instant, qu'il puisse exister un doute, dans de certaines limites, et l'indicateur direct des températures pourra devenir utile.

En effet, nous avons supposé l'emploi de la vapeur surchauffée, dans lequel cas on sort de la loi ordinaire de la relation entre les pressions et températures des vapeurs au maximum de force élastique, pour rentrer dans la question des gaz permanents dont la dilatation peut être proportionnelle à l'élévation de température. C'est donc parce que nous pouvons entrevoir une application utile d'un thermomètre quelconque aux moteurs à vapeur, que nous ferons figurer celui-ci dans l'énumération actuelle des appareils d'observation et de sûreté.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Connaissant le principe de la dilatation des métaux par la chaleur, et de l'inégalité de cette dilatation pour des métaux différents, le pyromètre dont nous nous occupons sera facilement compris.

Deux tiges creuses C et D, fer et cuivre, sont ajustées exactement l'une dans l'autre, le cuivre en dedans. Toutes deux ont leurs extrémités inférieures reliées invariablement, tandis qu'à l'extrémité opposée, la tige de fer est rigoureusement réunie à une boîte à cadran A, et la tige de cuivre est, au contraire, libre; mais elle est en rapport, par une tringle *a*, avec un mécanisme complétement identique à celui du manomètre à diaphragme ci-dessus décrit (fig. 10).

Or, si l'on introduit la tige mixte CD dans un certain milieu, à une température élevée, les deux tubes qui la composent se dilatent; mais celui D, en cuivre, se dilate plus que l'autre; et s'ils sont réunis par une extrémité, l'excès de longueur doit se manifester par l'autre.

C'est, en effet, ce qui se produit. Le tube D, en s'allongeant, repousse par son extrémité libre la tige *a* qui s'y ajuste exactement par une tête *b* d'un égal diamètre; cette tige met alors en mouvement le mécanisme de l'aiguille, laquelle indique sur un cadran la température correspondante. Nous supposons évidemment que ces températures ont été déterminées par comparaison à l'aide d'un appareil étalon.

Tel est ce pyromètre, dont laf orme convenable et solide en permet l'application sans danger. Quant à sa sensibilité, nous avons lieu de croire qu'elle est suffisante, puisque nous avons nous-même obtenu des mouvements de l'aiguille par la seule chaleur des mains, en étreignant la tige C, d'un instrument dont la graduation s'étendait jusqu'à près de 300 degrés centigrades.

Ce qui précède suffit probablement pour faire connaître aux personnes qui consulteront ce traité les principes généraux des manomètres actuellement en usage.

Nous allons maintenant décrire les appareils destinés à observer le niveau d'eau dans les générateurs, et à prévenir les irrégularités et l'insuffisance de l'alimentation.

## NIVEAU D'EAU ET FLOTTEURS A SIFFLET

(PLANCHE 8)

A part le niveau d'eau simple, à tube de cristal, les autres appareils de sûreté sont le plus souvent rassemblés en groupe, de façon à n'exiger pour eux tous qu'une seule ouverture dans la paroi du générateur, ou au moins pour en diminuer le nombre; car si l'on observe strictement les règlements administratifs, il faut au moins deux soupapes de sûreté pour un seul générateur, et placées à des extrémités différentes. Mais si l'on réunit, par exemple, à l'une de ces soupapes, le flotteur et le manomètre, une seule ouverture suffira pour ces trois appareils.

C'est en effet ce que montrent les fig. 3, 5, 10 et 14, de la pl. 8, qui représentent *des groupes* disposés d'après cette pensée.

Nous décrirons séparément, pour en faire voir les particularités, ces divers appa-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

reils dont les détails sont déjà connus par ce qui a été dit dès le commencement de cette section. (*Voy.* Générateur type, p. 118.)

Quant aux soupapes de sûreté, elles feront l'objet d'un article séparé, à cause des conditions rigoureuses spéciales qu'elles doivent remplir.

## NIVEAU D'EAU A TUBE DE CRISTAL

(FIG. 1 ET 2, PL. 8)

L'appareil représenté par ces figures est le modèle de la maison Thiébault, de Paris, perfectionné en vue de son application aux machines locomotives, mais qui convient également bien aux générateurs fixes.

Nous avons dit qu'un instrument de ce genre se compose principalement d'un tube en cristal A, retenu solidement entre deux tubulures à raccord en bronze, B et B′, qui communiquent avec le générateur au-dessus et au-dessous du niveau d'eau normal.

La tubulure supérieure B est percée d'outre en outre d'un trou cylindrique *a* pour l'arrivée de la vapeur, qui peut être interceptée au besoin à l'aide du robinet *b*. Un bouchon à vis *c* permet, en le retirant, de déboucher le conduit s'il se trouvait obstrué accidentellement par des dépôts d'une nature quelconque. Ici la même pièce B est munie d'une autre tubulure vissée C, avec un robinet *d*, pour l'application d'un manomètre, ce qui ne se fait pas avec les générateurs fixes, pour lesquels on est beaucoup moins gêné qu'avec les locomotives, pour affecter une prise spéciale à cet usage.

Le raccordement du tube A avec la pièce B se fait au moyen d'une garniture d'étoupe, disposée de la même façon que dans toute autre circonstance analogue, c'est-à-dire avec un presse-étoupe *e*, serré en place à l'aide d'un écrou *f* vissé sur la partie extérieure de la portée venue de fonte avec la tubulure B.

La tubulure inférieure B′ est construite d'une façon identique à la précédente, quant à l'assemblage du tube A et à sa relation avec la chaudière. On remarque seulement le robinet D qui s'y trouve vissé et qui est destiné à vider l'appareil lorsqu'il y a lieu de le faire. D'après cela, le montage complet du tube A et sa communication avec le générateur sont entièrement expliqués.

Quant à la fonction de l'instrument, elle s'explique d'elle-même en considérant qu'il est en parfaite communication avec les deux parties du générateur, et le milieu de la hauteur du tube correspondant à la hauteur de la surface de l'eau dans l'intérieur. Il est évident que le même niveau doit s'y établir, puisque la pression de la vapeur s'y exerce comme dans la chaudière.

L'observation du niveau se fait le plus souvent à vue, c'est-à-dire que l'on reconnaît simplement s'il correspond à peu près à la moitié de la hauteur du tube. Mais dans le cas actuel, pour une locomotive où le niveau doit être maintenu avec exactitude, à cause de la disposition du foyer, on y a joint une échelle E, divisée en centimètres, pour faire cette observation avec plus de précision.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il reste à mentionner un organe aussi ingénieux qu'indispensable pour atténuer les accidents susceptibles d'arriver par le fait de la rupture du tube de cristal. C'est un petit clapet $g$, ménagé dans la tubulure inférieure B′, qui est d'ordinaire flottant quand l'appareil fonctionne régulièrement, mais qui vient de lui-même s'appliquer sur son siége dans la circonstance suivante :

Si le tube vient à casser, l'eau et la vapeur s'échappent avec violence, et on ne peut en arrêter l'effusion qu'en fermant les robinets $b$ et $b'$. Mais cette opération est, sinon impossible, du moins très-dangereuse, surtout à cause de l'eau bouillante. A l'aide du clapet $g$, les choses n'ont pas lieu ainsi. Aussitôt le bris du tube, la pression de la vapeur dans la partie inférieure n'ayant plus lieu que de bas en haut, le clapet $g$ est enlevé, vient s'appliquer sur son siége et arrête le courant d'eau bouillante.

On peut alors, avec plus de sécurité, s'approcher et fermer les robinets $b$ et $b'$ pour opérer le remplacement du tube.

Le remplacement du tube brisé doit se faire avec rapidité et, évidemment, sans qu'il soit nécessaire de démonter les tubulures de communication B et B′. Il suffit ici de démonter le robinet supérieur C dont l'ouverture du taraudage est d'un diamètre un peu plus grand que celui du tube, que l'on introduit en effet par cette ouverture, après avoir préalablement desserré les écrous $f$ et $f'$ qui compriment l'étoupe des garnitures.

Une fois le nouveau tube mis en place, on refait les garnitures, on repose le robinet C, puis, en rouvrant les robinets $b$ et $b'$, l'instrument fonctionne de nouveau.

L'indicateur de niveau à tube de verre est devenu obligatoire par les règlements administratifs, qui exigent que cette observation du niveau de l'eau soit directe et non pas une simple déduction. Cependant, cet appareil, qui n'est pas toujours aussi bien établi que celui dont nous venons de donner le dessin et la description, est loin d'être sans inconvénients. D'abord il arrive un moment où le verre se dépolit par l'effet des dépôts calcaires, d'où il s'ensuit que ses indications deviennent difficiles à lire. Mais la rupture du tube est aussi un accident fréquent, et qui peut devenir terrible pour les personnes qui en sont proches, surtout s'il n'existe pas de clapet de retenue. De toute façon, il faut le remplacer, opération qui, si simple qu'elle puisse être, exige un certain temps.

D'ailleurs, il peut arriver un fait d'une autre nature, et non moins susceptible d'accident, c'est que l'une des communications $a$ ou $a'$ se bouche. Si c'est celle $a$, correspondant à la vapeur, le niveau de l'eau s'élève au fur et à mesure que la vapeur contenue dans le tube se condense, n'étant plus en communication avec la chaudière : on peut croire alors, pendant un instant, qu'il y a trop d'eau envoyée par la pompe alimentaire et arrêter celle-ci. Si c'est le conduit $a'$ qui se bouche, ce qui est plus probable à cause de l'impureté des eaux, l'eau du tube reste fixe, et cesse d'indiquer ce qui se passe dans le générateur avec lequel elle n'est plus en rapport. Dans les deux cas, on peut se reposer dans une sécurité trompeuse et en être victime.

C'est en raison de ces inconvénients que les ingénieurs, qui les connaissaient

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

très-bien et qui ont préparé les règlements administratifs, ont prescrit l'adjonction du flotteur à sifflet qui sert à corriger les indications éventuellement fausses du niveau à tube de cristal.

Maintenant que l'on possède divers appareils qui peuvent le remplacer avec avantage, il n'est pas douteux que l'autorité, dans un temps plus ou moins prochain, n'en permette la suppression totale.

### FLOTTEURS A SIFFLET

(FIG. 3 A 10, 12 ET 13, PL. 8)

Avant l'emploi des flotteurs qui sont mis en relation avec un sifflet avertisseur, on faisait usage de flotteurs dont le contre-poids extérieur en marquait, sur une échelle graduée, les degrés d'abaissement ou d'élévation suivant les fluctuations du niveau de l'eau dans la chaudière. Pour cela, le flotteur était attaché à une tige qui sortait de la chaudière par une petite boîte à étoupe, puis était elle-même rattachée à une chaîne qui tournait autour d'une poulie de renvoi et portait le contre-poids à son autre extremité. On obtenait la même chose à l'aide d'un balancier; seulement, les amplitudes des mouvements étaient un peu plus limitées.

L'objection sérieuse à faire sur cette disposition est la difficulté de conserver à la tige du flotteur toute la mobilité qui lui est nécessaire, sans pour cela laisser la vapeur fuir par la garniture d'étoupe faute de la serrer suffisamment. A moins de faire cette garniture très-souvent, elle laissait échapper la vapeur, ou bien il fallait la serrer de façon que le flotteur perdait de sa sensibilité.

Actuellement, dans quelques systèmes, la tige du flotteur traverse le sifflet et porte une soupape qui ferme bien le passage, mais alors l'appareil ne marque quelque chose que dans la limite du manque d'eau; autrement, il ne peut que rester immobile. Cependant, d'autres dispositions rendent au flotteur ses propriétés primitives, tout en évitant l'inconvénient de la garniture.

En général, on s'est efforcé de combiner de nouveaux flotteurs qui puissent remplir le but proposé sans mécanisme susceptible d'exiger une transmission ou une garniture dans la paroi de la chaudière. Nous verrons comment ce but a été atteint par plusieurs constructeurs. Sans nous arrêter davantage sur les anciens systèmes, nous décrirons la disposition la plus générale de flotteurs à sifflet, fonctionnant uniquement au manque d'eau.

DISPOSITION D'UN FLOTTEUR A SIFFLET (fig. 3 et 4). — Ces figures représentent, en coupe verticale et en projection horizontale, l'ensemble du montage d'un flotteur à sifflet et d'une soupape de sûreté. Quant à cette dernière, il en sera fait plus loin une description toute spéciale.

Le siége de ces deux organes est une double tubulure en fonte A qui se fixe par sa bride inférieure sur le générateur, et ordinairement près de l'une de ses extrémités. L'intérieur de cette pièce présente un conduit qui se bifurque en deux canaux dont l'un correspond au siége de la soupape de sûreté B, et l'autre à une

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ouverture d'attente que l'on ferme au moyen d'une plaque C si elle reste sans usage.

L'intervalle de ces deux tubulures est occupé par le sifflet D que le jeu du flotteur doit faire parler dans un degré d'abaissement déterminé du niveau de l'eau.

Le flotteur qui correspond à cet ensemble est une pierre circulaire suspendue à une tige métallique elle-même accrochée à une autre tige E, qui traverse le sifflet et lui forme soupape ouvrant de haut en bas. Cette dernière est, à son tour, rattachée, par une chaîne F, à un balancier en fonte G dont l'autre extrémité supporte un contre-poids qui doit équilibrer le flotteur plongé dans l'eau d'une certaine partie de son volume.

Les choses ainsi disposées, on comprend que le flotteur, qui est non pas flottant, mais équilibré suivant son degré d'immersion, doit suivre les fluctuations du niveau pour que l'équilibre soit conservé. Cependant, si le niveau s'élève, le flotteur s'immerge seulement davantage, à cause de la soupape E qui empêche la tige de suspension de s'élever. Si le contraire arrive, si le niveau s'abaisse, le flotteur le suit; mais alors la soupape E, détachée de son siége, laisse passer la vapeur, et le sifflet fonctionne.

Ce système de flotteur n'avertit donc que pour le manque d'eau et non pas pour le trop. Bien que ce soit surtout le premier cas dont on se préoccupe, le système à minima exclusif a donné lieu à des accidents graves. Il est arrivé que le flotteur s'est décroché; alors le contre-poids extérieur agissant de mieux en mieux pour fermer la soupape du sifflet, la chaudière a pu se vider presque complétement sans que l'on en reçoive aucun avertissement.

Ajoutons encore que, par cette disposition, le levier du flotteur reste constamment fixe, sans même osciller, tant que le niveau de l'eau reste un peu au-dessus de la hauteur normale; si, au contraire, il s'abaisse un peu au-dessous, ses moindres mouvements font marcher le sifflet, puisque le flotteur ne peut descendre d'une quantité quelconque sans laisser échapper la vapeur.

*Détails de construction du sifflet.* — Le sifflet D est représenté en détail par les fig. 12 et 13, moins la tige à soupape qui le traverse.

On voit qu'il est composé de plusieurs pièces en bronze réunies par des parties taraudées. Le corps principal est la base $a$, surmontée d'une tige sur laquelle sont vissées les cloches inférieure et supérieure $b$ et $b'$, qui laissent entre leurs bords un intervalle très-étroit. De plus, celle inférieure est fermée par une lame mince $c$ qui laisse aussi entre sa circonférence et sa cloche $b$ un passage extrêmement faible. L'ensemble est percé, pour le passage de la tige E, d'un trou $f$ qui est tourné conique à sa partie inférieure pour recevoir la soupape.

Lorsque cette dernière se détache de son siége, la vapeur s'échappe par le trou $f$ et pénètre en partie dans l'intérieur de la cloche inférieure $b$ par une série de petits trous $d$. C'est en s'échappant de cette cloche, par l'étroit passage qui lui est réservé à la circonférence de la lame $c$, qu'elle acquiert une très-grande vitesse et produit un sifflement aigu, augmenté encore par la forme même des deux cloches.

*Suspension du flotteur.* — Le balancier ou levier G est monté sur un support en fonte H qui est retenu par un écrou après une oreille venue de fonte avec le siége

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

principal A. Ce support étant placé sur l'axe de la soupape de sûreté, il est percé d'une mortaise pour le passage du levier I auquel il sert de guide.

Pour diminuer les résistances passives qui dérangeraient les conditions calculées de l'équilibre du flotteur, le levier G est monté sur son support, comme le fléau d'une balance, au moyen d'un couteau en acier *g*. C'est une bonne méthode, conseillée par les instructions administratives.

*Conditions d'équilibre du flotteur.* — Nous n'entrerons pas ici dans les détails rigoureux d'une théorie à laquelle un praticien n'a réellement pas recours en pareil cas. Disons seulement un mot des conditions principales à remplir.

Le flotteur est d'abord mis en équilibre au moyen d'un contre-poids dont l'intensité varie suivant le rapport des bras du levier G, et d'après le propre poids du flotteur, diminué de la portion qu'il en perd par l'immersion et augmenté de celui des tiges et chaînes de suspension C'est une condition qui peut se déterminer pratiquement et qu'il faudrait éprouver, nonobstant tout calcul préalable.

Mais il faut que le flotteur présente un excès de poids capable de vaincre la pression que la vapeur oppose à l'ouverture de la soupape.

Pour donner une idée de l'influence de cette cause, nous ferons remarquer que la soupape de l'appareil représenté ici (fig. 3) a 1,5 centimètre de diamètre à sa grande base, et 0,6 à celle qui correspond au trou *f*, ouvert à l'atmosphère.

Si nous admettons que la pression dans le générateur soit égale à 5 atmosphères, nous trouvons, pour la pression effective qui s'oppose à l'ouverture de la soupape E :

$$\left(\overline{1^c5}^2 \times 5 - \overline{0^c6}^2\right) \times (0{,}7854 \times 1^k033) = 8^k83.$$

Par conséquent, il faut que le flotteur possède, immergé, cet excédant de poids lorsque le générateur ne fonctionne pas; et ensuite, la pression ramenant l'équilibre, il faut que par un abaissement de niveau, inférieur à la quantité d'immersion du flotteur, celui-ci reprenne un excédant de poids capable de mettre tout le système en mouvement et d'ouvrir la soupape. Nous disons d'une quantité inférieure à l'immersion, attendu qu'il ne faudrait pas que le flotteur sortît entièrement de l'eau sans agir, ce qui donnerait lieu à une chute et à des secousses qui nuiraient au fonctionnement de l'appareil.

Ces diverses conditions conduisent à adopter pour le flotteur une forme plate, afin de diminuer l'amplitude des mouvements verticaux. Quant à son poids absolu, il doit être déterminé pratiquement pour correspondre à l'inertie des pièces qui composent le mécanisme de suspension.

Groupe d'appareils de sureté par M. Desbordes (fig. 5 et 6). — On adopte, depuis quelque temps, des groupes formés d'appareils réunis sur la même base qui se place en un seul point de la chaudière, dans laquelle il ne faut alors pratiquer qu'une seule ouverture pour l'application de plusieurs appareils de sûreté. Ce genre d'appareil est surtout convenable pour les petits générateurs, et particulièrement pour le système vertical, aujourd'hui très-répandu, et qui ne possède qu'une surface très-restreinte pour l'application des instruments de service et de sûreté.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La fig. 5 de la pl. 8 représente une vue en élévation extérieure d'un groupe d'appareils disposé par M. Desbordes;

La fig. 6 en est une projection horizontale, le balancier du flotteur enlevé.

Cet ensemble comprend en effet une base principale en fonte A qui reçoit un flotteur à sifflet, deux soupapes de sûreté et un manomètre.

Le flotteur est disposé exactement comme celui décrit ci-dessus, et, comme ce dernier, fonctionne seulement au manque d'eau. Son balancier G est appuyé sur une colonne H vissée sur la tubulure principale A. Sa tige à soupape E est aussi suspendue à la chaîne F rattachée au balancier. Le sifflet D occupe l'intervalle des deux soupapes de sûreté B.

Celles-ci sont composées chacune, comme toujours, de la soupape proprement dite ajustée sur un siége en bronze fixé sur la base A par des boulons *a*. Chacune d'elles est maintenue sur son siége par le levier I, à poids, articulé sur une tige *b* et guidé par une semblable *c*.

Le manomètre C, du système de ceux représentés sur la pl. 7, est fixé au sommet d'une colonne creuse J, montée sur la base commune A. Une partie sphérique creuse *d* a été ménagée à cette colonne pour recevoir de l'eau sur laquelle la pression de la vapeur agit au lieu d'exercer son action directe sur le manomètre. La disposition intérieure de ce réservoir *d* est complétement analogue pour cela à la cuvette des manomètres à air libre qui ont été décrits plus haut.

La même colonne J est munie d'un robinet obturateur *e* et d'une petite tubulure *f* pour y adapter au besoin un manomètre étalon en supposant que l'on veuille vérifier les indications de celui métallique C.

Ainsi, l'ensemble tout disposé peut se fixer sur la chaudière, et chacun des appareils qui le composent est en communication avec l'intérieur par l'ouverture unique pratiquée dans la tôle vis-à-vis de la capacité intérieure de la tubulure A.

Flotteur extérieur a action directe (fig. 7). — Comme flotteur fonctionnant exclusivement au manque d'eau, nous décrirons celui-ci, dont la disposition est toute différente des précédents.

Ce système a été présenté à l'Exposition nationale de 1844 par M. Daliot, alors inspecteur de la navigation fluviale, à Paris, et a valu à son auteur une récompense de la part de la Société d'encouragement.

Le flotteur, dans cet appareil, est un cylindre métallique A, renfermé dans une cloche en bronze B au sommet de laquelle se trouve le sifflet D dont le flotteur porte directement la soupape E; cette soupape est fixée à l'extrémité d'une tige qui traverse le flotteur et lui sert de guide inférieur en *a*.

Pour comprendre le jeu de cet appareil, il faut remarquer que la cloche A est en relation, par l'intermédiaire du robinet C, avec l'eau de la chaudière par un tube plongeur F dont l'extrémité inférieure, coupée en biseau, s'ouvre à la hauteur du niveau le plus bas que l'eau doive occuper dans le générateur. Par conséquent, en marche normale, le niveau est plus élevé que l'ouverture du tube F, et l'ensemble de l'appareil est rempli d'une colonne d'eau soutenue par la pression de la vapeur.

La hauteur de cette colonne d'eau étant du reste bien inférieure à celle qui ferait

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

équilibre à cette pression, non-seulement l'appareil est complétement rempli, mais le flotteur A est fortement sollicité de s'élever, et la soupape E ferme hermétiquement le conduit *b* du sifflet.

Mais si le niveau baisse suffisamment pour dégager l'ouverture inférieure du tube E, la vapeur s'y introduit et parvient au sommet de la colonne d'eau qu'elle déprime et fait tomber d'une certaine quantité; elle tomberait même complétement si le niveau de l'eau dans la chaudière n'était pas ramené à sa hauteur primitive. En s'abaissant, la colonne d'eau entraîne le flotteur qui débouche ainsi le sifflet par lequel s'échappe la vapeur introduite, en le faisant parler. Seulement, le flotteur ne s'abaisse que d'une très-faible quantité, attendu qu'il se trouve arrêté dans la cloche par le croisillon découpé *a* qui lui sert aussi de guide.

Comme la vapeur entraîne beaucoup d'eau non vaporisée, et même quelques parties de dépôt liquide, on a cherché à éviter que tout l'appareil n'en soit mouillé et oxydé en ménageant au sommet de l'appareil une petite cuvette *c* afin de recueillir la majeure partie du liquide qui s'échappe par l'orifice du sifflet.

Aussitôt que le niveau dans la chaudière a repris sa hauteur par la reprise de l'alimentation, l'appareil est de nouveau rempli, et le flotteur s'élevant referme, par la soupape E, le conduit *b* du sifflet.

Avec cet instrument, très-ingénieux du reste, comme avec les précédents, on ne peut rien connaître des fluctuations incessantes du niveau de l'eau en dehors du manque absolu dans lequel cas le sifflet fonctionne. Par conséquent, on peut imaginer tel accident que ce soit qui empêche le mouvement du flotteur, et rien alors ne permettra de prévoir un abaissement anormal du niveau de l'eau.

Flotteur a sifflet par M. E. Bourdon (fig. 8 et 9). — M. E. Bourdon a imaginé un système de flotteur qui est très-répandu. Il indique toutes les fluctuations du niveau de l'eau dans un générateur et siffle à la limite inférieure extrême.

A l'aide de la fig. 9, qui est une section longitudinale de l'ensemble, on voit que la pièce principale du mécanisme est une boîte en fonte A, à l'intérieur de laquelle se trouve logé le bras de levier B qui supporte le flotteur par sa tige C.

Cette boîte est creuse et complétement en rapport avec la vapeur de la chaudière. Sa forme triangulaire est motivée par l'amplitude même des mouvements oscillatoires du levier B, dont l'axe de rotation *a* se trouve ajusté au sommet de l'angle des deux parois. Elle est montée sur une tubulure cylindrique D qui se place sur la chaudière et qui a pour objet de la surélever de la quantité nécessaire correspondant à l'épaisseur de la brique ou de la couche de matières non conductrices qui recouvrent ordinairement un générateur. Cette boîte est surmontée d'un sifflet d'alarme G dont nous expliquerons tout à l'heure les fonctions.

L'axe *a*, qui porte à l'intérieur de la boîte le levier B auquel est suspendu le flotteur, porte aussi extérieurement, pour équilibrer ce dernier, un second levier E avec un poids F qui peut s'y déplacer afin de régler plus facilement l'équilibre; le prolongement du levier E est une aiguille qui répète exactement le levier intérieur B, et dont l'extrémité peut suivre les divisions d'un limbe circulaire fixé à l'extérieur de la boîte A.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il résulte de cette disposition qu'en faisant abstraction pour l'instant de ce qui concerne le sifflet, on peut suivre de l'extérieur tous les mouvements du flotteur, qui monte et descend librement avec le niveau de l'eau, et fait osciller l'aiguille extérieure qui indique sur le cadran de combien le niveau varie en plus ou en moins de sa position normale.

Mais pour faire fonctionner le sifflet d'alarme G, lorque le niveau de l'eau est à son plus bas, l'extrémité du levier B est reliée par une petite chaîne de Gall *b* à une soupape *c*, qu'un ressort tient constamment appliquée sur son siége pour interrompre le passage de la vapeur par le sifflet.

Tant que le flotteur reste dans les limites de hauteur convenables, la chaîne n'est pas tendue, et la soupape *c* reste fermée. Mais si, au contraire, le flotteur s'abaisse suffisamment pour tendre la chaîne, la soupape est tirée de haut en bas, et la vapeur peut s'échapper par le sifflet.

Par conséquent, des appareils ci-dessus décrits à celui-ci il y a un progrès évident, puisque si ce dernier ne siffle encore qu'au manque d'eau, il indique au moins toutes les variations intermédiaires; ce que les autres ne permettent pas d'observer.

Toute la question, pour l'appareil de M. Bourdon, est dans l'ajustement de l'axe *a*, qui doit conserver une mobilité suffisante, tout en empêchant d'une manière rigoureuse les fuites de vapeur.

La fig. 8 est une vue de bout de l'appareil, avec une partie en coupe suivant l'axe 1-2 pour laisser voir comment ce but est atteint.

L'axe *a* est simplement muni, à l'intérieur de la boîte, d'une embase conique, du côté de l'aiguille, et repoussé à l'autre extrémité par une vis de butée *d* qui maintient le contact de la portée conique. Cette vis est taraudée dans une plaque *e* qui se fixe avec des vis, et dont le joint est fait à l'aide d'une rondelle de cuir.

Comme accessoire, il reste à faire remarquer la tubulure *f*, que l'on peut boucher avec une plaque pleine, ou bien y adapter un tube *g* pour communiquer avec un manomètre.

Somme toute, un appareil qui donne des indications incessantes doit être préféré à tout autre, si toutefois, bien entendu, sa construction particulière est exempte d'inconvénients sérieux. A part cette propriété fondamentale de l'indication constante du niveau, comme on doit l'obtenir avec un tube de cristal, un appareil analogue à celui de M. Bourdon ne permet pas de supposer un dérangement dont on ne puisse s'apercevoir ausssitôt, tandis que la chute même de la pierre du flotteur, avec les systèmes précédents, peut passer inaperçue.

Avec celui actuel, l'immobilité absolue de l'aiguille annoncerait déjà un dérangement quelconque que l'on devrait rechercher aussitôt. Quant à la chute de la pierre, on en serait encore averti par le levier extérieur que le poids F ferait tomber, l'aiguille dirigée vers les plus hautes divisions du cadran.

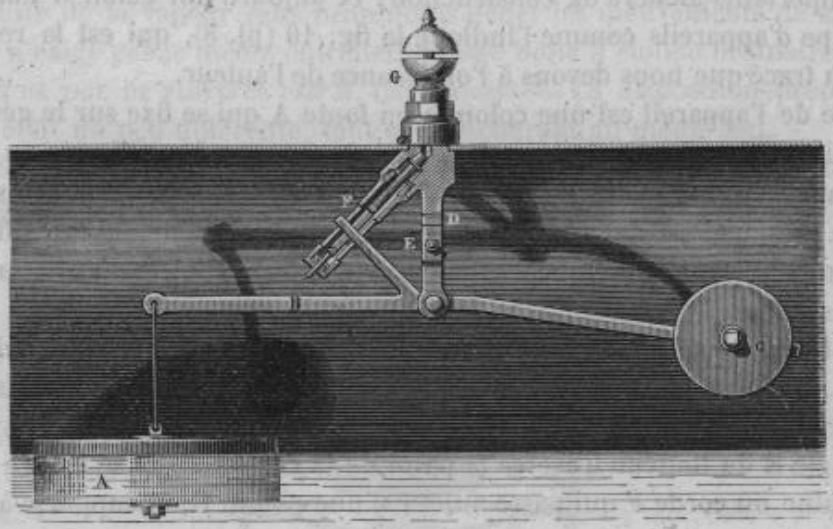
Sifflet d'alarme simple a flotteur. — Lorsqu'il s'est agi d'adapter aux générateurs des sifflets avertisseurs, alors que ces générateurs possédaient déjà leurs flotteurs ordinaires sans sifflet, on a cherché à composer des systèmes de sifflet

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

simples que l'on puisse appliquer sans remplacer tout à fait les appareils existants.

C'est ainsi que quelques constructeurs ont été conduits à la disposition de l'appareil que représente la figure suivante, et qui est précisément celui imaginé en principe par M. Chaussenot aîné, et construit par M. E. Bourdon.

Fig. 45.




On voit que le flotteur et son mouvement sont entièrement établis à l'intérieur de la chaudière; il n'existe extérieurement que le sifflet proprement dit G, que le flotteur A doit faire fonctionner exclusivement par le manque d'eau.

Ce flotteur A est, comme précédemment, une pierre plate circulaire, suspendue à un levier B chargé du contre-poids C. Le levier a son centre d'oscillation dans une chape E qui est elle-même fixée, au moyen d'un boulon, à une pièce en bronze D, laquelle se visse à la base du sifflet en pinçant la tôle de la chaudière.

Cette même partie intérieure est munie d'une tubulure oblique F dans laquelle est ajustée la soupape *a* qui ferme le conduit intérieur du sifflet, et qu'un ressort à boudin tient constamment fermée lorsque le flotteur n'agit pas pour l'en détacher. Pour obtenir cet effet, le bras B est muni d'une courte branche à angle aigu qui pénètre dans une mortaise allongée, pratiquée dans la tubulure F et dans la tige de la soupape *a*.

Par conséquent, dans les oscillations moyennes du flotteur, la branche auxiliaire du bras de levier parcourt la mortaise sans rien produire, quant à la fonction du sifflet; mais lorsqu'il atteint sa limite inférieure, cette branche est arrivée à l'extrémité de l'ouverture de la mortaise et tire la tige, ce qui détache la soupape de son siége. La vapeur peut alors s'échapper, et le sifflet fonctionne.

Si, au contraire, le niveau s'élève beaucoup et que la branche H atteigne l'extrémité opposée de la mortaise, il ne peut rien se produire, puisque cet effet n'a d'autre résultat que de faire appuyer davantage la soupape sur son siége et en même temps d'arrêter l'élévation du flotteur.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Aujourd'hui, sur un générateur neuf, on applique plutôt un appareil complet, analogue à ceux décrits ci-dessus; mais de préférence, il sera bien d'adopter quelque chose de semblable aux dispositions que nous allons examiner, et dans lesquelles le flotteur fait siffler au trop et au manque d'eau, en oscillant du reste librement et de quantités que l'on peut observer entre ces deux positions.

Groupe d'appareils par M. Bréval (fig. 10). — M. Bréval, qui fut longtemps directeur d'importants ateliers de construction, et aujourd'hui établi à Paris, dispose son groupe d'appareils comme l'indique la fig. 10 (pl. 8), qui est la reproduction exacte du tracé que nous devons à l'obligeance de l'auteur.

La base de l'appareil est une colonne en fonte A qui se fixe sur le générateur et communique librement avec lui par l'intérieur, comme nous l'avons vu précédemment; l'appareil comprend la soupape de sûreté B, le flotteur C et son sifflet D. Le caractère principal est dans la fonction complète du flotteur qui fait siffler au trop et au manque d'eau, et indique les fluctuations intermédiaires du niveau en valeurs métriques égales.

Pour obtenir ce résultat, le constructeur a emprunté aux anciennes dispositions quelques points qu'il a modifiés, de façon à éviter les inconvénients qu'ils pouvaient présenter.

La tringle E du flotteur traverse la paroi de la chaudière et se trouve suspendue à une chaîne ou corde F qui passe autour d'une poulie G, et supporte à son extrémité opposée le contre-poids J; la poulie est montée sur deux supports H élevés sur la colonne de fonte A.

Cette tringle porte une chape *a* à laquelle est rattaché, par une goupille dans une coulisse, un petit levier *b* dont le centre fixe d'oscillation est situé au-dessus du sifflet; cette extrémité du levier présente deux saillies formant à peu près deux cammes *c*. D'après cela, le levier *b* oscille en même temps que la tige E monte ou descend avec le flotteur, et dans chacune des positions extrêmes, l'une des cammes *c* venant appuyer sur un bouton *d*, qui correspond avec la soupape intérieure du sifflet, il fait ouvrir cette soupape en comprimant le ressort qui la maintient ordinairement fermée. La soupape ouverte, la vapeur s'échappe et le sifflet fonctionne.

Par conséquent, le flotteur agit ainsi dans ses deux positions extrêmes; mais ses positions intermédiaires sont aussi indiquées par le contre-poids J, qui forme curseur, et dont le milieu, présentant un disque aminci, suit les divisions d'une échelle graduée *e*.

Pour employer le mode ancien consistant à faire traverser la paroi de la chaudière par la tige du flotteur, mais sans faire usage du presse-étoupe dont nous avons dit les inconvénients, le constructeur applique ici un moyen dont le principe avait du reste été indiqué, il y a environ douze à treize ans, par M. Ch. Faivre, maintenant ingénieur à Nantes (1).

La tige E pénètre dans la chaudière par un trou de même grosseur qu'elle-même,

(1) Disposition applicable à un flotteur intérieur, par M. Ch. Faivre, *Publication industrielle*, vol. v, pl. 38.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

percé dans la tôle et sans aucune pièce spéciale pour ménager ce passage. Le joint hermétique est obtenu en entourant simplement la tige d'un peu d'étoupe à l'extérieur de la chaudière; mais cette étoupe est comprimée et retenue en contact avec la tige et la paroi de la chaudière par une masse assez pesante K, que la tige E traverse également, et qui porte à sa partie inférieure une petite cavité *f* où vient se loger l'étoupe.

La pression continuelle et constante de cette masse sur l'étoupe suffit pour empêcher la fuite de la vapeur sans néanmoins gêner les mouvements de la tige du flotteur, et n'exige pas le même entretien qu'une boîte à étoupe ordinaire.

Garniture de tige de flotteur par M. Ch. Faivre. — La disposition proposée par M. Faivre était un peu différente, tout en concourant au même but.

La fig. 46 ci-dessous permettra de la comprendre et d'établir la comparaison avec celle représentée sur la fig. 10 de la pl. 8.

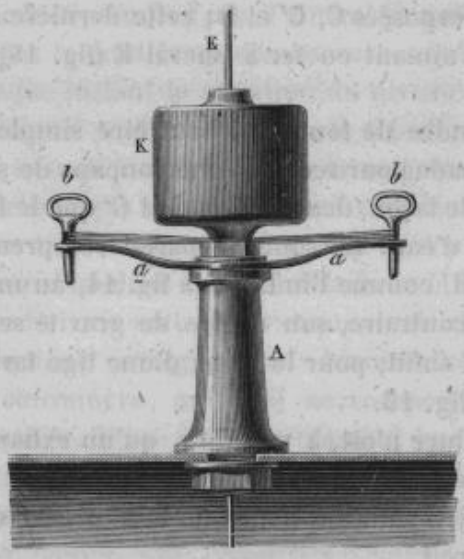



Fig. 46. Échelle de 1/10.

On voit par cette figure que la tige E du flotteur traverse la paroi de la chaudière, ainsi qu'une petite colonne en bronze A qui n'a d'autre objet que de surélever les quelques pièces dont on va reconnaître les fonctions. Cette petite colonne porte en effet une lame métallique *a* dont les extrémités sont munies de deux chevilles *b* auxquelles on rattache une mèche d'étoupe qui repose sur le sommet de la colonne en entourant la tige du flotteur. Le poids K, que cette tige traverse, vient alors appuyer sur l'étoupe et faire le joint, comme dans la disposition précédente.

Flotteur a indicateur magnétique par M. Lethuillier-Pinel (fig. 14 et 15). — Nous arrivons au système le plus radical, peut-être, qui ait été imaginé pour rendre les indications d'un flotteur visibles sans ouverture, avec ou sans garniture quelconque, entre l'intérieur et l'extérieur d'une chaudière. Aussi quelques mots suffiront pour en faire comprendre le principe : fixer à la tige du flotteur *un aimant permanent* qui vienne influencer un index en fer au travers des parois d'une boîte

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

entièrement close; c'est en effet la base de l'appareil inventé par un ingénieur-mécanicien de Rouen, M. Lethuillier-Pinel, qui en pratique actuellement la construction sur une grande échelle.

Nous allons examiner avec quelque détail ce nouvel appareil de sûreté, dont les fig. 14 et 15 représentent deux dispositions légèrement différentes, mais qui peuvent néanmoins se servir réciproquement d'explication, l'une comme coupe et l'autre comme vue extérieure.

L'appareil représenté fig. 14 est un groupe complet, composé du flotteur, d'une soupape de sûreté et d'un manomètre, comme les groupes décrits ci-dessus. Il est indiqué en vue extérieure et fonctionnant sur une chaudière.

La fig. 15 représente en coupe transversale un appareil analogue, mais sans soupape de sûreté.

Ces figures permettent de reconnaître que la tige B du flotteur A s'élève à l'intérieur d'une haute tubulure entièrement close par rapport à l'extérieur, et formée de plusieurs parties superposées C, C′ et D; cette dernière est une boîte en cuivre dans laquelle se meut l'aimant en fer à cheval E (fig. 15), fixé au sommet de la tige B.

La base C est un cylindre de fonte qui peut être simple, comme le montre la fig. 15, ou muni d'un coude pour recevoir une soupape de sûreté F, suivant le cas. Mais elle possède, de toute façon, deux sifflets G et G′ que le flotteur doit faire parler au trop ou au manque d'eau. Lorsque l'appareil comprend une soupape, il est monté sur la chaudière H, comme l'indique la fig. 14, au moyen d'une large bride boulonnée. Dans le cas contraire, son centre de gravité se trouvant précisément sur son axe de figure, il suffit, pour le fixer, d'une tige taraudée et d'un écrou *a*, comme on le voit sur la fig. 15.

La partie C′ de la tubulure n'est, à vrai dire, qu'un exhaussement muni, à l'endroit de son raccord inférieur, d'une douille en fonte qui sert de guide intermédiaire à la tige, avec un jeu suffisant pour que la vapeur circule avec facilité dans tout l'intérieur de l'appareil.

La boîte en cuivre D, sur laquelle se pose, si l'on veut, un manomètre métallique I, est rectangulaire, à cause de l'ajustement du fer magnétique E qui doit glisser à son intérieur. L'une de ses faces porte extérieurement les divisions métriques qui se rapportent aux positions différentes du niveau de l'eau; sur cette face se trouve placé un petit index en acier *b* qui est complétement libre, mais maintenu en contact avec la paroi de cuivre uniquement par l'attraction de l'aimant E qui s'exerce très-fortement au travers de cette paroi, conformément aux propriétés bien connues de cet agent physique. Cette même face de la boîte présente un élégissement pour recevoir une glace *c* qui enferme l'aiguille *b*, tout en permettant d'observer ses mouvements.

Cet index est un petit cylindre d'acier d'environ 2 1/2 millimètres de diamètre sur 25 millimètres de longueur; il porte deux bourrelets saillants par lesquels son contact est établi avec la surface contre laquelle l'action magnétique le retient appuyé. Cette particularité s'explique en remarquant que, si le cylindre portait sur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

toute l'étendue de ses génératrices, il se dérangerait inévitablement de sa position horizontale, et ne se présentant plus exactement vis-à-vis des pôles de l'aimant, il pourrait en être abandonné dans les mouvements brusques du flotteur. D'ailleurs, on comprend que, pour une même intensité d'attraction, l'effort exercé est d'autant plus énergique qu'il agit sur un moindre nombre de points. On sait, en effet, que dans les expériences qui ont pour but d'éprouver les charges qu'un aimant peut soulever, on diminue la surface des *portants* auxquels on donne une forme courbe pour que leur contact avec les pôles ait lieu, pour ainsi dire, par une tangente.

Maintenant, on peut comprendre aisément les fonctions de cet appareil. Le flotteur, qui ne peut pas recevoir de contre-poids, *flotte réellement,* c'est-à-dire que c'est un corps creux formé de deux coupoles en cuivre rouge mince, réunies par une soudure, et dont la pesanteur spécifique est assez faible pour surnager, tout en portant le poids de la tige et de l'aimant qui la surmonte. Par conséquent, le flotteur s'élevant et s'abaissant avec le niveau de l'eau, l'aimant se meut avec lui et se trouve exactement suivi par l'index *b*, dont les positions successives sur la face graduée font alors connaître à chaque instant la situation du niveau de l'eau dans le générateur. Mais de plus, à chaque position extrême, la tige B, à l'aide d'un taquet *d* qu'elle porte, agit sur la bascule *e* et fait ouvrir la soupape du sifflet correspondant G ou G′; le trop et le manque d'eau extrêmes sont ainsi annoncés par le jeu d'un sifflet, indépendamment de l'index *b*, qui les fait également connaître.

Nous ne pouvons pas entrer ici dans tous les détails de la construction de cet instrument, qui peut demander une certaine pratique, mais dont les fonctions n'en exigent aucunement, et qui n'a presque jamais besoin d'entretien ni de réparation : il est aisé de s'en convaincre, puisqu'il ne comporte aucune garniture ni assemblage mécanique mobile. Nous dirons seulement quelques mots de la pièce principale, l'aimant en fer à cheval.

C'est une bande d'acier contournée en U et dont les bouts, qui deviennent *les pôles* lorsque la pièce est aimantée, sont recourbés d'équerre afin de les amener au contact de la paroi graduée derrière laquelle se trouve l'index *b*. L'aimantation s'effectue au moyen des procédés électro-magnétiques ordinaires, puis la pièce aimantée se place entre des armatures de fer doux, de même forme qu'elle, qui ont pour propriété, ainsi qu'on le sait, de maintenir le fluide magnétique en tension.

Dans l'origine, une objection importante a été soulevée à propos de l'emploi de l'indicateur magnétique, qui doit fonctionner à des températures relativement élevées : l'action magnétique ne finirait-elle point par se détruire ou diminuer sensiblement sous l'action de la chaleur ?

A part une pratique de plusieurs années qui a permis de résoudre la question, il est également notoire que, pour vaincre la force coercitive qui tient tendus les fluides magnétiques dans un barreau d'acier bien trempé, et détruire l'aimantation, il faut soumettre ce barreau à une température au moins correspondante au rouge naissant. Mais à la plus haute température où l'on puisse produire la vapeur, soit 200 degrés, que l'on n'atteint même jamais, l'action magnétique n'éprouve aucune altération.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Cependant, M. Lethuillier, qui a dû faire directement des expériences sérieuses à cet égard, nonobstant les résultats annoncés d'avance par la science, a pu reconnaître que l'énergie du barreau d'aimant diminue légèrement pendant les premiers temps de sa mise en fonction, mais qu'elle devient ensuite parfaitement constante. Il suffit alors de compter sur cette diminution en donnant à l'aimant un excès d'énergie pour une action très-minime du reste, et qui se borne à une attraction capable de soutenir une aiguille d'acier, pesant peut-être 2 grammes, au travers d'une paroi de métal de 4 à 5 millimètres d'épaisseur.

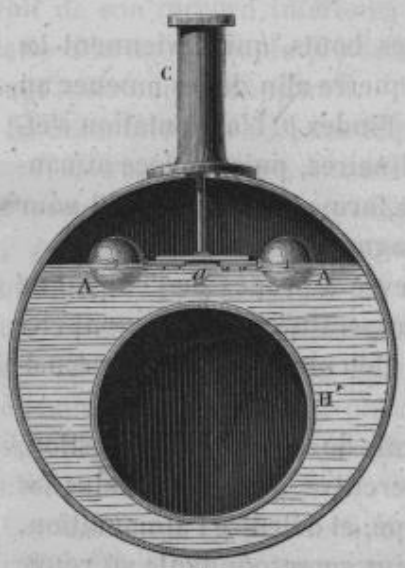
Seulement, comme les actions magnétiques, quelles qu'elles soient, diminuent rapidement en raison inverse de la distance à laquelle elles s'exercent (dans le rapport inverse des carrés des distances), il est important que le contact des pôles avec la paroi graduée ait toujours exactement lieu. A cet effet, non-seulement l'aimant E est guidé par une pièce fixe *f*, ajustée dans la boîte D, mais il est encore pressé par un ressort *g* pour parer au peu d'usure qui pourrait se produire.

*Modification apportée à l'appareil précédent.* — Avec les générateurs à foyer intérieur, la couche d'eau au-dessus du corps intérieur est presque toujours trop mince au centre pour permettre le jeu d'un flotteur, à moins de placer ce dernier sur le côté du corps de la chaudière pour qu'il plonge à côté du bouilleur.

En vue de placer néanmoins le flotteur sur l'axe vertical du générateur, lorsque la couche d'eau ne présente pas au centre une épaisseur suffisante, on a essayé de lui donner une forme très-aplatie; mais ce moyen est encore insuffisant lorsque la couche d'eau n'a pas plus de 10 centimètres, par exemple, comme cela se rencontre souvent.

M. Lethuillier-Pinel propose alors le même appareil magnétique, mais avec le flotteur modifié comme l'indique la fig. 47 ci-contre.

Fig. 47.




Le flotteur est composé de deux corps creux A sphériques ou cylindriques, suivant le volume qu'ils doivent avoir, disposés horizontalement, et reliés par une traverse *a* assemblée d'équerre avec la tige B qui porte l'aimant. Ces deux masses sont alors réparties de chaque côté du bouilleur intérieur H', où l'eau présente assez de hauteur verticale pour que le flotteur ait une course suffisante.

En terminant ce qui est relatif au flotteur magnétique, faisons de nouveau remarquer sa propriété fondamentale, qui est de rendre visibles les fluctuations du niveau de l'eau, sans mécanisme exigeant de garniture dans la paroi de la chaudière et sans parois transparentes qu'il faudrait évidemment faire en cristal, et qui auraient, à ce titre, l'inconvénient de la fragilité.

NIVEAU D'EAU MÉTALLIQUE A FLOTTEUR PAR M. HERDEVIN. — M. Herdevin, mécanicien de Paris, est l'auteur d'un indicateur de niveau qui, avec peu de volume et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

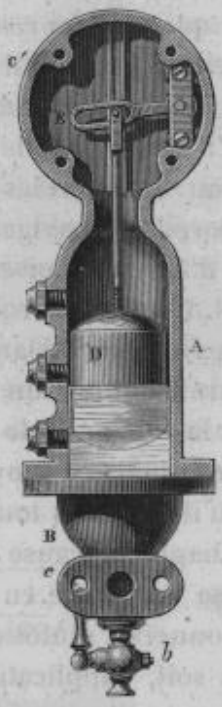
d'une construction peu dispendieuse, peut rendre de véritables services. La position qu'il occupe sur un générateur est celle du niveau à tube de cristal; il fonctionne en effet d'après le même principe : mais ses indications résident dans le jeu d'un flotteur, dont les mouvements sont rendus sensibles au moyen d'une aiguille qui suit les divisions d'un cadran.

Les fig. suivantes 48 et 49 représentent cet appareil en vue extérieure, et en coupe transversale regardée du côté opposé à la précédente.

Fig. 48.




Fig. 49.




C'est une sorte de bouteille en fonte A, terminée à sa partie supérieure par une boîte cylindique C, et boulonnée à sa base avec une culasse B, également en fonte. Cette dernière pièce est munie d'une tubulure à bride *c* qui se répète également à la partie supérieure du corps principal A, dans la partie cylindrique C (cette deuxième tubulure n'est pas vue sur la fig. 49, à cause de la coupe, mais il est facile de se la figurer). L'appareil est mis en communication avec le générateur au moyen de ces deux tubulures, exactement de la même façon que le niveau représenté fig. 1 et 2, pl. 8; l'eau entre dans l'appareil par l'orifice inférieur et la vapeur par l'autre, d'où le niveau s'y établit comme dans le tube de cristal.

Mais dans celui de M. Herdevin, le niveau n'étant plus observé par transparence, c'est un flotteur D, que renferme l'appareil, qui fournit cette indication à l'aide de l'aiguille *d*, avec laquelle il est en relation.

Le mode de transmission du flotteur à l'aiguille est fondé sur le même principe que l'appareil de M. Bourdon, précédemment décrit et représenté fig. 8 et 9, pl. 8. C'est un levier E, placé dans l'intérieur de la boîte C, dont l'axe porte extérieurement l'aiguille *d*, et auquel le flotteur se trouve suspendu. Cet assemblage se fait

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

par la tige du flotteur, qui est terminée, à sa partie supérieure, par une chape embrassant le levier E, dont la partie correspondante est ouverte en coulisse, pour que le flotteur conserve son mouvement vertical nonobstant celui en arc de cercle du levier. La rectitude de ce mouvement est assurée au moyen d'une rainure ménagée sur les deux fonds de la boîte C, pour guider la goupille qui assemble la tige au levier E.

L'étude que nous venons de faire des flotteurs et niveaux d'eau permettra de comprendre celui-ci sans recourir à une plus longue explication.

Nous ajouterons seulement quelques mots pour expliquer la fonction des robinets $a$, $a'$ et $a^2$, qui sont *des robinets d'épreuve,* et de celui $b$, qui sert à volonté pour purger l'appareil de l'eau qu'il renferme.

*Robinets d'épreuve.* — Les robinets dits *d'épreuve* sont appliqués très-souvent aux générateurs qu'il serait difficile de munir de flotteurs, ou d'appareils analogues indicateurs de niveau. Tels sont les générateurs des locomotives, des machines locomobiles et des appareils de navigation.

Les robinets d'épreuve doivent être alors appliqués concurremment avec les niveaux en cristal. L'un de ces robinets est posé juste à la hauteur normale du niveau, et les deux autres à égales distances au-dessus et au-dessous. Celui du milieu $a$, quand on l'ouvre, devrait donner un mélange d'eau et de vapeur, et les deux autres respectivement de la vapeur et de l'eau. L'usage des robinets d'épreuve est un moyen de sûreté de plus; mais ce moyen, tout seul, ne serait pas lui-même extrêmement sûr, attendu qu'il n'est pas toujours facile de reconnaître si c'est de l'eau ou de la vapeur qui s'échappe, à cause de la grande vitesse d'abord, et ensuite parce que l'eau se vaporise en partie en arrivant dans l'atmosphère, tandis que la vapeur, au contraire, donnerait plutôt naissance à de l'eau par une condensation partielle.

Quoi qu'il en soit, l'application des robinets d'épreuve à l'appareil Herdevin en est un complément utile, comme remplaçant la transparence pour s'assurer que l'instrument fonctionne. A leur défaut, on pourrait également vérifier l'appareil à l'aide du robinet purgeur $b$.

## SOUPAPES DE SURETÉ

Une soupape de sûreté est un appareil fort simple, et sur lequel cet ouvrage a déjà fourni assez de renseignements pour le faire connaître en principe, soit par quelques citations, soit par les figures qui en ont été données. Aussi nous n'aurions presque rien à ajouter à ce qui a été dit sur cet instrument s'il n'était pas indispensable de donner les règles pratiques qui servent à en déterminer les dimensions, et les particularités qui le concernent dans les règlements administratifs.

A cet effet, il nous reste donc à examiner les conditions qui établissent le rapport entre son diamètre et la puissance du générateur auquel on l'applique; les règles précises à suivre pour ses conditions d'équilibre; les préceptes qui servent de base à sa construction.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

### DIAMÈTRE DES SOUPAPES DE SURETÉ

Pour qu'une soupape de sûreté, appliquée sur un générateur, satisfasse au service auquel on la destine, il faut que la section de son ouverture soit suffisante pour débiter largement le volume maximum de vapeur que ce générateur peut produire avec le foyer le plus actif, et sous la tension indiquée comme limite par le timbre légal qui s'y trouve apposé. Mais cet orifice ne doit pas être démesurément grand, attendu que si l'on offrait à la vapeur un passage d'une dimension telle qu'elle pût s'écouler presque instantanément dans l'atmosphère, la masse d'eau liquide, se trouvant dégagée de la pression qui s'exerçait sur elle, se transformerait aussi brusquement en vapeur et occasionnerait l'accident que l'on voulait prévenir, c'est-à-dire l'explosion du générateur.

MM. les ingénieurs, chargés par le gouvernement de préparer les instructions qui ont été annexées à l'ordonnance relative aux machines à vapeur, ont cherché à déterminer le rapport numérique général qui peut exister entre la production en vapeur d'un générateur et l'orifice qui serait capable de suffire au débit de cette vapeur s'échappant dans l'atmosphère. Ces recherches les ont amenés à une formule pratique qui est devenue la règle obligée pour servir à déterminer le diamètre d'une soupape de sûreté, d'après la surface de chauffe totale du générateur et la pression absolue maximum de la vapeur qu'il doit produire, et chaque générateur devant être muni de deux soupapes semblables.

Voici cette formule :

$$d = 2{,}6\sqrt{\frac{S}{n - 0{,}412}},$$

dans laquelle,

$d$ représente le diamètre de la soupape en centimètres;

S » la surface de chauffe du générateur exprimée en mètres carrés;

$n$ » la tension de la vapeur indiquée par le numéro du timbre légal appliqué sur le générateur

En discutant cette formule, on trouve que les diamètres des soupapes, ainsi déterminés, sont proportionnels à la racine carrée de la surface de chauffe, et qu'ils sont d'autant plus faibles, que la tension de la vapeur est plus élevée, et *vice versâ*. Ce dernier point s'explique aisément si l'on fait attention que la vitesse d'échappement de la vapeur change comme sa tension, et que, pour en débiter un même volume, la section de l'orifice d'échappement est inversement proportionnelle à la vitesse.

Exemple de l'emploi de la formule précédente. — Soit le générateur type représenté pl. 1, pour lequel S égale 25 mètres carrés, et $n$ égale 5, quel sera le diamètre de chacune des deux soupapes de sûreté qu'il doit posséder?

*Solution.* On trouve :

$$d = 2{,}6\sqrt{\frac{25}{5 - 0{,}412}} = 6^{c}069.$$



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si maintenant nous rapprochons cette donnée de la soupape représentée en coupe fig. 3, pl. 8, on voit que ce diamètre est attribué à l'ouverture cylindrique dans laquelle pénètrent les ailettes qui servent de guide à la soupape proprement dite B, qui la recouvre. Par conséquent, la section effective du passage offert à la vapeur est un peu diminuée par la place occupée par ces ailettes, si minces qu'elles soient. Si l'on examine ce qu'il en est en prenant des diamètres de soupape de 10 à 2 centimètres, avec trois ailettes dans tous les cas, variant d'épaisseur de 5 à 2 millimètres, on trouve que la section effective subit une diminution variant dans les mêmes limites de 1/100 à 1/50 environ.

D'autre part, négligeant pour l'instant cette faible diminution, on sait que la levée de la soupape doit être égale au quart de son diamètre pour que l'ouverture annulaire qui en résulte soit équivalente à la section circulaire.

Malgré cette diminution, une seule soupape, ainsi calculée, suffit pour débiter toute la vapeur que pourrait produire le générateur correspondant sous l'influence du feu le plus actif que l'on puisse y faire. C'est du reste un fait dont MM. les ingénieurs de l'administration se sont assurés par expérience. Par conséquent, deux soupapes devraient toujours suffire pour éviter les explosions, si ce terrible accident ne provenait pas plus souvent d'une avarie accidentelle et ignorée survenue au générateur ou de la surcharge des soupapes, que d'un excès de pression momentané.

Pour terminer ce qui est relatif au diamètre des soupapes et à leur efficacité comme issue offerte à la vapeur, faisons une hypothèse sur celles qui doivent être appliquées sur le générateur type, pl. 1.

On a vu que sa surface est égale à 25 mètres carrés pour une vaporisation totale de 300 kilogrammes d'eau par heure, dans des conditions de marche normale, soit 12 kilogrammes par mètre carré de surface de chauffe.

En admettant que cette vaporisation soit poussée avec beaucoup plus d'activité, il serait néanmoins difficile qu'elle s'élevât à plus de 30 kilogrammes par mètre carré; mais admettons 35 pour notre exemple : ce sera une production totale de 875 kilogrammes par heure;

Soit en volume de vapeur à 5 atmosphères et par seconde :

$$\frac{875^{k}}{2^{k}5682 \times 3600} = 0^{m.c.}094,$$

ou 94 décimètres cubes par seconde.

D'autre part, puisque chaque soupape a $6^{c}069$ de diamètre, soit $6^{c}07$, la section correspondante est égale à 28,93 centimètres carrés, qu'il faudra diminuer environ de 1/60 pour tenir compte de l'obstruction par les ailettes et avoir sa valeur effective plus approchée; soit :

$$28^{c.q.}93 \times \frac{59}{60} = 28^{c.q.}45.$$

Maintenant, pour connaître le débit d'un semblable orifice en vapeur à 5 atmosphères s'échappant à l'air libre, il suffit de se reporter aux règles spéciales (41 à 50)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

qui permettent de trouver les vitesses d'écoulement des gaz et des vapeurs par un orifice en mince paroi, tel que celui d'une soupape peut être considéré.

Nous trouvons ainsi que la vitesse d'écoulement de la vapeur, dans les conditions précédentes, sera 562 mètres par seconde; et si nous prenons le plus faible coefficient (55) pour calculer le débit, il vient en résumé :

$$28^{c.q.}45 \times 56200^{c} \times 0{,}65 = 1039278^{c.c.} = 1039 \text{ décimètres cubes.}$$

Par conséquent, si la production est égale à 94 décimètres cubes, une seule des deux soupapes pourra effectuer une dépense correspondante en se soulevant de 1/40 seulement de son diamètre, soit moins de 2 millimètres, puisqu'en se soulevant du quart pour représenter la même section que son ouverture circulaire, elle pourrait dépenser un volume plus que dix fois supérieur.

Cette appréciation est toute théorique, puisqu'on y admet que la vitesse de la vapeur serait pratiquement égale à celle calculée. Mais, quelle que soit la correction qu'on lui fasse subir, la dimension de la soupape n'en restera pas moins plus que suffisante.

Péclet, faisant la même recherche, disait que, pour poser la base de la vaporisation la plus énergique, il faut supposer 100 kilogrammes d'eau évaporée par heure et par mètre carré de surface de chauffe, conformément aux résultats donnés par des expériences spéciales à cet égard.

Mais ceci ne semble guère applicable à nos générateurs actuels, dans lesquels une petite partie seulement de la surface de chauffe se trouve dans les conditions où l'on s'est placé pour obtenir une aussi forte vaporisation.

Cependant, si l'on admettait encore ce chiffre, la valeur proposée ci-dessus deviendrait :

$$94 \times \frac{100}{35} = 268 \text{ décimètres cubes,}$$

et n'approcherait pas encore du débit maximum de la soupape, égal, théoriquement, à 1039 décimètres cubes.

L'instruction ministérielle, en donnant la formule, a fourni aussi une table des diamètres des soupapes, calculés à l'aide de cette règle pour des surfaces de chauffe et des pressions variables.

Cette table est peut-être un peu étendue pour les applications actuelles où la vapeur est rarement employée aux plus basses pressions. Néanmoins, comme nous n'avons aucun intérêt à y faire des retranchements, nous la reproduirons telle qu'elle a été donnée. Cependant, nous supprimons la décimale indiquant les millièmes de centimètres, approximation qui ne peut être réellement d'aucune utilité pratique.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## TABLE

DES DIAMÈTRES DES SOUPAPES DE SURETÉ, CALCULÉES AU MOYEN DE LA FORMULE LÉGALE.

| SURFACE de chauffe des chaudières. | DIAMÈTRES CORRESPONDANTS AUX NUMÉROS DES TIMBRES qui indiquent les tensions absolues de la vapeur, de 1 1/2 à 6 atmosphères. | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 1/2 | 2 | 2 1/2 | 3 | 3 1/2 | 4 | 4 1/2 | 5 | 5 1/2 | 6 |
| mèt. car. | cent. | cent. | cent. | cent. | cent. | cent. | cent. | cent. | cent. | cent. |
| 1 | 2,49 | 2,06 | 1,80 | 1,62 | 1,48 | 1,37 | 1,29 | 1,21 | 1,15 | 1,10 |
| 2 | 3,52 | 2,92 | 2,54 | 2,29 | 2,09 | 1,94 | 1,82 | 1,72 | 1,63 | 1,55 |
| 3 | 4,32 | 3,57 | 3,62 | 2,80 | 2,56 | 2,38 | 2,23 | 2,10 | 2,00 | 1,90 |
| 4 | 4,98 | 4,13 | 3,60 | 2,23 | 2,96 | 2,74 | 2,57 | 2,43 | 2,30 | 2,20 |
| 5 | 5,57 | 4,61 | 4,02 | 3,61 | 3,31 | 3,07 | 2,87 | 2,71 | 2,58 | 2,46 |
| 6 | 6,11 | 5,05 | 4,41 | 3,96 | 3,62 | 3,36 | 3,15 | 2,97 | 2,82 | 2,69 |
| 7 | 6,59 | 5,46 | 4,76 | 4,28 | 3,91 | 3,63 | 3,40 | 3,21 | 3,04 | 2,91 |
| 8 | 7,05 | 5,83 | 5,09 | 4,57 | 4,18 | 3,88 | 3,64 | 3,43 | 3,26 | 3,11 |
| 9 | 7,48 | 6,19 | 5,40 | 4,85 | 4,44 | 4,12 | 3,86 | 3,64 | 3,46 | 3,30 |
| 10 | 7,88 | 6,52 | 5,69 | 5,11 | 4,68 | 4,34 | 4,07 | 3,84 | 3,64 | 8,48 |
| 11 | 8,27 | 6,84 | 5,97 | 5,36 | 4,91 | 4,55 | 4,23 | 4,02 | 3,82 | 3,65 |
| 12 | 8,63 | 7,15 | 6,23 | 5,60 | 5,12 | 4,75 | 4,45 | 4,20 | 3,99 | 3,81 |
| 13 | 8,99 | 7,44 | 6,49 | 5,83 | 5,33 | 4,95 | 4,64 | 3,38 | 4,16 | 3,96 |
| 14 | 9,32 | 7,72 | 6,73 | 6,05 | 5,54 | 5,14 | 4,81 | 4,54 | 4,31 | 4,12 |
| 15 | 9,65 | 7,99 | 6,97 | 6,26 | 5,73 | 5,32 | 4,98 | 4,70 | 4,46 | 4,26 |
| 16 | 9,97 | 8,25 | 7,20 | 6,46 | 5,92 | 5,49 | 5,14 | 4,85 | 4,61 | 4,40 |
| 17 | 10,28 | 8,51 | 7,42 | 6,66 | 6,10 | 5,66 | 5,30 | 5,00 | 4,75 | 4,53 |
| 18 | 10,58 | 8,75 | 7,63 | 6,84 | 6,28 | 5,82 | 5,45 | 5,15 | 4,89 | 4,67 |
| 19 | 10,86 | 8,99 | 7,84 | 7,04 | 6,45 | 5,98 | 5,60 | 5,29 | 5,02 | 4,79 |
| 20 | 11,15 | 9,23 | 8,05 | 7,23 | 6,62 | 6,14 | 5,75 | 5,43 | 5,15 | 4,92 |
| 21 | 11,42 | 9,45 | 8,24 | 7,39 | 6,78 | 6,29 | 5,89 | 5,56 | 5,28 | 5,04 |
| 22 | 11,69 | 9,68 | 8,44 | 7,58 | 6,94 | 6,44 | 6,03 | 5,69 | 5,41 | 5,16 |
| 23 | 11,95 | 9,89 | 8,63 | 7,75 | 7,09 | 6,58 | 6,17 | 5,82 | 5,53 | 5,27 |
| 24 | 12,21 | 10,11 | 8,81 | 7,92 | 7,25 | 6,72 | 6,30 | 5,84 | 5,65 | 5,39 |
| 25 | 12,46 | 10,32 | 9,00 | 8,08 | 7,40 | 6,86 | 6,43 | 6,07 | 5,76 | 5,50 |
| 26 | 12,71 | 10,52 | 9,17 | 8,24 | 7,54 | 7,00 | 6,56 | 6,19 | 5,88 | 5,61 |
| 27 | 12,95 | 10,72 | 9,35 | 8,40 | 7,78 | 7,13 | 6,68 | 6,31 | 5,99 | 5,71 |
| 28 | 13,19 | 10,92 | 9,52 | 8,55 | 7,83 | 7,26 | 6,80 | 6,42 | 6,10 | 5,82 |
| 29 | 13,42 | 11,11 | 9,69 | 8,70 | 7,97 | 7,39 | 6,92 | 6,53 | 6,21 | 5,92 |
| 30 | 13,65 | 11,30 | 9,35 | 8,85 | 8,10 | 7,52 | 7,04 | 6,65 | 6,31 | 6,02 |

*Usage de la table précédente.* — La simplicité de cette table pourrait nous dispenser d'en donner un exemple; nous le ferons, néanmoins, afin de bien fixer les idées.

EXEMPLE. — Quel est le diamètre à donner aux soupapes de sûreté d'un générateur de 20 mètres carrés de surface de chauffe, et timbré à 5 1/2 atmosphères?

On cherche, dans la première colonne de gauche, le chiffre de la surface, et on trouve sur la même ligne horizontale, dans la colonne correspondant à la pression, le chiffre 5c15, qui est le diamètre cherché.

Si la pression était 4 atmosphères, on trouverait de même 6c14, valeur plus forte que la précédente, ainsi que l'on a vu que cela devait être.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

### CONDITIONS D'ÉQUILIBRE D'UNE SOUPAPE DE SURETÉ

Le diamètre d'une soupape se trouvant ainsi déterminé, il faut charger cette dernière dans de certaines conditions pour qu'elle se maintienne sur son siége, sans laisser échapper la vapeur, tant que celle-ci ne dépasse point la tension maximum pour laquelle la soupape a été réglée. En principe, cette charge doit être évidemment égale à l'effort total exercé par la vapeur sous la partie inférieure de la soupape lorsqu'elle a atteint sa tension maximum réglementaire.

Pour les générateurs marchant à basse pression, le poids dont il faut charger une soupape n'est jamais considéable, puisque la pression intérieure dépasse peu celle de l'atmosphère ambiante. On pouvait, dans ce cas, charger la soupape d'un poids posé directement sur elle, en l'ajustant convenablement entre des guides verticaux qui lui laissent la liberté de s'élever avec la soupape.

Mais avec les hautes pressions, on comprend que les charges deviennent trop considérables pour adopter le même mode; on est obligé de se servir d'un levier intermédiaire qui, par l'inégalité de ses bras, permet de réduire de beaucoup le poids que l'on doit y suspendre.

Nous avons déjà expliqué (14) cette disposition et les calculs auxquels elle donne lieu. Nous n'y reviendrons donc que pour mémoire, et pour obtenir une plus exacte approximation en tenant compte du poids du levier et de la soupape, ainsi que de la contre-pression due à l'atmosphère extérieure.

La charge qui doit faire équilibre à la pression de la vapeur composée :

De l'effort exercé par la pression atmosphérique;

Du poids propre de la soupape;

Du poids suspendu à l'extrémité du levier multiplié par le rapport de ses bras;

Plus enfin du poids du levier lui-même.

Si le levier ne pesait rien, l'opération pour déterminer l'intensité du poids qui s'y trouve suspendu se réduirait à celle dont nous avons montré la forme (14), en calculant son action comme étant égale à l'effort total exercé par la vapeur, diminué de celui de l'atmosphère et du poids de la soupape. Mais ce levier pèse non-seulement de tout son poids, mais encore de toute la valeur du contre-poids qu'il faudrait placer à l'extrémité de son petit bras pour que son centre de gravité correspondît précisément au point où il appuie sur la soupape.

Au lieu de procéder par calculs, ce qui serait long et incertain, MM. les ingénieurs de l'administration proposent d'éprouver directement la charge simple du levier au moyen d'un peson à l'aide duquel on le soulèverait par le point même où il porte sur la soupape, tandis qu'il est à sa place et assemblé par son centre d'articulation. L'indication du peson correspondra juste au poids qu'il convient d'attribuer au levier pour sa part d'influence dans la charge totale.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Exemple. — Admettons qu'il s'agisse de déterminer le poids $p$ à suspendre au levier d'une soupape dans les conditions suivantes :

Diamètre de l'orifice de la soupape..... $d$ = 8 centimètres.
Pression de la vapeur (ou numéro du timbre)... $n$ = 5 atmosphères.
Poids de la soupape..... $p''$ = 1 kilog.
Poids du levier (expérience du peson)..... $p'$ = 7 kilog.
Rapport des bras du levier..... = 1/10

*Solution.* La pression totale P de la vapeur sous la soupape se détermine, ainsi qu'on le sait, de la manière suivante :

$$P = \frac{\pi d^2}{4} 1{,}0333 n = 50^{c.q.}24 \times 1{,}0333 \times 5 = 259^{k}668.$$

La pression atmosphérique E agit, de haut en bas, sur un cercle dont le diamètre est plus grand de 4 millimètres que celui de l'ouverture (voir plus loin p. 295); par conséquent, on trouve :

$$E = 0{,}7854 \times \overline{8{,}4}^{2} \times 1{,}0333 = 57^{k}263.$$

Ainsi, la charge P′, afférente au poids $p$ suspendu au levier, devient :

$$P' = 259^{k}668 - (57{,}263 + 7^{k} + 1^{k}) = 194^{k}405.$$

Enfin le poids $p$ cherché égale lui-même :

$$p = 0{,}1 \times 194^{k}405 = 19^{k}440.$$

## CONSTRUCTION D'UNE SOUPAPE DE SURETÉ

Pour qu'une soupape fonctionne bien, il faut qu'elle soit parfaitement ajustée sur son siége et qu'elle s'y repose bien exactement lorsqu'elle a été accidentellement soulevée. Pour remplir ces conditions principales, on la dispose généralement comme celle indiquée fig. 3, pl. 8, où elle est représentée en coupe verticale, et correspond à peu près aux plus grandes dimensions usuelles.

La soupape B est un disque circulaire, un peu concave, muni à sa partie inférieure de trois ailettes $a$ dont l'extérieur est tourné au diamètre $d$ de l'orifice. Elle est surmontée d'une partie cylindrique percée d'un trou dans lequel pénètre un peu librement un goujon d'acier $b$. Cette pièce, dont les extrémités sont tournées en pointes obtuses, sert d'intermédiaire entre la soupape et la pression du levier I; elle a pour objet de supporter la légère transformation du mouvement rectiligne de la soupape en celui d'arc de cercle suivant lequel le levier se meut lorsque la soupape se lève, et de laisser alors cette dernière libre pour retomber à plat sur son siége.

Celui-ci est une pièce cylindrique en bronze J qui se fixe sur la tubulure principale en fonte A. Le contact avec la soupape est établi par un bord qui doit être extrêmement étroit, conformément aux règlements administratifs.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La loi qui régit les machines à vapeur dit en effet que la largeur de la partie circulaire constituant le contact de la soupape avec son siége ne doit pas dépasser la trentième partie du diamètre, et ne doit excéder, dans aucun cas, 2 millimètres. Comme complément de cette règle générale, l'instruction ministérielle a donné la table suivante des relations entre les différents diamètres de soupapes et la surface de recouvrement.

| ORIFICES EXPOSÉS DIRECTEMENT A L'ACTION DE LA VAPEUR. | | SURFACES DE CONTACT AVEC LA SOUPAPE. | | |
|---|---|---|---|---|
| Daimètres. | Sections. | Largeurs des rebords. | Diamètres. | Sections. |
| millimètres. | mill. carrés. | millimètres. | millimètres. | mill. carrés. |
| 20 | 314 | 0,67 | 21,34 | 357 |
| 25 | 491 | 0,83 | 26,66 | 558 |
| 30 | 707 | 1,00 | 32,00 | 804 |
| 35 | 962 | 1,11 | 37,22 | 1087 |
| 40 | 1257 | 1,32 | 42,54 | 1426 |
| 45 | 1590 | 1,50 | 48,00 | 1810 |
| 50 | 1963 | 1,67 | 53,34 | 2233 |
| 55 | 2376 | 1,83 | 58,66 | 2706 |
| 60 (et au-dessus.) | 2827 | 2,00 | 64,00 | 3217 |

La soupape étant bien construite suivant ces conditions, il faut que le levier I soit aussi disposé de façon à lui laisser une mobilité régulière et offre le moins possible de résistances passives qui viennent fausser les conditions d'équilibre calculées.

La disposition ordinaire est celle indiquée fig. 3, où l'on remarque que le levier a son centre d'oscillation dans un plan horizontal situé un peu au-dessus du point de contact avec le pointeau *b* par lequel il appuie sur la soupape. Le point d'appui et d'oscillation du levier est pris sur un support en fer K, vissé sur la bride du siége J, et dont la partie supérieure est fourchue pour recevoir le levier. Cet assemblage doit être fait très-exactement, et le levier doit être aussi guidé latéralement, comme il l'est en effet par une mortaise pratiquée dans le support H, pour que ses mouvements verticaux aient lieu sans déviations.

L'assemblage de l'articulation est fait ici (fig. 3) au moyen d'une goupille cylindrique, ce qui peut être sans inconvénient pour une grande soupape qui représente une puissance considérable comparée aux résistances passives du mécanisme. Mais pour les petites dimensions, il est bon d'adopter le système représenté fig. 5, pl. 8, où l'on voit que le goujon qui assemble le levier avec son support est taillé en couteau comme celui d'un fléau de balance. De cette façon, le frottement de l'axe est évidemment beaucoup moindre que dans le premier cas.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Des constructeurs ont adopté un mode différent pour centrer le levier. Ils ont muni celui-ci de deux longues portées, figurant des moyeux à l'endroit du centre, et l'ont ainsi monté entre pointes. Outre une extrême mobilité obtenue par ce système, l'écartement considérable des pointes donne au levier une assiette suffisante pour que l'on puisse supprimer son guide latéral, ou du moins lui donner, dans ce guide, assez de jeu pour ne pas craindre un frottement accidentel.

Soupape des appareils de Saint-Germain (fig. 11, pl. 8). — Avant de terminer ce sujet, nous reviendrons sur un système de soupape appliqué aux générateurs du chemin de fer atmosphérique de Saint-Germain, et dont nous avons dit quelques mots en décrivant ces appareils (p. 195).

Ce système est représenté en détail et en coupe sur la fig. 11 de la pl. 8. Il a de remarquable que la soupape A et son siége B se trouvent recouverts d'une cloche en bronze C qui a pour objet d'empêcher la vapeur de s'échapper directement dans l'intérieur du local des générateurs.

Pour cela, la tubulure principale en fonte D présente, à son intérieur, deux canaux distincts *a* et *b*, dont l'un communique exclusivement avec le générateur, et l'autre avec l'atmosphère par un conduit vertical E qui s'élève jusqu'au-dessus du bâtiment. Le siége de la soupape est alors ajusté sur l'ouverture du premier canal *a*, tandis que la cloche C ferme le conduit *b* allant à l'extérieur. Par conséquent, lorsque la vapeur s'échappe, elle se trouve confinée dans la cloche C, et n'a d'autre issue que le canal *b* qui la dirige à l'extérieur par le tuyau E.

## REMARQUE SUR LES FONCTIONS DES SOUPAPES DE SURETÉ

Bien que toutes les conditions calculées, qui servent de base à l'établissement des soupapes de sûreté, soient rigoureusement établies sur les prévisions d'une théorie, qui n'a pourtant rien de douteux ni de difficile à réaliser, quelques personnes ont néanmoins constaté que, contrairement à ce que l'on pouvait prévoir, il est arrivé qu'une soupape s'est levée *avant que la pression maximum,* pour laquelle elle était calculée, *ne fût atteinte.*

Ce fait singulier doit probablement dépendre d'une imperfection dans le contact des surfaces, qui laissent peu à peu la pression s'établir entre elles; la section se trouvant par ce fait augmentée de toute la surface du rebord, l'effort total qui fait lever la soupape est augmenté d'autant, et devient supérieur alors à celui qui avait été prévu. Si c'est là la véritable cause de cette anomalie, elle se produira d'autant moins que la soupape sera plus grande, ou pour mieux dire, que le rebord sera plus mince par rapport au diamètre.

Lorsqu'un tel fait se présente, on doit s'assurer de l'exactitude du manomètre et régler la charge de la soupape après avoir vérifié son rodage, pour qu'elle ne se lève qu'au moment où le manomètre accuse la tension limite, en faisant toutefois constater la surcharge par les délégués de l'administration.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## CONCLUSION

### SUR LES APPAREILS D'OBSERVATION ET DE SURETÉ

Les appareils sur lesquels nous avons appelé l'attention de nos lecteurs ne forment réellement qu'une faible partie des nombreux systèmes différents qui ont été proposés et parfois même mis en application. Dans l'impossibilité de les mentionner tous, nous nous sommes réservé de décrire ceux qui sont le plus généralement en usage, et qui, du reste, permettront d'en comprendre d'autres analogues, que l'on voit également appliqués et que nous avons été forcé de passer sous silence.

Toutefois, nous aurions pu parler de quelques appareils qui ont été réellement employés il y a déjà un certain nombre d'années, mais qui ne le sont plus ou très-peu aujourd'hui; tels que :

1° Les rondelles fusibles, ou obturateurs pleins composés d'un métal qui fond à une très-basse température; on se rappelle que ces rondelles avaient pour but, en se dissolvant aux températures et pressions limites, d'offrir une issue à la vapeur comme les soupapes de sûreté;

2° Les obturateurs en membranes métalliques flexibles qui se courbent et crèvent sous un excès de pression;

3° Les soupapes de rentrée d'air ou *reniflards*, qui se plaçaient principalement sur les chaudières prismatiques, et qui devaient servir à faire rentrer l'air extérieur dans le générateur au moment de son refroidissement, lequel produit nécessairement le vide si l'air n'y rentre pas, et par suite met la chaudière dans la position d'être écrasée par la pression atmosphérique.

On sait que les générateurs cylindriques et tubulaires dont on fait usage actuellement, et qui sont en forte tôle pour marcher à haute pression, sont à l'abri de ce danger.

Comme il nous a paru superflu de revenir sur ces sortes d'instruments, nous ne pouvons qu'engager les personnes qui désireraient être complétement renseignées à ce sujet, et en général sur tous les genres d'appareils de sûreté, à parcourir l'excellent *Traité de la chaleur* (2e édit.) du savant et regrettable Péclet, qui s'était attaché à les décrire et à les étudier tous avec la clarté et l'intelligence qui distinguaient le célèbre physicien.

FIN DU CHAPITRE HUITIÈME.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

# CHAPITRE IX

## INCRUSTATIONS DES GÉNÉRATEURS A VAPEUR MOYENS DE LES ÉVITER

Tout le monde sait que, lorsqu'on chauffe et qu'on fait évaporer constamment de l'eau dans un même vase sans le nettoyer, il se forme des dépôts calcaires qui proviennent de diverses substances que l'eau retient en dissolution ou en suspension et qui ne s'évaporent pas avec elle. Cet effet, qui peut ne pas avoir ordinairement de suite fâcheuse lorsqu'il s'agit de petites opérations d'économie domestique ou de fabrication, donne lieu, au contraire, à de graves inconvénients pour les générateurs à vapeur; c'est peut-être l'une des causes les plus sérieuses des explosions et des accidents qui en résultent.

On a successivement essayé une foule de procédés pour éviter les incrustations, mais le problème ne paraît pas avoir jusqu'ici reçu une solution qui satisfasse toutes les exigences. Il faut dire, du reste, qu'il est d'autant plus difficile à résoudre que la composition des eaux n'est pas la même partout, de sorte qu'un procédé qui présente parfois quelques chances de succès dans une localité peut échouer entièrement dans une autre. Nous voulons parler surtout des moyens qui ont pour but d'opérer dans la chaudière même, car on comprend sans doute qu'en purifiant l'eau avant de l'introduire dans le générateur, on conserve alors une plus grande liberté pour le choix des ingrédients sur lesquels, dans le cas contraire, l'action de la chaleur peut agir en donnant naissance à des résidus qui détruisent le métal, ou bien, étant entraînés partiellement par la vapeur, nuisent à la machine même.

Sans avoir la prétention de traiter cette grave question des incrustations d'une manière complète, il nous a paru utile, à cause de l'importance même du sujet, de faire connaître au moins les méthodes pratiques les plus employées depuis quelques années (1).

Avant de décrire ces procédés, disons quelques mots sur la composition des eaux et sur la nature des incrustations.

### NATURE DES DÉPOTS INCRUSTANTS

L'eau non distillée contient généralement en dissolution du *sulfate de chaux* (du plâtre) et du *carbonate de chaux* (de la craie) en quantité plus ou moins grande, et de

(1) Nous puisons à cet effet une partie des renseignements qui suivent dans le *Traité de la chaleur*, de Péclet (3e édit.), et dans le *Guide du chauffeur*, de MM. Grouvelle et Jaunez, qui sont entrés à cet égard dans des détails intéressants, comme aussi dans les brevets d'invention pris en France et à l'étranger.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

plus quelques autres substances, mais en quantités plus faibles. De certaines eaux renferment même des parties acides qui détruisent très-rapidement les vases métalliques dans lesquels on les fait évaporer.

Plusieurs chimistes très-distingués ont fait, à diverses époques, un grand nombre d'expériences pour analyser les eaux de Paris et d'autres localités, et ont constaté que ces eaux présentent des compositions très-variables. Nous croyons devoir reproduire les analyses de plusieurs d'entre elles, comme étant le plus souvent employées dans l'alimentation des chaudières.

Pour l'eau de Seine, par exemple, prise à différents points de Paris, l'analyse chimique de MM. Henry et Boutron a donné les résultats suivants :

| SUBSTANCES CONTENUES dans 1 litre d'eau de Seine. | PONT d'Ivry. | PONT Notre-Dame. | POMPE du Gros-Caillou. | POMPE de Chaillot. |
|---|---|---|---|---|
| | litre. | litre. | litre. | litre. |
| Air atmosphérique | 0.003 | 0.003 | 0.004 | 0.003 |
| Acide carbonique libre | 0.013 | 0.014 | 0.014 | 0.013 |
| | gramme. | gramme. | gramme. | gramme. |
| Bicarbonate de chaux | 0.132 | 0.174 | 0.229 | 0.230 |
| — de magnésie | 0.060 | 0.062 | 0.075 | 0.076 |
| Sulfate de chaux anhydre | 0.020 | 0.039 | 0.040 | 0.040 |
| — de magnésie anhydres. | 0.010 | 0.017 | 0.027 | 0.030 |
| — de soude anhydres. | | | | |
| Chlorure de sodium | | | | |
| — de calcium | 0.010 | 0.025 | 0.032 | 0.032 |
| — de magnésium | | | | |
| Sels de potasse | traces. | traces. | traces. | traces. |
| Nitrate alcalin | indices. | indices. | indices. | indices. |
| Silice, alumine, oxyde de fer | 0.008 | 0.014 | 0.023 | 0.024 |
| Matière organique souvent azotée. | traces. | traces. | traces très-sensibles. | traces très-sensibles. |
| Poids des matières minéralisantes. | 0.240 | 0.334 | 0.426 | 0.432 |

Les eaux du puits de Grenelle, qui ne renferment pas de sulfate de chaux, seraient les plus propres à l'alimentation des générateurs; mais elles ne sont pas assez abondantes et sont exclusivement employées aux usages domestiques.

L'eau du canal de l'Ourcq est, après l'eau de la Seine, celle que l'on emploie le plus généralement à Paris; elle est beaucoup moins chargée que les eaux de Belleville, de Ménilmontant et des Près-Saint-Gervais, comme on peut le voir par le tableau qui suit :

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

| SUBSTANCES CONTENUES dans 1 litre de ces eaux. | EAU d'Arcueil. | EAU de Belleville. | EAU des Prés-Saint-Gervais. | EAU du puits de Grenelle. | EAU du canal de l'Ourcq. |
|---|---|---|---|---|---|
| | grammes. | grammes. | grammes. | grammes. | grammes. |
| Bicarbonate de chaux..... | 0.458 | 0.400 | 0.032 | 0.029 | 0.458 |
| *Id.* de magnésie..... | 0.060 | | 0.012 | 0.009 | 0.075 |
| *Id.* de potasse..... | » | » | » | 0.010 | » |
| Sulfate de chaux..... | 0.138 | 1.100 | 0.430 | » | 0.080 |
| *Id.* de magnésie..... | 0.072 | 0.520 | 0.100 | 0.032 | 0.095 |
| Chlorures de calcium, sodium, etc.... | 0.081 | 0.400 | 0.600 | 0.057 | 0.113 |
| Acide silicique, oxyde de fer, alumine, etc..... | 0.018 | 0.100 | 0.020 | 0.012 | 0.069 |
| Matières organiques..... .... | Traces. | » | » | » | » |
| | 0.527 | 2.520 | 1.194 | 0.149 | 0.590 |

A l'hydrotimètre de MM. Boutron et Boudet, ces diverses eaux sont cotées pour leurs degrés de pureté, le chiffre le plus élevé correspondant à l'eau la moins pure, de la manière suivante :

| | | | |
|---|---|---|---|
| Eaux de Grenelle..... | 9 à 11 degrés. | Eaux de Seine... | 17 à 20 degrés. |
| Eaux de l'Ourcq..... | » 31 » | Eaux d'Arcueil... | » 37,5 » |
| Eaux des Prés-Saint-Gervais. | » 76 » | Eaux de Belleville. | » 155 » |

Ainsi, pour les chaudières comme pour les usages domestiques, ce serait l'eau du puits de Grenelle, et ensuite celles de la Seine, qui seraient les plus convenables à appliquer.

Quand on fait vaporiser l'eau contenue dans un générateur, les substances solides qu'elle renferme en dissolution ne se vaporisant pas avec elle, on conçoit qu'elle se sature de plus en plus, et par suite les sels calcaires se précipitent sur les parois métalliques. Si on ne les épuise pas fréquemment par un moyen quelconque, ils finissent par se solidifier et former sur les parois de la chaudière une croûte dont l'épaisseur augmente ainsi que sa dureté, au point que, pour parvenir à les détacher, on est souvent obligé de recourir au burin et au marteau.

Lorsqu'un générateur se trouve ainsi garni intérieurement d'une couche de dépôts solides, que l'on désigne ordinairement sous le nom de *tartre,* la vaporisation devient difficile par la diminution de la conductibilité des parois, et de plus on court les plus grands dangers d'explosion.

En effet, la tôle ainsi recouverte intérieurement d'une couche de substance qui arrête la transmission prompte de la chaleur, l'extérieur peut s'échauffer jusqu'à rougir, ce qui diminue nécessairement la résistance du métal tout en augmentant l'oxydation qui, par suite, réduit encore plus rapidement son épaisseur.

Cet effet sera d'autant plus sensible que le volume intérieur du générateur est plus restreint. Ainsi, à l'égard d'une chaudière tubulaire, le tartre peut augmenter jusqu'au point de remplir presque complétement les intervalles des tubes.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si en outre il arrive que, par quelques fissures dans la couche du tartre, l'eau puisse s'introduire entre elle et la tôle affaiblie et presque rouge, il en résulte une formation subite de vapeur qui détache alors cette couche sur une grande étendue, découvre une plus grande partie de paroi rouge ou beaucoup plus élevée de température que celle de la vaporisation, et met enfin l'eau de la chaudière en contact avec des parois surchauffées, ce qui donne lieu à la production subite d'un grand volume de vapeur qui cause presque inévitablement une explosion.

En admettant que ce cas extrême ne se présente que peu fréquemment, la présence de dépôts solides et d'une grande épaisseur doit amener, sans aucun doute, la destruction du générateur si on les laisse persister, et dans tous les cas ils en diminuent l'effet utile. Il est donc de la plus haute importance de surveiller l'incrustation d'une chaudière, en cherchant à éviter que les dépôts se solidifient, s'il est possible de le faire, ou au moins à en débarrasser le générateur avant que la couche n'ait pris une certaine épaisseur.

Les moyens proposés pour éviter les effets désastreux des dépôts calcaires sont, d'après cela, basés sur différents principes :

1° Extractions fréquentes avant la solidification et nettoyages réitérés;

2° Additions de substances capables d'empêcher l'adhérence aux parois;

3° Additions de substances qui viennent se combiner chimiquement avec les sels calcaires et modifier leurs propriétés;

4° Alimentation avec de l'eau préalablement épurée.

Ce sont ces divers moyens que nous allons faire connaître succinctement.

## PROCÉDÉS POUR ÉVITER LES INCONVÉNIENTS DUS AUX DÉPOTS CALCAIRES

### EXTRACTIONS

L'extraction mécanique des dépôts et le nettoyage fréquent d'un générateur sont les procédés les plus généraux, indépendamment de la nature des dépôts.

Ces opérations doivent se renouveler aussi souvent que l'exigent les propriétés plus ou moins incrustantes des eaux que l'on emploie.

MM. Grouvelle et Jaunez disent qu'avec de l'eau de Seine un nettoyage par mois suffit, tandis que, dans d'autres lieux, à la fonderie de canons de Liége, par exemple, il faut nettoyer après quelques jours de marche seulement. Péclet rapporte qu'à la fabrique de céruse de Clichy, après trois semaines de travail, à dix heures par jour, les dépôts formés dans le générateur avaient acquis 5 centimètres d'épaisseur, ce qui amenait la destruction des bouilleurs en huit ou dix mois.

L'extraction des dépôts peut s'effectuer à l'aide du tube spécial qui a été décrit à propos du générateur type (pl. 1), au moins pour la partie liquide. Quant à la partie solide, fixée aux parois des bouilleurs, principalement dans la partie la plus fortement chauffée, on ne peut l'extraire qu'en frappant avec un marteau, après avoir préalablement vidé le générateur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Lorsqu'on travaille avec de l'eau moyennement chargée, l'extraction et le nettoyage suffisent, en réglant les époques de nettoyage assez rapprochées pour que les dépôts n'aient pas encore acquis de la dureté. Cependant, s'il reste quelques parties solides à extraire, c'est alors qu'on fait usage du marteau dont on frappe intérieurement les parois de la chaudière. Cette opération est d'autant plus facile que le diamètre des bouilleurs permet d'y faire pénétrer un homme ou un enfant.

Seulement, il est bien recommandé de ne vider la chaudière que froide : sans cela, le fourneau encore très-chaud calcine les résidus, après le départ de l'eau, et les rend très-difficiles à détacher.

Par conséquent, pour ce qui regarde le nettoyage d'un générateur, il est indispensable que pas une partie soit inaccessible, au moins aux outils nécessaires pour détacher et enlever les dépôts. Il est également important que les parties en contact direct avec le foyer ne présentent pas de rétrécissements prononcés dans lesquels les produits calcaires se déposent, se concrétionnent promptement et les isolent presque immédiatement du liquide.

Cette situation se rencontre surtout dans l'assemblage de la boîte à feu des locomotives et d'autres générateurs d'une construction analogue. Mais on a le soin d'y disposer des tampons que l'on retire à volonté pour y introduire des ringards et enlever des dépôts. D'après cela, les boîtes à feu de forme circulaire ne présentent pas la même facilité et nécessitent par cela même d'autres dispositions spéciales.

MM. Grouvelle et Jaunez conseillent l'emploi de l'acide chlorhydrique pour opérer le nettoyage d'un générateur lorsque les dépôts contiennent peu de sulfate de chaux. Ce procédé, que ces ingénieurs décrivent avec une entière connaissance de cause, exige en effet du soin et de l'habitude, à cause de l'acide dont l'action mal ménagée pourrait nuire au métal.

### SUBSTANCES EMPÊCHANT L'ADHÉRENCE DES DÉPÔTS

Lorsque les eaux sont fortement chargées de sels calcaires et que les nettoyages deviennent trop fréquents, sans même empêcher une prompte formation de la croûte solide, il devient urgent de prendre des précautions spéciales pour en diminuer les inconvénients.

Un procédé depuis longtemps connu et employé avec quelque succès consiste à jeter dans le générateur une certaine quantité de pommes de terre ou quelque autre matière amilacée. La substance amidonneuse, en se dissolvant dans l'eau, se mêle peu à peu aux produits calcaires, les enveloppe et les empêche de se fixer aux parois du générateur; ils restent alors à l'état de boue épaisse que l'on peut extraire à l'aide des moyens ordinaires.

Les sons gras ont été employés de la même façon; mais ils auraient l'inconvénient, à leur tour, de former des dépôts calcinés qui exposent encore les chaudières à brûler.

L'emploi de la pomme de terre est réellement efficace; mais il paraît que la nécessité de s'en approvisionner y a fait renoncer pour la navigation.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour les générateurs fixes, cette objection ne se présente pas, attendu que la quantité de pommes de terre à employer est relativement faible. MM. Grouvelle et Jaunez, dans leur *Traité*, disent que pour un générateur de 15 chevaux (soit environ 20 mètres de surface de chauffe) que l'on nettoie une fois par mois, 8 à 10 litres de pommes de terre suffisent à chaque nettoyage.

M. Pelouze, père, en 1824, et plus tard, M. Chaix, en 1836, ont proposé l'argile pour arriver au même résultat. Des expériences ont été faites de cette façon. Toutefois, l'application n'est pas devenue générale, à cause des difficultés qu'elle présente. Pour atteindre le but proposé, il faut que l'argile soit bien délayée avant de l'introduire dans la chaudière, et pour ainsi dire fournie au générateur au fur et à mesure de l'alimentation, sans quoi, si elle est introduite par masse pâteuse et sans régularité, il peut s'en trouver un excès entraîné jusque dans la machine où il encrasse le piston et les organes distributeurs. Des masses qui se déposeraient sur le fond de la chaudière pourraient également la faire rougir et brûler.

En résumé, l'argile, qui avait montré un efficacité complète, n'en a pas moins été abandonnée pour cet usage.

On a employé de même la sciure de bois et le verre pilé, comme corps pulvérulents qui s'interposent dans la masse des matières incrustantes et les empêchent de former une croûte solide. Mais en général, ces matières, qui n'ont aucune onctuosité, étant entraînées partiellement avec la vapeur dans la machine, nuisent à son fonctionnement, et même la détruisent. Cette observation s'applique surtout au verre pilé, qui non-seulement usait très-promptement les parties frottantes de la machine, mais aussi s'attachait au fond des bouilleurs qui brûlaient inévitablement.

On a également fait usage de matières telles que la plombagine et le suif. Cette dernière substance est encore employée.

Nous trouvons, dans le *Traité* de Péclet, qu'en 1845, MM. Néron et Kurtz firent la remarque qu'une chaudière, qui était alimentée par une rivière dont les eaux étaient chargées de matières colorantes provenant d'une teinturerie, ne donnait pas de trace d'incrustation. Mettant cette observation à profit, ils firent des essais en plaçant un sac de copeaux de bois de campêche dans l'eau d'alimentation d'un générateur qui la recevait ainsi chargée de matières colorantes. Les résultats furent généralement bons. La matière colorante paraît être absorbée par les dépôts et les empêche d'adhérer aux parois de la chaudière.

Mais pour les machines alimentées avec de l'eau de mer, il n'en a pas été de même; les incrustations n'ont pas été évitées par ce procédé.

A Lille et à Saint-Quentin, où les eaux ne contiennent pas de sulfate de chaux, ce procédé a, au contraire, été efficace. Mais dans les localités où les eaux contiennent de ce dernier sel, il n'a pas eu d'effet, d'où on en a déduit que la matière colorante n'agit probablement que sur le carbonate de chaux.

En général, si l'on examine les procédés de désincrustation, on remarque qu'ils ont d'autant moins d'effet que les eaux employées sont plus chargées de sulfate de chaux.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

### PROCÉDÉS CHIMIQUES

En dehors des moyens proposés ci-dessus, il y a de nombreux procédés qui ont pour principe la transformation, dans l'intérieur du générateur même, des sels calcaires en autres substances moins susceptibles de former des dépôts solides ou corrosifs.

Celui qui semble le plus efficace consiste dans l'emploi du carbonate de soude ou de potasse introduit dans la chaudière. Ce procédé a été mis en avant par M. Kuhlmann, qui propose d'introduire par mois, dans une chaudière, 100 à 150 grammes de sel de soude par force de cheval.

Cependant, ce procédé est encore sans effet à Paris, et partout où l'eau renferme du sulfate de chaux.

M. C. Polonceau, qui pouvait connaître mieux que personne les inconvénients des incrustations pour les locomotives, dont les tubes se couvrent de tartre qu'il est ensuite très-difficile d'enlever, imagina de détacher le tartre en introduisant successivement dans la chaudière pleine d'eau, maintenue en ébullition pendant 12 à 15 heures, du carbonate de soude et de l'acide chlorhydrique. Le résultat en a été complet : c'est-à-dire que les dépôts se trouvaient transformés et dissous, et pouvaient être ensuite facilement extraits par un simple lavage.

M. Lelong-Burnet, dans une addition à son premier brevet de purification des eaux dont nous parlerons plus loin, a également proposé d'ajouter à l'eau de la chaudière de l'acide hydrochlorique pour dissoudre les carbonates et désagréger les sulfates ou autres matières terreuses. Il a aussi proposé d'employer d'autres acides, pouvant former avec la chaux des sels solubles tels que l'acide nitrique et l'acide acétique.

On objecte contre ce procédé que l'action de l'acide peut s'exercer d'une manière fâcheuse sur le métal de la chaudière.

MM. Grouvelle et Jaunez décrivent un procédé dû à M. Bevenot, pharmacien à Boulogne-sur-Mer, et qui consiste dans une composition particulière que l'on introduit dans un générateur où il transforme les sels calcaires en résidus boueux ou pulvérulents qui ne forment aucune incrustation. Cette composition comprenait du sel marin, du sel de soude et de l'extrait de tan sec; c'est à cette dernière substance qu'il est permis d'attribuer le succès du procédé, abandonné cependant, peut-être à cause de son haut prix de revient.

Dans la généralité des applications, on sait que les procédés directs de désincrustation sont remplacés par des soins, des extractions et des nettoyages fréquents, à moins que l'on se serve d'une eau exceptionnellement calcaire. Mais il est évident que, si l'on n'a à sa disposition que des eaux corrosives qui attaquent le métal des générateurs, il faut absolument avoir recours à des moyens plus directs et plus certains.

En dehors des moyens d'épuration ou de distillation préalables des eaux em-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ployées à l'alimentation, on a fait usage de chaudières en cuivre dans lesquelles on met de la ferraille, et que l'on enduit en outre intérieurement d'une couche de suif mélangé de mine de plomb. (PÉCLET, 3e édit., IIe vol.)

### ÉPURATION PRÉALABLE DE L'EAU D'ALIMENTATION

Il ne peut pas exister de meilleur procédé, pour éviter les incrustations, que d'alimenter avec de l'eau déjà pure et privée de tout sel incrustant ou acide corrosif. Il est juste d'ajouter que c'est bien l'avis de tout le monde, et que, si l'on n'agit pas de cette façon, c'est parce que ce n'est pas toujours possible.

Pour atteindre ce but, deux moyens sont en présence : distillation préalable ou épuration chimique.

S'il fallait distiller purement et simplement l'eau que l'on destine à être introduite dans une chaudière, la dépense de combustible serait double, il n'y faut donc pas penser, à moins qu'on ne puisse utiliser pour cela les propres chaleurs perdues du fourneau.

C'est en effet ce qui a été essayé par quelques auteurs en opérant la première chauffe de l'eau dans des récipients d'une importance moindre que la chaudière, et qui, n'étant pas exposés directement au foyer, donnent lieu à des incrustations moins énergiques.

On pourrait aussi diminuer beaucoup l'importance des dépôts en condensant, sur des surfaces froides, la vapeur qui a exercé son action sur le moteur, pour la recueillir et fournir de nouveau à l'alimentation, en ne lui ajoutant que la faible quantité d'eau nécessaire pour réparer les pertes inévitables.

Il paraît que des essais de cette nature ont été faits sur des machines marines dans lesquelles la vapeur était condensée dans des capacités plongées dans la mer, à l'extérieur du bâtiment. Mais il est arrivé que ces capacités se recouvraient extérieurement, à leur tour, d'un tartre déposé par l'eau salée, lequel détruisait leur conductibilité.

M. E. Bourdon a fait usage, dans le même but, d'un condenseur à tubes, monté sur un axe tournant, afin de renouveler plus facilement l'eau froide en contact avec les surfaces métalliques, contre lesquelles venait se condenser la vapeur destinée de nouveau à l'alimentation. Nous entrerons dans quelques détails sur cet appareil en parlant des appareils de condensation en général.

Enfin, nous arrivons au procédé qui résume par sa nature les principales difficultés du problème : c'est celui dû à M. Lelong-Burnet, qui, depuis plus de dix ans, s'est beaucoup occupé de cette importante question, et qui a désigné son système par : *procédé chimico-mécanique* (1). Cette méthode consiste à mêler préalablement à l'eau d'alimentation les agents chimiques nécessaires pour précipiter toutes

(1) M. Lelong-Burnet a pris successivement plusieurs brevets, en France et ailleurs, pour son système de purification préalable des eaux appliquées aux chaudières à vapeur ou à d'autres usages. Le premier date du 14 septembre 1849 et a pour titre : *Procédé chimique propre à dégager les eaux diverses, qui doivent servir aux générateurs à vapeur, des matières calcaires qu'elles contiennent, et par suite, éviter les incrustations.* Le second, demandé trois mois



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les substances incrustantes, afin de n'envoyer que de l'eau pure dans le générateur. A cet effet, l'auteur emploie des réservoirs spéciaux, munis d'agitateurs pour effectuer le brassage des matières projetées dans l'eau en proportion convenable, afin de dissoudre les sels existants et d'en former d'autres qui se précipitent au fond des cuves.

On voit que, pour l'application de ce procédé, il est indispensable d'analyser avec soin, à l'avance, l'eau destinée à l'alimentation, puis de choisir les réactifs qui conviennent le mieux à la précipitation complète des sels en dissolution. M. Lelong-Burnet a fait à ce sujet un grand nombre d'expériences, afin de reconnaître, d'une part, les agents les plus propres à remplir le but, et de l'autre, les proportions qu'il faudrait adopter suivant la nature des eaux employées. Il a proposé, à cet effet, une foule d'agents, et en particulier les solutions de potasse et de soude caustique, celles de carbonates alcalins, la baryte, la strontiane, des oxalates ou tartrates solubles, etc.

Il est évident, selon nous, que tout procédé consistant à introduire des substances quelconques dans le générateur même ne vaut pas celui qui a pour objet d'épurer l'eau d'alimentation. Aussi, le système de M. Lelong-Burnet nous semble-t-il parfaitement rationnel; il en a fait un certain nombre d'applications qui ont donné des résultats très-satisfaisants; nous avons la conviction qu'il se serait propagé davantage, si les droits d'auteur n'avaient paru trop élevés à la plupart des manufacturiers.

Des expériences faites, en notre présence, chez MM. Varrall, Elwell et Poulot, constructeurs à Paris, il est résulté une économie notable dans la consommation du combustible, par l'emploi des eaux ainsi épurées, qui ont permis de faire fonctionner des chaudières pendant plusieurs mois consécutifs sans aucun nettoyage, et qui n'ont présenté à l'ouverture aucun dépôt adhérent.

La maison Cail et C^ie^ de Paris, qui n'exécute aujourd'hui, presque exclusivement, que des chaudières tubulaires, auxquelles elle apporte d'ailleurs tous les soins désirables, a compris combien il importe d'alimenter avec des eaux pures; aussi, après avoir été des premières à appliquer le système de M. Lelong-Burnet, elle a cru devoir se faire breveter en décembre 1857, tout spécialement pour *l'application des retours de vapeur et de l'eau de pluie à l'alimentation des générateurs tubulaires, et pour l'application de ces derniers aux sucreries et aux raffineries.*

Plusieurs chimistes étrangers se sont également occupés de la purification des eaux destinées soit aux usages domestiques, soit à l'alimentation des générateurs à vapeur. Ainsi M. Van Dencorput, professeur de chimie au musée royal de Bruxelles, a décrit, en 1856, dans les *Annales des travaux publics de Belgique*, un procédé dans lequel il indique l'emploi du *silicate de potasse* ou *de soude*, pour rendre les eaux douces, quelle que soit d'ailleurs leur nature séléniteuse ou carbonatée. Il se forme,

plus tard, a pour titre : *Moyens de purifier les eaux en général, de manière à ce qu'elles puissent servir à certains usages déterminés;* ces deux brevets sont accompagnés d'un grand nombre d'additions. Un dernier brevet plus récent (du 20 juin 1856) porte : *Applications du calorique perdu des appareils à vapeur et foyers quelconques au chauffage préparatoire de l'eau épurée d'alimentation des générateurs.*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dit l'auteur, par l'addition de ce sel, un silicate parfaitement insoluble, tandis que l'eau ne retient en échange qu'un sulfate ou un carbonate alcalin, dont la présence n'a rien de nuisible pour la plupart des applications industrielles.

M. de Jung a importé récemment en France un procédé analogue dû à MM. Buft et Wersmann, chimistes anglais, qui ont aussi reconnu que, pour débarrasser l'eau de la magnésie et de la chaux, le silicate de soude, mélangé au besoin avec du carbonate de soude, remplissait bien le but. Pour cela, ces sels sont introduits dans l'eau en quantité convenable, et on a le soin d'agiter le tout et de laisser reposer pendant un certain temps.

Après avoir constaté le degré de dureté ou de crudité de l'eau (ce qui a lieu soit avec l'appareil du docteur Clarcke, soit avec l'hydrotimètre de MM. Boutron et Boudet), on ajoute à chaque hectolitre d'eau 3 grammes de carbonate de soude anhydre pour chaque degré déterminé de dureté, et 3 grammes de silice pour chaque gramme de magnésie que le volume d'eau contient.

Nous avons vu, chez M. de Jung, des eaux provenant de différents puits des environs de Paris ainsi traitées par ce procédé, et rendues parfaitement douces et potables.

En résumé, l'épuration préalable de l'eau d'alimentation doit être le but de tous les efforts tentés pour empêcher les incrustations et éviter les graves accidents qui peuvent en résulter. Si l'introduction, dans un générateur, de substances désincrustantes produit souvent un bon effet, leurs résidus ont aussi des inconvénients que nous avons signalés. L'eau rigoureusement pure est donc favorable à l'économie du combustible, à la conservation du générateur et à la régularité de la vaporisation.

## CONCLUSIONS GÉNÉRALES SUR LES GÉNÉRATEURS A VAPEUR FIXES

Avant que l'on soit fixé sur les bases de l'établissement d'un appareil vaporisatoire, tant sur ses dispositions générales que sur la nature des matériaux propres à sa construction, on a dû faire des recherches sur la partie de la théorie, de la propagation de la chaleur applicable à ce nouvel objet. Des ingénieurs et des physiciens ont alors déterminé, par expérience, comment la chaleur se transmet au travers d'une paroi métallique, suivant sa nature et son épaisseur; par conséquent, comment la vapeur se produit dans un vase soumis à l'action d'un foyer.

Le savant Péclet, qui s'est tout particulièrement occupé de la transmission de la chaleur, a cité des expériences directes faites par Christian, par lesquelles cet ingénieur a trouvé qu'une plaque de fonte, exposée au feu le plus violent, laisse passer la quantité de chaleur suffisante pour vaporiser 100 kilogrammes d'eau dans 1 heure. Il cite encore une expérience de Clément qui a obtenu le même résultat, avec une plaque de cuivre de 2 à 3 millimètres d'épaisseur seulement.

Par conséquent, l'épaisseur et la nature du métal n'auraient pas d'influence sur la quantité de chaleur qui peut se transmettre dans un temps donné, au travers des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

parois d'un récipient renfermant de l'eau soumise à la vaporisation. Cependant, comme la vitesse de transmission de la chaleur est proportionnelle à la différence de température des deux faces de la paroi chauffée, on doit pouvoir grandement modifier l'intensité de la vaporisation en favorisant le renouvellement, par une circulation active, du liquide qui mouille les parois intérieures d'une chaudière : c'est ce que l'on obtient, en effet, en disposant convenablement le point d'injection d'eau par la pompe alimentaire.

Maintenant, faut-il admettre, puisque l'épaisseur du métal influe peu ou point sur la vaporisation, que cette épaisseur puisse être très-grande et de beaucoup supérieure à ce qui est admis dans la pratique actuelle?

Il y aurait évidemment danger de faire ces épaisseurs trop fortes, attendu que si la quantité totale de chaleur transmise est égale dans tous les cas, pour un même foyer, bien entendu, il n'en sera pas de même de l'inégalité de température des faces intérieure et extérieure; celle-ci pourra se chauffer beaucoup et même se détruire sous l'action du foyer : on aura *un coup de feu;* enfin, plus cette épaisseur sera faible, au contraire, et plus facilement la surface extérieure conservera une température voisine de celle de la vapeur émise par le liquide, laquelle température ne peut jamais altérer du métal quand il s'agit de vapeur d'eau. A part cette remarque générale, on sait qu'il est d'autant plus difficile d'obtenir une plaque de métal homogène, laminée ou fondue, qu'elle est plus épaisse.

Ainsi, en principe, tout s'accorde pour rendre aussi faible que possible l'épaisseur du métal employé dans la construction d'un générateur, abstraction faite des limites de sa résistance mécanique, qui ne doit pas être dépassée. En nous occupant spécialement, vers la fin de cet ouvrage, de cette question de résistance, nous montrerons facilement comment, tout en suivant les règles admises, et même prescrites à cet égard, on doit s'arranger pour éviter l'emploi des épaisseurs considérables.

Revenant au produit en vapeur d'un mètre carré de surface métallique soumise au foyer le plus ardent, on peut en conclure que c'est justement la production correspondante à la partie d'un générateur directement exposée au feu, et que cette partie vaporise, en effet, 100 kilogrammes d'eau par heure et par mètre carré, vaporisation à peu près la plus énergique que l'on puisse produire.

Il en résulte qu'en enveloppant un générateur complétement par son foyer, on pourrait en réduire beaucoup les dimensions, mais en ne tirant qu'un faible produit du calorique. C'est de cette considération qu'est né le système de générateurs très-développés dont la production par unité de surface est faible, mais qui ne laissent sortir les gaz issus du foyer que considérablement dépouillés de leur calorique.

Ces principes généraux de la propagation de la chaleur peuvent servir à bien fixer les idées, *à priori,* sur les meilleures dispositions qu'il convient de donner à un générateur à vapeur.

Ainsi, en prenant ces deux faits pour point de départ, savoir :

1° Que la chaleur se transmet d'autant plus vite que la différence de température des deux faces d'une paroi chauffée est plus grande;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

2° Que l'économie du combustible exige de refroidir le plus possible les gaz avant de les laisser s'écouler dans la cheminée ;

On en déduit les conséquences suivantes :

1° Pour produire rapidement de la vapeur, il convient de faire la surface de chauffe, directement exposée au foyer, la plus grande possible proportionnellement;

2° Pour refroidir suffisamment les gaz, il faut développer les surfaces de chauffe beaucoup plus loin que la partie chauffée directement. Mais comme l'absorption de la chaleur dépend de la différence entre les températures des corps chauffants et chauffés, il devient nécessaire que les parties successives du générateur puissent être maintenues de plus en plus froides, comme le courant de gaz qui les rencontre;

3° Alors, pour remplir cette condition, il est urgent non-seulement d'introduire l'eau d'alimentation en sens inverse de la marche des gaz, mais aussi de rendre distinctes les portions du générateur qui sont de moins en moins chauffées, attendu que le mélange inévitable qui s'opère à l'intérieur d'un seul corps doit empêcher, jusqu'à un certain point, cette condition de se réaliser.

Nous ne pouvons choisir un plus juste exemple de cette hypothèse que le système de générateur de M. Farcot, dont on a vu ci-dessus la description. On y trouve très-nettement séparés le récipient directement chauffé et ceux qui le sont indirectement et de moins en moins.

Le générateur de MM. Molinos et Pronnier nous offre à peu près la même particularité, d'abord par la grande surface chauffée directement et ensuite par le corps cylindrique presque entièrement séparé de celui des tubes.

En s'appuyant sur les mêmes considérations, les générateurs verticaux seraient alors du plus mauvais système.

Si, au contraire, on essaie de prolonger démesurément un seul et unique corps, espérant utiliser la chaleur par le refroidissement de la fumée, ne peut-il pas arriver qu'au lieu d'absorber la chaleur de cette dernière, ce soit au contraire les parois de la chaudière qui perdent de la chaleur, à cause de l'égalité de température qui tend nécessairement à s'établir dans toute son étendue, soit par le mélange du liquide, soit par la conductibilité du métal?

Certainement, ceci ne doit pas rigoureusement se produire, car il faudrait pour cela que la fumée se trouvât refroidie jusqu'à moins de 150°, en produisant de la vapeur à 5 atmosphères, ce qui n'arrive pas. Mais si l'on ne tombait pas dans cette situation extrême, on aurait au moins pour résultat que les parties les plus éloignées du foyer ne produiraient plus rien, si ce n'est le maintien de la température de l'eau liquide, mais plus de chaleur absorbée ; tandis que, si l'on fait agir un courant de gaz à 250 degrés, par exemple, sur un réchauffeur contenant du liquide maintenu à moins de 100 degrés, il est certain que l'on absorbera encore une quantité notable de cette chaleur au profit de la température de l'eau qui sera alors fournie très-chaude au générateur principal.

Après avoir envisagé le côté hypothétique de la construction des générateurs,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nous pouvons également examiner ce qui regarde la conduite du feu sous le même point de vue, et chercher quelles sont les meilleures conditions du chauffage.

La conduite d'un foyer est à la fois un problème très-simple et très-difficile, suivant qu'on le considère théoriquement ou dans la pratique avec tous les soins que la combustion exige pour éviter la fumée, pour ménager le générateur, et enfin le combustible lui-même.

Un foyer bien conduit doit présenter les particularités suivantes :

1° L'intensité parfaitement fixe, obtenue par une alimentation aussi continue que possible;

2° Le combustible réparti de façon qu'aucune partie n'échappe à la combustion;

3° La quantité d'air nécessaire à la combustion bien en rapport avec le poids de combustible à brûler dans un temps donné, et cet air admis avec une vitesse suffisante pour qu'il se renouvelle activement et pénètre avec énergie dans toutes les parties de la couche en ignition;

4° Enfin, le foyer doit être alimenté de combustible frais sans jamais masquer la surface incandescente, afin de ne pas suspendre l'action rayonnante qui est la plus énergique, et par suite éviter les changements brusques de température qui sont cause de la destruction des générateurs.

Nous avons déjà vu comment on opère pour arriver à remplir ces conditions importantes, principalement à propos des foyers fumivores. Nous n'ajouterons donc rien autre chose, si ce n'est que la plupart de ces conditions s'obtiennent pratiquement et surtout par les soins mêmes du chauffeur qui conduit un foyer. Ainsi, aucune mesure précise théorique ne suffira pour attribuer à un foyer la quantité d'air qui lui est nécessaire : l'ouvrier seul, par la manœuvre intelligente de ses registres et l'entretien de la grille, peut atteindre le but proposé.

Nous admettons évidemment que le fourneau soit construit de façon à permettre au conducteur de choisir dans des limites extrêmes posées en vue d'un travail maximum déterminé.

Quant à l'alimentation du foyer, s'il est possible de l'effectuer à l'aide d'un mécanisme simple, nous sommes d'avis qu'on devra s'empresser de le faire; mais il ne supprimera pas la surveillance d'un homme qui devra toujours préparer le combustible et s'assurer à chaque instant que la quantité fournie au foyer reste bien en rapport avec la dépense momentanée du générateur.

Les générateurs constituent, en résumé, la partie peut-être la plus importante des moteurs à vapeur, et nous aurions encore beaucoup à dire pour compléter ce sujet, en tant qu'il soit possible de prétendre à un pareil résultat. Cependant, en nous occupant des locomotives et des appareils de navigation, nous aurons l'occasion de revenir sur les générateurs qui possèdent, du reste, pour ces machines, des dispositions toutes spéciales. Nous nous proposons de mentionner alors diverses expériences anciennes et nouvelles dont les générateurs à vapeur ont été l'objet, en vue de connaître ceux qui donnent les meilleurs résultats pratiques.

FIN DU CHAPITRE NEUVIÈME ET DE LA TROISIÈME SECTION.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

# QUATRIÈME SECTION

## APPLICATION DE LA PUISSANCE DE LA VAPEUR D'EAU AUX MACHINES FIXES

---

## CHAPITRE PREMIER

### PRINCIPES GÉNÉRAUX DE LA DISPOSITION DES MOTEURS A VAPEUR

Lorsqu'on examine avec un peu d'attention chacun des systèmes de machines à vapeur que l'industrie utilise actuellement, on reconnaît bientôt qu'en dehors des diversités de pièces, de dimensions, de formes, etc., du reste très-nombreuses, le moteur, en son principe essentiel, est toujours le même, et composé de quelques organes importants que l'on retrouve invariablement dans chaque type différent. En effet, on peut dire que la machine à vapeur ne repose aujourd'hui que sur UN SEUL GRAND PRINCIPE :

*Un cylindre dans lequel la vapeur agit sur unpiston qui transmet sa puissance à un axe tournant,* en faisant abstraction évidemment des moyens divers employés pour la distribution de la vapeur dans le cylindre, et de ceux qui servent à opérer la transmission du piston à l'axe récepteur tournant (1).

En considération de l'uniformité du principe, nous sommes convaincus que l'étude d'un moteur à vapeur peut être rendue très-simple, si l'on sépare nettement les organes essentiels et fondamentaux, pour en faire une étude et une description spéciales. Ces fonctions essentielles une fois définies et comprises, chaque système de machine sera très-aisément explicable, puisqu'on y retrouvera presque toujours les mêmes organes principaux.

Telle est la méthode que nous allons suivre ; c'est-à-dire énoncer le principe général de l'ensemble d'un moteur à vapeur ; décrire ensuite avec détail les organes principaux ; puis passer en revue les différents systèmes, en insistant particulièrement sur leurs parties caractéristiques.

(1) Si l'on parvient un jour à construire une bonne machine rotative, procédé déjà bien souvent essayé, mais sans succès, on pourra dire qu'à dater de ce moment, la machine à vapeur entrera dans une nouvelle phase et possédera *un deuxième grand principe*.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La pl. 9 représente une machine à vapeur spécialement disposée en vue de la démonstration, c'est-à-dire démunie de toutes pièces étrangères au principe le plus rigoureusement général des fonctions physiques et mécaniques du moteur. On ne devra donc aucunement s'attacher, quant à présent, aux formes ni aux dimensions des pièces de détail, qui sont d'ailleurs, ainsi que nous l'avons dit, très-variables, et qui ne figurent ici, pour ainsi dire, que nominalement. Nous devons même avouer que quelques parties ont été disposées peut-être moins bien que dans les meilleures machines actuelles; mais nous n'avons fait ainsi que lorsque cela était nécessaire pour l'intelligence des figures et de l'explication générale.

Il faut ajouter encore que, parmi les différentes dispositions d'ensemble que ces machines affectent, horizontales, verticales, à directrices, à balancier, etc., nous avons choisi pour exemple celle qui peut s'établir le plus simplement : c'est la disposition horizontale qui semble, en effet, réunir les conditions requises.

Ceci posé comme point de départ, nous allons examiner ce moteur à vapeur type sous les divers points de vue suivants :

1° Ensemble du fonctionnement et de la construction;

2° Calcul des effets mécaniques;

3° Tracé géométrique et conditions statiques des organes de la transmission.

Nous avons dit tout à l'heure que nous décririons ensuite séparément chacun des organes principaux, puis après, les divers systèmes de machines fixes qui sont exécutées aujourd'hui par nos constructeurs les plus en réputation pour cette spécialité.

## ENSEMBLE DU FONCTIONNEMENT ET DE LA CONSTRUCTION D'UN MOTEUR A VAPEUR

(PLANCHE 9)

L'unique grand principe dont nous avons parlé consiste à mettre en communication avec le générateur un cylindre dans lequel se trouve un piston qui peut y exécuter des allées et venues alternatives sous l'influence de la pression de la vapeur. A cet effet, cette communication doit être établie et supprimée alternativement avec les bouts du cylindre et les deux faces opposées du piston; et dans chacune de ces phases le côté opposé à celui où la vapeur est admise est mis en relation avec un milieu dont la pression est inférieure à celle de la vapeur, afin que, celle-ci prédominant, il en puisse résulter un effet utilisable. On sait que l'échappement se fait dans l'atmosphère ou dans un récipient appelé condenseur, et dans lequel on entretient un vide aussi parfait que possible.

La machine que nous prenons pour exemple est supposée sans condenseur pour plus de simplicité, ce qui ne change en rien, du reste, aux actions principales.

Son mode de fonction est celui dit *à double effet*, en raison de l'action double et symétrique de la vapeur sur le piston récepteur : c'est aussi le système généralement en usage aujourd'hui.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Mais il n'en a pas toujours été de même. Nous avons expliqué, dans l'historique, comment les machines dites *atmosphériques* employaient la vapeur, qui n'était admise que d'un seul côté du piston et dans l'unique but d'y faire le vide, afin d'utiliser la pression atmosphérique, qui était alors la véritable puissance motrice, tandis qu'avec les machines à double effet, la pression atmosphérique devient, au contraire, une résistance passive dont on se débarrasse même lorsqu'on adopte le système dit à condensation.

Enfin, on a fait aussi des machines à simple effet dans lesquelles la vapeur admise d'un seul côté se répartissait ensuite sur les deux, ainsi qu'on l'a vu (p. 105); nous reviendrons à l'occasion sur ce système.

A l'égard du mode usité actuellement, nous disons que le piston reçoit de l'action de la vapeur un mouvement *rectiligne alternatif* ou de *va-et-vient*, suivant la longueur donnée au cylindre.

Chaque parcours simple s'appelle *la course du piston* ou *un coup de piston simple*, ou encore *une pulsation simple*.

Un va-et-vient complet, c'est-à-dire le piston ayant parcouru le cylindre une fois dans chaque sens, se désigne par *un coup double*, ou *une évolution complète du piston*, etc.

Ceci constituant le moyen direct d'utiliser la puissance de la vapeur, les besoins les plus généraux de l'industrie exigent que cette action primordiale, traduite d'abord en un mouvement rectiligne alternatif, soit transformée en un mouvement circulaire continu, qui est en effet celui suivant lequel fonctionnent tous les appareils des ateliers et manufactures. On sait qu'il existe fort peu d'exceptions à cette règle; parmi elles, nous ne citerons guère pour exemples que les pompes à eau, les marteaux-pilons des forges et quelques machines soufflantes, qui peuvent être commandés directement par le piston d'un cylindre à vapeur.

Ainsi, le mouvement de va-et-vient du piston est, nous pouvons le dire, presque toujours transformé en mouvement de rotation continu, lequel est communiqué à un axe en fer ou en fonte sur lequel on place alors des organes de transmissions, engrenages ou poulies.

Quant à la manière d'opérer cette transmission, on sait qu'elle varie, et qu'elle donne lieu à divers systèmes principaux de machines qui sont particulièrement :

Les machines à mouvement direct, celles à balancier et celles dites *oscillantes*.

Chacun de ces systèmes devant être l'objet d'un examen particulier, nous allons décrire en principe une machine dite à mouvement direct dont le dessin (pl. 9) montre un exemple dans sa plus simple acception.

## DISPOSITION GÉNÉRALE

La fig. 1 de la pl. 9 représente la coupe longitudinale de la machine à vapeur supposée horizontale et à mouvement direct; cette coupe est faite suivant un plan vertical passant par l'axe général du cylindre et du piston-moteur;



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La fig. 2 est une section transversale du cylindre et du bâti, suivant la ligne 1-2 de la distribution;

La fig. 3 est une section parallèle à la précédente, faite suivant l'axe 3-4 de l'arbre moteur tournant;

La fig. 4 montre un détail du mouvement de la distribution;

La fig. 5 est un tracé géométrique des mouvements relatifs des pièces principales.

Le cylindre à vapeur A est une pièce en fonte de fer, ouverte d'abord à chaque extrémité et fermée, pour la mise en fonction, d'un bout, par un fond plein *a*, et de l'autre par un couvercle *b* muni en son milieu d'une ouverture disposée pour le passage de la tige du piston mobile B. Le cylindre est évidemment très-bien alésé et rodé pour que le piston, qui est lui-même tourné avec soin, n'éprouve dans sa course aucune résistance, tout en y joignant par la circonférence avec la plus grande exactitude.

Quoique l'intérieur du cylindre constitue une capacité unique, il n'en est pas moins vrai que le piston B la divise en deux parties, parfaitement distinctes et qui n'ont rigoureusement aucune communication entre elles. Cette remarque est surtout importante pour concevoir le *mécanisme de la distribution*, mécanisme au moyen duquel chacune des parties distinctes fonctionne d'une façon identique, mais dans des moments opposés comme les phases mêmes de la marche du piston. C'est ce que nous allons essayer de rendre facilement compréhensible.

La communication entre le cylindre et le générateur à vapeur est établie au moyen d'un tube en cuivre rouge ou en fonte qui, partant du réservoir de vapeur monté sur la chaudière, vient aboutir à une tubulure *c* (fig. 2) fondue avec le cylindre A. Le canal intérieur de cette tubulure vient déboucher à la surface d'une partie dressée sur laquelle s'ajuste une boîte close H, appelée *boîte de distribution* ou *boîte du tiroir*, qui est l'organe important de la distribution.

Par conséquent, la vapeur du générateur pouvant être en libre relation avec cette boîte lorsque les robinets nécessaires sont ouverts, on la fait pénétrer à l'intérieur du cylindre au moyen de deux canaux *d* et *d'*, fondus de la même pièce que lui, correspondant avec chacune des parties opposées, et débouchant tous deux sur la même face dressée qui constitue l'une des parois intérieures de la boîte à vapeur. L'ouverture de chacun de ces canaux, dans cette boîte, est rectangulaire et très-exactement rectifiée.

Mais puisque la communication de la vapeur avec chaque extrémité du cylindre doit être alternative, il faut alors que ces deux canaux soient eux-mêmes ouverts et fermés alternativement, et qu'ils communiquent, chacun à leur tour, avec le milieu neutre dans lequel la vapeur doit s'échapper lorsqu'elle a terminé son action.

Or, l'organe qui permet d'accomplir cette double fonction est *le tiroir* I, pièce d'une extrême simplicité comparée au rôle admirable qu'elle remplit. C'est une sorte de parallélipipède rectangle en métal, fonte de fer ou bronze, dont la longueur correspond, *théoriquement*, à la distance extrême des orifices d'introduction *d*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et $d'$, et muni d'un évidement $e$ sur l'une de ses faces, en laissant à chaque bout une partie pleine que l'on appelle *la bande,* capable de recouvrir respectivement les mêmes orifices $d$ et $d'$.

Ce tiroir reçoit, de la machine même, un mouvement rectiligne alternatif qu'il exécute en glissant sur la table dressée où débouchent les canaux de distribution; l'étendue de sa course étant d'une grandeur convenable, chacun des orifices $d$, $d'$ est tantôt découvert et en relation avec l'intérieur de la boîte H, tantôt recouvert et communiquant alors avec l'évidement $e$ du tiroir. Mais cet évidement est lui-même en relation permanente avec un troisième canal $f$ (fig. 1 et 2), ménagé dans le cylindre et mis en communication, par un conduit, avec le milieu dans lequel la vapeur doit s'échapper; par conséquent, chaque évolution du tiroir a pour effet de mettre simultanément l'un des orifices $d$ ou $d'$ en communication avec la boîte à vapeur et l'autre avec l'orifice d'échappement, d'où résulte, en résumé, cette admission de la vapeur qui, d'un côté, pousse le piston, tandis que celle qui a terminé son effet de l'autre côté devient immédiatement neutre par la facilité qui lui est donnée de s'échapper librement, cet échappement se faisant ici dans l'atmosphère au moyen d'un tuyau qui s'élève de la tubulure $f$.

Pour compléter ces premières notions de la distribution de la vapeur, nous ferons remarquer que la fig. 1 de la pl. 9 indique nettement l'une des phases de cette importante opération.

On y voit, en effet, que l'une des parties du cylindre est en libre communication avec la boîte à vapeur H par l'orifice $d$, que le tiroir I découvre entièrement : c'est le côté où s'introduit la vapeur, que l'on a figurée par une teinte grise. L'autre partie, au contraire, est en relation, par son canal $d'$, avec l'intérieur $e$ du tiroir qui communique lui-même avec l'orifice d'échappement $f$ : c'est la phase correspondante à la sortie de la vapeur du coup précédent et qui a terminé son action.

Si l'on conçoit maintenant que le même effet se produit alternativement pour les deux côtés du cylindre, il sera facile de se rendre compte du mouvement de va-et-vient du piston, dans lequel, en résumé, réside complétement le principe fondamental des machines ou moteurs à vapeur.

Avant de pénétrer plus avant dans le détail du mécanisme de la distribution, il faut examiner comment le mouvement rectiligne alternatif du piston se trouve transformé en mouvement de rotation continue, particulièrement dans l'exemple à mouvement direct que nous avons choisi.

Rien n'est plus simple, quoique ce procédé ait donné lieu autrefois à bien des essais.

Le piston est muni d'une tige métallique C, bien rigide et bien cylindrique, et qui traverse le couvercle $b$ du cylindre par une garniture dite *stuffingbox* ou *boîte à étoupe g,* dont la disposition est très-simple, et du reste assez bien connue. En dehors du cylindre, cette tige est assemblée avec une traverse D dont les extrémités sont guidées de façon à la maintenir parfaitement sur l'axe que le piston suit dans sa course. A cette traverse est assemblée, par articulation, une pièce rectiligne E que l'on nomme *bielle,* et dont la fonction sera complétement caractérisée en disant

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

qu'elle agit exactement de la même façon que le bras d'un homme qui donne le mouvement à un outil quelconque au moyen d'une *manivelle*.

Cette bielle est en effet assemblée, également par articulation, avec une véritable *manivelle* F, qui est solidaire de l'axe, ou arbre G, bien maintenu par des supports dans lesquels il ne peut que tourner suivant son propre centre. La longueur de cette manivelle, ou *son rayon*, qui est la distance du centre de l'arbre G à celui de son bouton ou tourillon d'assemblage avec la bielle, est justement égale à la moitié de la course que le piston doit effectuer dans le cylindre. Alors la traverse D suivant le piston dans son mouvement alternatif, l'extrémité correspondante de la bielle exécute le même mouvement; mais comme son autre extrémité est rendue solidaire d'une pièce qui ne peut que tourner autour d'un centre fixe, il en résulte que chaque coup simple du piston fait décrire à la manivelle F une demi-révolution; à la vérité, lorsque cette demi-révolution est accomplie, la bielle et la manivelle se trouvant alors en ligne droite, il n'y aurait pas de raison pour que celle-ci ne revînt point sur ses pas, et qu'elle ne parcourût le même chemin, mais en sens inverse, s'il n'y avait pas la vitesse acquise par l'arbre et les appareils qu'il commande, vitesse qui a pour effet de faire continuer le mouvement dans le même sens, et de faire faire à la manivelle un tour complet pour un coup double du piston.

Ainsi, prenant notre dessin pour exemple et les directions indiquées par les flèches, on voit que le piston allant de gauche à droite, la manivelle exécute le parcours de la moitié supérieure du cercle qu'elle décrit : la bielle est *au-dessus* de l'axe de mouvement. Le piston, arrivé à l'autre extrémité de sa course, repartira de droite à gauche, et la manivelle décrira la moitié inférieure de son cercle : la bielle se trouvera *au-dessous* de l'axe de mouvement, etc.

Mais déjà nous pouvons apercevoir combien il est facile de changer le sens de rotation de l'arbre moteur, puisque, à partir de chaque extrémité de course, la manivelle, supposée un instant fixe, peut partir indifféremment dans un sens ou dans l'autre, à condition qu'un mouvement initial lui soit donné. C'est en effet ce qui peut avoir lieu en remplissant certaines conditions dont nous parlerons bientôt.

Ayant saisi, dans leur ensemble, les mouvements relatifs du piston, de la bielle et de la manivelle, on distingue ensuite des positions particulières qui sont fondamentales pour le tracé et les fonctions de bien des organes importants; ce sont les extrémités et le milieu de la course du piston qui donnent lieu à quatre positions correspondantes de la bielle et de la manivelle.

Lorsque le piston est à l'une des extrémités de sa course, la bielle et la manivelle sont exactement en ligne droite, au bout l'une de l'autre lorsque le piston est à l'extrémité la plus éloignée de l'axe de rotation, et l'une devant l'autre pour l'extrémité opposée. Dans ces deux positions extrêmes, la machine est dite *au point mort*, attendu que l'action motrice du piston s'exerçant sur des organes complétement en ligne droite, il n'en pourrait résulter aucun effet capable de faire tourner la manivelle autour de son axe si la vitesse acquise ne venait pas agir en ce moment pour *faire passer les points morts*.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Lorsque le piston est rigoureusement au milieu de sa course, la manivelle est aussi *près du milieu* de la sienne, mais au-dessus ou au-dessous de l'axe, suivant que le piston effectue sa course dans un sens ou dans l'autre. Dans les deux cas, la bielle et la manivelle forment entre elles un angle presque droit, d'où l'action motrice tangentielle est nécessairement près de son maximum, ce qui pourrait bien faire désigner cette position par *point actif*, en opposition avec les points morts.

Cette propriété des points morts, qui se représente dans toute transformation de mouvement de ligne droite alternatif en circulaire continu, serait un obstacle absolu à la marche d'une machine à vapeur simple si l'on n'y avait obvié par l'application de l'organe appelé *volant*, qui a précisément pour objet principal de faire passer les points morts, et aussi de régulariser le mouvement de rotation dans des conditions que nous exposerons plus loin.

Le volant est une roue J, pesante, en fonte, formée d'une couronne annulaire et de plusieurs bras, avec un moyeu par lequel elle est montée sur l'arbre moteur de la machine. En principe, le volant est isolé sur l'arbre et ne transmet de force à aucun appareil. Ses propriétés ont pour base l'inertie de la matière qui oppose toujours un effort proportionnel à sa masse pour passer de l'état de repos à celui de mouvement, et réciproquement. Or, l'arbre de la machine étant muni de cette pièce, dont le poids est toujours relativement considérable, il en résulte que si la manivelle occupe une position dans laquelle la puissance du piston ne se fasse pas sentir, et que le volant possède déjà une vitesse suffisante, sa force d'inertie s'opposera à ce qu'il suspende son mouvement comme la manivelle; en continuant de tourner d'une certaine quantité, en vertu de cette propriété, il changera la manivelle de position, et l'action motrice se fera de nouveau sentir pour continuer le mouvement.

C'est précisément ce qui arrive pour les points morts que l'inertie du volant fait passer avec la plus grande facilité en même temps qu'elle détermine la rotation continue, puisque le volant ne peut pas changer le sens de son mouvement dans un temps aussi court et sans repasser par l'immobilité complète.

L'influence des points morts se manifeste cependant lorsque la machine doit être mise en marche, et que le volant est nécessairement en repos. Il faut alors lui donner réellement un mouvement initial en agissant à la main sur le volant en même temps que l'on ouvre le robinet qui amène la vapeur dans le cylindre. Cette opération, qui est assez facile avec des machines d'une faible puissance, devient assez difficultueuse dans le cas contraire; on se sert alors de leviers et de treuils pour entraîner le volant, surtout lorsqu'il n'est pas possible de désembrayer momentanément les machines que le moteur commande.

Mais on sait que, dans diverses applications, on peut même se passer de volant, à condition de réunir au moins deux machines sur le même arbre moteur et en mettant les manivelles perpendiculaires l'une à l'autre. Les locomotives et les machines de navigation sont dans ce cas-là. L'une des manivelles se trouvant toujours dans une position active lorsque l'autre est à l'un de ses points morts, une machine entraîne l'autre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Nous sommes en mesure maintenant de compléter l'explication générale sur la marche du tiroir de distribution, en comparant cette marche avec celle du piston.

Nous avons dit plus haut que sa marche est *croisée* avec celle du piston, ce qui revient à dire que les extrémités de sa course correspondent aux moments où le piston est au milieu de la sienne, *et vice versa*. Or, lorsque le tiroir est à l'une des extrémités de sa course, il découvre complétement l'un des orifices $d$ ou $d'$, et la vapeur peut entrer en toute liberté dans le cylindre et agir avec toute sa puissance sur le piston, qui est, avons-nous dit, au milieu de sa course. Quand ce tiroir est, au contraire, au milieu de sa course, il recouvre exactement les deux orifices $d$ et $d'$, et la communication du cylindre avec le générateur est complétement interrompue.

Par conséquent, cette dernière phase des mouvements du tiroir correspondant juste aux moments des points morts, il est clair que ce serait une cause de plus pour produire l'arrêt de la machine, si le volant n'était pas là pour l'aider à continuer son mouvement. Dans les positions extrêmes du tiroir, au contraire, la manivelle étant dans la position la plus favorable à la transmission de l'effort du piston, c'est aussi le moment de l'introduction maximum de la vapeur; d'où il résulte en résumé que, d'un point mort à l'autre, la manivelle ressent des efforts essentiellement variables qui donneraient lieu à une grande irrégularité dans la vitesse de rotation si l'action du volant n'intervenait pas pour la régulariser.

Pour terminer ces notions générales, il reste à décrire en détail quelques particularités de la construction du moteur, et principalement la commande de son tiroir de distribution.

## DÉTAILS DE CONSTRUCTION

Commande du tiroir. — Le tiroir de distribution est mis en mouvement au moyen d'un organe bien connu en mécanique, mais que nous décrirons néanmoins. Cet organe, c'est *l'excentrique circulaire* K, dont les fonctions géométriques sont complétement identiques à celles d'une manivelle ordinaire. Seulement, l'excentrique se place en un point quelconque de l'axe sur lequel on prend le mouvement, tandis qu'une manivelle en occupe nécessairement l'extrémité, à moins qu'on n'en fasse un essieu coudé ou *vilbrequin*.

La fig. 4 de la pl. 9 représente en détail l'excentrique qui commande le tiroir de la machine qui nous occupe, ainsi que la partie principale de la transmission. Sur cette figure, l'excentrique est représenté coupé suivant le milieu de son épaisseur et par un plan perpendiculaire à l'axe de rotation, afin de laisser apercevoir la disposition des deux pièces principales qui le composent.

Cette pièce est formée d'abord d'un disque circulaire plein en fonte K, fixé comme une poulie sur l'arbre G de la machine; mais il ne s'y trouve pas monté centre sur centre : celui $o$ de l'arbre et le sien $m$ sont éloignés l'un de l'autre d'une distance $om$ précisément égale à la moitié de la course qu'on veut lui faire produire, exactement comme la manivelle motrice dont le rayon est la moitié de la longueur de la course du piston. Cet écartement des centres constitue *le degré*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

*d excentricité*; c'est le rayon de la manivelle fictive que représente l'excentrique circulaire.

Le disque plein est muni sur son contour extérieur d'une gorge dans laquelle est ajusté un collier en bronze ou en fonte, et en deux pièces *h*, qui ne s'y trouve aucunement fixé et seulement ajusté à frottement gras; ce collier est assemblé avec une tige L dont l'autre extrémité est rattachée directement ou indirectement à la pièce que l'excentrique doit mettre en mouvement : elle remplit, en un mot, le même rôle que la bielle de la machine.

D'après cela, l'arbre G, en tournant, emporte avec lui le disque plein K, puisqu'il s'y trouve assujetti par une clef; le centre *m* du disque, comme tous ses autres points, décrit alors un cercle autour de celui de l'arbre. Mais le collier ne pouvant pas le suivre à cause de la tige L, qui ne peut varier que très-peu de sa position, il en résulte que le disque plein tourne à l'intérieur du collier en le déplaçant, comme son propre centre, autour de l'axe de rotation. L'effet final de cette combinaison est évidemment de faire faire à l'extrémité de la tige L une course égale au diamètre du cercle engendré par le centre de l'excentrique, et dont le rayon est *om*.

En résumé, l'excentrique circulaire pourrait être remplacé complétement par une manivelle ayant pour rayon celui *om* de l'excentricité, avec une bielle pour la tige L, dont le tracé nous indique que l'axe correspond dans toutes les positions avec le centre *m* du disque plein.

La fig. 4 montre, en effet, quatre cercles, dont trois en traits ponctués, qui correspondent aux positions de ce disque suivant celles du centre, qui a été lui-même indiqué aux deux extrémités et aux deux milieux de sa course, par rapport à l'axe de mouvement, lequel réunit le centre de l'arbre moteur et le point d'attache de la tige L.

Maintenant, il est facile de concevoir comment ce mécanisme est employé pour faire mouvoir le tiroir I de distribution.

Le plus souvent, la boîte à vapeur H étant placée sur le côté du cylindre, il suffit de réunir directement l'extrémité de la tige L, ou *barre de l'excentrique*, à celle *i* attenant au tiroir et qui traverse la boîte H par une garniture d'étoupe. Mais ici, pour permettre d'apercevoir en une seule vue toutes les parties de la machine, la distribution a été ramenée au-dessus du cylindre, ce qui entraîne à un mécanisme intermédiaire pour la commande du tiroir, mais sans en changer les conditions.

Ce mécanisme se compose d'un axe horizontal *j*, monté devant le cylindre, et qui porte deux bras de levier *k* et *k'*, l'un rattaché à la barre d'excentrique et l'autre, par une bielle fourchue *l*, à la tige du tiroir. Par conséquent, l'excentrique fait décrire à l'arbre un mouvement d'oscillation qui détermine celui rectiligne du tiroir; il suffit que les leviers *k* et *k'* soient de longueurs égales pour que le tiroir effectue exactement la course engendrée par le centre de l'excentrique, ce qui n'est aucunement, du reste, une condition *sine qua non*, puisque l'un peut toujours être calculé pour être en rapport avec l'autre.

Sans entrer, quant à présent, dans l'étude du tracé de la distribution, il est cependant utile de faire connaître tout de suite la relation importante qui doit exister

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

entre les positions de la manivelle et de l'excentrique pour obtenir les situations relatives du piston et du tiroir, et les effets résultants qui ont été décrits ci-dessus.

Considérant l'excentrique comme une manivelle qui a pour rayon *om*, *le degré d'excentricité* (voir précédemment), nous remarquons d'abord que la pièce qu'il met en mouvement, le tiroir, se meut dans une direction exactement parallèle à celle du piston, qui a, lui aussi, sa manivelle F. Or, puisque ces deux organes, le tiroir et le piston, se meuvent parallèlement, mais suivant des phases *croisées*, il est clair que leurs manivelles respectives, qui ont un axe de rotation commun, doivent occuper des positions relatives identiques : en d'autres termes, l'une doit être aussi au milieu de sa course quand l'autre est à l'extrémité de la sienne, *et vice versa*.

La position géométrique qui correspond à cette condition est la perpendiculaire : le rayon *om*, mené par le centre *m* du disque excentré et par celui de l'axe G de rotation est, en effet, *théoriquement perpendiculaire* à celui de la manivelle.

Cette position est nettement indiquée par la fig. 4, où l'on voit que le centre du disque K étant placé en *m*, la manivelle motrice aurait son rayon représenté par la perpendiculaire *on*.

Mais il ne suffit pas de constater ce premier fait pour déterminer la place de l'excentrique par rapport à la manivelle, il faut aussi trouver de quel côté son centre doit être placé, s'il doit être à droite ou à gauche du rayon *on*. C'est en effet de cette condition importante que résulte le sens de la rotation de la machine, ainsi que nous allons l'expliquer.

Prenons encore pour exemple la fig. 1, qui représente une position relative du piston et du tiroir et indique aussi, au moyen d'une flèche, le sens attribué à la rotation de l'arbre moteur. Nous voyons que le piston marche de gauche à droite, que le tiroir est à l'extrémité droite de sa course et qu'il découvre l'orifice *d* par lequel la vapeur doit en effet pénétrer en ce moment dans le cylindre. Puisque le tiroir est à l'extrémité droite de sa course, il ne peut maintenant que marcher de droite à gauche; or, pour qu'il effectue ce mouvement, de quel côté doit se trouver le centre de l'excentrique pour produire cet effet, en admettant que l'arbre G tourne dans le sens indiqué?

Si l'excentrique commandait directement le tiroir, sans mouvement intermédiaire, il est évident que son centre devrait être aussi *à droite* de l'axe de la manivelle; mais comme il y a un intermédiaire : l'arbre *j*, qui renverse le mouvement, il faut qu'il se trouve *à gauche*, ce que montre bien en effet la fig. 4, qui représente exactement les organes de la distribution dans la position qu'ils occupent pendant la phase de la marche indiquée par la fig. 1.

Il ressort de là que si la manivelle et le piston restant dans la position tracée fig. 1, on voulait que la machine tournât en sens inverse, il faudrait que le tiroir se trouvât reporté à l'extrémité gauche de sa course pour laisser découvert l'orifice *d'* par lequel la vapeur devrait alors entrer. Par conséquent, il faudrait reporter aussi le centre de l'excentrique à l'extrémité opposée du diamètre qu'il occupe actuellement, ce qui est évident, d'après l'explication qui précède.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour résumer ce point important, nous pouvons formuler les remarques suivantes :

1° *Quand un tiroir marche parallèlement avec le piston, et qu'il est commandé sans intermédiaire, par la barre de l'excentrique, le centre de ce dernier est* POUSSÉ EN AVANT *par la manivelle, suivant le sens de la rotation;*

2° *Quand, toutes choses égales d'ailleurs, il existe un mécanisme intermédiaire, qui renverse une fois le mouvement, le centre de l'excentrique est* TIRÉ *par la manivelle.*

Cette propriété du mécanisme des excentriques est heureusement utilisée pour les machines dites *à changement de marche*, telles que les locomotives et les appareils de navigation et des mines. Pour ces moteurs, chaque tiroir possède généralement deux excentriques, dont les centres respectifs occupent *à peu près* (1) les extrémités d'un même diamètre, mais qui fonctionnent, bien entendu, isolément. Lorsqu'on veut changer le sens de la rotation, après avoir préalablement suspendu l'introduction de la vapeur, on agit sur un mécanisme qui substitue un excentrique à l'autre, opération qui a en même temps pour effet de reporter le tiroir à la position qu'il doit occuper, et en rendant aussitôt la vapeur, la machine se remet en route dans le sens opposé à celui qu'elle possédait auparavant.

On peut obtenir le même effet avec un seul excentrique, susceptible de se déplacer sur l'axe, et dont on fait varier le callage au moyen d'un mécanisme de débrayage.

Cylindre a vapeur. — Le cylindre à vapeur est, le plus souvent, fondu avec tous les canaux nécessaires à l'introduction et à la sortie de la vapeur. D'après la disposition actuelle, le canal *c* qui amène la vapeur dans la boîte de distribution appartient au cylindre, ce qui ne s'est pas toujours fait; on s'est contenté longtemps de ménager simplement une tubulure à la boîte H même, condition très-incommode lorsqu'il fallait démonter celle-ci.

Le canal d'échappement *f* appartient au cylindre; il s'arrête assez ordinairement sur le côté, comme il a été dessiné fig. 2, lorsque la vapeur doit être renvoyée dans l'atmosphère. Mais quand on la dirige sur un condenseur, comme cet organe est souvent situé au-dessous de la machine, on fait suivre au canal le contour du cylindre pour amener son orifice au-dessous, à peu près comme cela a été indiqué en *f'*, par des traits ponctués.

Afin d'éviter les pertes de chaleur, qui occasionnent des refroidissements très-nuisibles pour l'économie du combustible, et qui provoquent une condensation à l'intérieur du cylindre, il est très-important de l'envelopper d'une chemise formée de douves en bois cerclées, et d'un garnissage de gros feutre, de poussière de charbon ou de sciure de bois, ou en général de matières non conductrices de la chaleur.

Dans la disposition horizontale, le cylindre est fondu avec des oreilles *p* par lesquelles on le boulonne solidement sur le bâti en fonte M, ou sur une plaque de fondation.

(1) Nous disons *à peu près* à cause de *l'avance*, qui modifie sensiblement cette condition, mais dont il sera parlé plus loin avec détail.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Piston. — La construction du piston comprend généralement un plateau en fonte, à la circonférence duquel on dispose des segments métalliques que des ressorts maintiennent exactement contre la surface du cylindre, pour empêcher les fuites d'un côté à l'autre; ce plateau est alors fixé avec la tige C par une clavette ou un écrou.

Lorsqu'on n'employait que de la vapeur à basse pression, comme dans les machines de Watt, la garniture des pistons se faisait en tresses de chanvre. Mais avec la vapeur à haute pression, dont la température est aussi plus élevée, le chanvre brûle ou sèche, ce qui a conduit à adopter la garniture métallique qui s'applique maintenant dans tous les cas. Nous reviendrons évidemment sur la construction des pistons lorsque nous décrirons les meilleurs systèmes de machines en usage.

Traverse et glissières. — La réunion de la tige du piston avec la bielle se fait au moyen d'une traverse D, en fonte ou en fer, au milieu de laquelle est ménagé un mamelon en partie cylindrique et en partie sphérique, avec un trou légèrement conique pour l'ajustement de la tige C, qui s'y fixe au moyen d'une clavette ou d'un écrou $q$.

Cette même traverse D présente, de chaque côté de l'ajustement de la tige, une portée cylindrique formant tourillon pour recevoir la bielle, qui est fourchue à cette extrémité, et possède en effet deux têtes à coussinets. Cependant, nous verrons que ceci n'est pas général, et que l'on exécute des machines avec des bielles à tête simple à chaque extrémité, ce qui amène un changement de disposition pour la traverse.

Celle-ci est terminée à ses extrémités par deux tourillons qui s'ajustent dans des coussinets dont l'extérieur est carré, et qui sont disposés pour suivre en glissant deux voies bien parallèles que l'on appelle à cet effet *les glissières*.

Les glissières ont pour objet de maintenir la rectitude de la marche du piston et de résister à la poussée latérale qui résulte de la décomposition du mouvement produit par la tige et la bielle.

Elles sont formées chacune, dans cette machine, de deux règles en fonte, à nervures, N et N′, qui se fixent sur les côtés du bâti au moyen d'oreilles ménagées à cet effet. Ces deux pièces ayant leurs surfaces bien dressées, sont superposées et maintenues bien parallèlement à distance l'une de l'autre, suivant l'épaisseur du coussinet qui doit y glisser, par deux petites colonnes $r$ formant entretoises; le tout est alors fixé sur les oreilles du bâti par deux boulons qui les traversent ainsi que les mamelons fondus avec les règles N et les entretoises $r$. On voit qu'on a profité des pièces supérieures N′ pour y ménager les paliers $s$ qui maintiennent l'arbre intermédiaire $j$ de la distribution.

Cette disposition de glissières présente beaucoup de variantes en pratique. Il arrive souvent que la règle inférieure N est supprimée et remplacée par le bord même du bâti M qui est alors dressé dans cette partie. Si on les suppose ici indépendantes, c'est pour les rapprocher de l'axe et diminuer la longueur de la traverse D; ajoutons que cette disposition est certainement bonne, d'autant plus qu'elle permet de niveler et redresser les glissières très-facilement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Bien des constructeurs adoptent une autre disposition, qui consiste à n'avoir qu'une seule glissière centrale dont les deux règles N et N′ sont alors fixées par leurs extrémités sur le couvercle du cylindre à vapeur, ou bien après des oreilles venues de fonte avec la bride appartenant au cylindre. Ce système est généralement adopté pour les machines locomotives.

BIELLE, MANIVELLE ET ARBRE MOTEUR. — La bielle E est une pièce en fer forgé dont la section peut être circulaire, ou méplate comme elle est supposée dans le cas actuel, et dont les extrémités sont terminées par des chapes à coussinets pour opérer son assemblage par articulation avec la traverse D et la manivelle F.

Nous avons expliqué comment se fait cet assemblage avec la traverse. Quant à l'autre assemblage, on voit que cette extrémité de la bielle est élargie et évidée pour recevoir une paire de coussinets en bronze qu'une clavette tient constamment serrés.

Ces coussinets embrassent un tourillon cylindrique *t* que l'on appelle *le bouton de la manivelle,* et qui est effectivement fixé avec cette dernière, soit au moyen d'un écrou, soit par une clavette.

La manivelle est le plus souvent une pièce en fer forgé (préférablement à de la fonte), calée sur le bout de l'arbre moteur G. Cet assemblage doit être d'une solidité à toute épreuve, et pour cela, la manivelle est emmanchée à chaud et *à dilatation,* plus une clef de calage parfaitement ajustée. Parfois, cette manivelle est forgée de la même pièce que l'arbre, surtout dans le cas des petites dimensions qui rendent cette condition moins difficile et moins dispendieuse à obtenir.

L'arbre moteur est en fer forgé, tourné avec des parties saillantes pour recevoir les différents organes de transmissions ainsi que le volant. Avec le système représenté pl. 9, l'un des paliers qui supportent cet arbre appartient au bâti de la machine, et l'autre est placé indépendamment sur un massif en maçonnerie le plus rapproché possible. Cette disposition, qui est la plus générale, n'est cependant pas la meilleure, attendu qu'il n'est pas facile de rendre ces deux paliers aussi invariables, l'un par rapport à l'autre, que s'ils appartenaient au même bâti ou à une seule plaque de fondation.

Mais il est aussi très-difficile de faire différemment, surtout à cause de la longueur que l'arbre doit avoir pour les différentes pièces qu'il porte. On ne peut guère obvier à cet inconvénient qu'en employant un *arbre coudé,* comme ne craignent pas de le faire du reste de bons constructeurs; le coude forme alors manivelle, avec un palier sur chaque côté du bâti. Le principal exemple à citer serait la machine exposée à Rouen, en 1859, par les établissements Cail et C^ie^, qui ont adopté assez généralement cette disposition, comme nous le ferons voir plus loin.

En résumé, l'arbre d'une machine à vapeur est le récepteur de la puissance totale développée par la vapeur sur le piston. Non-seulement c'est sur lui que la force à utiliser se recueille soit au moyen d'engrenages, soit avec des poulies, mais c'est aussi sur lui que se prennent les différents mouvements de tous les organes de service de la machine. Déjà nous savons que la distribution s'opère ainsi *automatiquement* par l'excentrique, qui est fixé sur l'arbre; mais des fonctions d'une autre nature y puisent également leur origine.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si, par exemple, la machine est à condensation, ce qui exige une pompe à air pour entretenir le vide et extraire l'eau réfrigérante, c'est sur l'arbre moteur que se prend ordinairement la commande du piston de cette pompe.

D'autre part, c'est presque toujours la machine motrice qui fournit l'eau à son générateur, et commande pour cela une pompe dite *pompe alimentaire*, au moyen d'un excentrique circulaire monté auprès de celui de la distribution.

Souvent aussi elle donne le mouvement à une pompe à eau froide, dite pompe de puits, destinée à remplir un réservoir dans lequel puise la pompe alimentaire, ou à *nourrir* l'appareil de condensation.

Enfin, la machine à vapeur puise en elle-même toutes les ressources de sa vitalité, ce qui conduit, à juste titre, à la considérer comme entièrement *automatique*, et fonctionnant sans aucun autre auxiliaire que son générateur.

Bati ou plaque de fondation. — La disposition horizontale permet une très grande simplicité dans la forme du bâti qui reçoit tout l'ensemble de la machine.

Analogue à ce qui se fait généralement dans cette circonstance, le bâti M est formé d'une seule pièce de fonte sur laquelle tous les organes de la machine peuvent être fixés, moins, comme on l'a dit ci-dessus, un des deux paliers nécessaires à l'arbre moteur.

Les différentes figures de la pl. 9 indiquent très-clairement les formes particulières de ce bâti ; nous aurons donc peu de chose à en dire.

Faisons remarquer, cependant, la grande solidité qu'il faut donner au palier principal M′ en le garnissant de nervures qui le relient fortement à la masse du bâti. Pour des questions de résistance, que nous examinerons, il arrive quelquefois que, dans les machines horizontales, on incline ce palier afin de rapprocher l'ouverture des coussinets de la perpendiculaire à l'axe du piston ; mais ceci n'est pas général.

Toutes les pièces de la machine étant fixées après le bâti, l'ensemble peut être alors facilement mis en place sur un massif en maçonnerie et assujetti au moyen des boulons *u* qui traversent les côtés et pénètrent dans la maçonnerie, où ils sont arrêtés par des écrous, mais plus souvent par des clavettes. Ces boulons sont placés particulièrement près du palier principal, vis-à-vis le cylindre et à l'endroit des glissières.

Régulateur de vitesse. — On applique aux machines à vapeur des régulateurs entièrement semblables à ceux des moteurs hydrauliques, et dont il a été fait une ample mention dans la première partie de cet ouvrage (1). Toute la différence indubitable, c'est que le jeu du régulateur s'exerce sur une vanne réglant la dépense d'eau, pour les moteurs hydrauliques, et qu'il s'applique à une soupape qui règle l'admission de la vapeur pour les moteurs dont nous nous occupons actuellement.

Comme nous aurons fréquemment l'occasion d'en montrer des exemples par la suite, il suffira d'indiquer comment l'application doit en être faite à la machine que nous venons de décrire et que nous n'avons pas voulu compliquer de mécanismes accessoires, afin qu'on en reconnût mieux le principe et les organes essentiels.

(1) Régulateurs appliqués aux roues et aux turbines, *Traité des Moteurs hydrauliques*, page 445.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

S'il s'agit de l'emploi d'un régulateur à force centrifuge, cet appareil se place sur la machine même ou tout proche, de façon à recevoir facilement son mouvement de l'arbre moteur G. Il est mis en relation avec une petite soupape oscillante, dite *papillon*, et dont le siége est placé sur la tubulure d'entrée *c*, fig. 2, entre elle et le robinet placé sur le conduit qui amène la vapeur de la chaudière.

Par conséquent, le jeu du régulateur, lorsque la vitesse de la machine éprouve une modification, a encore pour effet de ramener cette vitesse à sa valeur normale en ouvrant ou en fermant d'une certaine quantité l'orifice d'admission, ce qui augmente ou restreint le volume de vapeur introduit dans le cylindre et change les conditions de l'effort transmis par le piston.

Appareils de service. — Toutes les parties frottantes d'une semblable machine doivent être soigneusement munies de vases appropriés à un graissage facile et constant, condition qui est, du reste, générale pour toute autre machine qui renferme des pièces en mouvement.

Le cylindre est particulièrement muni, à chacune de ses extrémités, de robinets graisseurs destinés à laisser pénétrer à volonté de l'huile pour lubrifier le frottement du piston.

De plus, il possède deux autres robinets à ses extrémités et vers la partie inférieure pour *purger*, c'est-à-dire pour faire évacuer l'eau provenant de la condensation de la vapeur après un certain temps d'arrêt. Les personnes habituées à la conduite des machines à vapeur savent combien cette précaution est importante, car l'eau qui s'amasserait dans le cylindre pourrait, puisqu'elle est incompressible, avoir pour résultat de faire éclater les fonds, en se trouvant trop étroitement confinée entre eux et le piston à chaque fin de course.

Résumé de la description d'ensemble. — La description qui précède a eu essentiellement pour but de faire connaître dans leur ensemble les principaux organes qui composent un moteur à vapeur, et, autant que possible, les principes de leurs fonctions. Dans toutes les machines que nous aurons à décrire, nous retrouverons, en effet, comme dans celle que nous avons prise pour modèle :

1° Le jeu du piston dans le cylindre;

2° La distribution de la vapeur aux deux extrémités de celui-ci;

3° L'échappement de la vapeur du cylindre, lequel peut avoir lieu, comme nous l'avons dit, directement dans l'atmosphère ou bien dans l'appareil appelé *le condenseur*, qui est alors accompagné d'une pompe à air, ainsi que nous le montrerons;

4° La disposition mécanique au moyen de laquelle le mouvement rectiligne du piston est transformé en mouvement de rotation et transmis à l'arbre moteur;

5° Enfin l'organe destiné à l'alimentation du générateur, soit une pompe foulante dite *pompe alimentaire*, soit un appareil spécial fonctionnant indépendamment de la machine motrice.

Avant de décrire les divers modèles de machines le plus en usage, nous croyons devoir, dès à présent, faire connaître le principe du calcul des effets mécaniques d'un moteur à vapeur en général, quels que soient d'ailleurs son système de construction, et les modifications qu'il présente dans ses dispositions.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## EXPOSÉ DU CALCUL GÉNÉRAL DES EFFETS MÉCANIQUES PRODUITS PAR UN MOTEUR A VAPEUR

L'étude à laquelle nous allons nous livrer exige, pour être facilement comprise, que l'on se reporte à la partie des notions préliminaires qui a trait aux propriétés mécaniques de la vapeur d'eau, depuis le paragraphe 60 jusqu'à la fin. Lorsque l'on possède bien ces éléments, rien de ce qui va suivre ne pourra paraître obscur.

Nous avons à estimer le travail développé par un moteur à vapeur dans deux conditions principales, savoir :

1° Lorsque l'admission est à pleine vapeur pendant toute la course du piston (61);

2° Lorsque l'admission n'a lieu que pendant une partie de la course, et qu'alors le piston marche avec détente ou par expansion (66).

### TRAVAIL DÉVELOPPÉ A PLEINE VAPEUR

Le cylindre d'une machine à vapeur et son piston se trouvant mis en libre communication avec le générateur où la vapeur est formée, constituent un ensemble qui reproduit très-exactement l'expérience que nous avons supposée (61) : c'est-à-dire que le piston, par les résistances qu'il doit vaincre, n'est pas autre chose que la colonne de mercure, qui en était l'image, et que la vapeur devait soulever en surmontant la résistance que son poids lui oppose. Le poids du piston, c'est réellement l'effort qu'il doit faire pour mettre en mouvement les appareils que la machine commande, et qui se résume par la pression qu'il faut exercer sur le bouton de la manivelle pour faire tourner l'arbre moteur auquel sont adaptés les organes de transmission.

On pourrait donc se reporter à cette expérience pour expliquer complétement la première manifestation de la puissance de la vapeur sur le piston d'une machine, et même en calculer tous les effets. Cependant, le piston ne peut pas être tout à fait dans les mêmes conditions que la colonne de mercure, qui est supposée pouvoir se déplacer indéfiniment dans la même direction : le piston change, au contraire, périodiquement de direction, ce qui pourrait modifier le résultat du problème; nous allons voir néanmoins qu'il n'en est rien ou peu de chose.

Supposons la machine au repos, le piston près de l'une des extrémités de sa course et l'orifice de distribution un peu découvert pour permettre la communication avec le générateur. Sous l'influence de la pression, le piston commencera à se mettre en mouvement, mais lentement, et dans les conditions d'une masse inerte qui quitte l'état de repos et prend un mouvement uniformément accéléré sous l'action d'une force constante. Arrivé à l'extrémité opposée de sa course, on a vu qu'en raison du principe des points morts, il devrait s'arrêter complétement si la vitesse

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

acquise du volant ne lui faisait pas reprendre sa marche, mais en sens inverse, et après le court instant d'un repos qui sépare théoriquement tout changement de direction sur une ligne droite. Alors la vapeur pouvant entrer de nouveau, le piston accomplit encore une évolution, et ainsi de suite.

Mais il arrive qu'après quelques oscillations, la force d'inertie étant vaincue, l'effet de la vapeur a gagné en vitesse et s'est mis en équilibre avec la résistance à vaincre, d'où il résulte que le volant est arrivé à une vitesse de rotation uniforme. Par conséquent, le piston parcourt le cylindre, non pas avec une vitesse uniforme, mais dans des temps égaux : autrement dit, chacune de ses oscillations a une même durée, et il en exécute un même nombre à l'unité de temps.

Comme à chaque coup de piston le cylindre se remplit de vapeur, on déduit de la proposition précédente que les volumes de vapeur écoulés sont proportionnels aux temps, et qu'on peut leur appliquer le même raisonnement que dans l'expérience de principe, c'est-à-dire que :

*La puissance mécanique développée sur le piston d'une machine est théoriquement proportionnelle aux volumes de vapeur dépensés et à sa pression effective.*

Or, le volume dépensé étant mesuré par celui engendré par le piston, l'ensemble de ces propriétés nous permet de calculer très-facilement la puissance d'un moteur à vapeur.

Prenons pour exemple la machine représentée pl. 9, qui est supposée avoir les dimensions principales suivantes :

| | |
|---|---|
| Diamètre du piston | $0^{m}45$ |
| Superficie du piston | $1590^{c.q.}$ |
| Rayon de la manivelle | $0^{m}45$ |
| Course du piston | $0^{m}90$ |

Admettons que la pression de la vapeur dans le générateur soit égale à 4 atmosphères, et que l'équilibre réglé entre la puissance et la résistance soit tel que l'arbre moteur de la machine exécute régulièrement 30 tours par minute.

Ces conditions ainsi arrêtées nous permettant de déterminer le volume engendré par le piston et par conséquent celui de la vapeur dépensée, on trouve en effet :

Volume total engendré par le piston dans une minute :

$$1590^{c.q.} \times 90 \times 60 = 8586000^{c.c.} \text{ ou } 8{,}586 \text{ mètres cubes,}$$

qui est aussi celui de la vapeur dépensée.

Nous avons vu (65) que 1 mètre cube de vapeur, employé sans détente, développe 10333 kilogrammètres par chaque atmosphère de pression; par conséquent, le travail produit dans les conditions ci-dessus, à chaque minute et abstraction faite de toute résistance passive, serait égal à :

$$8^{m.c.}586 \times 10333 \times 4^{atm.} = 354876 \text{ kilogrammètres.}$$

Mais il est évident que le piston éprouve continuellement sur sa face opposée à celle sur laquelle agit la vapeur une résistance due à la pression du milieu dans

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lequel cette vapeur s'échappe, et que l'on nomme la *contre-pression* : pour le cas proposé ici, c'est la pression de l'atmosphère ambiante.

Par conséquent, du travail actif calculé ci-dessus, il faut retrancher le travail passif dû à *la contre-pression*, et qui s'évalue exactement comme si l'on introduisait dans le cylindre, en sens inverse et dans le même temps, un même volume de vapeur à la pression de 1 atmosphère, et qui développerait une quantité de travail correspondante dans la direction opposée.

Le travail résistant ainsi évalué est donc égal à :

$$8{,}586 \times 10333 = 88719 \text{ kilogrammètres.}$$

Retranchant le travail résistant du travail actif, il reste pour le travail utile développé par la vapeur sur le piston :

$$354876 - 88719 = 266157 \text{ kilogrammètres.}$$

Maintenant, si l'on veut ramener cette évaluation à la seconde, prise pour unité, on trouve :

$$\frac{266157}{60} = 4435{,}95 \text{ kilogrammètres par } 1'',$$

et, suivant l'usage, en chevaux-vapeur de 75 kilogrammètres :

$$\frac{266157}{60 \times 75} = 59{,}14 \text{ chevaux-vapeur théoriques.}$$

Cette puissance, transmise au piston par la vapeur, n'est bien, en effet, que théorique, car si nous examinons les circonstances qui accompagnent son développement, nous ne tardons pas à reconnaître qu'elle est loin de se transmettre intacte à l'arbre moteur.

D'abord, la pression de la vapeur est supposée la même dans le cylindre que dans le générateur, et invariable pendant tout le temps de son admission, conditions qui ne peuvent pas être exactement remplies, par suite des refroidissements inévitables dans le parcours de la vapeur de la chaudière au cylindre, dans celui-ci même, et par la nature des mouvements du tiroir qui ne maintient pas l'admission pleine et entière pendant toute la course. Ensuite, du piston à l'arbre moteur, et ce dernier même, les pièces de la transmission absorbent de la force par leur frottement. Enfin, les organes accessoires, tels que le tiroir de distribution, la pompe alimentaire et leurs mécanismes de commande, dépensent encore une quantité de puissance assez notable pour être mis en mouvement.

Somme toute, on peut évaluer, *à priori*, à près de la moitié de la puissance utile sur le piston, celle absorbée ou perdue par ces diverses causes, ce qui réduit d'autant le travail réellement disponible sur l'arbre moteur.

Par conséquent, la machine représentée pl. 9 marchant dans les conditions ci-dessus, serait seulement d'une *puissance nominale* d'environ 30 chevaux.

Maintenant, il reste une remarque très-importante à faire sur la façon d'évaluer le travail théorique et pour en simplifier le calcul.

Nous avons calculé séparément le travail actif de la vapeur et celui résistant dû

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à la contre-pression. Mais dans cette circonstance particulière, où la pression de la vapeur est regardée comme fixe par l'absence de détente, il est clair que celle de l'atmosphère l'étant également, la différence des deux pressions, en vertu de laquelle le piston est poussé, est également invariable : d'où il résulte que la situation est exactement la même, que si le piston n'éprouvait pas de contre-pression, et que la vapeur possédât une atmosphère de moins.

Donc, si l'on cherche le travail utile développé sur le piston d'une machine *marchant sans détente,* il suffit de faire la différence des pressions que le piston supporte sur ses deux faces, et d'attribuer cette différence à la pression de la vapeur, pour en calculer le travail d'après le volume.

Ainsi, dans l'exemple ci-dessus, la pression *absolue* de la vapeur étant 4 atmosphères, celle *effective* devient 3, puisque celle extérieure est égale à 1; le travail utile développé sur le piston sera donc déterminé directement, en supposant la pression de la vapeur réduite à 3 et la contre-pression nulle, et l'on trouvera, comme ci-dessus :

$$8^{\text{m. c.}}586 \times 10333 \times 3^{\text{atm.}} = 266157 \text{ kilogrammètres par } 1'.$$

Calcul de la puissance en fonction de la vitesse du piston. — De même que le piston engendre des volumes égaux dans des temps égaux, le chemin qu'il parcourt est aussi invariable pour un même nombre de tours de l'arbre moteur à l'unité de temps. Par conséquent, bien que sa vitesse soit réellement variable pendant la durée d'une course simple ou d'une pulsation, on peut cependant lui attribuer une vitesse moyenne, fixe, en divisant exactement le chemin qu'il effectue par le temps mis à le parcourir. Mais puisque la pression qui le pousse est aussi regardée comme fixe, on peut donc dire que le travail T développé résulte directement du produit d'un effort P, par le chemin V qu'il fait parcourir à la résistance dans le sens de sa propre direction, soit :

$$T = PV,$$

principe conforme à la théorie générale des forces mécaniques.

Cette méthode de calculer la puissance d'une machine à vapeur est très-simple et aussi très-employée, plus facilement, il est vrai, pour le cas d'une machine sans détente, où l'effort est considéré comme fixe, qu'avec la machine à détente, bien qu'il soit possible d'en faire usage dans ce dernier cas, comme nous le montrerons bientôt.

Pour appliquer cette méthode à la machine actuelle, nous disons que, si l'arbre moteur fait 30 tours par minute, le piston donne un même nombre de coups doubles dans le même temps, c'est-à-dire qu'il parcourt 60 fois la longueur du cylindre, ou bien encore qu'il engendre un chemin total équivalent à 120 fois le rayon de la manivelle.

Sa vitesse moyenne V, à l'unité de temps, c'est-à-dire par seconde, est donc la soixantième partie de ce chemin total effectué dans une minute, soit :

$$V = \frac{120 \times 0^{m}45}{60} = 0^{m}90 \text{ par } 1''.$$



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

(Une circonstance toute fortuite fait que cette vitesse est ici égale à la course même du piston. Cela tient tout simplement au nombre de tours adopté qui est 30, d'où le piston donne précisément 60 pulsations par minute, et effectue par conséquent sa course en 1 seconde.)

D'autre part, l'effort moteur P est le produit de la superficie du piston par la pression effective de la vapeur par unité de surface, laquelle est ordinairement exprimée en kilogrammes par centimètre carré (7). Cet effort est ainsi égal à :

$$P = 1590^{c.q.} \times 1^{k}0333 \times 3 = 4928^{kil.}841.$$

Effectuant, en résumé, le produit pour obtenir le travail T, il vient :

$$T = 4928^{k}841 \times 0^{m}90 = 4435{,}95 \text{ kilogrammètres par } 1'',$$

valeur identique à celle trouvée précédemment.

Nous aurons l'occasion de montrer que cette façon d'envisager la marche des machines à vapeur a servi souvent de base à leurs proportions, et que l'on dit encore que la vitesse du piston est réglée dans tel système à 1 mètre par seconde en moyenne, à $1^{m}50$ dans tel autre, etc. Il est d'ailleurs remarquable que les grandes machines fixes sont généralement basées sur 1 mètre environ, et les locomotives sur une vitesse deux à trois fois plus considérable.

### TRAVAIL DÉVELOPPÉ AVEC DÉTENTE

Lorsqu'une machine fonctionne dans les conditions supposées précédemment, le cylindre se trouve rempli, à chaque coup simple, d'un volume de vapeur qui devient neutre, et dont il faut se débarrasser immédiatement en lui ouvrant une issue facile dans un milieu d'une pression moindre.

Mais cette vapeur est loin d'avoir rendu tout son effet, attendu qu'elle possède encore une force élastique bien supérieure à celle du milieu résistant dans lequel elle s'échappe, et il est certain que, s'il est possible de la diriger sur une seconde machine, elle y développera encore de la puissance utile, effet qui est, du reste, exactement produit à l'aide des machines à vapeur dites *à deux cylindres*.

Cependant, une machine à un seul cylindre, comme celle dont nous nous occupons actuellement, est susceptible de recevoir une disposition convenable pour mieux utiliser la puissance de la vapeur que par l'admission à pleine vapeur : c'est une distribution disposée pour l'admission *avec détente,* mode d'emploi de la vapeur dont on a pu étudier les propriétés dans les notions préliminaires (66 et suivants).

Faisant abstraction, pour l'instant, des détails du mécanisme employé, un tiroir, organisé pour produire de la détente dans le cylindre, a pour effet principal de laisser entrer la vapeur pendant une certaine fraction de la course simple du piston et d'en interrompre complétement l'introduction avant que la course soit achevée.

Il en résulte alors l'effet qui a été expliqué précédemment (66 et suivants); la vapeur, entièrement confinée dans le cylindre, se dilate et exerce sur le piston une pression qui décroît progressivement jusqu'au moment où elle s'échappe, et peut

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

alors ne conserver, arbitrairement, qu'une force élastique peu supérieure à celle de la contre-pression.

Supposons, comme premier exemple, que la vapeur soit admise à plein e pression à 4 atmosphères, pendant le premier tiers de la course et que l'admission soit arrêtée complétement en ce point, son expansion ou sa force élastique suffira pour continuer de pousser le piston; la course achevée, la vapeur occupant un volume trois fois plus grand que celui de son admission à pleine vapeur, sa pression sera réduite au tiers, c'est-à-dire à 4/3 d'atmosphère, pression encore supérieure à celle du milieu où se fait l'échappement.

Par conséquent, sa puissance aura été plus complétement utilisée, et dans le rapport indiqué par la table (72) qui montre que le travail de 1 mètre cube de vapeur, volume pris pour unité, développe seulement 10333 kilogrammètres par atmosphère quand on l'emploie sans détente, tandis qu'il en produit 21686, à la même pression, en continuant de l'utiliser jusqu'à ce que sa pression soit réduite au tiers. On gagne donc la différence, c'est-à-dire 11353 kilogrammètres, ce qui démontre que la simple détente au tiers permet de doubler l'effet utile de la puissance de la vapeur.

Mais si nous notons encore qu'avec le système à détente on emploie la vapeur à une plus haute pression que dans le cas de la pleine pression ou de l'admission complète, il est évident qu'il existe encore là un motif d'économie, en raison de la réduction de dépense de combustible employé pour passer d'une faible pression à une autre beaucoup plus élevée (39).

Cela ne veut pas dire évidemment qu'en conservant les mêmes dimensions à la machine, et en marchant ainsi avec la détente, on eût obtenu plus de puissance, ce qui serait absurde, mais tout simplement qu'en augmentant les dimensions du cylindre pour opérer une détente déterminée, on aurait obtenu une plus grande puissance avec le même volume de vapeur dépensée, ou bien une puissance égale avec une moindre quantité de vapeur.

En considérant l'action de la vapeur sur le piston, il est évident que l'effort direct, qui était regardé comme constant avec l'admission à pleine vapeur, est, au contraire très-variable avec le mode à détente. Or, la résistance étant fixe, le mouvement de la machine subirait des variations très-contraires à sa bonne fonction, si le volant ne venait pas encore agir pour maintenir l'uniformité de la vitesse. Aussi les machines à détente doivent-elles posséder des volants plus puissants que les autres, et cela d'autant plus que la détente est plus grande ou plus longuement prolongée.

Ce fait établi dans son ensemble, nous pouvons en calculer les effets avec notre machine type, en prenant pour point de départ les bases qui ont été posées avec quelque développement dans les notions préliminaires.

Exemple. — Soit donné de calculer la puissance théorique développée sur le piston de la machine représentée pl. 9, en admettant que :

1° La vapeur soit introduite à pleine pression dans le cylindre seulement pendant un cinquième de la course du piston, les quatre autres cinquièmes s'effectuant par expansion, lorsque la communication avec le générateur est complétement interrompue;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

2° La pression de la vapeur dans le générateur étant de 5 atmosphères;

3° Les conditions de vitesse de l'arbre moteur restant les mêmes que ci-dessus, c'est-à-dire de 30 révolutions par minute.

*Solution.* La méthode à employer est la première des deux précédentes proposées pour la pleine pression, c'est-à-dire :

1° Déterminer la quantité de travail développée pour chaque coup de piston et en déduire le travail négatif dû à la contre-pression;

2° Ramener le résultat à l'unité de temps.

Pour répondre à la première de ces conditions, on remarquera que la quantité de travail développée à chaque coup de piston est exactement celle qui correspond au volume de vapeur introduit d'après sa pression et le degré de détente, et que cette quantité, répétée autant de fois que le piston donne de pulsations dans une minute, équivaut à la somme totale de travail dans le même temps.

Par conséquent, nous trouvons, comme ci-dessus, pour le volume de vapeur dépensé par minute, en tenant compte de ce que la vapeur n'est introduite que pendant un cinquième de la course :

$$\frac{1590^{c.q.} \times 90 \times 60}{5} = 1717200^{c.c.} \text{ ou } 1{,}717 \text{ mètres cubes.}$$

Raisonnant toujours comme dans le premier cas, on trouve, à l'aide de la table (72), que 1 mètre cube de vapeur, détendu à 5 fois son volume primitif, développe 26964 kilogrammètres par atmosphère, soit 134820 pour 5.

Or, puisque la dépense s'élève à $1^{m.c.}717$, la quantité de travail directe est alors :

$$134820 \times 1{,}717 = 231486 \text{ kilogrammètres.}$$

Retranchant de cette valeur celle du travail résistant, qui est le même que précédemment, puisque nous supposons toujours l'échappement à l'air libre, il vient, pour le travail théorique effectif développé sur le piston :

$$231486 - 88719 = 142767 \text{ kilogrammètres.}$$

Enfin, ramenant le travail à la seconde et en chevaux-vapeur, on a :

$$\frac{142767}{60 \times 75} = 31{,}72 \text{ chevaux théoriques.}$$

Comme dans la première condition, on peut ici trouver la quantité de travail due à l'action de la vapeur en prenant la vitesse du piston pour base. Le problème revient alors à calculer le volume de vapeur dépensé en procédant comme ci-dessus, mais avec un cylindre idéal ayant pour longueur géométrique la vitesse du piston par seconde.

L'application de cette remarque à notre exemple n'offre pas d'intérêt, puisque la vitesse du piston est égale à sa course; il est du reste aisé de comprendre ce qu'il y aurait à faire dans un autre cas quelconque.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

### RÉCAPITULATION DES RÈGLES PRÉCÉDENTES

Que l'admission de la vapeur ait lieu avec ou sans détente, voici les règles qui permettront de calculer la puissance théorique d'un moteur à vapeur, estimé exclusivement sur le piston et par coup double,

Appelant :

$p$, la pression absolue de la vapeur dans le générateur, exprimée en atmosphères;

D, le volume engendré à chaque coup simple par le piston, exprimé en mètres cubes;

$d$, le volume de vapeur dépensé à chaque coup simple du piston, exprimé en mètres cubes;

$t$, le nombre de la table (72) exprimant la quantité de travail en kilogrammètres, développée par 1 mètre cube de vapeur à la pression de 1 atmosphère et dans les conditions de son mode d'emploi avec ou sans détente;

$p'$, la pression du milieu où se fait l'échappement, exprimée en atmosphères;

T, la quantité de travail théorique développée sur le piston pour un coup double correspondant à un tour entier de l'arbre moteur, exprimée en kilogrammètres.

On a, pour cette quantité de travail :

$$T = 2\,(dtp - 10333\,Dp'). \qquad (A)$$

S'il n'existe pas de détente, que le volume de vapeur dépensé soit précisément égal à celui engendré sur le piston, cette formule se simplifie un peu et devient :

$$T = 2d\,(p - p')\,10333. \qquad (A')$$

D'après cela, pour obtenir la quantité totale de travail T′ par seconde et pour le nombre $n$ de tours complets de l'arbre moteur dans une minute, on trouve :

$$T' = \frac{Tn}{60}, \qquad (B)$$

valeur qu'il faudrait encore diviser par 75 pour avoir l'expression de la puissance en chevaux-vapeur.

PREMIER EXEMPLE. — Quelle est la puissance théorique d'un moteur à vapeur dans les conditions suivantes :

$p$, pression absolue de la vapeur..... = $4^{at.}\,5$
D, volume engendré à chaque course par le piston..... = $0^{m.c.}200$
$d$, volume de vapeur dépensé (sans détente)..... = $0^{m.c.}200$
$t$, travail de 1 mètre cube de vapeur à 1 atmosphère (sans détente)..... = 10333 kilgm.
$p'$, pression du milieu d'échappement..... = 1 atm.
$n$, nombre de tours ou de coups doubles par 1′..... = 55

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

*Solution* (formule A′).

Puissance correspondante à 1 tour :

$$T = 2 \times 0^{m}200 \times (4{,}5 - 1) \times 10333 = 14466 \text{ kilogrammètres.}$$

Puissance totale par 1″ et en chevaux-vapeur :

$$T' = \frac{14466 \times 55}{60 \times 75} = 176{,}8 \text{ chevaux théoriques.}$$

Deuxième exemple. — Quelle est la puissance d'un moteur à vapeur dans les conditions suivantes :

$p$, pression absolue de la vapeur..... = 6 atm.
D, volume engendré par le piston..... = $0^{m.c.}200$
$d$, volume de vapeur dépensé par coup (détente pendant 4/5 de la course)..... = $0^{m.c.}040$
$t$, travail de 1 mètre cube de vapeur à 1 atmosphère, détendu 5 fois (72)..... = 26964 kilgm.
$p'$, pression du milieu d'échappement ou contre-pression (avec un condenseur)..... = $0^{at.}1$
$n$, nombre de tours de l'arbre par 1′..... = 55

*Solution* (formule A).

Puissance correspondante à 1 tour :

$$T = 2 \times (0^{m.c.}04 \times 26964 \times 6^{at.} - 10333 \times 0^{m.c.}200 \times 0^{at.}1) = 12529{,}4 \text{ kilgm.}$$

Puissance totale par 1″ et en chevaux :

$$T' = \frac{12529{,}4 \times 55}{60 \times 75} = 153{,}14 \text{ chevaux théoriques.}$$

Remarque sur la dépense de combustible par les deux modes d'emploi de la vapeur avec et sans détente. — Après avoir exposé la méthode servant à déterminer le travail dû à l'emploi de la détente, nous allons essayer de donner quelques chiffres sur l'économie qui en résulte.

Si dans l'un des exemples proposés plus haut (p. 331) on avait employé de la vapeur à pleine pression au lieu de limiter l'admission au 1/5 de la course du piston en utilisant la détente à 5 fois le volume primitif, quelle aurait été la dépense comparative pour obtenir le même effet ?

Le travail produit étant de 142767 kilogrammètres par minute, pour obtenir le même effet sans détente, dans lequel cas la pression est aussi supposée constante, il faudrait dépenser $8^{m.c.}586$ de vapeur (p. 327), dont la pression effective à déterminer est $x$.

Cette pression sera déterminée facilement en employant la règle (p. 329) disposée pour estimer directement le travail à pleine vapeur, en opérant tout de suite la différence des pressions supportées par le piston sur les deux faces, et en réduisant ainsi celle de la vapeur à sa valeur effective. Cette règle ordonnée alors pour trou-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ver la pression, puisque ce sont les autres quantités qui cette fois sont données, on trouve :

$$x = \frac{142767}{8^{\text{m. c.}}586 \times 10333} = 1{,}6 \text{ atmosphères},$$

d'où la pression absolue de la vapeur dans le générateur devrait être de $2^{\text{at.}}6$.

La quantité de vapeur à produire serait donc de 8,586 mètres cubes de vapeur qui à cette pression pèsent (11) :

$$8^{\text{m. c.}}586 \times 1^{\text{k}}400 = 12^{\text{k}}020 \text{ environ.}$$

D'autre part, la dépense pour la même quantité de travail avait été seulement de 1,717 mètres cubes de vapeur à 5 atmosphères qui pèsent :

$$1^{\text{m. c.}}717 \times 2{,}576 = 4^{\text{k}}423.$$

Par conséquent, si nous admettons, pour plus de simplicité, que l'on produise, dans les deux cas, un même poids de vapeur par kilogramme de combustible, il est évident que, pour la même puissance théorique de $31^{\text{ch.}}72$, on dépensera environ le triple de combustible en marchant sans détente, puisqu'il y a environ 3 fois plus d'eau vaporisée et dépensée. Ce rapport ne changera pas, quel que soit l'effet utile réel estimé sur l'arbre moteur, si ce dernier reste le même dans les deux cas. Il est évident, d'ailleurs, que chaque degré différent de détente présentera un rapport particulier d'économie, celui-ci n'étant qu'un exemple.

Dans tout ce qui précède, la dépense calculée correspond évidemment à de la vapeur *sèche*, c'est-à-dire n'entraînant pas d'eau non vaporisée avec elle, et ne subissant aucun refroidissement dans son parcours du générateur à la machine motrice. Enfin ce sont des données *théoriques*, mais dont on peut se rapprocher d'autant plus que le générateur, d'une part, et la machine d'autre part, sont plus ou moins bien disposés en vue de conserver à la vapeur ces précieuses propriétés de siccité et de température.

## RÉSUMÉ DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

De tout ce qui précède, on déduit les propriétés fondamentales suivantes :

La puissance d'un moteur dépendant exclusivement du volume de vapeur dépensé à l'unité de temps, en tenant compte de sa pression et de son mode d'emploi avec ou sans détente, il s'ensuit que les dimensions de la machine, comme cylindre, *sont complètement indépendantes* de la force qu'on peut lui faire développer, puisqu'un même volume donné de vapeur peut être dépensé dans un même temps en faisant varier réciproquement le diamètre du cylindre, la course du piston et le nombre de pulsations.

Aussi rencontre-t-on des machines de grandes dimensions très-faibles, et d'autres très-petites et cependant très-puissantes : les machines locomotives, par exemple, sont des moteurs très-puissants, avec des dimensions relativement faibles. Tout

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dépend, en résumé, de la pression de la vapeur et du volume qui en est à la fois produit et dépensé par la plus ou moins grande vitesse de la machine, abstraction faite, bien entendu, de la résistance des organes de transmission.

Une même machine peut donc représenter des puissances nominales très-différentes, suivant la vitesse à laquelle on la fait marcher. C'est de là que viennent les différences considérables qui existent entre des machines livrées, pour une même force nominale, par les divers constructeurs.

## TRACÉ GÉOMÉTRIQUE ET CONDITIONS STATIQUES DES ORGANES DE LA TRANSMISSION

Les organes qui lient le piston à l'arbre moteur, et qui opèrent à la fois la transmission et la transformation du mouvement, sont déterminés par leurs axes géométriques, au moyen d'un tracé qui varie évidemment avec leur forme même et leur nature, suivant le système propre de la machine.

D'autre part, la disposition particulière de chaque mode de transmission détermine une répartition relative des efforts éprouvés par chacun des organes différents et une relation spéciale entre les positions correspondantes du piston et de la manivelle, laquelle résume l'action dans chacun des cas.

Nous avons à examiner sous ce rapport les systèmes suivants :

1° Machines à action directe, horizontales ou verticales;

2° Machines à balancier;

3° Machines conjuguées par un seul arbre moteur;

4° Machines oscillantes.

### MÉCANISME DES MACHINES A ACTION DIRECTE

(FIG. 5, PL. 9.)

La machine représentée pl. 9 est *à mouvement direct,* parce que le mécanisme de transmission se compose uniquement de la bielle reliant la tige du piston à la manivelle. Que l'ensemble soit horizontal ou vertical, ou même incliné, rien n'est changé dans ces conditions.

Cependant, dans la catégorie des machines à transmission simple par bielle et manivelle, il se présente une variante dont le caractère consiste dans la position de l'axe moteur qui se trouve placé à l'extrémité opposée du cylindre de celle indiquée par la pl. 5.

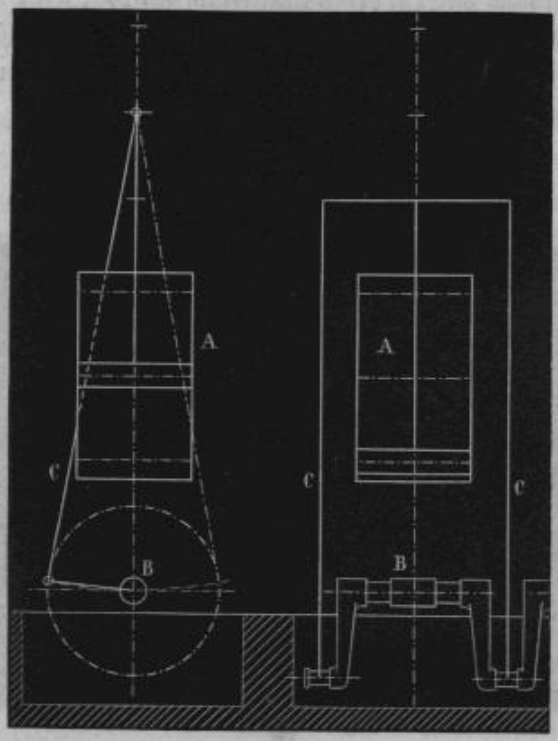
Ces machines sont généralement verticales, comme le représente la fig. 50 ci-après.

Le cylindre A est placé sur un socle au-dessous duquel se trouve l'arbre moteur B, qui est alors commandé par deux bielles C placées symétriquement de chaque côté

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

du cylindre; il est muni, à cet effet, d'une manivelle à l'une de ses extrémités et forme un coude du côté opposé où il doit être continué pour la transmission du mouvement.

Fig. 50.




Cette disposition présente l'avantage de pouvoir donner aux bielles une très-grande longueur, tout en réduisant comparativement la hauteur de la machine; elle est néanmoins à peu près abandonnée aujourd'hui, à cause de la complication de la double bielle et de l'arbre coudé ou à triple manivelle.

Les spécimens les plus connus de ce système étaient les machines construites par M. Saulnier aîné, et celles de M. Maudsley, le célèbre constructeur anglais.

Cependant quelques machines plus récentes ont été établies sur le même principe, mais avec cette différence que l'arbre à coude a été remplacé par un axe droit ordinaire et une manivelle reliée alors aux deux bielles par une pièce en forme de T. Nous pouvons citer à cet égard la machine de M. Farcot, dite *machine à tabouret*, et qui se trouve reproduite par la pl. 17. La fig. 51, de la page suivante, représente le tracé géométrique de ce système, pour lequel nous ajouterons quelques mots plus loin.

Il existe encore, comme variété de forme, les machines à mouvement direct analogues à celles construites par M. Hermann, dans lesquelles la liaison de la manivelle avec le piston est opérée par un châssis en forme de trapèze, et dont le fonctionnement est exactement le même que celui d'une bielle simple.

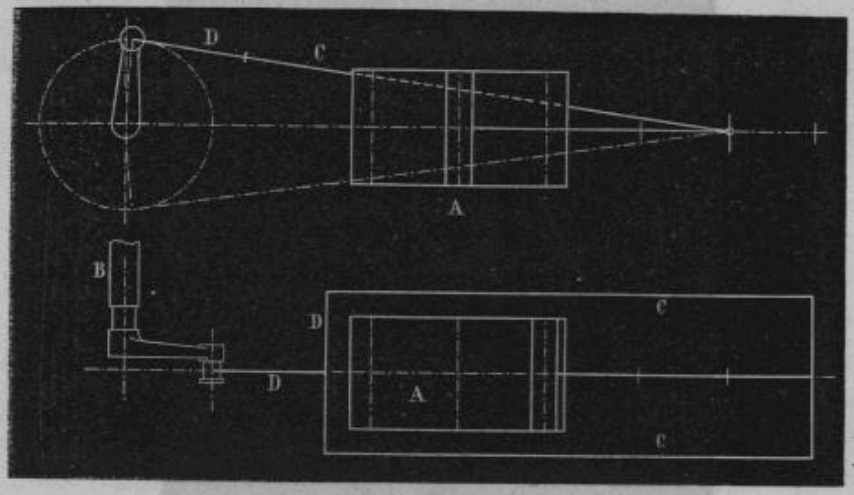
Avant d'arriver aux détails du tracé géométrique général, considéré par l'exemple



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

représenté pl. 5, et qui s'applique exactement aux variétés de formes que nous mentionnons actuellement, nous donnons par la fig. 51 suivante l'une des dispositions dont nous avons parlé, et qui est adoptée pour des machines horizontales, par M. Duvoir, mécanicien à Liancourt, et par d'autres constructeurs. C'est le cas de l'arbre coudé remplacé par l'arbre à manivelle simple, avec la pièce D en forme de T, reliant la manivelle aux deux bielles C. On voit que ce système exige de ménager entre le cylindre et l'arbre une grande distance, égale, à cause du T, à plus du double de la longueur de la manivelle.

Fig. 51.




Tracé géométrique de la machine type, pl. 9. — La fig. 5 de la pl. 9 montre spécialement le tracé géométrique des mouvements relatifs du piston, de la bielle et de la manivelle.

Le cylindre y figure comme un simple rectangle *abcd*, ayant pour grands côtés une longueur égale à la course du piston, et pour petits côtés une longueur égale à son diamètre. La tige, la bielle et la manivelle sont représentées par leurs axes, avec le cercle décrit par le bouton de la manivelle autour du centre *e* de l'arbre moteur.

Après avoir tiré la ligne AB pour représenter l'axe du cylindre et l'avoir prolongée pour y marquer le centre de rotation, on trace le rectangle *abcd* suivant les dimensions correspondant au diamètre du piston et de sa course. Le piston s'y trouve représenté par une ligne parallèle à *ad*, passant par le milieu de son épaisseur. En prenant ensuite le piston à l'extrémité *ad* de sa course, la plus opposée à l'axe de rotation, on détermine la longueur de la tige en raison de la quantité dont elle doit excéder le cylindre pour que la traverse D (fig. 1) ne vienne pas choquer le presse-étoupe lorsque le piston est tout à fait enfoncé dans le cylindre.

Cette longueur correspond au centre de la traverse ou de son assemblage avec la bielle; c'est le point *f* sur l'axe AB, fig. 5. A partir de ce point, on porte sur le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

même axe la longueur $fg$ de la bielle, et enfin, du point $g$, on porte la longueur $ge$ égale à la demi-course : le point $e$ est alors le centre de l'arbre moteur.

A l'égard de la longueur de la bielle, elle est *ad libitum*, pourvu que, *théoriquement*, elle excède celle de la course ou le double du rayon de la manivelle. Mais en pratique, il en est autrement, et cette longueur ne saurait être inférieure à environ 4 1/2 fois ce rayon; la meilleure condition serait qu'elle fût *infiniment longue*. On adopte assez généralement 4 à 5 fois le rayon de la manivelle, et pour exemple, nous avons admis le rapport 5 1/2, ce qui donne $2^m475$ pour la longueur réelle de la bielle, le rayon de la manivelle étant $0^m45$.

Cette façon de procéder permet, en résumé, de déterminer la distance exacte du centre de rotation au cylindre, puisque les pièces du mouvement sont prises exactement en ligne droite ainsi qu'elles se trouvent situées à chacun des deux points morts. On aurait pu partir de l'autre position où le piston se trouve à son extrémité $bc$, mais cela est moins convenable, à cause de la tige du piston, dont la longueur doit être préalablement déterminée indépendamment des conditions du mouvement, et d'après les dimensions propres de la traverse et de la saillie du couvercle.

Maintenant, pour compléter le tracé, on décrit, du point $e$ comme centre, un cercle d'un rayon égal à celui de la manivelle, puis du point $f$, on porte la course $ff'$ de la traverse égale à celle du piston, et dont on marque le milieu en $e'$.

Pour rendre le tracé plus expressif, on indique ordinairement l'ensemble des pièces en mouvement, la position relative qu'elles occupent, le piston étant au milieu de sa course et dans les deux sens du mouvement.

Dans ces deux circonstances de la position médium du piston, son axe est juste sur $m''m''$, et celui de la traverse au milieu de $ff'$ sur $m'm'$. La bielle, ayant son extrémité correspondante en $e'$, est au-dessus ou au-dessous de l'axe AB, suivant le sens de la rotation de l'arbre et la direction du mouvement du piston. Pour déterminer ces deux positions, il suffit de décrire, avec le rayon de la bielle et du point $e'$ comme centre, un arc de cercle $tGt'$ (fig. 1) qui vient couper la circonférence décrite par le bouton de la manivelle en deux points $t$ et $t'$, que l'on joint avec le centre de la traverse par deux droites qui correspondent à l'axe de la bielle dans les deux positions proposées. Les deux rayons menés des mêmes points au centre de rotation de l'arbre désignent les positions correspondantes de la manivelle. (Ces deux positions ont été indiquées exclusivement sur la fig. 1 pour ne pas compliquer le tracé géométrique, fig. 5, qui doit servir à une autre démonstration.)

En examinant les conditions du tracé, on reconnaît bientôt que cet arc de cercle $tGt'$ doit passer exactement par le centre de l'arbre moteur, car la distance de ce centre à la position milieu de la traverse est égale à la longueur de la bielle.

Si nous nous reportons, en effet, au point de départ du tracé, où la longueur $fg$ de la bielle a été portée de $f$ en $g$ (fig. 5), et celle $ge$ de la manivelle de $g$ en $e$, il est clair que $fe'$ étant égal à $ge$, on a :

$$e'e = fg + ge - fe', \text{ d'où : } e'e = fg.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ces conditions principales sont ordinairement les seules qui se déterminent toujours lorsqu'on représente le tracé géométrique d'une machine à mouvement direct comme celle-ci. Mais il n'est pas plus difficile ensuite de trouver telle autre position relative des pièces en mouvement. Si l'on veut, par exemple, déterminer toutes les positions du piston correspondant à celles occupées par la manivelle sur le cercle qu'elle décrit, il suffit de diviser ce dernier en un certain nombre de parties égales, et de chaque point de division, comme centre, de décrire des arcs de cercle avec la longueur de la bielle pour rayon. Chacun de ces arcs coupera l'axe commun AB en différents points qui indiqueront les positions correspondantes de la traverse D, qui sont aussi celles du piston dans le cylindre, puisque le piston, sa tige et sa traverse sont exactement solidaires l'un de l'autre.

Cette opération est représentée fig. 5, où le cercle de la manivelle est divisé en 20 parties égales qui correspondent à 10 positions du piston, attendu que celui-ci occupe les mêmes places pour chaque demi-tour exécuté des deux côtés de la ligne des centres. On voit en effet que la division se répète de chaque côté suivant 10 parties de 0 à 0, et donne deux chiffres réciproquement complémentaires de 10 pour les positions du piston ; autrement dit, le piston occupe successivement les positions 0, 1, 2, 3, etc., en marchant dans un sens qui correspond à celles 0, 9, 8, 7, etc., de la marche en sens contraire.

Positions et vitesses relatives du piston, de la bielle et de la manivelle. — Quel que soit le mode de transmission adopté entre le piston et l'arbre moteur, il est clair que le résultat doit être d'obtenir un mouvement circulaire uniforme pour ce dernier, et par conséquent pour la manivelle. Or, en cherchant les positions absolues des pièces qui constituent le mécanisme, il faut prendre pour point de départ la régularité du mouvement de la manivelle, et chercher, d'après cela, ce que deviennent les autres. On a vu que la manivelle est animée, en effet, d'un mouvement de rotation uniforme qui doit être maintenu par l'inertie du volant.

Si l'on compare alors les positions de la manivelle (fig. 5), suivant les divisions égales du cercle, avec les positions correspondantes du piston, on reconnaît que celles-ci sont loin d'être également distantes les unes des autres, et que, près des points morts, elles sont beaucoup plus rapprochées que vers le milieu de la course. Ceci prouve que la vitesse du piston n'est pas uniforme, comme celle de la manivelle, et qu'elle croît des extrémités de la course au milieu, et décroît du milieu aux extrémités. En un mot, pour des angles égaux, décrits par la manivelle dans des temps égaux, le piston parcourt des espaces inégaux, croissants ou décroissants, suivant qu'il s'éloigne ou se rapproche des positions extrêmes.

Cette propriété découle naturellement de la transformation du mouvement rectiligne en mouvement circulaire. Elle peut s'exprimer en disant que, si la bielle était infiniment longue et considérée alors comme parallèle à elle-même dans toutes les positions, le déplacement du piston suivrait exactement la progression croissante ou décroissante du sinus des angles engendrés par la manivelle par rapport au diamètre perpendiculaire à l'axe général AB.

Mais la bielle ayant nécessairement une longueur définie, il en résulte que cette

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

loi n'est pas exactement applicable, et qu'on s'en éloigne d'autant plus que la bielle forme un angle plus prononcé avec la ligne AB du centre. Aussi, non-seulement les espaces parcourus par le piston ne forment pas des divisions égales, mais ils ne sont pas symétriques dans chaque moitié de la course.

Si l'on examine, en effet, le tracé fig. 5, on voit que la position 1-9 est plus rapprochée de l'extrémité *bc* que celle semblable de l'autre extrémité *ad*, propriété qui existe pour toutes les autres positions; elle se remarque encore, à l'égard des positions 5 de la manivelle, à la moitié de la demi-circonférence du cercle qu'elle décrit, et qui, au lieu de coïncider avec le milieu $m''m''$ de la course du piston, correspondent à celle 5-5, située entre le milieu et l'extrémité *bc*.

Par la même raison, si l'on représentait les positions du piston par des divisions égales, celles de la manivelle seraient inégales. Ceci devient très-manifeste avec la position milieu du piston (fig. 1), pour laquelle l'arc de cercle, qui détermine celles de la manivelle, passe par le centre, et ne peut pas rencontrer alors les extrémités du diamètre qui s'y trouve tracé perpendiculairement à l'axe AB.

En résumé :

1° La manivelle possédant une vitesse uniforme, le piston marche avec une vitesse *périodiquement* variable;

2° La bielle a pour influence, sa longueur n'étant pas infinie, de rendre la marche du piston non symétrique dans les deux moitiés de sa course;

3° En considérant la course du piston divisée exactement en deux parties égales, la demi-circonférence correspondante engendrée par la manivelle se trouve divisée en deux angles inégaux, le plus faible compris entre l'axe de rotation et l'extrémité de la bielle opposée à son point d'attache avec la manivelle.

L'influence de la bielle sur la régularité de la marche du piston et de la manivelle se fait ressentir dans le même rapport sur les efforts transmis, ainsi qu'on le verra tout à l'heure; et comme ces perturbations n'existeraient pas si la bielle était infinie, il est donc nécessaire de la faire au moins assez longue pour se rapprocher, dans les limites possibles, de la meilleure condition.

Lorsqu'on peut adopter, comme nous l'avons fait ici, le rapport 5,5 : 1 avec la manivelle, on voit, par le tracé même, que l'irrégularité est faible, attendu que le piston étant juste au milieu de sa course (fig. 1), la manivelle est très-sensiblement près du même point de la sienne. Cependant, cette grande dimension de la bielle augmente proportionnellement la longueur de la machine, et partant, son poids, ce qui pourra conduire, dans de certaines circonstances, à l'adoption d'un rapport moindre. Mais au-dessous du rapport 4 ou 4,5, on cesserait réellement d'être dans des conditions acceptables; non-seulement une bielle trop courte rend difficile la réglementation d'une machine, mais elle produit une décomposition de force très-contraire à la conservation des pièces et à la bonne marche.

ÉGALITÉ DU TRAVAIL DÉVELOPPÉ ET DU TRAVAIL TRANSMIS. — Admettant, comme nous l'avons fait jusqu'ici, que la pression reste constante sur le piston pendant une course, ce qui est suffisamment exact pour être admis dans la démonstration actuelle, l'effort total qui en résulte se communique, par la tige et la bielle, à la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

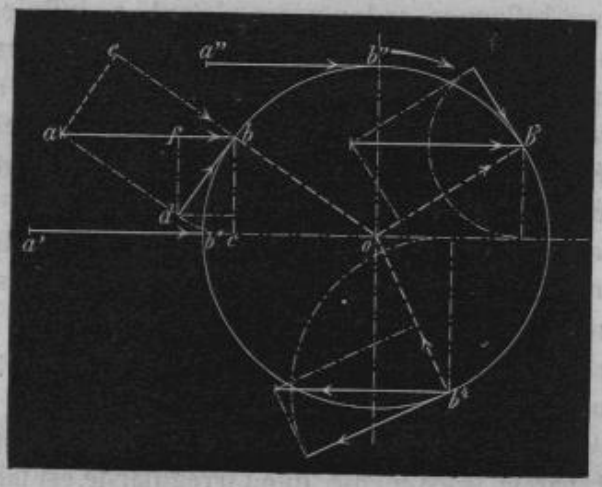
manivelle qui entraîne avec elle l'arbre moteur en surmontant la résistance qui lui est opposée par le travail à accomplir.

Le premier point à examiner est celui de savoir si la transformation de mouvement n'absorbe pas théoriquement une partie de cette puissance, et si la quantité de travail développée sur le piston est transmise intégralement à la manivelle.

Pour rendre cette recherche plus simple, nous devons admettre, pour l'instant, que la bielle ait une longueur infinie, de façon qu'agissant toujours parallèlement à elle-même et à l'axe général du mouvement, sur le bouton de la manivelle, cette action soit exactement égale à celle P développée sur le piston.

Maintenant, soit fig. 52, le cercle décrit par le bouton de la manivelle dont le centre est $o$ et le rayon $ob$. Si nous supposons la manivelle dans diverses positions $ob'$, $ob$ et $ob''$, la pression P agira suivant les directions parallèles : $a'b'$, $ab$ et $a''b''$, et en ces différents points son action sera évidemment différente, puisqu'en $a'b'$, au point mort, cette action sera nulle quant au mouvement circulaire, étant dans la direction propre de la manivelle, et sera au contraire entière et maximum en $a''b''$ où elle agit juste tangentiellement au mouvement circulaire.

Fig. 52.




Pour connaître d'abord la loi de cette action variable, prenons la position $ob$ de la manivelle, et supposons que la pression constante P soit représentée en grandeur par la droite $ab$ suivant la direction de laquelle nous savons qu'elle s'exerce.

En construisant le rectangle $adbe$, on reconnaît que la force P ou $ab$ se décompose en deux actions qui correspondent à $eb$ et $db$, l'une $eb$ dans la direction même de la manivelle et sans effet, quant au mouvement, et l'autre $db$ tangente au cercle et concourant exclusivement au mouvement circulaire.

Mais par la similitude des triangles $abd$ et $obc$, ce dernier formé par le côté $bc$ abaissé perpendiculairement sur $ob'$, on a :

$$\frac{ab}{db} = \frac{bo}{bc}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Or, $bc$ étant le sinus de l'angle aigu actuel formé par la manivelle avec la direction de la pression P ou $ab$, on en déduit que :

*La pression constante* P, *exercée par le piston, agit sur le bouton de la manivelle dans le sens du mouvement circulaire avec une intensité variable, proportionnelle au sinus de l'angle aigu formé par cette manivelle avec la direction absolue de la pression, la bielle étant supposée d'une longueur infinie.*

Il est facile de se rendre compte que cette propriété est générale et exacte pour tous les points de la circonférence décrite par la manivelle.

La fig. 52 indique la même opération pour deux autres points $b^3$ et $b^4$, et il est aisé de voir que la composante tangentielle est toujours égale au sinus de l'angle *aigu* formé par la manivelle avec l'axe général $a'o$ du mouvement du piston.

Pour que le travail transmis, dans cette circonstance, soit égal à celui développé, il faut que le produit des efforts différents par leurs vitesses respectives soient égaux, c'est-à-dire que l'on trouve

$$\mathrm{P}v = p\mathrm{V}$$

Or, si nous considérons le temps infiniment court pendant lequel les forces $ab$ ou P, et $db$ ou $p$, agissent à chaque point de la rotation qui pourrait être choisi tel que celui $b$, on reconnaît que les vitesses $v$ et V suivant lesquelles leurs actions s'exercent ont pour rapport :

$$\frac{fb}{db}\text{ ; soit : }\frac{v}{\mathrm{V}}$$

Mais à cause de la similitude des triangles $adb$ et $dfb$, ce rapport peut être remplacé par celui-ci :

$$\frac{db}{ab}\text{ ; soit : }\frac{p}{\mathrm{P}}$$

Par conséquent, ces deux rapports égaux fournissent l'équation suivante :

$$\frac{v}{\mathrm{V}} = \frac{p}{\mathrm{P}}\text{ d'où : }\mathrm{P}v = p\mathrm{V},$$

propriété qu'il fallait démontrer et qui se résume ainsi :

*A chaque moment de l'action de la bielle sur la manivelle, le produit de la pression constante sur le piston par sa vitesse relative, parallèle à l'axe a' o, est égal au produit de la pression sur le bouton de la manivelle, suivant la composante tangentielle, par sa vitesse dans cette même direction, d'où les deux quantités de travail sont égales entre elles,* ET LA TRANSFORMATION DE MOUVEMENT N'EN ABSORBE AUCUNE PARTIE POUR ELLE-MÊME.

L'égalité entre le travail développé sur le piston et celui transmis au bouton de la manivelle peut être démontrée très-clairement au moyen de la méthode suivante :

Une quantité de travail étant mesurée par l'aire d'une figure plane, dont les côtés correspondent à l'effort exercé et au chemin parcouru (70), celle qui correspond à un coup simple du piston, l'effort de la vapeur supposé constant, ou estimé tel par une moyenne, peut être représentée par la surface d'un rectangle ayant la course du piston pour base, et pour hauteur une grandeur proportionnelle à l'effort constant qui s'y exerce.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

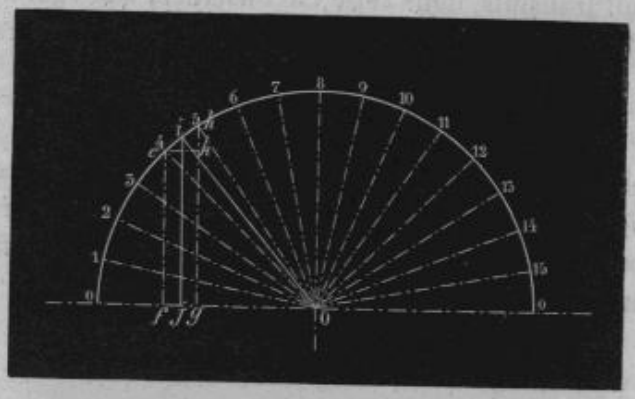
Soit donc un rectangle $abcd$, dont la base $ab$ est égale à la course du piston ou $2r$, ($r$ étant le rayon de la manivelle) et la hauteur $ad$, proportionnelle à l'effort constant que nous représentons encore par la valeur de $r$;

La superficie de ce rectangle, qui est aussi l'expression du travail total, égale :

$$ad \times ab; \text{ ou } r \times 2r = 2r^2$$

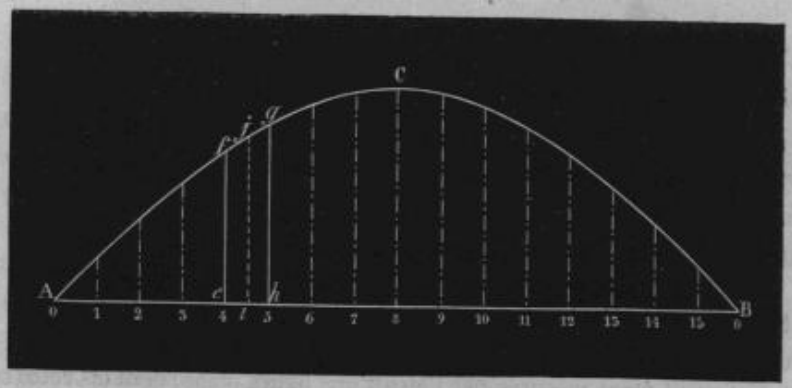
En vertu du même principe, la quantité de travail transmise directement au bouton de la manivelle, pendant un coup simple, ou pour un demi-tour de l'arbre, peut être représentée par l'aire d'une figure ayant pour base, ou ligne des absisses, le chemin parcouru par le bouton, et pour limite de hauteur une courbe déterminée par des ordonnées proportionnelles aux efforts variables qui s'exercent contre ce bouton.

Fig. 53.



Soit, fig. 53, la moitié du cercle décrit du centre O par la manivelle dont le rayon est $r$; ce cercle étant divisé en un certain nombre de parties égales qui représentent des positions successives de la manivelle, il est clair que le chemin parcouru, c'est le développement de la demi-circonférence, et l'effort variable, les valeurs successives des sinus des angles correspondant aux points de division, comme nous venons de le démontrer plus haut.

Fig. 54.



Par conséquent, prenant ce développement que l'on reporte en AB, fig. 54, et divisant cette longueur en autant de parties que la demi-circonférence, on élève ensuite par les points de division des perpendiculaires que l'on fait respectivement égales aux sinus des angles correspondants sur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

le cercle, fig. 53. L'extrémité de ces perpendiculaires détermine alors une courbe ACB qui limite la figure dont la superficie sera la mesure de la quantité de travail transmise au bouton de la manivelle.

Pour évaluer cette superficie, on remarquera qu'elle est formée de la somme de tous les trapèzes élémentaires comme celui $efgh$, dont les côtés peuvent être assez rapprochés pour que la partie de la courbe correspondante se confonde avec une ligne droite, et qui a pour mesure le produit de sa base $eh$ par la demi-somme des hauteurs $ef$ et $gh$, ou par la hauteur moyenne $ij$, c'est-à-dire :

$$eh \times ij.$$

Si l'on considère le même élément du travail sur la fig. 53, on voit que les facteurs de ce produit sont l'arc $eh$ rectifié et la demi-somme des sinus $ef$ et $gh$ ou celui $ij$; mais en traçant la perpendiculaire $ek$ et en menant le rayon $i$O, on détermine deux triangles $ekh$ et $ij$O qui sont semblables : ils permettent donc d'établir les rapports égaux ci-dessous :

$$\frac{eh}{ek} = \frac{i\,O}{ij}; \text{ d'où : } eh \times ij = i\,O \times ek.$$

Or, $eh \times ij$ étant la valeur ci-dessus de la superficie du trapèze $efgh$, cette dernière relation nous démontre que la même superficie est aussi égale au produit du rayon $i$O, ou $r$, par la projection $ek$ ou $fg$ de l'arc $eh$ sur le diamètre ; par conséquent, la superficie totale de tous les trapèzes sera le produit du rayon, facteur commun, par la projection de la demi-circonférence, c'est-à-dire le diamètre, ou $2r$; soit :

$$r \times 2r = 2r^2,$$

même valeur que celle ci-dessus du rectangle $abcd$.

Mais la superficie totale de tous les trapèzes, c'est celle même de la figure ACB qui mesure le travail transmis au bouton de la manivelle :

Donc, cette superficie étant égale à celle du rectangle, les quantités de travail développées et transmises, que ces deux figures mesurent respectivement, sont aussi égales.

Le problème, considéré dans son ensemble, aurait du reste conduit à cette première condition, que le piston accomplissant une course rectiligne pendant que la manivelle décrit un demi-cercle dont cette course est le diamètre, l'effort moyen transmis par le bouton de la manivelle est inférieur à l'effort direct de la vapeur contre le piston. L'égalité du travail dans les deux cas nous permet d'en conclure alors que ces efforts sont entre eux inversement proportionnels aux chemins parcourus, c'est-à-dire comme 2 : 3,1416, moitié du rapport du diamètre à la circonférence.

Ainsi, supposons que dans la machine décrite la pression constante sur le piston soit égale à 4770 kil., ce qui correspond à une pression effective de 3 atmosphères, l'effort transmis par le bouton de la manivelle sera égal à :

$$4770 \times \frac{2}{3,1416} = 3036 \text{ kilogrammes.}$$

Autrement dit, ce serait le poids élevé à la circonférence d'un tambour d'un rayon qui est égal à celui de la manivelle, et faisant équilibre, théoriquement, comme



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

résistance à la puissance totale développée sur le piston. S'il n'existait pas de volant, la vitesse de la manivelle serait évidemment irrégulière comme les efforts; mais nous avons dit que la masse du volant ne permettant pas de changements de vitesses sensibles, la moyenne supposée s'établit réellement; et dans une machine en bon état de marche, le bouton de la manivelle transmet des efforts sensiblement constants dans toute sa course. Seulement, ces efforts changent de direction, car tantôt c'est la machine qui le commande et tantôt c'est le volant.

A chaque point mort, par exemple, la vitesse composante du piston étant nulle, c'est le volant qui tire la bielle par le bouton de la manivelle. Mais, au milieu de la course, cette composante est à son maximum et supérieure, par conséquent, à celle moyenne du bouton : c'est alors la bielle qui pousse le bouton et le volant dont la vitesse est inférieure à celle que le bouton tendrait à prendre s'il était libre.

Un examen de la question plus approfondi que nous ne pouvons le faire ici permet de reconnaître que l'obliquité des mouvements de la bielle, dont la longueur est nécessairement définie, contrairement à ce que nous avons supposé, n'a pas d'influence théoriquement sur l'égalité entre le travail développé sur le piston et celui transmis par la manivelle. Mais nous savons que, pratiquement, c'est autre chose, et que le défaut de longueur de la bielle est principalement caractérisé par le partage inégal de la circonférence de la manivelle par rapport aux deux moitiés de la course du piston. Plus cette inégalité est sensible et plus il est difficile de régulariser la vitesse, puisque les quantités de travail seront reparties très-inégalement par rapport à la circonférence.

Envisagé sous son point de vue tout pratique, on peut dire que l'on restera dans de bonnes conditions lorsque la différence des deux moitiés de la course circulaire, par rapport aux deux moitiés égales d'un coup de piston, se maintiendra près de 1/18 sans atteindre 1/9, c'est-à-dire que la manivelle formera un angle d'environ 5 degrés avec la verticale quand le piston est au milieu de sa course, sans que cet angle atteigne jamais 10 degrés; ou encore que la bielle aura, dans cette position, une inclinaison d'environ 10 degrés par rapport à l'axe, et, en général, moins de 20 degrés.

En effet, le calcul indique que dans la première condition la longueur de la bielle doit être 5,72 fois le rayon de la manivelle, et dans la seconde 2,88, rapport qui n'est jamais adopté sans inconvénient.

Le rapport ordinaire que l'on choisit est généralement, comme nous l'avons déjà dit, 4 à 5 fois le rayon de la manivelle; mais lorsque les circonstances le permettent, il est bon d'en adopter un plus grand, ce qui a lieu surtout pour les machines à balancier comme on le verra plus loin.

Décomposition des efforts par l'obliquité de la bielle. — Si l'obliquité de la bielle est sans effet, quant à la quantité de travail transmise, elle agit au contraire avec une certaine intensité sur les différentes pièces du mécanisme qui ont à résister à des efforts dus à la décomposition de l'effort total.

Les parties du mécanisme qui supportent particulièrement un effort de ce genre, sont les glissières N et N′ de chaque côté du bâti (fig. 1re, pl. 9); et, ce qui est remarquable, l'une ou l'autre exclusivement, suivant le sens de la rotation de l'arbre moteur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Soit, fig. 5, le piston dans la position 4, par exemple, et la bielle et la manivelle dans leur position relative dans la période du mouvement où elles sont situées au-dessus de l'axe général, l'arbre tournant dans le sens indiqué par la flèche. Si l'on représente par $hk$ la grandeur de l'effort total suivant lequel la tige du piston agit en poussant sur l'extrémité de la bielle, la construction du parallélogramme $hijk$ montre que l'effort $hk$ détermine de la part de la bielle une résistance en sens contraire mesurée par le côté $kj$, et que ces deux forces ont nécessairement une résultante dirigée de haut en bas qui est $ik$.

Par conséquent si l'assemblage de la tige et de la bielle n'était point rigidement guidé et soutenu, il est clair que cet assemblage tendrait à se déplacer dans la direction de $ik$ : la tige et la bielle tendraient à augmenter l'angle qu'elles forment actuellement. Les glissières retenant au contraire la traverse D sur l'axe horizontal AB, elles s'opposent à ce déplacement, mais en supportant alors l'effort suivant lequel il est sollicité, c'est-à-dire que celle inférieure éprouve une pression proportionnelle à $ik$, ou plutôt à la perpendiculaire $pk$.

Or, si nous reprenons la même position du piston, mais dans la période de son retour, la bielle et la manivelle au-dessous de l'axe, les mêmes efforts se produiront, tels que le parallélogramme $hkj'i'$ les indique. Mais cette fois, ils agissent dans des directions inverses, ce qui fait que la tige du piston et la bielle tendent à se redresser : donc c'est encore la glissière inférieure qui s'oppose à cet effet, et pour qu'il en fût autrement, il faudrait que la machine tournât en sens inverse, chose dont il est aisé de se convaincre par le tracé qu'il suffit de retourner sens dessus-dessous pour s'en rendre compte.

Ainsi, pour une machine dont la marche est invariable les seules glissières inférieures suffiraient : on en a construit, en effet, dans cette disposition.

Maintenant, il est visible que l'intensité de cet effort dépend de l'angle formé par la bielle et l'axe AB, d'où il sera d'autant plus considérable que le rapport entre la bielle et la manivelle sera plus petit, d'après ce que l'on a vu ci-dessus.

Le tracé montre que la valeur maximum de cette pression sur la glissière, qui correspond au moment où le piston est au milieu de sa course, est sensiblement proportionnelle au sinus de l'angle formé par la bielle avec l'axe AB. D'après le rapport adopté dans notre exemple entre la bielle et la manivelle, cet angle équivaut environ à 10° 1/2 ; en supposant, comme ci-dessus, la pression totale P égale à 4770 kil. Celle totale sur les deux glissières inférieures devient :

$$P \times \text{Sin. } 10° 1/2 = 4770 \times 0{,}182 = 868 \text{ kil.},$$

soit 434 kilogrammes pour chacune des deux glissières inférieures. Cette pression, déjà considérable, deviendrait encore plus forte si la bielle était plus courte ; non-seulement il en résulte un frottement qui absorbe de la puissance, mais si le plan des glissières n'est pas très-exactement en rapport avec l'axe du mouvement, la tige du piston ressent une partie de l'effet de la décomposition des efforts et tend à se fausser, en ovalisant aussi, par l'usure, la garniture qu'elle traverse.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Après les glissières, c'est la manivelle qui éprouve un effort longitudinal qu'elle transmet au palier qui guide l'arbre moteur.

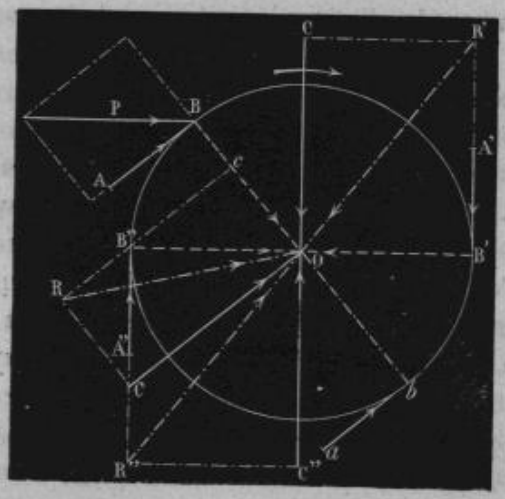
Cet effort est évidemment variable, et presque nul au milieu de la course dans lequel cas la pression totale est transmise perpendiculairement au rayon de la manivelle; il est au contraire dans toute son intensité aux deux points morts.

Cet effet est rendu sensible par la fig. 5 de la pl. 9, où l'on voit, par le parallélogramme $k'j''lo$, tracé dans la position 4 près du milieu de la course, que la composante représentant l'effort suivant le rayon de la manivelle et proportionnelle à $oj''$, tandis qu'elle devient $o'j^3$ dans la position 8, en approchant du point mort, $k'j''$ et $k''o'$ représentant l'effort transmis suivant l'axe de la bielle.

Mais le palier M', outre cette résistance dirigée dans le sens du rayon de la manivelle, supporte un effort d'une tout autre nature et dû à la puissance totale transmise, indépendamment des effets de la bielle. Nous allons en dire quelques mots.

Si nous admettons, pour l'instant, ce qui est vrai en raison de l'action du volant, que la manivelle transmet un effort fixe et constamment tangentiel, la résistance qu'elle surmonte est représentée par un effort égal agissant en sens contraire à l'extrémité opposée des diamètres successifs que la manivelle occupe.

Fig. 55.




Soit AB, fig. 55, cet effort constant qui agit à l'extrémité de la manivelle OB, dans le sens de la marche indiqué par la flèche; la résistance surmontée est égale, et représentée par $ab$ comme une force s'opposant à la marche à l'extrémité du même diamètre B$b$. Il en résulte que les coussinets du palier supportent en cet instant une pression égale à la somme des deux efforts ou au double de AB, pression représentée en grandeur et en direction par OC.

Mais puisque l'effort et la résistance restent constants sur tout le parcours de la circonférence, la pression sur les coussinets le sera également, et de plus, elle changera de direction à chaque instant et agira sur tous les points de la circonférence des coussinets pendant une révolution complète.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Voilà ce qui se produirait si la manivelle n'éprouvait pas d'effort longitudinal par l'effet de la bielle. Si l'on tient compte, au contraire, de cette circonstance, et que l'on représente par $Oc$ la valeur de l'effort décomposé suivant la manivelle (en adoptant, comme ci-dessus, le rayon OB pour représenter la grandeur proportionnelle de l'effort total P), on obtient, dans cette position la résultante OR qui devient la véritable grandeur et la direction exacte de la poussée sur les coussinets, laquelle était $Oc$ dans le premier cas.

En opérant de même aux deux points morts, pour lesquels la traction sur l'axe de la manivelle est à son maximum, on trouve les deux résultantes OR′ et OR″ qui représentent encore les pressions supportées par les coussinets du palier, et qui sont, comme on le voit, dirigées en sens contraire.

Pour être rigoureux, il faudrait dire que cette action maximum se produit près des points morts plutôt qu'exactement sur eux, attendu que la pression n'agit réellement avec toute son énergie sur le piston qu'un peu après son départ, et alors que l'orifice de distribution est suffisamment découvert.

L'enseignement que l'on tire de cette analyse, c'est que la décomposition du mouvement, suivant l'axe de la manivelle, n'augmente que légèrement la pression sur les coussinets, pression qui donne naissance à un frottement dont il faut, dans tous les cas, tenir compte.

Ensuite, si la machine est bien réglée et que son volant divise bien sa puissance autour de son axe moteur, il est remarquable que la pression sur les coussinets se déplace presque comme la manivelle, d'où leur circonférence intérieure éprouve des efforts sensiblement uniformes sur tous ses points.

Par conséquent, la disposition extérieure du palier peut être regardée comme assez indépendante de celle générale de la machine, et il semble peu important qu'il soit vertical, ou incliné comme l'ont proposé quelques constructeurs pour les machines horizontales. Mais il n'en est pas de même de la division des coussinets et de leurs moyens de serrage, détails d'exécution qui ont reçu des perfectionnements utiles que nous décrirons plus tard, avec les ensembles.

### MÉCANISME DES MACHINES A BALANCIER

Le système de transmission par balancier est, ainsi qu'on l'a vu par l'historique, le premier mode qui ait été adopté pour les moteurs à vapeur ; cela tient probablement à ce que les premières applications de machines ont été faites pour des élévations d'eau, dans lequel cas le mouvement du piston n'a pas besoin d'être transformé, mais simplement transmis aux pompes qui ont une marche rectiligne comme le piston à vapeur. Aujourd'hui même, lorsqu'il s'agit d'un emploi analogue, on adopte quelquefois encore la machine à balancier.

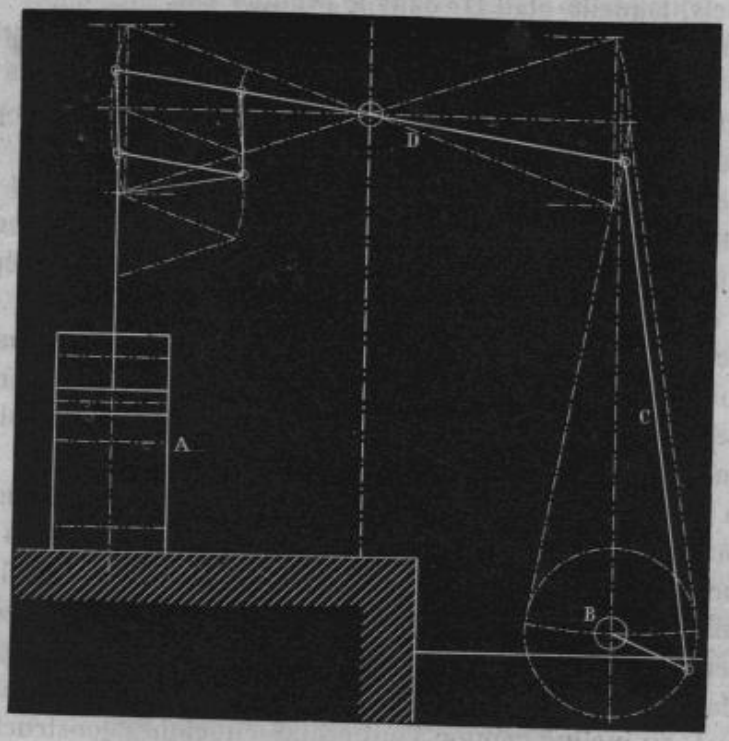
Ce système qui a l'inconvénient d'être plus dispendieux, est remplacé le plus souvent par les moteurs à mouvement direct de construction plus simple et plus économique; mais il possède aussi des qualités incontestables qui le font préférer dans certains cas, comme, par exemple, pour les filatures, les tissages mécaniques,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les moulins, etc., où une régularité très-grande est indispensable. Il devient surtout avantageux pour les machines à vapeur à deux cylindres, auxquelles la disposition du balancier se prête parfaitement.

La fig. 56 représente le tracé géométrique du mouvement des organes principaux d'une machine à balancier et à un seul cylindre.

Fig. 56.




En principe, c'est la machine verticale ordinaire composée de son cylindre A, de la bielle C et de l'arbre moteur B, excepté que le cylindre est séparé de son mécanisme par le balancier D qui transmet, sans les transformer mais en les renversant, les mouvements du piston à la bielle.

Les principes énoncés ci-dessus à l'égard des positions relatives du piston et de la manivelle, et de la décomposition des efforts, s'appliquent exactement au système à balancier, sauf quelques différences, que l'on peut regarder comme insignifiantes en pratique.

Le balancier D, comme on le verra plus loin, est une forte pièce en fonte, oscillant sur un point fixe ordinairement placé au milieu de sa longueur; ses extrémités décrivent donc deux arcs de cercle dont la corde est égale à la course du piston. Les bras du balancier peuvent être inégaux; mais alors la course du piston et le diamètre du cercle décrit par la manivelle subissent la même influence, puisqu'ils sont respectivement égaux à la corde de l'arc de cercle correspondant.

Pour que la déviation due à ces arcs soit moins sensible, les axes verticaux du cylindre et de l'arbre moteur sont placés sur le milieu de leurs flèches, et de plus la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

liaison entre la tige du piston et l'extrémité du balancier est opérée par l'intermédiaire d'un mécanisme très-ingénieux, que l'on appelle *parallélogramme*, qui a pour objet de maintenir la tige du piston sur l'axe du cylindre, en neutralisant l'effet de l'arc de cercle engendré par l'extrémité du balancier.

Ce mécanisme qui sera décrit plus tard avec tous les détails nécessaires à sa construction, a été inventé par Watt, comme on l'a vu par l'historique, et porte son nom.

La bielle étant reliée au balancier sans intermédiaire, il en résulte que son extrémité supérieure accomplit le même arc de cercle, tandis qu'elle suit une ligne droite dans la machine à mouvement direct; cette différence ne modifie pas, pratiquement, le mode d'action sur la manivelle et ne peut être l'objet, quant à présent, d'aucune remarque importante.

La condition principale à remplir pour le mécanisme de ce système de machine, c'est de donner au balancier une longueur suffisante pour que l'angle qu'il décrit soit le plus faible possible, dans les limites de la pratique, et diminue par cela même l'influence que peut avoir la flèche des arcs de cercle sur la décomposition du mouvement.

Cette longueur devrait être, théoriquement, infinie comme celle de la bielle.

En pratique on donne généralement au balancier une longueur égale à environ 3 fois la course du piston ou 6 fois le rayon de la manivelle, et quoique ce rapport soit sensiblement moindre dans les machines américaines, il semblerait plutôt devoir être augmenté que jamais diminué.

En adoptant un tel rapport, l'angle total décrit par le balancier est égal à environ 38° 20′, et la flèche des arcs est les 0,075 de la course.

C'est une limite pratique qu'il est convenable de ne pas dépasser, et qu'il vaudrait même mieux ne pas atteindre, en augmentant la longueur du balancier quand cela est possible.

Ajoutons qu'une grande longueur est surtout indispensable pour l'effet du parallélogramme; nous aurons l'occasion de faire remarquer que le rapport 1 : 3 est même insuffisant pour les machines à deux cylindres.

Les machines à balancier ne se prêtent pas aux grandes vitesses de rotation que l'on atteint aujourd'hui avec les machines à mouvement direct qui peuvent être réglées, même dans de bonnes conditions, sur 90 à 100 coups doubles par minute, et quelquefois plus.

La vitesse des premières ne dépasse guère 40 tours, ce qui est presque un maximum : la plus usuelle est 20 à 25; dans les grandes puissances, elle n'est même que 16 à 18.

Une marche *grave* convient mieux à ces machines. On comprend qu'une pièce comme le balancier, qui est toujours relativement très-pesante, ne peut pas être soumise à un mouvement oscillatoire trop rapide, sous peine d'éprouver des ébranlements et même des ruptures, accidents presque inévitables lorsqu'on fait subir des changements brusques de direction à une forte masse en mouvement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

### MÉCANISME DES MACHINES CONJUGUÉES

On dit que deux ou plusieurs machines à vapeur sont *conjuguées, accouplées* ou *connexées*, lorsque leurs manivelles appartiennent à un arbre commun qu'elles actionnent ensemble. Les exemples les plus fréquents de ces moteurs sont les locomotives et les appareils de navigation; mais aujourd'hui on adopte très-volontiers dans les grandes usines, surtout pour des puissances de 50 chevaux et plus, deux machines accouplées qui donnent un degré de régularité très-remarquable.

Pour se rendre compte de la répartition des efforts sur un axe qui reçoit simultanément l'action de deux machines accouplées, nous distinguons trois différents modes de positions relatives d'accouplement, savoir :

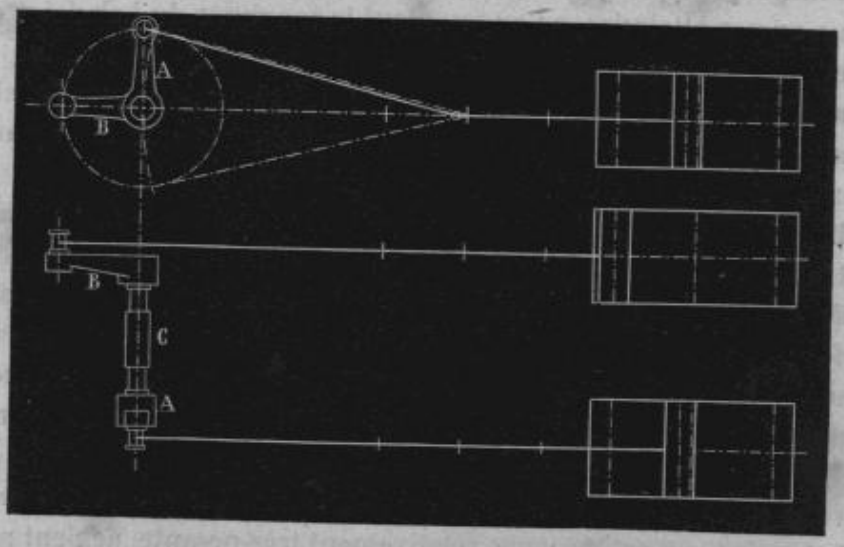
1° Les axes des deux cylindres étant parallèles entre eux ;

2° Les axes des cylindres formant un certain angle qui a le centre de l'arbre pour sommet ;

3° Les cylindres placés bout à bout sur un même axe et agissant sur une manivelle unique.

*Premier cas.* CYLINDRES PARALLÈLES. — Deux cylindres à vapeur agissant parallèlement sur un même axe et sur des manivelles distinctes, peuvent être disposés à côté l'un de l'autre, comme dans les locomotives, ou vis-à-vis l'un de l'autre, ainsi que cela se présente dans quelques machines de navigation à hélice. Dans la première de ces dispositions la marche des pistons est symétrique, et opposée dans la seconde; mais l'effet est le même si les manivelles forment entre elles le même angle.

Fig. 57.




Soit, fig. 57, le tracé géométrique, en élévation et en plan, du mouvement de deux machines agissant ainsi simultanément sur un même arbre C, et par deux manivelles distinctes A et B qui sont rapportées à ses extrémités.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si ces manivelles étaient placées parallèlement l'une à l'autre, sur le même rayon, ou diamétralement opposées, il est évident que l'on pourrait considérer l'appareil comme une machine simple, rien ne serait changé dans la répartition des efforts autour de la circonférence décrite, si ce n'est que ces efforts représenteraient évidemment la somme des deux puissances; seulement, dans un cas, les pistons marcheraient dans le même sens, et dans l'autre ils auraient une marche réciproquement inverse.

Mais le but à atteindre en accouplant deux machines est une plus grande régularité, une répartition plus égale des efforts pendant une rotation de l'arbre et la neutralisation des points morts.

C'est, en effet, ce que l'on obtient en plaçant les deux manivelles perpendiculaires l'une à l'autre, ou, autrement dit, *en les callant à angle droit sur l'axe commun.*

Il est évident, d'après cela, que si l'un des deux pistons se trouve à l'un des points morts, et nul d'action par conséquent, l'autre est, au contraire, au milieu de sa course et en pleine activité. Deux machines ainsi conjuguées pourraient presque se passer de volant, au moins pour se mouvoir purement et simplement; mais cet organe est toujours indispensable dans les machines fixes, pour obtenir la régularité parfaite de la vitesse, ce qui ne pourrait d'ailleurs être obtenu à cause d'un restant d'inégalité dans les efforts, et dont nous allons dire quelques mots.

En examinant les positions successives occupées simultanément par les deux manivelles, on reconnaît d'abord que chaque fois que l'une d'elles passe au point mort, l'effort total à la circonférence est dû à l'autre manivelle, et qu'il est égal à son maximum P, pour lequel nous prenons une grandeur proportionnelle au rayon $r$, en conservant la même notation que ci-dessus. Ensuite on peut remarquer que cette position se répète quatre fois pendant un tour complet de l'arbre.

Or, si l'on veut connaître la valeur des efforts différents entre ces quatre positions symétriques et égales, il suffira de se rappeler que l'effort transmis à l'une des deux manivelles est proportionnel au sinus de l'angle aigu qu'elle forme avec la direction de l'effort total P, ce dernier représenté en grandeur par $r$, et la bielle infinie.

Par conséquent, la somme des efforts sur les deux manivelles sera à son maximum quand celle des sinus ou de leurs angles aigus sera aussi la plus grande, condition qui correspond au moment où ils sont égaux; or, les angles aigus égaux que les deux manivelles puissent former avec l'axe du mouvement sont ceux de 45°, puis qu'elles sont à 90°; d'où il résulte que :

*Entre les points morts, le maximum d'effort total, transmis au moyen de deux manivelles à angle droit, est obtenu lorsque ces manivelles sont placées à 45 degrés par rapport à l'axe du mouvement.*

Mais ceci nous permet encore de dire que cette position, qui se répète aussi quatre fois dans un tour, correspond à l'effort maximum absolu; car si P, ou $r$, représente l'effort total quand l'une des manivelles est à l'un des points morts, et que $r$ égale 1, l'effort maximum $r'$ intermédiaire ci-dessus sera représenté par :

$$r' = 2 \sin 45^\circ ; \text{ d'où } r' = \sqrt{2} = 1,4142.$$



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Par conséquent, nous pouvons résumer ce qui précède ainsi :

1° Pendant la durée d'un tour de l'arbre, commandé par deux manivelles qui transmettent chacune une même puissance totale, les efforts tangentiels présentent des inégalités divisées symétriquement suivant 4 minima égaux et 4 maxima aussi égaux ;

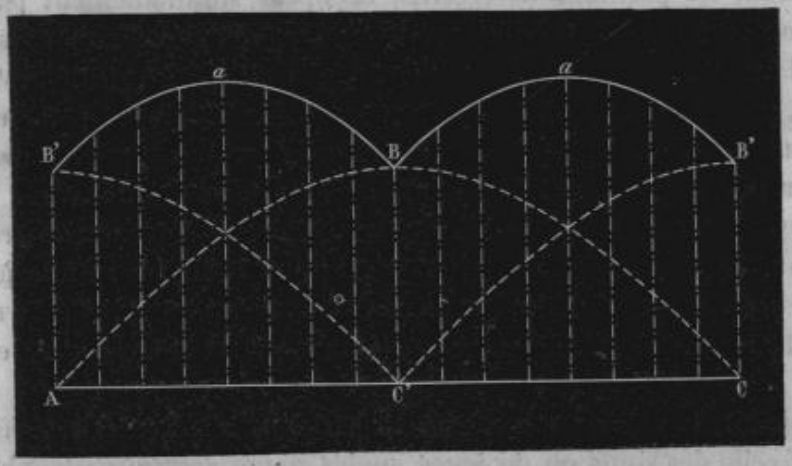
2° Le rapport entre un minimum et un maximum est 1 : 1,4142 ; la variation s'opère théoriquement pendant un parcours de 45°.

(Il ne faut pas oublier que la bielle est supposée infinie, et que son obliquité réelle modifie les valeurs trouvées par les raisonnements qui précèdent, mais de quantités assez faibles, si la bielle est suffisamment longue, pour que le principe puisse en être pratiquement conservé.)

Il peut être intéressant d'indiquer ici comment on peut rendre graphiquement la répartition du travail de deux ou plusieurs machines accouplées, et par suite rendre sensible la variation qui en résulte.

On a vu précédemment, fig. 54, la représentation graphique du travail d'une seule machine : en adoptant le même principe pour les deux marchant à angle droit, nous obtenons la fig. 58 ci-dessous.

Fig. 58.




ABC représentant le travail d'une manivelle, celui de la deuxième serait indiqué par les courbes ponctuées B′ C′, les points de départ étant naturellement croisés.

En reportant les ordonnées de ces courbes au-dessus de celle ABC, on obtient, en définitive, la courbe B′ $a$ B $a$ B′, qui exprime exactement la variation cherchée de l'effort tangentiel total.

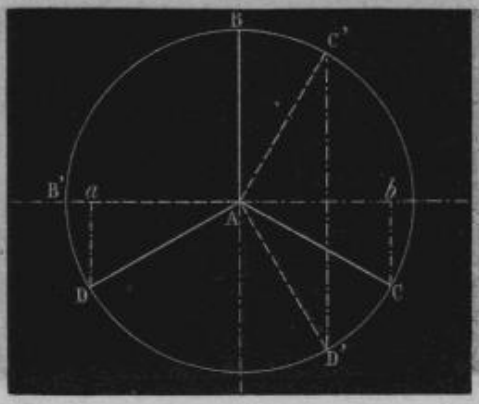
Si on procède de la même manière avec un système à trois cylindres et à trois manivelles connexées, disposées suivant les rayons concourant aux angles d'un triangle équilatéral inscrit, on trouve six maxima et six minima dans un tour complet. Chaque maximum correspond au passage d'une manivelle au milieu de la distance des points morts. La valeur de cet effort maximum est 2 $r$.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'effort minimum se manifeste lorsque l'une des manivelles passe à l'un des points morts; sa valeur égale 2 sin 60°.

En effet, soit, fig. 59, le cercle engendré par les trois manivelles AB, AC et AD, qui le partagent en trois parties égales; si l'on choisit la position où l'une d'elles AB

Fig. 59.




est au milieu de la course, l'effort qu'elle transmet est égal à $r$, tandis que les efforts égaux transmis par les deux autres AD et AC sont égaux chacun à sin 30°.

On a donc, pour l'effort total transmis dans cette position par les trois manivelles :

$$r + 2 \sin 30° = 2\,r.$$

Si l'une des manivelles est au point mort, en AB′, par exemple, les deux autres occupent relativement les positions symétriques AD′, AC′. L'effort transmis par la première AB′ est évidemment nul, et les efforts correspondants aux deux autres sont proportionnels chacun à sin 60°.

L'effort total égale, par conséquent, dans cette deuxième position :

$$2 \sin 60° = 0{,}866 \times 2 = 1{,}732.$$

Ainsi, cette deuxième valeur est moindre que la première, et le rapport entre ces efforts maximum et minimum est égal, en résumé, à :

$$2 : 1{,}732.$$

La variation a 30° d'étendue, qui est l'espace parcouru par les trois manivelles pour passer d'une position à l'autre, c'est-à-dire, par exemple, pour que leur ensemble se déplace de façon que l'une d'elles, soit celle AB, passe de AB en AC′.

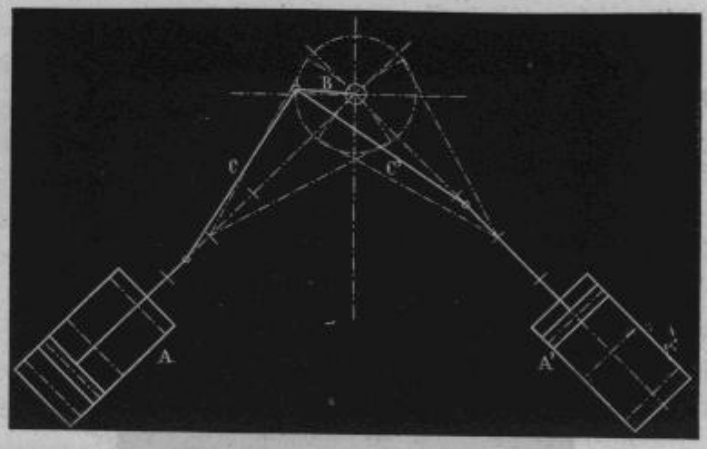
*Deuxième cas.* Cylindres inclinés. — On construit des machines composées de deux systèmes complets actionnant simultanément un même arbre et dont les cylindres forment entre eux un certain angle, comme le montre la fig. 60.

Cette application a été faite, nous le croyons, pour la première fois, sur des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

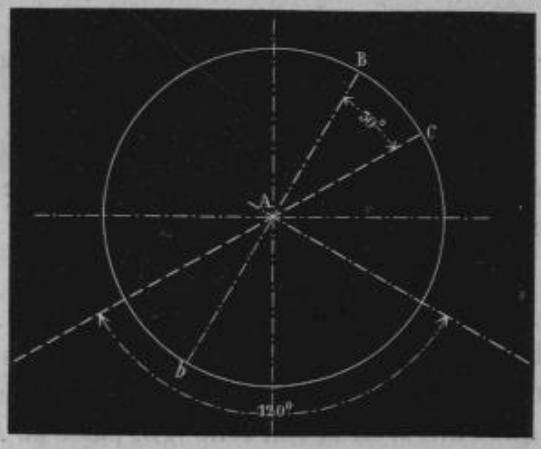
appareils de navigation, et plus tard à des machines fixes. Aux ateliers du chemin de fer de Lyon, à Paris, on en voit un très-beau spécimen conçu et exécuté sous la direction de l'habile ingénieur, M. Delpech.

Fig. 60.




Si on admet pour première condition que l'angle entre les deux lignes d'axe ou les directions des deux cylindres soit de 90 degrés, pour obtenir l'uniforme répartition des efforts (comme précédemment, fig. 57), il faudra que l'accouplement des deux machines se fasse sur une seule manivelle, ou bien sur deux différentes, si les circonstances l'exigent, mais toutes deux dans la même position. Il est évident qu'alors les directions propres de ces deux cylindres remplacent la combinaison des manivelles distinctes du premier exemple.

Fig. 61.




Si les cylindres forment entre eux un angle autre que l'angle droit, comme sur la fig. 61, on déterminera les positions relatives des manivelles en supposant l'une d'elles au point mort et l'autre perpendiculaire à la direction de son cylindre.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'angle qu'elles formeront entre elles sera le complément négatif de celui des cylindres.

Ainsi, par exemple, supposons que les axes des cylindres forment entre eux un angle de 120 degrés, les deux manivelles AB et AC seront calées à 120 — 90 = 30°.

Le même résultat sera obtenu en plaçant l'une d'elles diamétralement opposée, en A*b*.

Elles formeraient alors un angle de 180 — 30 = 150 degrés.

Dans les deux cas, la répartition des efforts serait la même que pour deux cylindres parallèles avec les manivelles placées à angle droit.

*Troisième cas.* Cylindres bout a bout. — Il peut arriver que deux cylindres soient placés bout à bout, sur un axe commun, et actionnant un même arbre.

Dans ce cas, la construction obligeant à assembler les deux bielles sur un bouton unique, il n'y a pas conjugaison ; les efforts se manifestent simplement comme pour une seule machine d'une puissance double. Cette disposition se présente parfois dans des machines horizontales, et en particulier dans les appareils actionnant des pompes ou des souffleries.

## MÉCANISME DES MACHINES OSCILLANTES

Les machines à vapeur ainsi désignées ont pour principe la suppression de la bielle dans la transformation du mouvement, laquelle pièce est remplacée par le mouvement d'oscillation donné à l'ensemble du cylindre et de sa tige. A part cette particularité, on pourra leur appliquer, sans réserves importantes, toutes les lois précédentes relatives soit aux vitesses du piston et de la manivelle, soit à la répartition des efforts dans chacun des cas proposés.

On attribue généralement, en France, l'invention des machines oscillantes à M. Cavé, mécanicien ingénieux et célèbre, à qui l'on doit en partie la construction de nos premiers appareils importants appliqués à la navigation, et des perfectionnements notables dans une foule d'objets mécaniques.

On distingue deux systèmes principaux dans les machines oscillantes :

1° Les machines dont le centre d'oscillation est situé en dehors du cylindre, soit en dessous, soit en dessus.

2° Les machines dans lesquelles ce centre même correspond au milieu de la course du piston ou près de ce point.

Premier système. — La fig. 62 représente le tracé géométrique d'une machine oscillante dont le point d'appui ou le centre d'oscillation est situé en dehors de la course du piston.

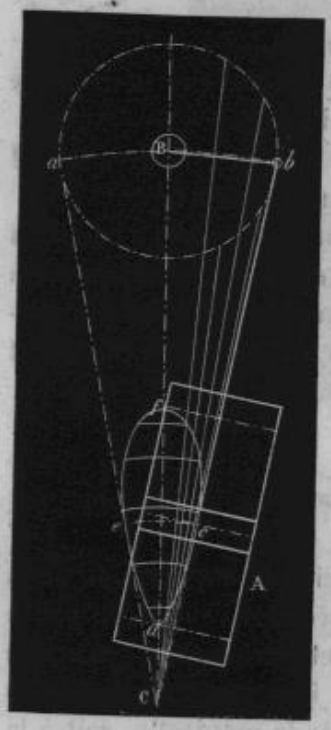
On voit que ce système consiste à fixer le cylindre A en un point de rotation fixe C, sur l'axe du mouvement, et d'après lequel il peut décrire un arc de cercle d'une certaine étendue. La tige du piston est alors reliée, sans intermédiaire, avec la manivelle, de telle façon qu'en se déplaçant dans le cylindre et en suivant le

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cercle décrit par le bouton de la manivelle, la ligne d'axe se déplace angulairement d'après le point C, comme centre, en entraînant le cylindre, qui oscille, par conséquent, et vient occuper toutes les positions comprises entre celles extrêmes C*a* et C*b*.

Pour définir cette fonction, en la comparant à celle des machines à bielle, on peut dire que dans celle-ci l'axe C*b* représente une véritable bielle qui se rallonge ou se raccourcit suivant les positions différentes de la manivelle sur le cercle qu'elle décrit; mais dans tous les cas la plus petite longueur de cette bielle ne peut être moindre que quatre fois le rayon de la manivelle ou de deux fois la course du piston.

Fig. 62.




Si l'on veut alors examiner avec soin la relation entre les positions du piston et de la manivelle, on remarque que cette relation se détermine facilement au moyen de la tige du piston dont la longueur, mesurée du milieu de l'épaisseur de ce dernier au centre du bouton de la manivelle, est invariable.

Ainsi, en divisant le cercle décrit par la manivelle en un certain nombre de parties égales, on joint ces points par des lignes avec le centre C d'oscillation, et des mêmes points de division on porte sur chacune des lignes angulaires la longueur géométrique *bc* de la tige du piston; traçant ensuite, par les points obtenus, des arcs de cercle, du point C comme centre, les intersections de ces arcs avec l'axe CB déterminent, en les rapportant à cet axe, les positions relatives du piston et de la manivelle.

Si l'on réunit les mêmes points par une ligne continue, il en résulte une courbe fermée *cdef* qui représente le lieu géométrique de la marche du piston pendant un tour complet de la manivelle, avec la combinaison du mouvement oscillatoire.

Ce tracé nous montre, en résumé, que cette marche suit bien la même loi que dans les machines à cylindre fixe. La même inégalité persiste entre les deux moitiés de la course du piston et celles de la manivelle.

Deuxième système. — Les machines oscillantes, disposées comme il vient d'être dit, ont l'inconvénient grave que, dans les deux positions moyennes, la masse entière de la machine se trouve reportée en dehors du centre de gravité, ce qui donne lieu à des perturbations dans la marche, par ces ruptures d'équilibre fréquemment répétées. S'il n'en résulte pas de pertes réelles de travail, attendu que ce qui s'en trouve dépensé en passant de l'une des positions obliques extrêmes à l'axe vertical est récupéré dans le mouvement inverse, il n'en est pas moins vrai que les pièces en mouvement en ressentent des efforts additionnels qui les usent et absorbent de la puissance par le frottement.

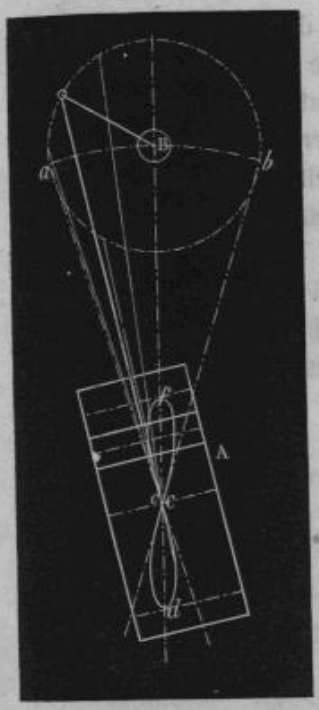
Ces motifs, et de certaines difficultés d'ajustement, ont fait que ce système, qui, d'ailleurs, n'a guère été appliqué que sur des machines de faible puissance, est à

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

peu près complétement rejeté aujourd'hui. Mais on emploie volontiers, même pour des puissances considérables, les machines oscillantes dont le centre du mouvement est situé près du milieu de la hauteur du cylindre et se confond sensiblement avec le centre de gravité de la masse en mouvement. Tel est particulièrement le système proposé, il y a plus de quarante ans, par M. Cavé, qui a exécuté un grand nombre de machines de ce genre sur toutes les dimensions.

La fig. 63 représente le tracé géométrique d'une machine de ce système.

Fig. 63.




Le centre C d'oscillation coïncide avec la position milieu du piston, ce qui est le plus généralement adopté, quoiqu'on puisse chercher à le placer sur le centre de gravité moyen du cylindre, du piston et de la manivelle, en tenant compte du déplacement de ces organes.

D'après cette disposition, le tracé géométrique effectué comme précédemment donne, pour le déplacement du piston, une courbe *cdCf* ayant la forme régulière d'un 8 dont les boucles sont d'autant plus aplaties que le rapport entre le rayon de la manivelle et la distance du centre de l'arbre à celui d'oscillation du cylindre est plus considérable.

Dans le cas où le centre d'oscillation et la position milieu du piston ne coïncideraient pas, on obtiendrait encore une courbe de même forme, mais l'une des deux boucles du 8 serait un peu plus fermée que l'autre.

A la seule inspection du tracé, on voit que ce système permet de réduire notablement la hauteur de la machine, puisqu'on gagne la longueur totale d'une bielle. Pour avoir une idée du résultat, on peut remarquer qu'une machine à mouvement direct, comme celle représentée pl. 9, possède une longueur totale égale à environ 11 fois la manivelle, d'où il résulte que celle actuelle, fig. 63, n'aurait comme plus grande étendue que 6 fois, approximativement, la longueur de la manivelle.

Cette disposition de machine oscillante, sans présenter les mêmes avantages que les machines à cylindre fixe, a trouvé néanmoins des applications nombreuses, et particulièrement pour la navigation à vapeur. Ainsi, on sait qu'en Angleterre, MM. Maudsley et Penn ont exécuté de puissantes machines oscillantes accouplées, pour des steamers marchant à l'aide de roues à palettes. MM. Nillus et Mazeline frères, du Havre, ont également construit, pour notre marine côtière et pour la marine de l'État, des machines semblables qui font l'admiration des connaisseurs par la régularité de leur marche et la perfection des détails d'exécution.

Remarquons que la position du centre d'oscillation à l'intérieur de la course a permis de construire de ces machines marchant horizontalement, ce qui n'était point praticable dans le premier cas. Tel est le modèle présenté à l'Exposition universelle de 1855 par M. Fauconnier.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## RÉSUMÉ DES PRINCIPES GÉNÉRAUX

L'ensemble des études contenues dans ce chapitre est relatif aux bases fondamentales de l'établissement des moteurs à vapeur, considérés sous le rapport des fonctions générales, des principes du calcul de leur puissance, des modes différents de dispositions et des circonstances particulières qui accompagnent la transformation de la marche du piston.

Il nous a paru utile, avant d'entrer dans de plus amples détails sur la construction de chacun des organes qui composent ces moteurs, de donner au moins une idée des divers systèmes proposés, en nous attachant surtout à ceux qui ont été le plus généralement adoptés dans la pratique, et sans nous arrêter à quelques genres particuliers qui n'ont qu'un médiocre intérêt ou qui ne diffèrent pas d'une manière sensible des autres, et qui, d'ailleurs, pour la plupart ont été à peu près complétement abandonnés.

Appuyé sur ces préliminaires qui ont mis nos lecteurs à même de reconnaître les fonctions des organes principaux, nous pouvons en faire maintenant une étude particulière, en commençant par la partie que nous regardons comme la plus essentielle : *le mécanisme du tiroir et de la distribution.*

FIN DU CHAPITRE PREMIER.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

# CHAPITRE II

## MÉCANISMES DE DISTRIBUTION

(PLANCHES 10, 11 ET 12)

Ce chapitre est consacré tout entier à l'étude détaillée des organes employés à la distribution de la vapeur dans les moteurs fondés sur cet agent physique, organes dont on a vu précédemment les fonctions principales. Il s'agit maintenant d'examiner avec soin les conditions exactes de leur établissement et les dispositions différentes qu'ils sont susceptibles de prendre dans la pratique.

Comme l'emploi de la vapeur présente deux modes différents et caractéristiques, c'est-à-dire l'admission avec ou sans détente, de même les appareils de distribution peuvent être classés en deux genres correspondants; cependant une même disposition doit, le plus souvent, satisfaire à cette double fonction; d'autre fois, la distribution ne peut produire que l'admission à pleine vapeur, ou opérer l'admission à un seul degré de détente, ou bien, enfin, permettre la détente à divers degrés et l'admission à pleine vapeur, *ad libitum*.

Nous établissons donc, pour les diverses distributions de vapeur en usage, les distinctions suivantes :

1° Admission à pleine vapeur sans aucune détente;
2° Admission avec détente fixe, c'est-à-dire à un seul degré;
3° Admission avec détente variable;
4° Admission à pleine vapeur ou avec détente, à volonté;
5° Dispositions qui ne peuvent produire que l'un des deux modes exclusivement.

Ce sont ces divers systèmes que nous allons décrire successivement avec détails, en montrant les particularités qu'ils renferment, les propriétés dont ils jouissent, et en faisant voir les mécanismes qui ont été imaginés et mis en pratique pour remplir les meilleures conditions.

Nous nous attacherons principalement à l'étude des tracés géométriques au moyen desquels on parvient à combiner les diverses parties d'une distribution et à en apprécier les effets, étude qui présente parfois des difficultés sérieuses lorsqu'on n'y est pas encore initié.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## DISTRIBUTIONS SANS DÉTENTE

### TIROIR SIMPLE COMMANDÉ PAR UN EXCENTRIQUE CIRCULAIRE

(FIG. 1, 2 ET 3, PL. 10)

Ainsi qu'on a pu le voir par la description de la machine type, pl. 9, lorsque la distribution de la vapeur dans le cylindre est opérée sans détente, c'est-à-dire que l'admission s'effectue sans interruption pendant la course entière du piston, on fait usage le plus généralement de la pièce appelée *le tiroir,* d'une construction extrêmement simple et qui est commandée par un excentrique circulaire, dont les effets sont absolument ceux d'une manivelle ordinaire.

Les fig. 1 et 2 de la pl. 10 représentent le tracé géométrique qui permet d'étudier les effets d'une pareille distribution, dans les conditions mêmes de celle appartenant à la machine représentée pl. 9.

La figure 1re représente, à l'échelle de 2/5, la table A sur laquelle glisse le tiroir et où viennent déboucher les trois canaux B, B′ et C, correspondant à l'intérieur du cylindre et au milieu d'échappement. Le tiroir s'y trouve figuré par un seul trait fort D E F E′ D′ suivant son profil en coupe longitudinale.

La fig. 2 représente, mais à l'échelle de 1/10, le cercle décrit par la manivelle motrice, mis en rapport avec la marche de l'excentrique, figurée par la circonférence tracée avec *le rayon d'excentricité* (p. 318).

CONDITIONS DE MARCHE ET DIMENSIONS DU TIROIR. — En énumérant les propriétés générales du tiroir simple, nous avons dit que sa longueur extérieure D D′ devait correspondre à la distance extrême des orifices B et B′, et que la largeur D E ou D′ E′ des bandes était celle de ces mêmes orifices. Ceci n'est exact qu'en théorie, attendu qu'il existe en pratique certaines conditions à remplir qui exigent des modifications que nous allons faire connaître.

Si nous prenons pour base cette donnée théorique, on sait que le piston se trouvant à l'une des extrémités de sa course, le tiroir est juste au milieu de la sienne, et ferme, par conséquent, les deux orifices : d'où il suit que l'admission et l'échappement sont complétement interrompus.

Or, si les bandes n'avaient que juste la largeur des orifices B et B′, on ne pourrait pas compter sur l'exactitude de ce résultat : l'absence de *recouvrement* pourrait faire qu'il y eût communication, pendant un court instant, entre l'intérieur de la boîte de distribution, qui est en libre rapport avec le générateur, et le vide intérieur du tiroir, qui est constamment en communication avec le milieu d'échappement par l'orifice C.

Cette première remarque conduit donc à donner aux bandes du tiroir un peu plus de largeur qu'aux orifices pour produire un recouvrement, et passer avec sûreté le moment de transition en empêchant des passages désordonnés de la vapeur.

D'autre part, nous avons dit que l'excentrique était callé *d'équerre* avec la mani-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

velle, ce qui ferait correspondre *rigoureusement* le milieu de la course du tiroir avec les extrémités de celle du piston. Cette condition n'est pas non plus exacte, car, s'il en était ainsi, en tenant compte surtout du recouvrement des bandes sur les orifices, le piston, se mettant en marche, effectuerait une notable portion de sa course sans recevoir l'action de la vapeur, et, ce qui serait plus nuisible, sans qu'aucune issue fût offerte à l'échappement de la vapeur *passive* du coup précédent.

En considération de cette importante remarque, on s'arrange, au contraire, pour que le tiroir ait déjà découvert *l'orifice d'admission*, et celui de *l'échappement*, *avant le départ du piston* de chacune de ses extrémités de course, ce qui revient à modifier l'angle de callage de l'excentrique, c'est-à-dire à *donner de l'avance*.

On a construit, dans l'origine, bien des machines à vapeur sans donner d'avance au tiroir de distribution : on a été longtemps sans en comprendre l'importance; ce n'a été, nous le croyons, que depuis l'emploi des locomotives, c'est-à-dire des machines à grande vitesse, que l'on a appris réellement à bien régler la position et le jeu des tiroirs. On verra, en effet, que plus une machine marche vite, plus il est nécessaire de donner de l'avance au tiroir (1).

Par l'étude du tracé géométrique nous verrons comment on détermine facilement l'angle d'avance qui joue un rôle si important dans la marche des distributions. Mais nous pouvons déjà trouver les dimensions réelles du tiroir et fixer la valeur *linéaire* de l'avance à l'introduction et à la sortie de la vapeur.

Les conditions complètes d'un tiroir simple sont déterminées d'après la largeur de l'un des orifices d'admission et de celui de l'échappement, d'où l'on déduit : la largeur des bandes, l'avance à l'introduction, l'avance à la sortie, la longueur totale du tiroir et sa course. Il faudrait donc fixer d'avance la dimension de cet orifice; mais pour cela il faut connaître les effets du tiroir, ce que le tracé géométrique seul nous apprendra. Nous le supposerons donc pour l'instant connu et donné; ce n'est que plus tard, en traitant des proportions des parties principales d'une machine à vapeur, que nous indiquerons ce qui est relatif aux orifices.

Les orifices de distribution sont généralement rectangulaires, et, à ce titre, les dimensions linéaires peuvent varier pour une même superficie. La dimension que nous considérons actuellement est celle, ordinairement la plus petite, qui se trouve disposée suivant la marche du tiroir.

Le problème se résume donc ainsi : étant données la largeur de l'un des deux orifices B et celle de la lumière C de l'échappement, déterminer d'abord la largeur d'une bande et la longueur du tiroir.

Le tiroir occupant juste la position milieu, tel qu'il est indiqué en DEFE′D′, fig. 1re, les deux orifices B et B′ sont symétriquement recouverts par les bandes dont la largeur est par conséquent égale, plus un certain recouvrement de chaque

(1) Nous croyons que c'est au mécanicien anglais Georges, qui a péri si malheureusement dans la catastrophe du chemin de fer de Versailles (rive gauche) en 1842, que l'on doit les premières applications de l'avance du tiroir dans les machines locomotives. Ayant eu l'occasion de le voir souvent de 1840 à 1842, il nous en a parlé plusieurs fois comme étant le premier qui, sur la ligne de Saint-Germain, avait modifié, sur les machines qu'il était chargé de conduire, le règlement des tiroirs, et qui obtenait, par ce simple changement, des avantages marqués par rapport aux machines des autres conducteurs.]

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

côté pour les motifs exposés ci-dessus. La largeur de chaque bande excède donc celle de la lumière d'une quantité que nous admettrons, pour l'instant, égale à un dixième de la largeur de l'orifice.

Lorsque ce tiroir aura marché d'une certaine quantité, soit dans le sens de la flèche en F, en quittant cette position moyenne, il arrivera un moment où les deux orifices B et B′ seront simultanément découverts : l'un B, pour laisser passer la vapeur dans le cylindre, et l'autre B′, pour permettre à la vapeur neutre de s'échapper en passant par l'intérieur du tiroir et par l'orifice central C.

Mais ces deux fonctions, au lieu d'être exactement simultanées, doivent au contraire présenter une avance relative en faveur de l'échappement ; c'est-à-dire qu'il a été reconnu nécessaire que la vapeur qui a terminé son action commence à sortir du cylindre avant que de nouvelle vapeur s'introduise de l'autre côté du piston.

Pour obtenir cet effet, il suffit *de partager inégalement* l'excès de largeur de la bande sur l'orifice, le tiroir pris dans la position milieu. Il s'ensuit alors que, si nous considérons, par exemple, l'arête D et celle E′, qui vont déterminer, le tiroir marchant, l'ouverture de chacun des orifices B et B′, celle D étant arrivée en correspondance exacte avec le bord de l'orifice B *ou barbe-à-barbe*, l'arête E′ aura découvert l'orifice B′ d'une quantité égale à l'inégalité du recouvrement, puisque la marche est égale pour ces deux arêtes D et E′. Ce résultat, sur lequel il est inutile d'insister, comme étant pour ainsi dire évident, a lieu indépendamment de l'avance absolue à l'introduction obtenue par l'angle de callage, ce dont nous allons parler bientôt. Mais en fixant les conditions qui permettent de l'atteindre, on possède tous les éléments nécessaires pour déterminer la dimension du tiroir et sa course.

En effet, la moitié de la course du tiroir sera accomplie lorsque, partant encore de la position milieu, l'orifice B sera complétement découvert; et pour cela, il faut que l'arête D parcoure la largeur de l'orifice B, plus la quantité dont elle déborde cet orifice, c'est-à-dire *du plus grand recouvrement* : donc, cette dernière quantité trouvée, la demi-course le sera aussi, puisque la largeur de l'orifice est donnée.

Pour trouver ce plus grand recouvrement ou la quantité dont le tiroir dépasse extérieurement chaque orifice au milieu précis de sa course, il faut seulement considérer que, si le recouvrement intérieur était aussi grand que celui extérieur, la largeur de la bande serait augmentée de l'avance relative à la sortie, d'où les deux recouvrements égaux auraient chacun pour valeur la moitié de la différence des largeurs de la bande, ainsi augmentée, et de l'orifice.

Si nous désignons alors par

R le plus grand recouvrement cherché;

$l$, la largeur de la bande;

$o$, la largeur de l'orifice;

$a$, l'avance relative à l'échappement,

nous trouvons pour le plus grand recouvrement :

$$R = \frac{l + a - o}{2}.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Par conséquent la détermination de la demi-course du tiroir revient à la règle suivante :

*On ajoute à la largeur de la bande du tiroir l'avance que l'échappement doit présenter sur l'introduction, et de cette somme on retranche la largeur de l'orifice; la moitié de cette différence, qui est la valeur du plus grand recouvrement, étant ajoutée à la largeur de l'orifice, donne la demi-course du tiroir.*

EXEMPLE. Pour bien fixer les idées, nous prenons l'exemple représenté fig. 1re, pl. 10, dans lequel chaque orifice B ou B′ a 30 millimètres de largeur, et la bande du tiroir 33.

Ayant admis que, du côté de l'échappement, l'orifice soit découvert de 1 millimètre avant que l'introduction commence, nous trouvons alors pour le plus grand recouvrement :

$$R = \frac{l + a - o}{2} = \frac{33 + 1 - 30}{2} = 2.$$

Cette valeur, ajoutée à la largeur de l'orifice, donne alors 32 millimètres pour la demi-course du tiroir. C'est aussi *le rayon d'excentricité*, le tiroir étant commandé directement par l'excentrique, ainsi qu'on l'a vu précédemment.

Quant à la longueur totale du tiroir, outre que le simple tracé exécuté dans les conditions ci-dessus suffit pour la déterminer, on peut aussi la trouver numériquement avec facilité, puisque cette longueur est égale à la distance extrême des orifices plus deux fois le plus grand recouvrement.

La distance extrême des orifices est composée de la somme même des trois orifices B, B′ et C, plus les intervalles qui les séparent; ces intervalles ont eux-mêmes pour valeur minimum la largeur des bandes du tiroir qui doivent s'y juxtaposer aux points extrêmes de la course, sans déborder sur les orifices.

Donc, dans notre exemple, où les intervalles des orifices ont 35 millimètres et l'orifice central C = 40, la longueur totale du tiroir est égale à :

$$(2 \times 30) + (2 \times 35) + 40 + (2 \times 2) = 174 \text{ millimètres.}$$

Si l'on en retranche les deux bandes, il reste pour le vide intérieur :

$$174 - 2 \times 33 = 108 \text{ millimètres.}$$

REMARQUE. — Lorsque nous disons : la largeur des intervalles qui séparent les orifices, il n'est pas nécessaire d'admettre que cette largeur soit attribuée à des épaisseurs de fonte correspondantes, car celles-ci pourraient être d'une épaisseur inférieure à la largeur des bandes, en les réduisant du côté de l'orifice central C. Le résultat réel à obtenir est que les bandes, en débordant à chaque fin de course sur l'orifice central, lui laissent néanmoins une largeur suffisante. En pratique, on cherche à réduire autant que possible cette largeur, afin de ne pas avoir des surfaces de tiroir trop grandes.

AVANCE ABSOLUE A L'INTRODUCTION. — C'est lorsque les dimensions du tiroir sont ainsi déterminées, qu'il est possible de fixer la quantité d'avance totale, ou *l'angle de callage*, d'après l'avance absolue à l'introduction.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Cette quantité d'avance absolue n'a rien de théorique, et change même avec les principaux systèmes différents de moteurs. Avant de rechercher ce que l'expérience enseigne pour chaque cas particulier, nous admettons la valeur adoptée généralement pour les machines analogues, comme espèce et comme puissance, à celle représentée pl. 9, dont la fig. 1re, pl. 10, est la distribution.

Dans cet exemple, l'avance absolue à l'introduction ou la quantité d'ouverture réelle, que nous désignons par $i$, est fixée à 1,5 millimètre, c'est-à-dire qu'au moment où le piston arrive à l'extrémité de sa course, l'orifice qui doit fournir de la vapeur pour le coup prochain est déjà découvert de cette quantité. D'après ce qui vient d'être dit, l'orifice d'échappement est alors découvert de 1 millimètre de plus, soit 2 1/2 millimètres.

Par conséquent, le piston étant à l'extrémité de sa course, le tiroir n'est plus au milieu de la sienne, comme cela a été dit, et ainsi que cela aurait lieu, s'il n'existait ni recouvrement ni avance. Le tiroir est, au contraire, dérangé de sa position centrale d'une distance égale à $1^{mill.}5$, l'avance à l'introduction, plus 2 millimètres, la largeur du recouvrement extérieur, soit $3^{mill.}5$.

Son déplacement total, désigné par A, peut donc être exprimé ainsi :

$$A = R + i = \frac{l + a - o}{2} + i.$$

Cette avance linéaire totale détermine alors *l'angle d'avance,* c'est-à-dire les positions relatives de la manivelle et du rayon de l'excentrique, figurant celui de la petite manivelle fictive dont on a expliqué la fonction (p. 318).

En effet, ces deux manivelles, qui étaient situées à angle droit lorsqu'on ne tenait pas compte de l'avance, forment maintenant un angle obtus composé d'un angle de 90°, plus un angle aigu qui a l'avance linéaire A pour sinus, mesuré sur le cercle décrit par le centre de l'excentrique.

C'est une détermination qu'il est très-facile d'obtenir en traçant, par exemple, du point $a$, fig. 1re, formant l'intersection de l'axe GH avec le plan des orifices, un cercle d'un diamètre égal à la course du tiroir. Projetant le centre $a'$ de celui-ci dans la position de l'avance, en $a^2$ sur le cercle, ce point $a^2$ devient le centre de l'excentrique et $aa^2$ le rayon, qui détermine ainsi, avec celui $ma$, l'angle total d'avance $maa^2$. Ceci est évident, puisque le rayon $ma$ représente la position de la manivelle quand le piston est à l'extrémité de la course correspondant à l'orifice B.

Maintenant il est aisé de voir que le même effet se reproduira pour la phase opposée du mouvement : car, lorsque la manivelle sera parvenue en $m'$, le centre de l'excentrique se trouvera en $a^3$, correspondant au centre du tiroir ramené d'une même avance de l'autre côté de l'axe GH.

Ajoutons que, si la commande du tiroir a lieu à l'aide d'un mécanisme qui renverse le mouvement une fois, comme on l'a supposé dans la disposition de la machine type, pl. 9, le centre de l'excentrique devrait alors se trouver en $a^3$, à l'extrémité opposée du même diamètre que le premier $a^2$.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

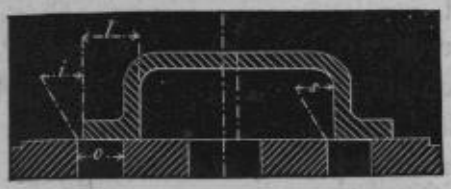
Expression générale de la course du tiroir. — La règle ci-dessus indiquée pour trouver la demi-course du tiroir fournit tout naturellement la course entière, et permet de plus de lui assigner une expression générale facile à retenir.

Il arrive souvent que les dimensions d'un tiroir et celles de la disposition des orifices étant données, on cherche quelle doit être sa course en ménageant l'avance nécessaire à l'introduction de la vapeur.

Au moyen d'un tracé, comme fig. 64, on met le tiroir en regard des orifices, le profil du tiroir étant parfois tracé sur une bande de papier ou de métal mince pour pouvoir se déplacer à volonté.

L'ayant ainsi placé avec le degré d'avance convenable à l'introduction, on possède alors comme données pouvant servir à trouver la course : l'avance $i$ à l'introduction, l'avance $s$ à la sortie, la largeur $l$ d'une bande, la largeur $o$ d'un orifice.

Fig. 64.




Sans faire de tracé, on trouvera facilement la course en faisant le raisonnement suivant.

On a vu précédemment que la demi-course, ou $1/2\,h$, avait pour valeur le plus grand recouvrement, plus la largeur de l'orifice, soit :

$$1/2\,h = \frac{l + a - o}{2} + o;$$

La course entière égale donc :

$$h = l + a - o + 2o = l + a + o.$$

Mais $a$ représente la différence des avances à l'entrée et à la sortie, soit :

$$a = s - i.$$

Par conséquent, faisant la substitution dans l'équation précédente, il vient :

$$h = o + l + s - i.$$

Cette dernière expression de la course d'un tiroir est alors généralisée ainsi :

*La course d'un tiroir est égale à la largeur d'une bande, plus celle d'un orifice, plus l'avance absolue à la sortie moins l'avance absolue à l'introduction.*

Nous allons donner un exemple de cette règle, très-simple et d'une grande utilité pour l'intelligence de la marche d'un tiroir ordinaire.

Premier exemple. — Quelle course doit effectuer un tiroir dans les conditions suivantes :

| | | |
|---|---|---|
| Largeur de l'une des bandes..... | $l$ = | 45 millimètres. |
| » d'un orifice..... | $o$ = | 35 |
| Avance absolue à l'introduction..... | $i$ = | 2 |
| » » à la sortie..... | $s$ = | 5 |

*Solution.* — On trouve :

$$h = 45 + 35 + 5 - 2 = 83 \text{ millimètres.}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Quand nous donnerons l'étude complète des dimensions d'une machine à vapeur, nous ferons voir comment, après avoir fixé les dimensions des orifices, on doit déterminer les degrés d'avance à l'entrée et à la sortie, suivant le genre du moteur et la vitesse, et, par suite, régler la largeur des bandes du tiroir.

Tracé géométrique de la marche du tiroir. — Les dimensions du tiroir et les conditions de marche étant connues, il est de la dernière importance d'en étudier les effets comparés aux mouvements du piston, autrement dit de déterminer leurs rapports de positions réciproques à chaque instant.

C'est une recherche qui ne présentera aucune difficulté, connaissant les positions relatives de la manivelle et de l'excentrique, et en remarquant que le tiroir se meut exactement suivant la même loi que le piston, chacun d'eux étant commandé par un semblable mode de transmission de mouvement.

A cet effet, nous traçons du point $a$, fig. 2, un cercle avec un rayon $am$ égal, à une certaine échelle (soit au 1/10), à celui de la manivelle; puis, divisant ce cercle en un certain nombre de parties égales qui représentent les positions successives de la manivelle de $a0$ à $a0'$, etc., on trace par les mêmes points, avec la longueur de la bielle pour rayon, des arcs de cercles qui donnent alors sur le diamètre $00'$ les positions correspondantes du piston (voir la même opération fig. 5, pl. 9). Ces positions sont ainsi indiquées fig. 1re, au-dessous de la table des orifices.

Du même centre $a$, fig. 2, on trace ensuite un cercle égal à celui décrit par le centre de l'excentrique ou à la course du tiroir. (Pour rendre le tracé plus sensible, ce cercle est à l'échelle de 2/5, comme le détail fig. 1re, ce qui ne change rien aux rapports cherchés et conduira aux mêmes résultats que s'il était à la même échelle que le cercle de la manivelle.)

Comme l'excentrique est solidaire de la manivelle, il exécutera simultanément les mêmes mouvements angulaires; mais ne se trouvant pas sur un même rayon, la division n'aura pas le même point de départ. Par conséquent, la manivelle étant en $am$, le centre de l'excentrique se trouve en $a^2$, sur le diamètre même $a^2a^3$, conformément à l'angle de callage, et la division du cercle doit être faite d'après ce diamètre, comme point de départ. C'est ce que montre le tracé où l'on voit, par la correspondance des chiffres, les positions successives occupées par le centre de l'excentrique en même temps que la manivelle sur le cercle qu'elle décrit.

La marche du tiroir sur la table des orifices pourrait donc être représentée par la même méthode que celle du piston, puisque la donnée primitive, un cercle divisé, est la même dans les deux cas; mais nous opérons ici d'une façon qui rendra les effets beaucoup plus sensibles.

Nous avons tracé, au-dessus de la table A, fig. 1re, une série de lignes parallèles et équidistantes 1-9', 2-8', etc., qui représentent justement cette même table autant de fois que nous voulons observer de positions différentes du tiroir, et suivant le nombre de divisions du cercle et de positions du piston. Pour compléter ce tracé, on a ensuite projeté les arêtes des trois orifices B, B' et C, par les lignes $DD^2$, $EE^2$, $ee'$, $ff'$, $E'E^3$ et $D'D^3$.

Maintenant du point $a$, fig. 1re, on trace le cercle de la course du tiroir en y repor-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tant les mêmes divisions que fig. 2, mais qui ne sont pas indiquées ici pour éviter d'embrouiller le tracé. Ces points de divisions, projetés alors sur les lignes parallèles à la table des orifices, en observant bien la coïncidence des numéros de position, y déterminent celles successives du centre du tiroir, en correspondance avec celles de la manivelle et de l'excentrique, et par conséquent du piston. Ces points de projection peuvent être aussi réunis par les deux courbes $a'bc$ et $cda'$, qui déterminent cette marche du centre du tiroir dans les deux sens de son mouvement, et pour toutes les positions intermédiaires à celles des divisions adoptées.

Mais si, d'après l'une des courbes $a'bc$ de la marche du centre, on reporte les dimensions du tiroir sur chaque ligne horizontale 1-9′, 2-8′, etc., on obtient, en résumé, les situations exactes des bandes par rapport aux orifices, ce qu'indique en effet la fig. 1re, sur laquelle les positions successives du tiroir sont rendues sensibles au moyen de teintes en arrachement pour les bandes. Seulement il faut noter que le tracé n'est complet que pour *un coup simple*, c'est-à-dire un demi-tour de la manivelle, et, par conséquent, de l'excentrique; mais il est facile de comprendre ce qu'il resterait à faire pour une évolution complète; car, la courbe $a'bc$ indiquant la marche du tiroir quand le piston se déplace de 00 à 0′0′, il est clair que l'autre courbe $cda'$ indique la même chose pour la marche inverse du piston de 0′0′ à 00.

Ce tracé, qui ne peut être d'aucune utilité au point de vue de la construction du tiroir, ses fonctions étant connues d'avance, est au contraire d'une très-grande commodité pour étudier ces fonctions, et applicable à tout autre mécanisme de commande que l'excentrique circulaire. A l'aide de la fig. 1re, nous pouvons suivre sans peine et avec certitude la marche du piston et celle du tiroir qui doit lui laisser arriver la vapeur. Faisons observer, toutefois, qu'il existe une légère inexactitude par ce fait qu'il n'a pas été tenu compte, pour le tiroir, de l'obliquité de la barre d'excentrique (p. 319), qui influe comme celle de la bielle motrice; mais le rapport entre sa longueur et le rayon d'excentricité est ordinairement si grand que cette influence peut être négligée sans aucun inconvénient.

Examinons donc les rapports de position du piston et du tiroir au point de vue de l'ouverture progressive des orifices d'introduction et d'échappement.

Le piston étant à l'extrémité de sa course, en 00, fig. 1re, le tiroir est à son point d'avance, comme l'indiquent les parties teintées pour les bandes sur le plan 00 des orifices;

Le piston marchant de 00 à 1-9′, ce qui correspond à 1/20 de la circonférence décrite par la manivelle, le tiroir a marché dans le même sens et découvert l'orifice d'introduction B d'environ les 4/10 de sa largeur, ce qu'il est aisé de voir par l'indication des bandes en arrachement sur la parallèle 1-9′;

Le piston parvenu en 4-6′, soit environ les 4/10 de sa course et 4/20 de la rotation de la manivelle, le tiroir a complétement découvert l'orifice, qui reste sensiblement ouvert en plein des positions 3 à 6, soit pendant un parcours du piston un peu moindre que de la moitié de sa course totale.

En continuant la même observation, on voit que le tiroir, après avoir atteint le milieu de sa course, repart en sens inverse de la marche du piston, et que, par l'ef-



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

fet même de l'avance, il ferme complétement les deux orifices pour l'introduction et l'échappement, entre les positions 9 à 0′, et très-près de cette dernière : d'où il résulte que toute communication extérieure est interrompue avec le cylindre dans cette même période, mais qui est extrêmement courte et qui correspond à moins d'un centième environ de la course du piston, et de 1/40 du cercle décrit par la manivelle.

En résumé, le croisement des mouvements du piston et de la manivelle fait qu'au départ le piston engendre de faibles volumes, tandis que le tiroir découvre rapidement l'orifice. Dans la position médium du piston, où il marche rapidement, le tiroir est, au contraire, *à son solstice* (que l'on nous passe cette comparaison), et finalement la vapeur peut affluer avec assez d'abondance pour saturer l'espace et établir convenablement la pression, sous la réserve toutefois que la dimension générale de l'orifice soit elle-même suffisante.

Mais, si ceci est vrai pour le cas d'un tiroir simple, l'admission de la vapeur ne se trouvant pas interrompue d'une autre façon, en sera-t-il de même *lorsqu'il y a détente,* et qu'un organe indépendant du tiroir principal vient arrêter l'affluence de la vapeur, lorsque le tiroir n'a souvent découvert l'orifice que d'une faible portion, suivant la position du piston choisie pour opérer la détente?

Sans résoudre, quant à présent, ce problème, nous pouvons affirmer que la marche progressive d'un tiroir n'est pas sans inconvénients, et qu'un mécanisme (et il en existe) qui permet l'ouverture et la fermeture presque spontanée des lumières de distribution, surtout l'ouverture de l'échappement, a incontestablement des avantages marqués sur celui dont nous venons de nous occuper.

Une dernière remarque reste à faire à l'égard de l'inégalité des deux moitiés de la course du piston, à cause de l'obliquité de la bielle, circonstance dont on a vu qu'il avait été tenu compte en faisant le tracé.

Il est évident que, pour une distribution comme celle-ci, à pleine vapeur, cette inégalité n'a pas d'influence, puisqu'elle ne trouble pas la régularité de la marche du tiroir, quant aux points du départ, aux moments où l'avance à l'introduction doit se manifester.

Cette influence est au contraire sensible, ainsi que nous le montrerons, lorsqu'il s'agit d'opérer une détente en un point quelconque de la course, qui doit être une partie exacte du volume engendré par le piston.

Simplification du tracé géométrique précédent (fig. 3). — Lorsqu'on se livre à l'examen pratique de la marche d'un tiroir, on fait usage d'un tracé très-simple dont la fig. 3 de la pl. 10 pourra donner une idée complète.

Après avoir, comme précédemment, tracé les cercles qui représentent la course de la manivelle et du tiroir, à une même échelle ou à des échelles différentes, peu importe, on fait la division de ces circonférences d'après les points de départ respectifs de la manivelle et de l'excentrique, suivant l'angle d'avance; mais, au lieu de conserver à la manivelle sa position réelle au point mort, on l'avance d'un quart de cercle, comme si le tiroir était mis en mouvement sur un axe placé perpendiculairement à celui du piston. Ainsi les positions relatives réelles de la manivelle et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de l'excentrique étant $am$ et $aa^2$, fig. 3, comme dans le premier exemple, fig. 2, on conserve celle $a^2$ de l'excentrique, et on amène le centre du bouton de la manivelle en G, qui devient le point 0.

Les deux cercles étant divisés d'après cette supposition, on mène, par les points de division du cercle de l'excentrique, des lignes parallèles à l'axe GH, et par ceux du cercle de la manivelle des parallèles au rayon $am$. Ces deux systèmes de lignes perpendiculaires les unes aux autres déterminent par leurs intersections, correspondant chiffre pour chiffre à la double division des deux cercles, une série de points qui, réunis par une ligne continue, forment une ellipse GIHJ, laquelle est un lieu géométrique des positions relatives du tiroir, et possède à ce titre les propriétés que nous allons examiner.

Pour pouvoir, à l'aide de ce tracé, étudier les positions relatives de la manivelle et du tiroir, on trace, tangentes au cercle qui correspond à la course de ce dernier, deux droites AD et A′D′ qui représentent chacune la table des orifices pour les deux phases du mouvement. D'après la disposition même de la figure, la marche du tiroir est, en effet, parallèle au rayon $am$, et le centre $a^2$ de l'excentrique est rapporté, comme repère, à un point quelconque de la longueur du tiroir. Suivant la fig. 1, ce point $a^2$ correspondait au centre du tiroir, tandis qu'ici, fig. 3, il se rapporte à l'extrémité de l'une des bandes. Par conséquent, si ce point $a^2$ était sur l'axe général GH, l'extrémité de la bande s'y trouvant aussi, l'ensemble du tiroir occuperait juste sa position centrale, et la bande déborderait chaque orifice correspondant *du plus grand recouvrement*, comme en DEFE′D′, fig. 1.

Donc il faut, pour mettre chaque orifice B ou B′ en rapport avec les conditions du tracé, fig. 3, les indiquer tous deux à droite et à gauche de l'axe GH à la distance de ce plus grand recouvrement, puisque, dans les deux sens du mouvement, le bord intérieur de la bande doit coïncider avec cet axe qui correspond lui-même à la position centrale du tiroir.

Si l'on examine la fig. 3, on voit qu'en effet le point $a^2$ est juste dans la position de l'avance à l'introduction par rapport à l'orifice B, et que celui $a^3$ correspond à l'extrémité de la bande opposée par rapport à l'autre orifice B′. En résumé, c'est comme si la longueur du tiroir était réduite à zéro, et que les deux orifices fussent en contact; et s'il n'existait aucun recouvrement, ces deux orifices partiraient en effet tous deux de l'axe GH du mouvement.

Maintenant, soit donné de trouver la position de la bande du tiroir dans la période du mouvement où l'introduction a lieu par l'orifice B, la manivelle étant au point 2 de sa circonférence.

Il suffit d'abaisser de ce point une perpendiculaire 2–2 à l'axe GH, et par son intersection avec l'ellipse de mener une parallèle à ce même axe; cette parallèle correspond, sur l'orifice B, au point $b$, qui est la position cherchée de la bande du tiroir en cet instant.

La même opération peut se faire pour tout autre point de la circonférence décrite par la manivelle, en observant, bien entendu, que pour tous les points choisis sur la demi-circonférence *descendante*, suivant le sens de la rotation indiqué par la flèche,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les positions trouvées se rapportent à l'orifice B, et, pour la demi-circonférence *montante*, à l'orifice B′.

Les indications de ce tracé seront facilement comprises, surtout après avoir étudié, comme on l'a fait ci-dessus, les rapports de positions entre la manivelle et le piston. Il est évident que, si l'on veut tenir compte de l'obliquité de la bielle, les positions relatives du tiroir et du piston étant toujours le but de la recherche, il faudra que le point choisi pour la manivelle soit déterminé, non pas d'après une division égale de la circonférence, mais directement d'après la position du piston, en procédant comme nous l'avons fait jusqu'à présent à cet égard.

Faisons encore remarquer une particularité caractéristique du tracé quant à l'ellipse GIHJ. Cette courbe présente une certaine obliquité par rapport à l'axe GH, ce qui provient exclusivement de *l'angle d'avance*. Il est en effet évident que, si l'excentrique était callé d'équerre avec la manivelle, les points de départ de la division des deux cercles seraient situés sur des diamètres communs (la manivelle étant avancée de 90°) et le grand axe de l'ellipse correspondrait précisément à l'axe GH.

Suppression de l'ellipse. — On obtiendra encore les mêmes résultats que précédemment, même en supprimant l'ellipse, dont il n'a été question ici que pour faire connaître son emploi dans cette circonstance, et qui a été proposé, il y a déjà longtemps, par des ingénieurs de mérite (1). Cette suppression va nous permettre, en même temps, de conserver à la manivelle et à l'excentrique leur rapport exact de position, c'est-à-dire que le centre de l'excentrique étant encore en $a^2$, le rayon de la manivelle sera représenté par $am$, directement suivant l'angle de callage.

Conservant donc l'ensemble du tracé, moins l'ellipse, proposons-nous de résoudre le même problème que ci-dessus, la manivelle ayant marché du point mort $m$ jusqu'en un point K déterminé.

On joindra ce point avec le centre par un rayon K$a$; puis prenant, à l'aide d'un compas, l'ouverture de l'angle de callage, de $c$ en $a^2$, du point $c'$, l'intersection du rayon de la manivelle avec ce même cercle, on reportera cette ouverture d'angle de $c'$ en $a^4$ : la projection de ce point parallèlement à GH donnera évidemment en $b$ la position cherchée de la bande du tiroir.

Ce dernier procédé est le plus simple de tous, et à moins de motifs particuliers, nous en ferons usage exclusivement par la suite pour des recherches analogues.

Principe du changement de marche. — On a vu (p. 321) que pour produire à volonté le changement de marche d'une machine, il suffisait, soit de changer la position de l'excentrique par rapport à la manivelle, soit de disposer deux excentriques occupant chacun la position requise pour les deux sens de mouvement, et organisés pour commander isolément le même tiroir.

C'est surtout dans les locomotives, dans les appareils de navigation et dans les machines à vapeur des mines, qu'il est utile d'appliquer des mécanismes de chan-

(1) Nous pensons que ce mode de tracé a été appliqué en premier par M. Clapeyron à propos de la distribution des machines locomotives de Saint-Germain, dont nous avons donné une description complète dans la *Publication industrielle*, vol. III, et pl. 40. Il a été indiqué aussi dans le traité de M. Campaignac sur les appareils de navigation.

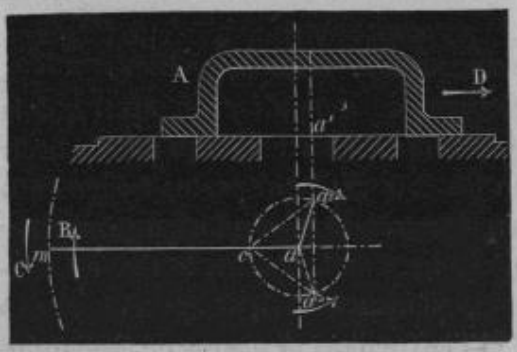
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

gements de marche, parce que l'on est souvent obligé de faire fonctionner le moteur tantôt dans un sens et tantôt dans un autre. Mais dans les machines destinées aux usines ou manufactures, il est rare qu'on en fasse l'application.

S'il n'existait pas d'avance, que l'angle de callage fût de 90 degrés, les centres des deux excentriques seraient situés sur un même diamètre. Mais aussitôt que le callage n'a pas lieu à angle droit, la même condition ne peut plus persister, attendu que dans quelque sens que tourne la machine, le même angle doit exister entre la manivelle et le rayon de l'excentrique; et si les deux rayons appartenaient au même diamètre, les angles de callage correspondants seraient suppléments l'un de l'autre, mais inégaux : la quantité d'avance, pour un sens de la marche, produirait une valeur double en retard pour l'autre. Peu de mots suffiront pour fixer les idées à cet égard.

Soit A (fig. 65) un tiroir à son point d'avance, la manivelle $am$ à l'extrémité de la course et la machine réglée pour marcher dans le sens indiqué par la flèche B. Le rayon de l'excentrique est en $aa^2$, et le tiroir va se mouvoir dans le sens de la flèche D.

Fig. 65.




Si, la manivelle conservant sa position, la machine devait tourner en sens contraire, suivant la flèche C, il est évident que le tiroir n'en conserverait pas moins sa position d'avance et le sens de son mouvement, puisque la vapeur devrait être introduite par le même orifice, le piston étant toujours à la même extrémité de sa course.

Pour que le tiroir conservât le sens de sa direction en même temps que son degré d'avance, il faudrait alors que le centre de l'excentrique fût reporté de l'autre côté de la manivelle et suivant le centre $a^3$, dont la projection correspond encore à celui $a'$ du tiroir. Ceci revient à dire, en résumé, que :

*Deux excentriques, disposés pour un changement de marche, forment par leurs rayons respectifs des angles égaux avec la manivelle, et symétriquement disposés, et l'angle qu'ils forment entre eux est égal à* 360 *degrés moins le double de l'angle de callage.*

Exemple. — Soit une distribution avec changement de marche pour laquelle l'angle de callage est égal à 95 degrés. Les rayons des deux excentriques, au lieu d'être en ligne droite, formeront un angle obtus égal à

$$360 - (95 \times 2) = 170 \text{ degrés.}$$

Nous aurions pu décrire, dès à présent, les dispositions mécaniques d'un changement de marche; mais comme nous aurons à examiner des machines qui en sont munies, principalement les locomotives et les machines de navigation, cette mention y trouvera tout naturellement sa place.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

### TIROIR SIMPLE COMMANDÉ PAR UNE CAMME DITE CURVILIGNE ÉQUILATÉRALE.

(FIG. 4 ET 5, PL. 10.)

Pour les machines à deux cylindres, dites du système longtemps connu en Angleterre sous le nom de Woolf, et en France sous celui d'Edwards, on fait généralement usage, en place d'un excentrique circulaire, pour la commande des tiroirs distributeurs, d'une camme triangulaire appelée culbuteur, montée sur un plateau ou disque circulaire qui exécute un mouvement de rotation continu. Cette camme est disposée à l'intérieur d'un châssis rectangulaire qu'elle élève et abaisse successivement, et, par la tige verticale dont il est muni, entraîne les tiroirs de distribution.

La fig. 4 de la pl. 10 peut donner une idée complète de cette disposition.

Il s'y trouve représenté un tiroir A, exactement de même forme, ainsi que la table B des orifices, que celui dont les propriétés ont été décrites jusqu'ici. Ce tiroir est assemblé par une oreille *a* avec une tige cylindrique C′ qui porte, forgée de la même pièce, à sa partie inférieure, le châssis rectangulaire D à l'intérieur duquel se meut la camme. Pour que la rectitude du mouvement soit assurée, la tige est continuée au-dessous du châssis, et l'ensemble est guidé par deux douilles en bronze *b* et *c*, l'une ajustée dans une console en fonte, et l'autre dans la plaque de fondation.

La camme E est une pièce de fer acérée ou tout en acier, fixée sur un plateau en fonte F, lequel est lui-même monté sur un axe en fer qui reçoit de l'arbre principal de la machine, par une paire de roues d'angle, un mouvement de rotation continu. Pour assujettir très-solidement cette camme, elle est encastrée d'une partie de son épaisseur dans le plateau et fixée au moyen d'une vis *d*.

Il est évident, d'après cela, que la camme qui est montée en dehors du centre du plateau s'élève et s'abaisse par l'effet du mouvement de rotation, en entraînant le châssis qui, lui, exécute alors un mouvement rigoureusement rectiligne alternatif, ainsi que le tiroir qui s'y trouve rattaché, comme on vient de le voir.

Mais tout ce qui jusqu'ici semble analogue au jeu de l'excentrique circulaire est profondément modifié dans les résultats, en raison de la camme et de sa forme.

La camme E est formée de trois arcs de cercle ayant chacun pour rayon *la course* que le tiroir doit effectuer, celui extérieur concentrique au mouvement de rotation : c'est, en peu de mots, un triangle équilatéral tracé du centre à la circonférence du cercle égal au double de la course, et dont les sommets sont pris réciproquement comme centres pour les courbes.

La largeur intérieure du châssis D étant égale à ce même rayon de courbure, la camme en touchera donc exactement les deux côtés dans toutes les positions que la rotation du plateau F lui fait prendre. Dans ces diverses positions de la camme, il

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

y a seulement *deux* des trois courbes qui agissent, suivant le sens de la rotation du plateau, pour faire mouvoir le châssis ; il n'y en a même qu'une seule, l'une de celles qui vont du centre à la circonférence; car aux deux positions extrêmes de la course, c'est la courbe concentrique qui se trouve en contact avec le châssis, et il ne peut plus se produire de mouvement de la part de ce dernier ni de celle du tiroir.

Ce dernier point établit le caractère principal de ce système de commande, qui a pour effet que le tiroir reste stationnaire, à chaque extrémité de sa course, pendant un sixième de tour de la machine (puisque le développement de chacune des courbes correspond à un angle de 60 degrés), tandis que le déplacement en est très-rapide et s'effectue complétement dans la durée d'un tiers de tour.

On a compris l'avantage de donner au tiroir un mouvement progressif rapide qui découvre en peu de temps les orifices d'introduction et d'échappement par rapport au déplacement du piston dans le cylindre. Le tracé géométrique, fig. 5, dont nous allons parler, rend très-sensible cet effet de la camme triangulaire.

Cependant, excepté dans les machines à deux cylindres et à balancier, on ne rencontre pas l'application de ce système, qui nécessite une transmission dispendieuse et difficile à établir avec la plupart des autres machines.

Faisons remarquer en passant cette autre particularité de la camme qu'elle permettrait le changement de marche sans mécanisme additionnel, c'est-à-dire qu'on pourrait faire tourner la machine dans un sens ou dans l'autre, suivant l'impulsion initiale donnée à volonté au moment de la mise en train. Mais empressons-nous d'ajouter qu'il faudrait pour cela que le tiroir fût réglé *sans avance,* ce qui n'a pour ainsi dire jamais lieu, comme nous avons essayé de le faire comprendre.

Tracé géométrique de la distribution par la camme fig. 5. — Ce tracé est entièrement fondé sur le même principe que ceux fig. 1 et 3, décrits ci-dessus. Il comporte cependant quelques différences légères pour ce fait qu'ici les mouvements du tiroir ne sont pas simplement déduits des fonctions d'une manivelle, ce qui a lieu avec l'excentrique circulaire, mais résultent de la combinaison des positions successives de la camme et de son contact avec le châssis D.

Voici, au surplus, comment nous procédons.

Après avoir mené deux axes perpendiculaires GH et IJ, de leur intersection *o*, comme centre, on décrit un cercle ayant pour diamètre le double de la course du tiroir, et par conséquent pour rayon celui de la camme. On trace ensuite cette camme en *omn* où son axe correspond à celui GH, et qui est nécessairement sa position milieu ainsi que celle du châssis et du tiroir.

Si nous admettons comme point de repère que la ligne supérieure du châssis coïncide avec le bord extérieur de l'une des bandes du tiroir, celle qui correspond à l'orifice *e*, cette bande doit être, pour cette position, en LM, en projection avec le point *m* de la camme à laquelle on sait que le châssis est tangent. D'après cela l'orifice *e* sera également déterminé en le traçant par rapport à la bande en LM, conformément à la répartition des recouvrements, dont on a vu plus haut les rapports quand le tiroir est juste au milieu de sa course. La table de l'orifice *e* est alors représentée par une ligne 0 0 menée parallèlement à IJ et à une distance arbitraire.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ajoutons que, si les dimensions du tiroir et des orifices sont calculées pour qu'à l'extrémité de la course la bande et l'orifice se trouvent barbe à barbe, le bord intérieur H de cet orifice correspondra précisément à l'axe G H, ce qui arrive sur le tracé, et ce qui doit être en effet, puisqu'à l'extrémité de la course la ligne supérieure du châssis, prise pour point de repère de la bande, occupera ce même axe.

Ceci fait, on répète de l'autre côté du cercle et à égale distance de son centre $o$ la ligne $0'0$, représentant la table des orifices, ainsi que l'orifice $e'$ qui se trouve nécessairement, par symétrie, au-dessous de l'axe G H, celui $e$ étant au-dessus. On divise ensuite l'intervalle des lignes 00 et $0'0'$ en un certain nombre de parties égales par des droites parallèles à I J, pour la courbe du mouvement, comme fig. 1. C'est en effet sur ces lignes 1-9', 2-8', etc., qui correspondent à un même nombre de positions de la manivelle (voir fig. 2), que doivent être rapportés les déplacements successifs du tiroir qui déterminent ensuite la courbe cherchée.

La première opération à faire est la détermination de l'angle d'avance. Pour cela on trace la bande du tiroir dans la position L'M' qu'elle doit occuper au départ du piston suivant la quantité donnée d'ouverture de l'orifice ; la projection du bord L' déterminant ainsi la position de la ligne supérieure $fg$ du châssis $fghi$, on trace la camme tangente à cette droite, suivant $o\,m'\,n'$, et le diamètre RR', qui partage l'arc concentrique $m'n'$ en deux parties égales, détermine alors, avec l'axe I J, l'angle de callage K $o$ R, K$o$ représentant la position du rayon de la manivelle. La position de la camme en $o\,m^2\,n^2$ indiquerait donc celle de la même bande au moment où l'introduction a lieu par l'autre orifice $e'$.

Bien que la camme ne soit pas montée directement sur l'arbre de la manivelle motrice, on conçoit facilement que ce rapport de position est rigoureusement conservé, puisque les vitesses de rotation sont identiques.

Conformément à ce qui a été expliqué plus haut, on opère alors la division du cercle de la course d'après le diamètre RR' pour point de départ; puis on trace la camme en chacun des points de division. Menant des tangentes aux arcs de cercle qui représentent ainsi la camme dans toutes ces positions, leurs intersections, chiffre pour chiffre, avec les lignes de divisions 1-9', 2-8', etc., déterminent une suite de points qui sont les éléments de la courbe cherchée L' $o$ L$^2$.

Cette courbe correspond au mouvement de la bande pendant l'introduction de la vapeur par l'orifice $e$. On comprendra facilement qu'en continuant le même tracé on obtiendrait la courbe symétrique L$^2$ K L' correspondant à la marche de la même bande pendant que l'échappement s'effectue par l'orifice $e$.

Au lieu de figurer la même opération pour l'autre orifice $e'$, opération qui serait identique à la première, on s'est attaché à suivre la marche de la seconde bande du tiroir par rapport à l'arête intérieure suivant laquelle se règle l'échappement.

Pour cela on trace cette seconde bande dans sa position centrale, en O N, correspondant à la première en L M; puis, attendu que les deux bandes marchent ensemble, la première ayant été abaissée au point d'introduction en L'M', la seconde a été abaissée de la même quantité et tracée en O'N'. Projetant alors le point O' en O$^2$, une seconde courbe O$^2$ P O$^3$ a été tracée à partir de ce point en por-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tant sur chacune des lignes verticales des grandeurs égales à $L'O^2$ à partir de la première courbe $L'oL^2$.

Cette deuxième courbe $O^2PO^3$ permet ainsi d'observer les degrés successifs d'ouverture à l'échappement, en même temps que ceux de l'introduction par l'orifice $e$ sont observés à l'aide de la première courbe.

Quant aux dimensions choisies pour cet exemple, elles consistent en ceci :

| | | |
|---|---|---|
| Largeur d'un orifice d'introduction..... | $o$ = | 30 millim. |
| Largeur des bandes du tiroir..... | $l$ = | 38 » |
| Avance absolue à l'introduction..... | $i$ = | 2 » |
| Avance absolue à la sortie..... | $s$ = | 4 » |

De ces dimensions données on déduit par conséquent les suivantes :
Course du tiroir (p. 367) :

$$h = l + o + s - i = 38 + 30 + 4 - 2 = 70 \text{ millimètres.}$$

Avance relative à l'échappement (p. 364) :

$$a = s - i = 4 - 2 = 2 \text{ millimètres.}$$

Plus grand recouvrement (p. 364) :

$$R = \frac{l + a - o}{2} = \frac{38 + 2 - 30}{2} = 5 \text{ millimètres.}$$

La valeur trouvée pour la course du tiroir est donc attribuable au rayon de la camme, puisque celle-ci, en tournant, déplace verticalement le châssis D de ce rayon même. Mais en pratique il est remarquable que cette valeur doit être légèrement augmentée, attendu que les angles de la camme ne peuvent pas rester vifs et demandent à être légèrement arrondis.

Quoi qu'il en soit, le châssis effectuera bien la course proposée en observant que l'angle central de la camme, déduction faite de l'arrondi, coïncide très-exactement avec le centre de son cercle de courbure extérieure, le diamètre de ce cercle étant justement égal au double de la course.

## COMPARAISON ENTRE LES EFFETS DE L'EXCENTRIQUE CIRCULAIRE ET DE LA CAMME CURVILIGNE

Si nous comparons maintenant la marche des tiroirs, suivant la commande par excentrique circulaire ou par la camme, l'examen des courbes obtenues (fig. 1 et 5) nous montre combien le temps de repos résultant de la camme augmente la section effective de l'orifice et favorise, par conséquent, l'introduction de la vapeur.

En effet, si l'on considère la courbe du mouvement (fig. 1), on reconnaît que le



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

rectangle $DD^2EE^2$, dans lequel elle est à peu près inscrite, est proportionnel à la section de l'orifice dont la largeur en est le petit côté : la surface renfermée entre le côté $DD^2$ et la partie concave de la courbe représente donc la partie proportionnelle de la section de l'orifice découverte pendant la durée entière du mouvement, c'est-à-dire pendant un coup de piston. Mesurée géométriquement, cette partie est à la superficie totale du rectangle $DD^2EE^2$ comme 2:3,1416 : soit un peu moins que les 2/3 :

D'où l'on déduit : *qu'un tiroir commandé par un excentrique circulaire ne livre au passage de la vapeur que moins des deux tiers de la section de l'orifice, pour la durée complète d'un coup de piston.*

Si nous faisons la même recherche à l'égard de la courbe $L'oL^2$ (fig. 5), en remarquant que l'ouverture de l'orifice est comprise dans la partie $L'op$, nous trouvons que la section totale découverte est les 0,77 environ de celle réelle de l'orifice : soit un peu plus des 3/4.

Mais c'est surtout la rapidité de l'ouverture qui est remarquable. Tandis que, dans le premier cas (fig. 1), l'orifice n'est encore découvert que des 2/3 environ de sa largeur, le piston étant dans la position n° 2, il l'est, au contraire, presque entièrement pour la phase correspondante avec la camme, ainsi qu'il est facile de s'en convaincre par l'examen de la fig. 5.

### DISTRIBUTEURS DIVERS FONCTIONNANT COMME LE TIROIR SIMPLE

A part le tiroir simple dont les propriétés viennent d'être décrites, il existe quelques organes de formes différentes, qui opèrent néanmoins la distribution d'une façon analogue, écartant encore, quant à présent, les moyens spéciaux imaginés en vue d'opérer la détente. Parmi ces dispositions diverses, beaucoup sont abandonnées; quelques-unes rencontrent de rares applications, ou constituent les procédés particuliers de certains constructeurs, mais ne sont pas encore généralisées.

Nous allons en faire connaître plusieurs de celles qui sont le plus remarquable.

Tiroir de Watt. — Les machines à double effet et à basse pression, construites par le célèbre ingénieur anglais, ont été munies d'un système particulier de tiroir d'une forme très-différente de celui ordinairement employé aujourd'hui, mais dont le principe, comme fonction, en était analogue; il était, du reste, également commandé au moyen d'un excentrique circulaire.

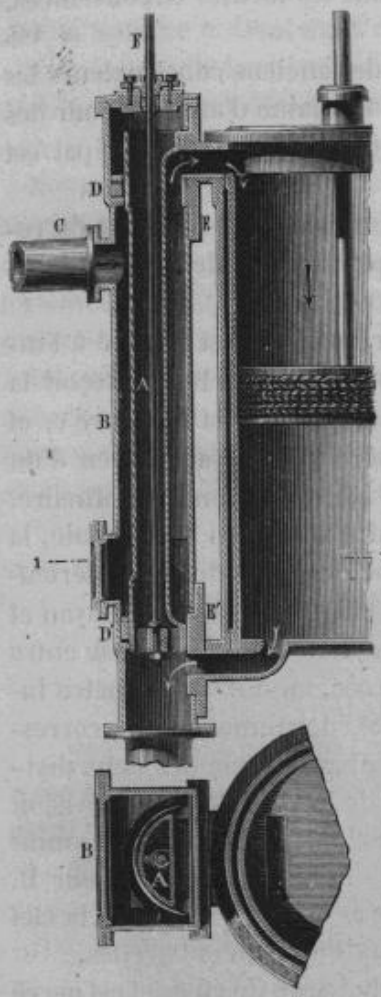
La fig. 66 représente, en coupe transversale, l'ensemble de ce tiroir et de sa boîte à vapeur, ainsi que la communication avec le cylindre et le condenseur ou milieu d'échappement.

Le tiroir de ce système de distribution est une pièce en fonte A, qui ressemble assez à une partie de tube cylindrique; il est ajusté à l'intérieur d'une boîte de même forme B, en communication avec le générateur par une tubulure C, ménagée vers le milieu de sa hauteur, et par sa partie inférieure avec l'appareil de condensation où se fait l'échappement de la vapeur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Cette boîte est munie, à cet effet, de deux garnitures D et D′ contre lesquelles glisse le tiroir en s'appuyant, par sa face opposée, sur les extrémités de deux tubulures E et E′, qui sont fondues avec le cylindre à vapeur et pénètrent, en s'y ajustant très-exactement, dans la boîte à vapeur B; ces tubulures sont traversées par les canaux distributeurs qui débouchent sur la face en contact avec le tiroir, lequel est muni, dans cette partie, de saillies dressées qui en déterminent les bandes proprement dites.

Fig. 66.




Le tiroir ainsi ajusté dans la boîte à vapeur B, le contact parfait de ses bandes avec les garnitures D et D′ sépare complétement les extrémités de cette boîte de la partie comprise entre les garnitures, et qui communique avec le générateur. D'après cela, la vapeur ne peut donc pénétrer dans le cylindre qu'autant que les orifices E ou E′ sont mis en relation avec cette partie de la boîte à vapeur : d'où il résulte que, contrairement à ce que nous avons vu jusqu'ici, la distribution s'effectue par le jeu des arêtes intérieures des bandes du tiroir. Quant à l'échappement, il a lieu évidemment lorsque les orifices sont mis en relation avec les extrémités de la boîte B, et la communication avec le condenseur s'établit, soit directement par l'orifice inférieur E′, soit par l'intérieur du tiroir, qui forme naturellement conduit lorsque c'est par l'orifice supérieur E que s'opère l'échappement.

A l'égard de la commande, on voit qu'elle se fait par une tige verticale F traversant le tiroir et fixée par sa partie inférieure après une barrette fondue avec lui; cette tige est reliée extérieurement avec un châssis auquel un excentrique circulaire transmet un mouvement de va-et-vient, comme à l'ordinaire.

Considérant, maintenant, les conditions de ce mode de distribution, on voit que, par la longueur du tiroir qui permet de reporter les lumières aux extrémités du cylindre, il supprime les longs canaux qui, dans la disposition ordinaire, constituent des espaces nuisibles en raison de la vapeur qu'ils renferment et qui n'est aucunement utilisée.

Mais la difficulté de tenir bien étanches les garnitures intérieures sans les serrer de façon à gêner la marche du tiroir, jointe au refroidissement considérable que ce dernier éprouve par le vaste développement de son intérieur toujours en communication avec le condenseur, sont des motifs qui ont fait abandonner cette disposition en la remplaçant par le tiroir simple ordinaire. Toutefois, pour les machines dans lesquelles on cherche à économiser le plus possible la dépense de vapeur, on a le soin d'appliquer un tiroir vers chaque extrémité du cylindre, afin d'éviter les grands

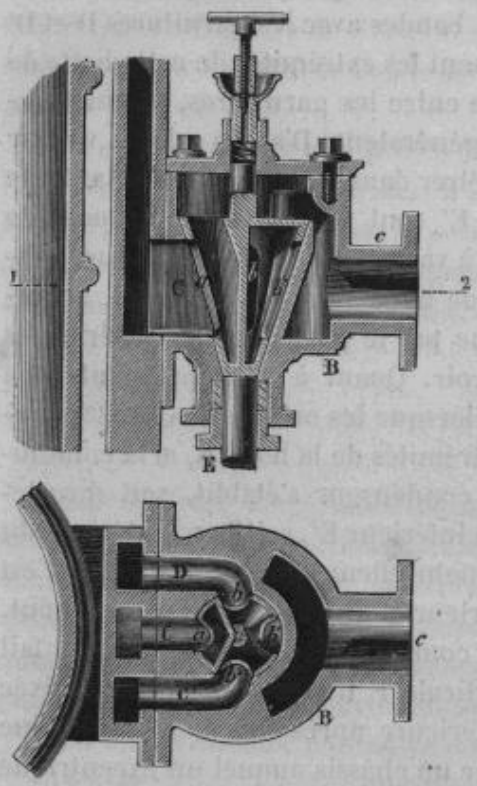
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

conduits, et, par suite, d'obtenir le même avantage qu'avec le tiroir de Watt. Cette application est surtout faite dans les machines à grande course. On a également fait usage de pistons fonctionnant comme tiroirs, et dans les mêmes circonstances. Nous aurons l'occasion d'en donner des exemples.

Robinet distributeur de Maudslay. — Maudslay, un des anciens constructeurs les plus distingués de l'Angleterre, a employé, il y a une trentaine d'années, pour des petites machines à vapeur, un système de distribution dont l'organe principal est un robinet à quatre ouvertures.

La fig. 67 représente cette disposition, en coupe verticale, faite par l'axe du robinet, et en coupe horizontale suivant la ligne 1-2.

Fig. 67.




Le robinet distributeur A est disposé à l'intérieur d'une boîte en fonte B, qui reçoit la vapeur de la chaudière par la tubulure $c$, et s'adapte au cylindre moteur au moyen d'un système de bride et de boulonnage ordinaire.

Comme le montre la section horizontale, la clef du robinet est creuse et divisée intérieurement par une cloison qui part du noyau et forme deux parties sans communication entre elles. Elle est percée, en outre, de quatre lumières $a$, $b$, $b'$ et $b^2$, dont une, celle $a$, correspond exclusivement avec l'une des deux divisions intérieures de la clef, laquelle division est ouverte à la partie supérieure, et communique avec l'intérieur de la boîte à vapeur B. Les trois ouvertures $b$, $b'$ et $b^2$, quant à la clef même, ne communiquent qu'entre elles.

D'autre part, le boisseau du robinet est percé de trois ouvertures C, C′ et D, qui sont les lumières de trois canaux communiquant, celui C avec le haut du cylindre, celui C′ avec le bas, et celui D avec le condenseur.

Maintenant la clef du robinet est animée d'un mouvement de rotation alternatif qui lui est communiqué à l'aide d'un excentrique circulaire, et par l'intermédiaire d'un mécanisme qui se relie à son prolongement E. Ce mouvement amène successivement l'orifice $a$ devant ceux C et C′, conduisant aux deux parties du cylindre : or cette partie de la clef étant exclusivement en rapport avec l'intérieur de la boîte B, dans laquelle nous avons dit que la vapeur afflue par la tubulure $c$, il s'ensuit que cette situation correspond à l'admission de la vapeur dans le cylindre par l'un des deux orifices C ou C′. Mais, en même temps, deux des lumières $b$ sont simultanément en rapport avec l'autre orifice et celui D du condenseur, ce qui permet l'échappement.

Si nous prenons pour exemple la position indiquée sur la fig. 67, on voit que, la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

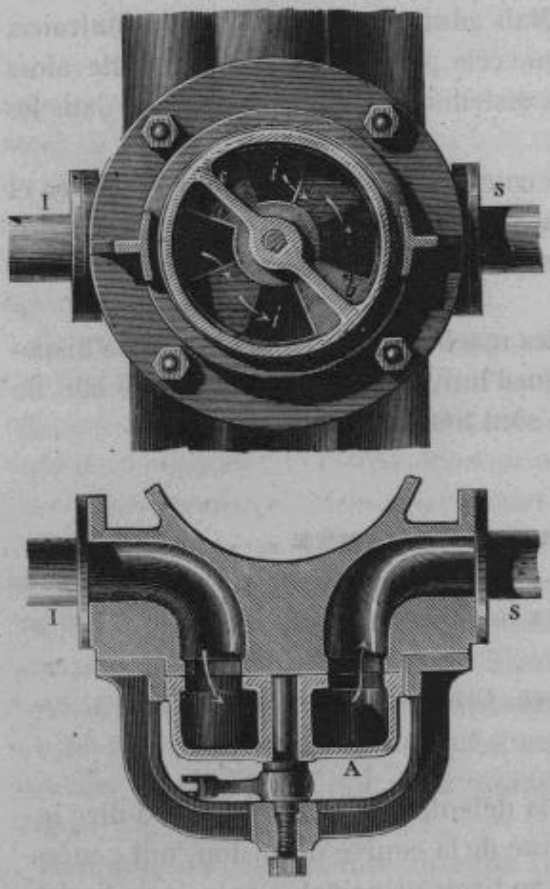
lumière *a* étant vis-à-vis de celle C, la vapeur s'introduit dans le cylindre par le canal correspondant. En même temps, l'échappement s'opère par le canal C′ mis en rapport avec celui D, du condenseur, par les lumières $b^2$ et *b* et par l'intérieur de la clef, la lumière *b′* étant dans ce moment sans usage.

Mais, lorsque la lumière *a* sera en regard de l'orifice C′ et lui distribuera la vapeur, l'échappement qui doit alors se faire par l'orifice C aura lieu par les lumières *b* et *b′*, celle *b′* étant en regard de l'orifice D, et celle $b^2$ neutre.

Nous ne devons pas insister davantage sur un appareil aujourd'hui complétement abandonné. Il est évident qu'un robinet semblable s'use, surtout inégalement, et donne lieu très-promptement à des fuites. Si, pour les éviter, on le serre un peu fortement, il offre alors une résistance considérable qui le rend très-difficile à faire mouvoir et le fait gripper.

Disques circulaires distributeurs. — M. Cavé, qui avait primitivement appliqué dans les machines oscillantes des robinets tournants pour distributeurs, a souvent employé, comme organe de distribution, il y a 25 à 30 ans, une plaque ou disque circulaire mobile, percée d'ouvertures en forme de secteur. Quelques constructeurs en ont également fait des applications, soit en imprimant au disque un mouvement de rotation continu, soit seulement en lui donnant un mouvement circulaire alternatif. On a plus tard modifié la construction de ce système en le remplaçant par une sorte de boîte circulaire mobile dont la fig. 68 peut donner une idée assez exacte.

Fig. 68.




La table des orifices, fondue avec le cylindre, est circulaire; elle est percée de quatre orifices, dont deux sont les lumières des canaux de distribution *i* et *i′* allant aux extrémités du cylindre, et les deux autres correspondent aux tubulures I et S, qui communiquent respectivement avec le générateur et avec le milieu d'échappement. Ces orifices ont la forme de secteurs qui convient évidemment à leur disposition sur une table circulaire.

La distribution est alors opérée au moyen d'une boîte circulaire creuse A, dont l'une des faces est évidée suivant deux ouvertures en segment qui ne laissent entre elles que deux parties pleines *a* et *b*, de la même dimension que les orifices *i* et *i′*. Et de plus, cette boîte est divisée intérieurement par une cloison *c*, laquelle rend exactement distinctes les deux par-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ties qui correspondent respectivement aux orifices I et S de l'arrivée et de la sortie de la vapeur.

Cette boîte étant maintenue d'une façon quelconque sur la table des orifices, et exécutant un mouvement oscillatoire qui amène les deux parties pleines $a$ et $b$, tantôt à droite et à gauche des orifices $i$ et $i'$, et tantôt sur ces orifices mêmes, on comprend que la distribution et la sortie de la vapeur s'opéreront très-régulièrement, et comme avec le tiroir ordinaire, l'une des deux parties de la boîte A correspondant spécialement à l'introduction de la vapeur et l'autre à son échappement.

Il n'est pas douteux que ce système de distribution, exécuté avec soin, et pour des machines de faible puissance, puisse fonctionner utilement; la forme cylindrique de la boîte mobile et son frottement plat ne donnent pas lieu aux mêmes inconvénients, par l'usure, que le robinet de Maudslay.

Mais, contrairement à ce qui arrive avec le tiroir ordinaire, que la vapeur fait appuyer fortement sur la table, la boîte circulaire A tend à se soulever, puisque la vapeur exerce son action entre son fond plein et la table de glissement. Il faudrait combattre cette action à l'aide d'un moyen quelconque qu'il serait, du reste, facile d'imaginer.

Nous venons de supposer que le cylindre étant fixe, c'est la boîte qui doit évidemment osciller pour opérer la distribution. Mais admettons maintenant le contraire, que ce soit le cylindre qui oscille, ainsi que cela peut avoir lieu, et la boîte alors complétement immobile, il est clair que la distribution se fera tout à fait dans les mêmes conditions.

Un seul changement doit avoir lieu dans ce cas-là. Les tuyaux I et S d'arrivée et de sortie de la vapeur devraient être rattachés directement à la boîte, en correspondance avec ses deux parties intérieures, au lieu de l'être au cylindre dont la table ne présenterait que deux orifices.

Il a été construit, en effet, quelques petites machines oscillantes sur cette disposition. Mais on en voit très-rarement aujourd'hui, parce qu'en définitive elle ne présente aucun avantage sur les tiroirs, qui sont toujours préférés.

## DISTRIBUTIONS AVEC DÉTENTE

### DÉTENTE FIXE DITE OPÉRÉE PAR RECOUVREMENT

(FIG. 6 A 8, PL. 10)

Les divers systèmes proposés pour opérer la détente de la vapeur, c'est-à-dire interrompre son introduction en un point donné de la course du piston, ont généralement pour caractère d'ajouter des organes au tiroir principal, ou plusieurs tiroirs, ou bien un tiroir simple commandé par une combinaison mécanique autre que l'excentrique circulaire, etc.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Cependant, en dehors de ces moyens, on peut opérer la détente avec un tiroir simple commandé par un excentrique circulaire, sans autre modification *qu'une notable augmentation de recouvrement des orifices par les bandes,* autrement dit, en donnant au tiroir un excès de longueur totale sur la dimension extrême des deux orifices d'introduction.

Ce procédé permet d'opérer une détente évidemment *invariable* et, avouons-le, qui semble peu efficace, ainsi que nous essayerons de le démontrer.

Néanmoins nous connaissons des constructeurs qui sont arrivés, par des tâtonnements intelligents, à très-bien régler une détente par recouvrement, même jusqu'à une limite maximum de l'expansion pendant le dernier tiers de la course du piston, et à obtenir des effets d'économie très-sensibles, comparativement à l'admission complète à pleine vapeur.

Si l'on examine la fig. 8 de la pl. 10, qui représente un tiroir T ainsi combiné, et dans la position où l'un des orifices est barbe à barbe avec la bande du tiroir, on voit que cette position peut correspondre, soit au commencement de l'introduction de la vapeur, qui est aussi le moment du départ du piston, soit à son interruption, c'est-à-dire au moment de la détente.

Si, par exemple, le tiroir descend, à partir de cette position, fig. 8, l'orifice va se découvrir : ce sera donc le moment de l'introduction et celui du départ du piston. Si, au contraire, le tiroir monte, c'est-à-dire s'approche vers sa position centrale, l'orifice va se trouver débordé et la vapeur n'entrera plus : ce serait alors le moment de la détente. En cherchant à se rendre compte de la position approximative du piston, dans ce deuxième cas, on est naturellement conduit à penser qu'il doit se trouver dans la deuxième moitié inférieure de sa course, attendu que lorsque le tiroir revient vers sa position milieu, le piston a ordinairement quitté le milieu de la sienne et court vers son extrémité.

Ce premier examen des choses nous montre, en résumé, que l'interruption de l'entrée de la vapeur a eu lieu avant que le piston n'ait terminé sa course et que cet effet est dû à l'excès de recouvrement du tiroir dont la bande a recouvert l'orifice dans le mouvement de retour, bien avant d'arriver à la position centrale, qui, dans les circonstances ordinaires, correspond à l'extrémité de la course du piston.

Pour obtenir, en résumé, la fermeture prématurée de l'orifice d'admission par le simple retour du tiroir, il faut donner aux bandes un grand excès de largeur sur ces orifices et ouvrir, dans le même rapport, l'angle de callage de l'excentrique; cet excès de largeur des bandes est d'autant plus grand que le point choisi pour la détente est plus rapproché du commencement de la course du piston. En pratique, il n'est guère possible d'obtenir ainsi une détente pendant plus du dernier tiers de la course du piston, ce que nous montrerons plus loin au moyen du tracé géométrique.

Mais déjà on peut comprendre que l'excès de recouvrement des bandes fait que les deux orifices se trouvent simultanément recouverts à partir du commencement de la détente, d'où il résulte que, s'il y a détente d'un côté, il y a compression de l'autre, puisque l'échappement est aussi interrompu. Il est vrai que pour atténuer

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cet inconvénient, on donne aux orifices un excès de largeur du côté de celui de la sortie, afin que l'échappement reste encore ouvert tandis que la détente s'effectue; mais alors on a une très-grande avance à l'échappement, et la vapeur commence à s'enfuir avant que le piston ait achevé sa course et qu'elle ait elle-même, par conséquent, produit tout son effet.

La position du tiroir, fig. 8, montre bien cette particularité. En le prenant dans sa phase montante, soit au moment de la détente, on voit de combien l'autre orifice, qui est figuré ainsi augmenté intérieurement, est encore découvert et laisse l'échappement se continuer quelque temps. S'il descend, au contraire, la même quantité d'ouverture de l'orifice inférieur constitue autant d'avance, en quelque sorte nuisible, à l'échappement.

Ainsi, pour produire une détente un peu prolongée par le système du recouvrement, il faudrait que l'échappement s'effectuât par une sortie particulière commandée par un mécanisme spécial, ce qui, du reste, a été fait par plusieurs constructeurs.

Malgré son faible résultat, la détente par recouvement rencontre beaucoup d'applications.

Elle est depuis longtemps employée sur les locomotives, auxquelles il serait difficile d'appliquer un mécanisme de détente offrant quelque complication (1).

On en fait aussi très-souvent l'application sur les appareils de mines, de navigation, et en général dans les machines à vapeur dont la construction doit être simple, et où l'on recherche, soit le bon marché d'établissement, soit la facilité de la conduite et des opérations.

Nous allons faire connaître maintenant un procédé graphique qui permet de trouver les dimensions relatives du tiroir et des orifices pour obtenir, avec ce système, un degré de détente déterminé (2).

Tracé géométrique de la détente par recouvrement. — Il est évident que, pour déterminer les dimensions d'un tiroir, combinées avec celles des orifices, pour produire un degré donné de détente, il faut tenir compte de bien des conditions dont plusieurs dépendent les unes des autres et sont également inconnues. Ainsi la largeur relative des bandes, d'où résultent les quantités de recouvrements, lesquelles permettront de déterminer les degrés d'avance, sont les conditions nécessaires, en résumé, pour trouver la course. Cependant, on ne possède d'abord que les données relatives au degré de détente et à la largeur de l'orifice d'introduction.

Ce problème, qui présenterait quelques difficultés pour être résolu par le calcul, peut l'être très-aisément à l'aide du tracé géométrique représenté par la fig. 6, pl. 10, et que nous allons essayer de faire comprendre.

On trace un cercle A B C D, d'un diamètre quelconque, représentant à la fois celui décrit par la manivelle et celui de la course de l'excentrique; puis on porte sur

(1) Les premières applications de la détente par recouvrement aux locomotives ont été faites en 1839, par M. Clapeyron, le savant ingénieur des chemins de fer de Saint-Germain et de Versailles. — (Voir à ce sujet la *Publication industrielle*, vol. III.)

(2) *Étude de la détente par recouvrement*, par M. J. Valet. — (*Publication industrielle*, vol. IX et XI.)

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

OC, considéré comme deuxième moitié de la course du piston, le point où la vapeur doit cesser d'être introduite : soit, comme exemple, le point *d* pris à la moitié du rayon et indiquant alors le piston aux 3/4 de sa course, qui sera ici le point choisi pour le commencement de la détente.

En traçant, par ce point *d*, un arc de cercle avec la longueur de la bielle pour rayon, son intersection E avec le cercle A B C D permet de tracer le rayon OE qui correspond alors très-exactement à la position qu'occupe la manivelle, le piston étant au point *d* de la course.

On joint ensuite le point E avec celui A par une corde sur laquelle on abaisse le diamètre perpendiculaire GF. Cette dernière opération complète le tracé ; car si l'on admet que la largeur de l'orifice d'introduction soit égale à la flèche FH, les dimensions cherchées sont les suivantes :

La portion restante GH, du même diamètre, est égale à la largeur de la bande ;

Le diamètre entier FG est égal à la course entière du tiroir ; c'est-à-dire que ces dimensions sont *proportionnelles* à celles que l'on cherche, et qui deviennent alors très-faciles à trouver par une simple proportion ou par un tracé.

Si l'on porte, en effet, la largeur donnée de l'orifice sur la flèche FH, de H en *a*, que par le point *a* on tire ensuite une parallèle *a b* à la corde AF, et que, par le point *b* d'intersection avec A E, on mène *b o* parallèle à A O, *ob* sera le rayon d'excentricité ou la demi-course réelle du tiroir ; traçant avec ce rayon le demi-cercle *a b c* décrit du point *o*, comme centre, le diamètre *a c* est égal, par conséquent, à la course entière du tiroir, et la portion H *c* est la véritable largeur de sa bande.

Ce tracé établit donc les relations fixes existant entre la largeur de l'orifice d'introduction, celle de la bande du tiroir et sa course. Il donne également l'angle de calage correspondant. Cet angle est, en effet, mesuré par celui EOG, formé par le rayon OE qui indique la position de la manivelle au moment de la détente, et par celui OG mené perpendiculairement à A E. Par conséquent, lorsque la manivelle se trouve en O E, le centre de l'excentrique est situé sur le rayon O G, et, pour la position du point d'introduction, la manivelle en O A, ce centre se trouverait sur O G′, l'arc E C G ayant été reporté en A F G′.

Cette méthode est fondée sur des remarques qu'il est très-aisé de faire d'après les études précédentes. Il est évident, en effet, que :

1° La flèche de l'arc de cercle engendré par le centre de l'excentrique, depuis le moment de l'introduction jusqu'à celui du commencement de la détente, *est égale à la largeur de l'orifice,* puisque le tiroir doit juste parcourir cette largeur dans les deux sens pour ouvrir et fermer complétement l'orifice ;

2° Cet arc est d'un même nombre de degrés que celui décrit par la manivelle, depuis le point mort jusqu'à la position occupée par le piston, à l'endroit où la détente doit commencer, puisque la manivelle et l'excentrique marchent ensemble ;

3° L'angle de calage est égal *à la moitié de la différence entre la circonférence et ce même arc de cercle,*

Pour démontrer cette dernière propriété, il faut supposer que le diamètre F G (fig. 6) soit l'axe de la marche du piston, et, par conséquent, celui de la marche du



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tiroir, et que l'orifice soit alors F H. Dans cette hypothèse, le centre de la manivelle sera en G et le centre de l'excentrique en A, au moment où il va commencer à découvrir l'orifice ; or, dans cette position, l'angle de calage est tout naturellement G O A, tandis que l'on a vu précédemment qu'il est égal à celui E O G; mais ces deux angles sont égaux, attendu que le centre de l'excentrique parcourant l'arc A F E pour ouvrir et fermer l'orifice, cet arc est coupé en deux par l'axe F G, représentant, dans l'hypothèse actuelle, la ligne des points morts du piston.

Donc chacun de ces deux angles G O A ou E O G est bien l'angle de calage, et moitié de la différence entre la circonférence entière et l'arc A F E parcouru par l'excentrique pour ouvrir et fermer l'orifice d'introduction.

Maintenant, les dimensions du tiroir, de la course et de son angle d'avance, qui ne résulte que du simple recouvrement de la bande sur l'orifice, ainsi déterminées supposent les bandes barbe à barbe avec l'orifice, au moment de l'introduction, et sans aucune avance réelle à l'introduction ni à la sortie. Mais sans faire d'autre opération, il suffit de diminuer la largeur trouvée pour la bande d'une quantité égale à l'avance à l'introduction, et de donner ensuite une dimension telle à l'écartement intérieur des bandes que le recouvrement sur chaque orifice soit partagé pour produire une avance double à l'échappement : la course n'en sera pas changée; mais l'angle total de calage devra être augmenté de l'avance à l'introduction, ce qui est peu de chose. Dans tous les cas, cette modification a cela de particulier qu'elle est sans influence sur le point choisi pour le commencement de la détente.

Empressons-nous d'ajouter qu'il n'est question ici que de l'avance simple à l'échappement et non pas de celle qui résulterait d'une augmentation intérieure de la largeur des orifices pour diminuer la compression, ainsi qu'on l'a vu plus haut.

Nous avons dit en effet (p. 367), que la course d'un tiroir est égale à :

$$h = l + o + s - i;$$

Or, la largeur de la bande étant diminuée de $i$, et l'avance à la sortie égalant $2\,i$, l'expression de la course devient :

$$h = (l - i) + o + (2\,i - i) = l + o;$$

Mais dans les conditions du tracé où chacune des avances est supposée égale à zéro, la course est aussi exprimée par :

$$h = l + o,$$

Ce qui démontre l'égalité de la course dans les deux cas.

Il en est de même pour trouver l'augmentation de l'avance linéaire qui détermine l'angle de calage modifié. Nous avons vu (p. 366) que cette avance A est égale à :

$$\mathrm{A} = \frac{l + a - o}{2} + i;$$

En faisant les deux avances doubles l'une de l'autre, et se rappelant (p. 367) que :

$$a = s - i; \text{ d'où } a = 2\,i - i = i,$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

on trouve, pour cette avance totale, avec les dimensions modifiées du tiroir :

$$A = \frac{l - i + o + i}{2} + i = \frac{l + o}{2} + i;$$

Mais, dans les conditions du tracé, les avances égales à zéro, on aurait eu :

$$A = \frac{l + o}{2} :$$

Par conséquent, il faut lui ajouter $i$, l'avance admise à l'introduction, pour lui donner sa véritable valeur par suite de la modification.

Ces règles sont précises, mais peut-être un peu abstraites : aussi en donnerons-nous bientôt une application. Auparavant, voyons la correction nécessaire à faire en raison de l'influence de la bielle.

En se reportant au tracé, fig. 6, on voit que, dans la position du piston choisie pour le moment de la détente, la manivelle est en OE et le piston en $d$, en tenant compte de la bielle, ce qui suppose cette manivelle dans la plus petite des deux moitiés inégales de sa course (p. 341). Or, sa position opposée et symétrique est le prolongement $OE^2$ du même rayon, ce qui, en tenant compte de l'influence de la bielle, met le piston en $d^2$, tandis que le 1/4 exact de sa course de ce côté est en $d'$, et la position correspondante de la manivelle en OE′.

Cela signifie, en résumé, que pour les deux positions semblables du piston, sur lesquelles on doit régler la détente, la manivelle présente un angle de variation égal ici à $E' O E^2$. Or, l'excentrique marchant comme la manivelle, il s'ensuit que la détente réglée pour le 1/4, du côté de $d$, ne commencerait que le piston en $d^2$, pour l'autre côté au lieu du 1/4 juste qui est $d'$.

En dehors des tâtonnements qu'un constructeur peut essayer pour corriger cette différence, par une inégalité de largeur des deux bandes ou autrement, nous conseillons de partager, dès le principe, la différence en deux, en plaçant, pour faire le tracé et pour le point de détente, la manivelle sur la bissectrice de l'angle $E' O E^2$ de la différence entre les deux positions symétriques du piston pour les deux sens du mouvement.

La détente commencera alors un peu avant que le piston ait atteint la position normale adoptée pour l'un des deux sens de la marche, et un peu après pour l'autre, sans que cette différence puisse être préjudiciable à la bonne marche de la machine.

En somme, la détente par recouvrement est difficile à obtenir, même pendant la moitié de la course du piston, pour deux motifs :

1° Par la compression qui dure aussi longtemps que la détente, à moins d'augmenter intérieurement la largeur des orifices, ce qui fait alors que la vapeur active s'échappe du cylindre bien avant que le piston ait terminé sa course;

2° Par l'énorme dimension des bandes du tiroir et du tiroir même, d'où il résulte une augmentation générale de la boîte de distribution et de l'excentrique, ainsi que de la pression que le tiroir supporte et qu'il faut vaincre pour le faire mouvoir.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour terminer cette théorie, nous donnons une table des dimensions relatives du tiroir et de sa course pour divers degrés de détente, en supposant à l'orifice une largeur fixe de 20 millimètres.

**TABLE**

DES DIMENSIONS RELATIVES D'UN TIROIR, DE SA COURSE ET L'ANGLE DE CALAGE, POUR OPÉRER, A DIVERS DEGRÉS, UNE DÉTENTE PAR RECOUVREMENT.

| DURÉE de la détente relativement à la course totale du piston. | DIMENSIONS DE LA COURSE ET DE LA BANDE, ET ANGLE DE CALAGE pour un orifice de 20 millimètres de largeur. | | | | OBSERVATIONS. |
|---|---|---|---|---|---|
| | Largeur de la bande. | Course. | Rapport des largeurs de la bande et de l'orifice. | Angle de calage. | |
| | millim. | millim. | | degr. et min. | Toutes ces dimensions résultent directement de ce que fournirait le tracé, sans la correction relative aux avances réelles à l'introduction et à l'échappement, et sans tenir compte de l'influence de la bielle, laquelle est supposée infinie. |
| 6/10 | 158 | 178 | 7,9 | 140° 50′ | |
| 5/10 | 116 | 136 | 5,8 | 135 » | |
| 4/10 | 88 | 108 | 4,4 | 129 10 | |
| 3/10 | 68 | 88 | 3,8 | 123 10 | |
| 2/10 | 52 | 72 | 2,6 | 116 30 | |
| 1/10 | 38 | 58 | 1,9 | 108 20 | |

Pour toute autre largeur d'orifice, il suffit de multiplier les nombres de la table par le rapport entre cette largeur et 20 mil. qui sert de base.

Ainsi, pour 25 mil. par exemple, et la détente 4/10, quelles seraient la course et la bande?

On trouve pour la course :

$$108 \times \frac{25}{20} = 135$$

D'où la bande, qui est théoriquement égale à la différence de la course avec l'orifice, devient :

$$135 - 25 = 110.$$

Ce tableau, sur l'exactitude duquel on peut compter, montre bien dans quelles limites on peut appliquer le système de détente par recouvrement. Ainsi, pour la détente à moitié il faudrait donner à la largeur de la bande près de six fois celle de l'orifice, d'où il est facile de prévoir les dimensions totales du tiroir et de la boîte. Il se produirait aussi une compression très-longue et difficile à atténuer, malgré le rélargissement intérieur des orifices.

C'est donc avec raison que l'on regarde ce moyen comme inapplicable, dans les grandes détentes, même pour une durée égale à la moitié de la course du piston.

APPLICATION DES DONNÉES PRÉCÉDENTES (fig. 6, 7 et 8). — Les fig. 7 et 8 représentent les positions principales d'un tiroir T construit à l'aide du tracé fig. 6, pour pro-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

duire la détente pendant 1/4 de la course (point $d$ du tracé fig. 6) l'orifice ayant 15 millimètres de largeur.

Les dimensions de ce tiroir sont telles que les donne le tracé, et avant la diminution de la largeur de la bande pour l'avance réelle à l'introduction.

La fig. 7 indique le tiroir dans deux positions. L'une, en coupe, est celle exactement centrale, c'est-à-dire le tiroir débordant également les orifices $e$ et $e'$. L'autre, suivant le profil en ligne ponctuée, correspondant au moment où la vapeur va s'introduire par l'orifice $e'$, ou bien, au moment de la détente, suivant que l'on suppose le tiroir montant ou descendant.

La fig. 8 représente de même deux positions. Le tracé en coupe correspond au tiroir barbe à barbe avec l'orifice $e$, au moment de l'introduction ou de la détente suivant qu'il est supposé descendre ou monter. La position représentée par le profil simple correspond à l'une des extrémités de la course du tiroir.

Cette dernière phase du mouvement indique que les orifices $e$ et $e'$ ont été élargis intérieurement pour diminuer la durée de la compression, ainsi que cela a été expliqué plus haut. On voit qu'en effet le tiroir ne découvre l'orifice $e$ que de sa largeur effective de 15 millimètres, qui a servi de base au tracé, et que cet orifice possède un excès de largeur que le tiroir n'atteint jamais. Cet excès a donc pour effet de laisser l'échappement continuer encore quelque temps, après le point de détente, comme on peut le remarquer par le tiroir en coupe pleine (fig. 8), qui ferme complétement l'orifice $e$ et découvre encore celui $e'$ précisément de son excès de largeur. Si cette position est prise, au contraire, pour le moment de l'introduction par l'orifice $e$, il en résulte que l'échappement a déjà commencé depuis un temps relativement long par l'orifice $e'$.

Sur chaque fig. 7 et 8, la course du tiroir est indiquée par un cercle décrit des points $o'$ et $o^2$, pris sur la ligne des centres pour se repérer avec le milieu de la longueur du tiroir.

Nous y avons également indiqué les positions du rayon de l'excentrique en correspondance avec les profils du tiroir dans les phases différentes de son mouvement, et suivant le sens de rotation indiqué par les flèches.

Le rayon $o'\,g$ de l'excentrique, fig. 7, correspond au profil en lignes ponctuées, et pour l'introduction par l'orifice $e'$. Le rayon $o'\,h$ correspond à la même position, mais au retour et au moment de la détente. Les deux positions centrales, correspondant au tracé en coupe, sont indiquées par les rayons $o'\,i$ et $o'\,i'$.

Enfin les positions analogues, fig. 8, sont indiquées par les rayons $o^2\,g'$ et $o^2\,h'$, pour le tiroir tracé en coupe, $o^2\,g'$ pour l'introduction et $o^2\,h'$ pour la détente. La position extrême inférieure, tracée en profil simple, correspond à $o^2\,i^2$ pour le rayon de l'excentrique.

On peut remarquer que le tiroir, dans ses positions extrêmes, recouvre en partie l'orifice d'échappement. Cela tient tout simplement à une économie réalisée dans la longueur totale du tiroir et de sa boîte, ce qui peut d'autant mieux se faire, que l'on donne d'abord à cet orifice un excès de largeur et qu'après tout il reste continuellement découvert, en tout ou en partie.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Voici maintenant les dimensions du tiroir relativement à l'orifice donné :

| | |
|---|---|
| Largeur de l'orifice..... | 15 millimètres. |
| « de la bande, d'après le tracé..... | 43 |
| Course totale du tiroir..... | 58 |
| Largeur intérieure du tiroir d'après les orifices et leur intervalle..... | 52 |

Si l'on voulait ensuite donner 1 mil. d'ouverture à l'introduction, en en supposant le double à l'échappement, à part l'élargissement intérieur des orifices, pour ne pas changer la course, la bande serait réduite à 42 mil., suivant ce qui a été dit ci-dessus (p. 386), et l'intérieur du tiroir devrait être porté à 54 au lieu de 52. L'angle d'avance serait ouvert de 1 mil., mesuré parallèlement à la marche du tiroir, toujours conformément à ce qui a été dit à cet égard.

On aurait donc, pour vérifier la course totale :

$$h = 42 + 15 + 2 - 1 = 58^{\text{mil.}},$$

même valeur que celle trouvée directement.

### DÉTENTE FIXE OPÉRÉE PAR UNE GLISSIÈRE

(FIG. 1 ET 2, PL. 11)

On opère la détente dans de très-bonnes conditions en employant la disposition que représente la fig. 1re de la pl. 11. Ce système se compose d'abord d'un tiroir A d'une forme un peu différente de celui décrit précédemment. Au lieu de se terminer à l'extérieur par le bord des bandes, il présente une masse d'une forme prismatique dans laquelle sont ménagées deux lumières $a'$ et $b'$ de même largeur que les orifices de distribution $a$ et $b$, et qui le traversent de part en part ; leur écartement étant juste égal à la dimension extérieure qu'aurait un tiroir simple, il en résulte qu'isolément ce tiroir fonctionne exactement de même; ces lumières viennent, en effet, coïncider aux extrémités de la course du tiroir avec chacun des orifices, et la communication entre la boîte de distribution et le cylindre est établie absolument comme si les bouts fermés qui déterminent ces lumières n'existaient pas.

Mais cette forme est motivée par le jeu d'un registre ou d'une glissière B qui se meut sur la face supérieure du tiroir, laquelle est, à cet effet, parfaitement dressée; cette glissière reçoit son mouvement d'un excentrique circulaire complétement indépendant de celui qui commande le tiroir principal, si ce n'est qu'ils sont montés tous deux près l'un de l'autre sur le même arbre moteur de la machine.

On comprend qu'en combinant d'une manière convenable les dimensions de cette glissière et sa course, on peut arriver à fermer les orifices $a'$ et $b'$ dans de certains moments où, par leur propre position relativement à ceux $a$ et $b$, ils laisseraient encore pénétrer la vapeur dans le cylindre s'ils restaient découverts.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On opère ainsi la détente par la glissière qui vient à propos empêcher la vapeur remplissant la boîte P de traverser le tiroir et d'arriver aux orifices. Cette disposition ne permet évidemment de produire qu'une détente fixe, suivant les conditions arrêtées d'avance, en déterminant les conditions de marche de la glissière. Mais on peut choisir le moment de la détente à volonté, et, pour ainsi dire, avec autant de facilité pour un point quelconque de la course du piston, ce que nous avons reconnu presque impossible par la méthode d'un seul tiroir à recouvrement.

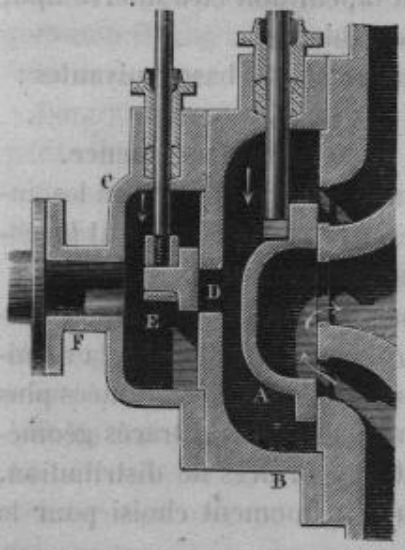
Avec la disposition qui nous occupe actuellement, rien ne vient modifier les conditions de l'échappement qui peut évidemment s'effectuer comme à l'aide du tiroir simple, et cela quel que soit le degré de détente.

En somme, le seul inconvénient qu'on puisse lui reprocher est d'exiger deux excentriques : nous admettons, pour l'instant, la question de variabilité mise de côté, condition qui ne s'obtient pas aisément, comme nous le montrerons bientôt.

Comme détail de construction, nous avons peu de chose à en dire.

La transmission du mouvement au tiroir principal A (fig. 1, pl. 11) se fait, comme à l'ordinaire, par la tige Q qui traverse la boîte à vapeur, et se rattache à un châssis en fer R dans lequel le tiroir est librement enclavé, afin de lui permettre, sous l'influence de la pression de la vapeur, de s'appuyer exactement sur la table des orifices.

Fig. 69.




La glissière est commandée de même par la tige S, qui porte deux embases engagées entre deux oreilles ouvertes en fourches et fondues avec la glissière. Ce mode d'assemblage a encore pour but de rendre la glissière libre de s'appuyer sur le tiroir, par l'effet de la pression; elle est seulement guidée de chaque côté par des rebords dressés parallèlement et fondus avec le tiroir principal.

On a fait usage d'une disposition analogue à celle-ci, qui, comme l'indique la fig. 69 ci-contre, consiste à employer deux boîtes à vapeur contiguës communiquant de l'une à l'autre par un orifice; ce dernier est alors muni d'un registre spécial, commandé à part du principal tiroir, et qui vient à propos interrompre la communication d'une boîte à l'autre.

On voit que la distribution est opérée par un tiroir ordinaire A, placé à l'intérieur de la boîte B, qui reçoit la vapeur d'une seconde boîte C avec laquelle elle communique par un orifice D. Le registre E venant à couvrir cet orifice, la vapeur qui afflue continuellement dans la première boîte par le conduit F, ne peut plus pénétrer dans la seconde, et la détente commence dans le cylindre.

L'effet qui en résulte est évidemment moins immédiat que lorsque la glissière est placée directement sur le tiroir de distribution percé de lumières, dont la capacité est bien inférieure à celle de la boîte B qui vient s'ajouter au volume du cylindre à vapeur et modifier le rapport de la détente.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Conditions de marche de la glissière de détente (fig. 1re, pl. 11). — Les conditions d'établissement de la glissière dont nous venons d'expliquer les fonctions, présentent quelques difficultés pour les déterminer, sans tâtonnements, et les mettre en rapport avec le degré de détente qu'on veut lui faire produire. Cependant cette opération est possible directement; nous allons faire connaître la méthode que nous proposons à cet effet.

Si l'on examine l'ensemble des fonctions d'une telle glissière, on ne tarde pas à reconnaître qu'elles dépendent de conditions réciproquement variables; ainsi :

1° Pour un même degré de détente, et le même tiroir principal, on peut changer inversement la longueur et la course de la glissière soit, par exemple, diminuer sa longueur et augmenter sa course, *et vice versâ ;*

2° La longueur et la course seront d'autant plus grandes que la détente doit être plus prolongée, et réciproquement;

3° Enfin, considérant les phases du mouvement de la glissière en raison des vitesses variables qui lui sont transmises par le mouvement transformé de l'excentrique, on trouve que le moment de la vitesse maximum doit être appliqué à celui de la fermeture de l'orifice, lorsque le passage de la vapeur doit être interrompu, opération qui doit s'effectuer aussi rapidement que possible.

D'après ces considérations, nous adoptons, dès le principe, les bases suivantes :

1° Les deux excentriques égaux ;

2° La glissière au milieu de sa course au moment où la détente commence.

Ces deux bases admises, nous pouvons, sans difficulté, déterminer toutes les autres conditions de la marche du tiroir et de la glissière, et particulièrement *la longueur* de cette dernière et l'angle de calage relatif des deux excentriques.

En effet, on commence par tracer le tiroir A, comme s'il devait fonctionner isolément. Ses dimensions, sa course et son angle de calage, par rapport à la manivelle motrice, seront donc déterminés exactement suivant les règles données plus haut (p. 362). Ensuite on déterminera, à l'aide des mêmes règles et tracés géométriques, la position qu'il doit occuper, par rapport aux orifices de distribution, par rapport à la position du piston dans le cylindre au moment choisi pour la détente.

C'est cette phase qui est représentée fig. 1re, où le tiroir A est tracé en un point tel que l'orifice d'admission $a$ est découvert d'environ les 3/4 de sa largeur, position qui correspond, d'après le sens du mouvement indiqué par la flèche, au premier 1/5 de la course du piston. (Voir fig. 1re, pl. 10.) On suppose, en effet, que le mécanisme actuel soit réglé pour la détente, correspondant à la durée des 4/5 de la course.

Puisque cette position est celle du moment d'interruption de l'entrée de la vapeur, la lumière $a'$ doit être alors couverte, mais seulement barbe à barbe, par la glissière B; comme cette phase de ses fonctions doit correspondre au milieu de sa course, suivant les bases adoptées ci-dessus, sa longueur est ainsi déterminée, attendu que son axe de mouvement est celui même FG du tiroir, qui résulte de la symétrie de leurs mouvements par rapport aux orifices de distribution.

Ainsi, la glissière doit avoir pour longueur : *le double de la distance entre l'axe gé-*

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

*néral* F G *et le bord extérieur de la lumière a' dans la position qu'elle occupe au moment de la détente.*

La distance des points de détente peut être comptée sur les orifices mêmes *a* et *b*, si, comme dans notre exemple, les lumières du tiroir sont percées parallèlement à l'axe F G. Mais si elles sont déviées, comme cela se fait presque toujours (voir la fig. 3, pl. 11), cette distance sera nécessairement mesurée sur le dessus du tiroir et réduite, tout naturellement, de la quantité d'obliquité des deux lumières.

La détermination pure et simple des positions du tiroir et de la glissière permet d'atteindre complétement le but proposé, car il ne reste plus qu'à trouver l'angle de calage de leurs deux excentriques : nous allons voir qu'il l'est déjà.

En effet, si du centre *o* du mouvement du tiroir, fig. 1re, on décrit le cercle qui représente sa course, par la position même qu'on lui a donnée on peut tracer le rayon de l'excentrique; il suffit, évidemment, de joindre l'intersection *m* de son axe et du cercle avec le centre : le rayon *o m* est celui de l'excentrique correspondant à la position actuelle du tiroir.

Or, la position du rayon de l'excentrique de la glissière B est connue, puisque celle-ci est en ce moment au milieu de sa course; et si d'un autre point *o'* de l'axe commun F G on trace le cercle indiquant la course de la glissière, lequel a été admis égal au premier, le rayon du second excentrique correspond à *o' n* sur l'axe F G.

Donc l'angle de calage réciproque des deux excentriques est celui *m o n'* formé par le rayon *o m* de l'excentrique du tiroir avec l'axe F G du mouvement général.

En adoptant de semblables conditions, on peut constater par leur analyse les propriétés suivantes :

1° Etant admis que la glissière B occupe le milieu de sa course au moment de la détente, *le rayon de l'excentrique n'a rien d'absolu comme grandeur, et l'angle de calage réciproque des deux excentriques ainsi que la longueur de la glissière sont seuls invariables pour un même degré de détente;*

2° Mais si ce rayon était plus petit que celui de l'excentrique du tiroir, autrement dit, si la course de la glissière était plus faible que celle du tiroir, l'opération ne s'effectuerait pas bien, attendu que la lumière couverte par la glissière serait démasquée avant que le tiroir fût revenu au milieu de sa course, et la vapeur pourrait rentrer de nouveau dans le cylindre;

3° L'égalité des deux excentriques correspond au minimum de course à donner à la glissière; mais ce minimum est suffisant et a pour résultat que, lorsque le tiroir est revenu au milieu de sa course, la lumière qui a été masquée pour la détente, l'est encore et même est débordée par la glissière d'une quantité égale au plus grand recouvrement du tiroir (p. 364).

La démonstration de ces théorèmes serait fastidieuse ici et d'une utilité contestable pour les praticiens; d'ailleurs, le tracé géométrique, fig. 2, dont nous allons dire quelques mots, permettra aux personnes désireuses de se rendre un compte exact de faire elles-mêmes cette étude.

Nous ajouterons seulement que la course de la glissière peut être plus grande que celle du tiroir, mais qu'elle ne doit pas être plus petite, afin de remplir cette



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

condition de première importance, *que la lumière a' ou b' du tiroir, masquée pour la détente ne soit, dans aucun cas, de nouveau démasquée par la glissière, avant que le tiroir ait lui-même complétement recouvert l'orifice d'introduction.*

Un peu plus de course à la glissière qu'au tiroir ne peut être qu'avantageux, et rend encore plus rapide l'obstruction de la lumière au moment de la détente.

Tracé géométrique de la détente fixe (fig. 2, pl. 11). — On peut vérifier la marche de la glissière très-aisément à l'aide d'un tracé basé sur le même principe que celui représenté fig. 1re, pl. 10. C'est, en effet, par un tracé analogue (fig. 2, pl. 11), que nous allons suivre la marche relative du tiroir A et de la glissière B dont l'ensemble est représenté fig. 1re, et dont on vient de voir les conditions fondamentales.

Le tiroir A est figuré rigoureusement suivant ses dimensions en longueur, les seules qui aient une influence dans sa marche. Il est représenté exactement dans sa position centrale par rapport à la table des orifices de distribution $a$ et $b$, leur axe commun étant toujours F G.

Supposant, comme pour la fig. 1re, pl. 10, un certain nombre de positions différentes de l'excentrique, on détermine la marche des lumières $a'$ et $b'$, par rapport aux orifices $a$ et $b$, au moyen des quatre courbes semblables à H I J, dont on a vu les propriétés. Ces courbes permettent en effet de suivre l'ouverture progressive des orifices d'introduction pendant un coup de piston; faisons remarquer, toutefois, qu'ici l'angle de calage avec la manivelle n'étant pas en question, ces courbes sont régulières, ce qui ne change rien à ce que l'on cherche, c'est-à-dire la relation pure et simple du tiroir et de la glissière de détente.

Ceci fait, d'un point $o$, pris à un endroit quelconque de l'axe F G, on décrit un cercle d'un diamètre $m n'$ égal et commun aux courses du tiroir et de la glissière; puis, sur une tangente $d e$ à ce cercle, on indique l'un des orifices d'introduction, soit celui $a$, par exemple, en observant son rapport exact de position, quant à la quantité de recouvrement, comme si $o m$ représentait, pour un instant, l'arête intérieure de la lumière $a'$, le tiroir étant au milieu de sa course, conformément à ce qui a déjà été expliqué (p. 371).

Dans cette situation où la marche du tiroir est bien mise en rapport avec l'orifice d'introduction par le cercle qui représente sa marche, on trace une verticale $n$ L au point où l'arête intérieure de la lumière $a'$ doit être parvenue quand la détente devra commencer, c'est-à-dire lorsque cette lumière doit être complétement masquée par la glissière. Cette verticale coupe le cercle en deux points $m'$ et $n$; le rayon $o m'$ correspond évidemment à la position de l'excentrique du tiroir au moment de la détente; mais puisqu'en ce même moment la glissière doit être au milieu de sa course, le rayon de son excentrique se trouve sur l'axe même, en $o n'$.

Donc, l'angle relatif de calage des deux excentriques est $n' o m'$; et comme l'angle $m o n$ lui est égal, il s'ensuit que le rayon $o n$ indique la position de l'excentrique de la glissière lorsque le tiroir occupe le milieu de sa course, ainsi qu'il a été figuré sur le tracé.

Pour déterminer ensuite la courbe de marche de la glissière, comme on l'a fait pour le tiroir, il suffira d'abord de se souvenir que le cercle, dont le centre est $o$,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

indiquant leur marche commune, est rapporté comme repère au milieu de leur longueur, ainsi qu'on l'a supposé fig. 1re de cette même pl. 11. Par conséquent, le rayon de la glissière étant en $on$, par rapport à la position actuelle du tiroir, le milieu de la longueur de la glissière est en ce moment sur la verticale $n$ L, d'où L est considérée comme point de départ de la glissière simultanément avec celui H du tiroir et d'où part en effet sa courbe de marche.

Cette courbe doit donc partir du point L. Pour l'obtenir, on divise en un certain nombre de parties égales, par des droites parallèles, l'intervalle de celles J J³ et H H³, qui limitent, pour un demi-tour de l'excentrique, le développement des courbes du tiroir; puis on divise la demi-circonférence du cercle en un même nombre de parties aux points 1, 2, 3, 4, etc., d'après le diamètre $nn^2$, comme point de départ, puisque c'est sur ce diamètre qu'est situé le rayon $on$ de l'excentrique de la glissière, lorsque celui du tiroir est en $om$, position d'après laquelle les courbes du tiroir ont été déterminées.

La projection, parallèlement à F G, des points de division du cercle sur les droites divisant l'intervalle de celles H H³ et J J³, déterminent alors des intersections (chiffre pour chiffre) qui, étant réunies, donnent la courbe LMN, correspondant à la marche du milieu N de la glissière B.

Il ne reste plus qu'à donner à cette glissière la longueur qu'elle doit avoir et que, d'ailleurs, nous connaissons déjà. Nous avons démontré, en effet (p. 392), que la longueur L′ L² de la glissière doit être égale à la distance des points de détente indiqués sur les lumières $a'$ et $b'$, plus le double de la largeur de ces lumières. Comme ici les lumières sont percées d'équerre et répètent exactement sur la face supérieure du tiroir les orifices $a$ et $b$, on tracera sur l'un d'eux $a$, la ligne $m^2 m^3$, correspondant au point de détente, et la moitié de la longueur de la glissière B, dont le milieu est L, sera égale, par conséquent, à la distance de cette ligne à l'axe FG, plus la longueur d'une lumière; soit :

$$\text{L}' \text{L}^2 = 2 (\text{G } m^2 + \text{H H}').$$

Maintenant on complète le tracé, en reportant la courbe LMN en L′M′N′ et en L²M²N², à partir des extrémités de la glissière; la marche de celle-ci est alors indiquée par ces courbes, dont les positions, par rapport à celles du tiroir, permettent de reconnaître aisément la marche relative de ces deux organes.

Ainsi il est clair que l'orifice d'admission $a$, pour cette phase de la distribution, restera découvert jusqu'au moment où les courbes se croisent en M′, qui est en effet celui de la détente, ce dont il est facile de se convaincre, attendu que la ligne de détente $m^2 m^3$ vient faire intersection en $m^3$ avec la courbe H′ I′ J′, et avec la droite M′M² qui est la représentation de la glissière dans cette position.

Enfin on reconnaît que la lumière $a'$ ne sera pas de nouveau démasquée puisque les deux courbes L′M′N′ et H I J ne se rencontrent pas avant que le tiroir soit revenu à sa position centrale, auquel point elles conservent encore une petite distance N′J, qui constitue la quantité de recouvrement de la glissière sur la lumière $a'$ dans cette position. C'est, du reste, celle H³ L² pour la lumière opposée $b'$.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

D'autre part, il est visible, en examinant la courbe $L^2M^2N^2$ que la lumière $b'$ se découvre de plus en plus, et qu'à la prochaine position centrale du tiroir cette lumière sera toute disposée pour l'admission, l'extrémité correspondante de la glissière se trouvant alors en $N^2$, comme l'autre extrémité est actuellement en L', etc.

Quant aux courbes $L'fN'$ et $L^2f'N^2$ indiquées en traits ponctués, elles correspondent au mouvement de retour de la glissière, et indiqueraient la même chose que les autres, pour l'admission par l'orifice $b$, si les courbes de retour du tiroir avaient été tracées, ce qui n'a pas été fait afin de simplifier la figure.

Mais elles représentent un autre fait très-caractéristique : elles montrent la marche que suivrait la glissière, dès son point de départ actuel si la détente, ayant toujours lieu au même endroit $m^2m^3$, devait s'effectuer au retour du tiroir au lieu de commencer dans la première partie de son mouvement : c'est-à-dire si, au lieu de détendre pendant plus de la moitié de la course du piston, comme nous l'avons admis, on détendait seulement pendant moins de cette moitié.

Dans cette circonstance, l'angle de calage serait seul changé. Au lieu d'être $mon$, il serait $mom'$, aigu au lieu d'être obtus; mais on voit qu'il serait déterminé, comme précédemment, par l'intersection de la ligne L $n$ avec le cercle des courses. Cette ligne produisant deux intersections $m'$ et $n$, il suffit de choisir entre les deux, suivant que le point de détente correspond à l'aller ou au retour du tiroir : l'angle aigu correspond à la première de ces conditions et celui obtus à la seconde.

En admettant le calage à angle aigu, on voit que les courbes H I J et $L'fN'$ se croisent en $M^3$, qui est encore le point de détente en correspondance avec celui indiqué par la verticale $m^2m^3$, mais cette fois dans le mouvement de retour du tiroir.

Si nous rapprochons les différentes propriétés que nous avons pu constater dans le cours de cette démonstration, nous remarquons :

1° qu'une glissière d'une longueur déterminée est capable de produire le même degré de détente avec des courses variables, à condition *que l'angle de calage relatif des deux excentriques reste invariable* dans tous les cas;

2° Qu'une glissière d'une longueur déterminée pourra produire des degrés différents de détente, en effectuant une même course, *mais en faisant varier l'angle de calage relatif* des deux excentriques;

3° Qu'avec le même angle de calage et la même course on change le degré de la détente *en faisant varier la longueur de la glissière.*

Nous verrons que ces deux dernières remarques ont été utilisées pour établir une détente variable par cette même disposition du tiroir avec glissière mobile, mais, dans un cas, l'angle de calage relatif variable à volonté, et dans l'autre la longueur de la glissière seule variable.

En résumé, une analyse plus complète de ce système de distribution à détente serait fort longue et toujours difficile; nous ne pouvons donc que la terminer ainsi, en faisant remarquer que, si l'analyse est difficile, nous en rendons le principe fort simple, pour une détente fixe déterminée, et réduit à ceci :

1° Donner à la glissière une course égale, au minimum, à celle du tiroir;

2° Donner pour longueur à cette glissière : deux fois la distance du point de dé-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tente à l'axe, mesuré sur le dos du tiroir, plus le double de la largeur des lumières, sur la même face de ce tiroir ;

3° Supposer la glissière au milieu de sa course au moment de la détente ;

4° Régler l'angle de calage relatif des deux excentriques par la simple représentation graphique du tiroir et de la glissière dans le moment de la détente, en figurant la position correspondante du rayon de l'excentrique du tiroir, lequel rayon forme avec la ligne perpendiculaire à la table du tiroir l'angle cherché (fig. 1re, pl. 11).

5° Dans tous les cas, déterminer le point de détente d'après la position du piston, et en tenant compte de l'influence de la bielle, suivant les principes énoncés pour la détente par recouvrement (p. 387).

### DÉTENTE FIXE PAR UNE GLISSIÈRE MOBILE PERCÉE DE LUMIÈRES

(FIG. 3 ET 4, PL. 11)

On a établi des distributions à détente fixe différant seulement de la précédente en ceci que la glissière, au lieu d'être une simple plaque pleine, était percée de deux lumières comme le tiroir principal.

La fig. 3 de la pl. 11 représente cette variété de la détente par une glissière ; elle montre aussi, ce qui peut avoir lieu dans tous les cas, les lumières $a'$ et $b'$ du tiroir inclinées dans le but de diminuer la dimension de la glissière, et, par conséquent, sa résistance au mouvement sous l'influence de la pression de la vapeur.

Ce mode de construction donne plus de latitude que le précédent pour la combinaison réciproque du double mouvement du tiroir et de la glissière, attendu que les parties pleines extérieures des lumières $a^2$ et $b^2$ forment recouvrements à celles $a'$ et $b'$ en dehors des moments d'introduction, et permettent d'éviter plus facilement les rentrées de vapeur anormales ; aussi, dans l'exemple actuel, la course de la glissière est-elle plus faible que celle du tiroir, ce qui ne pouvait pas avoir lieu avec la méthode précédente.

Voici, du reste, le procédé très-remarquable sur lequel on peut faire reposer la construction de ce genre particulier de détente, pour lequel on ne suppose pas les mêmes données que ci-dessus ; celles actuelles consistent seulement en ceci :

1° Le degré de détente ;

2° Le tiroir principal.

TRACÉ GÉOMÉTRIQUE DE LA DISTRIBUTION A DÉTENTE PAR UNE GLISSIÈRE A LUMIÈRES. — La fig. 70 suivante représente ce tracé qui n'aurait pu être assez intelligible avec le dessin seul de la pl. 11.

Soit O$m$ le rayon du cercle égal à la course du tiroir, lequel cercle est rapporté à la marche de l'arête $r$, par laquelle doit s'opérer la détente, c'est-à-dire celle qui doit coïncider avec le bord $s$ de la lumière $a^2$ de la glissière au moment de la fermeture de la lumière $a'$.

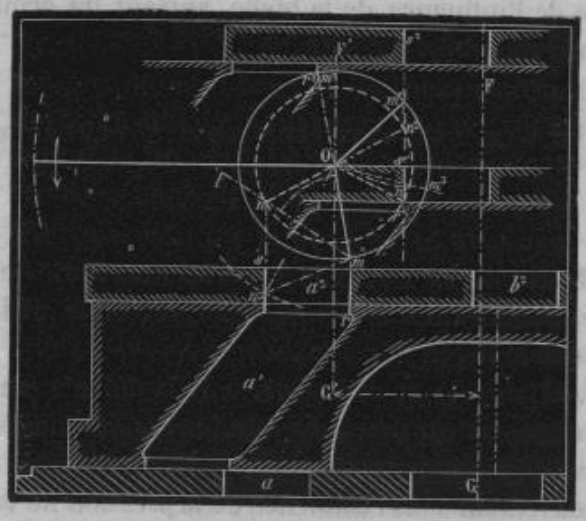
D'autre part, le centre de l'excentrique qui commande la glissière doit être aussi en O, et rapporté à l'arête $s$, dont nous observons les mouvements simultanés avec

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ceux de l'arête $r$. Mais nous ne connaissons encore ni le rayon de cet excentrique, ni sa position.

Partant de la position d'avance du tiroir ou du point de départ du piston, le rayon de son excentrique est en O$m$. D'autre part, la lumière correspondante $a'$ du tiroir doit être entièrement découverte par la glissière, d'où les lumières $a'$ et $a^2$ sont exactement superposées, ce qu'indique en effet le tracé fig. 70.

Fig. 70.



Maintenant, admettons qu'au moment où la détente doit se produire, le tiroir soit dans une telle position que le rayon de son excentrique se trouve en O$m'$ ; l'orifice $a'$ sera parvenu au point où son arête est dans la projection $r'$ du point $m'$ ; mais, puisque c'est le moment de la détente, il faut aussi que l'orifice $a^2$ de la glissière soit avancé de façon que son arête $s$ se trouve en $s'$ *en parfaite superposition* avec celle $r'$ du tiroir.

Alors le rayon de l'excentrique de la glissière doit avoir son extrémité sur la ligne $m'\,r'$, projection commune des arêtes superposées et de l'extrémité $m'$ du rayon de l'excentrique du tiroir : autrement dit, ce tracé démontre qu'au moment de la détente, les deux excentriques ont les extrémités de leurs rayons *sur une même droite parallèle à l'axe* F′ G′ *du mouvement*.

Cette condition suffit pour trouver toutes les autres. En se reportant au point de départ, où les deux lumières $a'$ et $a^2$ doivent être juxtaposées, on trace du point $m$ une droite $m\,t$, formant avec O$m$ un angle égal à celui O$m'\,r'$, et projetant ensuite l'arête $s$ par une droite parallèle à F′ G′, la ligne droite O$\,n$, qui joint l'intersection $n$ de ces deux droites au centre O, est le rayon cherché de l'excentrique de la glissière, comme grandeur et comme position : l'angle de calage relatif des deux excentriques est, en effet, $m$O$n$. Par conséquent, au moment de la détente les deux rayons sont en O$m'$ et O$n'$.

Pour s'assurer que l'orifice $a'$ n'est plus démasqué à partir du point de détente,

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

il suffit d'amener le rayon de l'excentrique du tiroir dans la position d'avance opposée en $Om^2$, et d'indiquer de même le rayon $On^2$ de la glissière. On voit ainsi très-clairement que les arêtes $s$ et $r$ sont maintenant très-éloignées, et que l'orifice $a'$, loin de se découvrir, s'est au contraire recouvert de plus en plus depuis le moment de la détente.

Cependant, pour que cet effet ait réellement lieu, il faut que la bande extérieure de la glissière soit aussi suffisamment longue. Cette longueur peut être alors déterminée dans cette dernière position en observant qu'elle recouvre encore la lumière $a^2$ d'une certaine quantité.

Quant à la longueur de la glissière, ou la distance des deux lumières $a^2$ et $b^2$, rien n'est plus aisé que de la trouver. Il suffit d'indiquer l'axe F G de l'ensemble du mouvement, et de supposer l'arête $s$ parvenue sur E′ G′ au milieu de sa course.

La longueur extérieure des orifices $a^2$ et $b^2$ de la glissière est alors égale au double de la distance des deux axes F′ G′ et F G.

Résumant ce qui précède, on remarque que la course de la glissière varie avec le degré de détente, pour le même tiroir, et qu'elle est d'autant plus longue que cette détente est plus prolongée. On peut également constater que l'angle de calage relatif des deux excentriques dépend, par exception, de la largeur de l'orifice qui est l'un des éléments de la détermination du problème actuel.

Si, par exemple, on voulait que la détente eût lieu lorsque le rayon de l'excentrique est en $Om^3$, ce qui correspond à une position du piston comprise dans la première moitié de sa course, le même tracé, fig. 70, montre que le rayon de l'excentrique de la glissière serait $On^3$, cette ligne indiquant aussi sa position relative à celui O $m$ de l'autre excentrique.

La fig. 4 de la pl. 11 indique simplement, à une plus grande échelle, les conditions géométriques de l'exemple représenté fig. 3.

Les rayons $o\,m'$ et $o\,n'$ désignent les excentriques au point de détente; celui $o$ M′ correspond à la manivelle au même instant. Tenant compte de la bielle, en admettant pour le cercle décrit par la manivelle celui du rayon $o\,m$ et la longueur de la bielle ramenée à la même échelle, on voit que le piston est en $d$, c'est-à-dire aux trois quarts de sa course, qui est en effet ici le commencement de la détente.

Il serait trop long de faire un examen complet de cette question, qui, dans chaque cas proposé, peut donner lieu à plusieurs solutions; mais nous espérons que les exemples que nous venons d'en donner suffiront pour permettre à chacun d'en compléter l'étude suivant les circonstances particulières qui peuvent se présenter.

## DÉTENTE PAR UN EXCENTRIQUE A BOSSES

M. Saulnier aîné, qui s'était acquis une juste réputation dans la mécanique par ses diverses inventions, a construit pendant une douzaine d'années des machines à vapeur avec un système de détente assez ingénieux, mais dont l'emploi a néan-

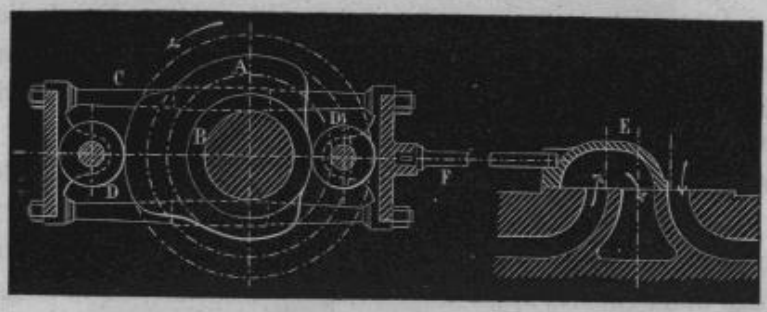
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

moins été abandonné à cause de certains défauts qu'il présente dans sa marche comme dans sa construction.

Nous le considérons ici comme système de détente *fixe*, bien qu'il soit susceptible d'être rendu variable, dans de certaines limites, au prix d'une modification que nous indiquerons.

La fig. 71 représente cette disposition, qui réside principalement dans une *camme* d'une forme particulière substituée à l'excentrique circulaire pour la commande du tiroir.

Fig. 71.




On voit que cette camme A est un disque plat, monté sur l'arbre B de la machine, et dont le contour présente plusieurs parties concentriques de différents rayons, lesquelles sont raccordées entre elles par des courbes en S. Cette camme est disposée à l'intérieur d'un châssis rectangulaire C muni de deux galets D qui, par la forme même de la camme, sont continuellement en contact avec elle dans toutes les positions successives qu'elle occupe pendant le mouvement de rotation de l'arbre B.

Ce châssis reçoit de la camme un mouvement de va-et-vient qu'il communique, soit directement, soit par une combinaison de leviers, au tiroir de distribution E auquel nous pouvons le supposer relié par sa tige F, d'une manière rigide.

Le châssis éprouve des moments de repos, puisque la camme possède des parties de son contour exactement concentriques à l'arbre. Ces phases correspondent aux temps de l'admission et de la détente, pendant lesquels le tiroir est, en effet, immobile, soit qu'il laisse la vapeur s'introduire, soit qu'il l'en empêche en masquant l'orifice. Mais comme l'échappement ne peut être interrompu en même temps que l'admission, il faut que le tiroir soit plus long qu'à l'ordinaire de la largeur même d'un orifice, de façon que celui qui vient d'admettre la vapeur étant masquée, l'autre reste néanmoins ouvert pour l'échappement.

Considérant, d'après cela, l'ensemble de la marche du tiroir, on y remarque les phases principales suivantes :

1° Au départ du piston, le tiroir découvre rapidement l'orifice et le tient complétement ouvert jusqu'au moment où l'admission doit cesser;

2° Puis il se déplace de la largeur de l'orifice en marchant en sens contraire pour le couvrir, et conserve cette position jusqu'à ce que la course du piston soit achevée;

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

3° A ce moment, l'admission devant avoir lieu par l'orifice opposé, le tiroir se déplace, dans le sens de son dernier mouvement, et d'une quantité égale *à deux fois* la largeur d'un orifice, afin que celui qui communiquait avec l'échappement soit démasqué et en relation avec l'intérieur de la boîte à vapeur.

Ainsi, pour un coup de piston simple, le tiroir reçoit deux mouvements et trois repos, ce que montre en effet la camme même qui présente, pour une moitié, deux parties courbes progressives et trois parties concentriques. Mais pour un tour complet, le tiroir exécute réellement quatre repos et autant de mouvements.

La durée de la détente dépend évidemment de l'étendue angulaire des parties concentriques de la camme d'où il résulte que le tiroir laisse passer la vapeur dans le cylindre pendant des temps plus ou moins longs, comme aussi il reste plus ou moins en repos. Avec une seule camme la détente serait alors fixe.

Mais pour obtenir une détente variable, on forme la camme de deux épaisseurs qui peuvent se déplacer l'une par rapport à l'autre en faisant tourner l'une d'elles sur l'axe commun. L'effet de ce mouvement est alors l'extension des parties concentriques, les deux épaisseurs se présentant l'une à la suite de l'autre en contact avec les galets.

On conçoit que ce moyen de varier la détente ne pouvait pas être parfaitement utilisable, puisqu'il faut, pour cela, arrêter la machine, ce qui suppose une variation de travail d'une durée un peu prolongée, tandis qu'aujourd'hui on cherche à établir une détente non-seulement variable à la main pendant la marche de la machine, mais encore variable par le régulateur, et par suite à tout instant.

Considéré au point de vue théorique, ce système de détente est susceptible d'une assez grande précision, et permet l'ouverture des orifices tout en grand. Mais cette précision est naturellement rattachée à la conservation des pièces du mécanisme; et il est clair que l'action réciproque des galets et de la camme doit faire naître promptement une quantité d'usure qui tend, comme l'on dit : *à faire ferrailler* les pièces et à détruire l'exactitude de leurs fonctions.

Somme toute, l'absence absolue d'application actuelle de ce système peut nous dispenser de nous y arrêter davantage.

## DÉTENTE VARIABLE DITE DÉTENTE D'EDWARDS

Les systèmes de distribution à détente que nous venons d'énumérer ont généralement pour caractère de ne pas permettre de varier à volonté le degré d'expansion de la vapeur, au moins, sans un changement notable de l'une des pièces ou de leurs dispositions réciproques; de plus, la détente était obtenue, si l'on en excepte le système dit *à recouvrement*, soit à l'aide d'un organe commandé séparément, soit par la substitution d'une camme à l'excentrique circulaire.

M. Edwards a fait le premier l'application à ses machines à deux cylindres, lors-



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

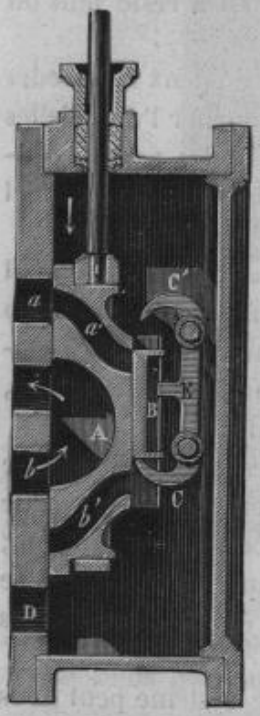
qu'il dirigeait les ateliers de construction de Chaillot (1); d'un système de détente, variable à volonté et à chaque instant, sans organe spécial de commande autre que celui appliqué au tiroir de distribution.

La détente d'Edwards étant le principe fondamental de plusieurs systèmes très-employés depuis, il nous a paru utile de la faire connaître.

Le tiroir auquel l'auteur fait l'application de cette détente est construit de la même façon que celui décrit précédemment et représenté fig. 3 pl. 11.

La fig. 72 en indique la disposition exacte, telle qu'elle a été appliquée au petit cylindre de la machine des ateliers du chemin de fer de Saint-Germain.

Fig. 72.




Cette figure montre que le tiroir proprement dit A est, en effet, traversé par des lumières $a'$ et $b'$ correspondant à celles $a$ et $b$ qui conduisent aux extrémités du cylindre. Il est également muni, au dos, d'une glissière B qui doit opérer la détente en venant masquer à propos les lumières distributrices du tiroir.

Faisons observer toutefois que ces lumières sont plus étroites que les orifices du cylindre, dans le but, comme nous l'expliquerons tout à l'heure, de pouvoir fermer ces lumières par un faible mouvement du mécanisme.

On peut aussi remarquer que la vapeur est amenée du générateur à la boîte de distribution par un orifice D, s'ouvrant sur la même table que les orifices distributeurs : c'est, du reste, ce que nous retrouverons plus loin dans bien des exemples.

La glissière n'est reliée à aucun mécanisme extérieur, et, prise ainsi isolément, elle se trouve simplement *collée* en quelque sorte sur le revers du tiroir par la pression de la vapeur; de façon que, si aucune cause étrangère ne l'arrêtait, elle suivrait le tiroir dans son mouvement, sans se déplacer relativement à lui, et sans produire, par conséquent, aucun effet.

Pour la faire agir, l'auteur a disposé à l'intérieur de la boîte à vapeur deux crochets C et C′, montés sur deux axes qui dépassent extérieurement pour porter deux roues dentées de même diamètre et engrenant ensemble. En agissant convenablement sur ces roues, on peut faire tourner les deux axes, et faire éloigner ou rapprocher, suivant le sens du mouvement, les extrémités des crochets l'une de l'autre.

Si nous les supposons dans un état d'écartement inférieur à la course du tiroir, plus la longueur de la glissière B, celle-ci, au lieu d'achever la course que le tiroir lui ferait faire en l'entraînant, rencontrera l'un des deux crochets, s'y butera et ne suivra plus le tiroir qui achèvera alors sa course sans elle. Pendant ce moment

(1) Cet établissement, fondé par MM. Perier et Chaper, n'existe plus aujourd'hui; il y a trente ans, c'était le plus considérable de Paris. Il en est sorti un grand nombre de bonnes machines, et principalement des machines à vapeur à deux cylindres, telles que celle de 30 chevaux montée aux ateliers du chemin de fer de Saint-Germain, avec le système de détente d'Edwards.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'arrêt de la glissière, il est clair que la lumière du tiroir, par laquelle l'admission avait lieu, viendra d'elle-même se masquer, et l'admission étant alors interrompue, la détente commencera.

Lorsque le tiroir va revenir sur lui-même, il entraînera de nouveau la glissière, en la détachant tout naturellement du contact avec le crochet, mais continuant sa course, la glissière viendra se buter sur le deuxième crochet, et la même opération aura lieu pour l'autre côté du cylindre, et ainsi de suite.

Pour nous résumer sur cet ingénieux mécanisme, nous disons que la glissière arrêtée dans son mouvement, la lumière d'admission se couvre, tandis que celle opposée se découvre, et se trouve disposée pour l'introduction en sens inverse. Ainsi, en prenant la fig. 72 pour exemple, on voit que la vapeur venant de pénétrer dans le cylindre par l'orifice $a$, la glissière, suivant la marche du tiroir, rencontre le crochet C et s'y arrête : la lumière $a'$ est alors cachée sous la glissière, et l'admission est interrompue. Par le même mouvement, la lumière $b'$ est complétement démasquée et toute prête pour l'introduction qui a lieu par l'orifice $b$.

Maintenant, il est très-facile de concevoir que si l'on change l'écartement des crochets, la course libre de la glissière éprouvera une modification correspondante, et les orifices seront masqués plus tôt ou plus tard : de là la variabilité du degré de détente.

Il suffit en effet, pour cela, de mettre en mouvement les roues qui commandent simultanément les deux crochets, opération toujours facile, même pendant la marche de la machine. Un cadran divisé et placé aussi extérieurement, permet de reconnaître très-exactement de combien on fait tourner les axes des crochets, et par conséquent sur quel degré de détente on règle la machine.

Nous arrivons à la propriété caractéristique, ou plutôt à l'inconvénient principal de ce système de détente, qui a pourtant l'immense avantage de n'exiger aucun mécanisme de commande et d'être très-facilement accessible.

Puisque l'obstruction de l'orifice ne peut avoir lieu qu'autant que le tiroir possède encore une marche au moins égale à la largeur de sa lumière, après la butée de la glissière, et que sa course est terminée quand le piston est au milieu de la sienne, ou à peu près, il s'ensuit que l'admission à pleine vapeur ne peut pas durer plus que la demi-course du piston, autrement dit :

*Le système de détente d'Edwards et tous ceux qui en dérivent ne permettent pas d'effectuer une détente moins prolongée que la seconde moitié de la course du piston.*

Mais la durée de l'admission à pleine vapeur peut être aussi faible que possible et même presque nulle : il suffirait, pour cela, de serrer les crochets de façon à empêcher presque tout mouvement de la part de la glissière.

Cependant, les dimensions adoptées pour cette distribution ne permettent pas de restreindre l'admission à une durée moindre que celle qui correspond à une portion de la course du tiroir égale à la largeur de ses lumières $a'$ et $b'$, laquelle est réduite autant que possible pour étendre les limites de la variabilité de la détente. Mais il en résulte que ces mêmes limites peuvent changer suivant les dimensions relatives adoptées *à priori,* entre les diverses parties du mécanisme.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

D'autre part, s'il n'est pas possible de restreindre la détente à moins de la moitié de la course du piston, on peut marcher entièrement à pleine vapeur, c'est-à-dire que l'admission peut être continuée pendant la course entière du piston.

Il suffit, pour cela, d'ouvrir assez les crochets pour qu'ils ne soient plus rencontrés par la glissière qui reste alors immobile au milieu de la longueur du tiroir en découvrant également ses deux lumières. Mais pour qu'elle vienne se fixer dans cette position, il existe sur le même plan que les deux crochets une barrette fixe centrale E, contre laquelle la glissière vient buter intérieurement par les deux talons dont elle est munie, et dans des conditions telles que le tiroir parvenu à l'extrémité de sa course, la glissière se trouve aussi placée à sa position constante fixe. Une seule évolution simple du tiroir suffit évidemment pour que cet effet soit produit, après quoi la butée contre cette barrette n'a plus d'action.

Cet inconvénient de la détente d'Edwards et de celles qui lui sont analogues, quant à la limite de *restriction* de la détente, n'est pas, néanmoins, une cause suffisante pour que l'application ne puisse s'en faire avantageusement; car les motifs mêmes pour lesquels une machine a été disposée pour marcher avec une grande détente s'opposent assez souvent à ce que cette détente soit limitée jusqu'au point de marcher à pleine vapeur pendant une demi-course du piston. Cependant, un système permettant la détente *ad libitum* ne peut être que préférable, s'il n'offre pas d'autres inconvénients particuliers.

Un reproche plus sérieux à adresser aux divers mécanismes qui ont pour base la glissière, fonctionnant soit par un excentrique circulaire spécial, soit par la butée simple, c'est l'étranglement des orifices distributeurs, surtout pour les détentes très-prolongées. Il est clair que l'obstruction de la lumière du tiroir devant avoir lieu lorsque celui-ci est parvenu au point de sa course correspondant à celle du piston choisie pour commencer la détente, l'orifice distributeur sera d'autant moins découvert que la détente doit commencer plus tôt. Nous allons avoir l'occasion d'examiner ce point important en décrivant le système de détente, si répandu, de M. Farcot, système qui est le dérivé le plus perfectionné de la détente d'Edwards.

## DÉTENTE VARIABLE DITE DÉTENTE DE FARCOT

(FIG. 5 A 9, PL. 41)

M. Farcot a fait connaître en 1838 un système de distribution à détente variable pour lequel il a pris un brevet de courte durée, sans penser probablement au brillant avenir qui lui était réservé (1). La détente Farcot est en effet employée aujourd'hui par un grand nombre de mécaniciens français, et c'est à peine si des systèmes plus récents parviennent à lui disputer les applications pour obtenir,

(1) Voir pour l'une des premières applications de ce système de détente, *la Publication Industrielle* vol. I, pl. 38, et pour les suivantes les vol. III et XII du même recueil

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

bien entendu, des effets comparables à ceux qu'elle est capable de produire (1).

Le principe général exposé dès l'origine par l'inventeur est encore intact aujourd'hui, mais dans ses mains mêmes la construction a subi des modifications importantes et constitue un ensemble perfectionné dont la fig. 5 de la pl. 11 pourra donner une idée très-complète.

Cette figure représente, en coupe transversale, la distribution appliquée à une machine à vapeur horizontale d'une puissance nominale de 25 chevaux, construite pour la manutention militaire de Chaillot par M. Lecouteux, mécanicien à Paris (2), d'après les formes et les dispositions particulières de M. Farcot. (Deux machines ont été en effet fournies pour la manutention par ces deux constructeurs et presque sur les mêmes plans).

La fig. 6 est une vue du tiroir détaché de la boîte et regardé du côté opposé à la face frottante.

Ensemble du mécanisme de la détente Farcot. — On vient de voir que le système d'Edwards consistait en un tiroir percé de deux lumières d'une moindre largeur que les orifices de la table, et muni d'une glissière libre, mais butant au moment d'opérer la fermeture des lumières contre des arrêts fixes. Nous avons fait remarquer que le rétrécissement de ces lumières avait pour objet d'en rendre la fermeture plus prompte et en même temps de permettre de réduire la durée de l'admission à pleine vapeur dans des limites aussi étendues que possible.

Dans le système de M. Farcot, les deux lumières $a'$ et $b'$ sur la face frottante du tiroir A sont égales en largeur aux orifices $a$ et $b$; mais sur la face opposée ces lumières, après s'être considérablement élargies, sont divisées en trois ouvertures étroites $a^2$ dont la somme est néanmoins égale ou supérieure, à volonté, à la largeur normale de la lumière.

Ensuite, au lieu d'une seule glissière, le tiroir est muni de deux registres B et B′, complétement indépendants l'un de l'autre, devant agir chacun séparément par une butée, comme la glissière d'Edwards, pour opérer la détente en obstruant les lumières $a^2$ ou $b^2$, suivant la phase des mouvements du tiroir A en correspondance avec les deux sens du mouvement alternatif du piston. Ces registres sont eux-mêmes percés de deux lumières $a^3$ ou $b^3$, exactement de la dimension de celles du tiroir et également espacées, de façon que, lorsque l'admission de la vapeur doit avoir lieu, les parties pleines du registre et du tiroir se superposant, les trois orifices $a^2$ ou $b^2$ sont entièrement découverts (voir fig. 8).

L'arrêt contre lequel doivent buter les registres à leurs moments respectifs d'opérer est une pièce en forme de camme C montée à l'extrémité d'un axe F qui traverse le couvercle E de la boîte à vapeur D; chacun des deux registres porte, à

(1) Si le brevet de M. Farcot eût été d'une plus longue durée et que l'industrie en fût restée aussi longtemps tributaire, même pour un faible droit prélevé par force de cheval, il est évident que cette invention pouvait devenir, pour son auteur, aussi avantageuse sous le rapport financier, qu'elle a contribué à sa réputation comme mécanicien.

(2) M. Lecouteux est le successeur de M. Moulfarine, qui s'est aussi distingué pour l'exécution des machines à vapeur. Nous aurons de nouveau l'occasion de citer M. Moulfarine pour les machines à deux cylindres qu'il a établies à l'hôtel des Monnaies, et qui ont été pendant longtemps citées comme des modèles du système de Woolf. Ces machines ont été décrites dans *la Publication industrielle*, vol. VII.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cet effet, un talon saillant *d*, par lequel il vient buter contre la camme C, lorsque le tiroir principal l'a amené au point convenable.

Déjà nous pouvons faire remarquer qu'il existe cette différence avec la détente d'Edwards que la pièce d'arrêt peut être placée au centre de la boîte à cause de l'indépendance des deux registres.

Maintenant, la variabilité du point de détente est obtenu par la camme C, dont la forme extérieure présente des rayons de dimensions différentes, et qui, en la tournant par son axe F, arrête les registres plus tôt ou plus tard, effet produit par les crochets d'Edwards, suivant qu'on les ouvre plus ou moins. Cette camme peut posséder des formes diverses, soit comme elle est indiquée en détail fig. 9, où elle est composée de deux développantes de cercle, et, comme le fait M. Farcot, soit comme le montre les fig. 6 et 8, où on lui suppose une forme moins accentuée.

L'indépendance des deux glissières conduit ici à une disposition particulière qui ne se trouve pas dans la détente d'Edwards, mais qui contribue encore à améliorer les effets obtenus par celle-ci. C'est une butée de retour qui a pour objet de ramener chaque registre à la place qu'il doit occuper pour démasquer complétement les lumières du tiroir au début de l'introduction.

Chaque registre porte à cet effet un talon *e* dans lequel se trouve taraudée une broche G qui, à chaque fin de course du tiroir A, vient buter contre le fond de la boîte à vapeur ou contre la tête d'une vis *f* qui permet, en la détournant d'une certaine quantité, de régler le moment exact de la butée. On conçoit que le tiroir principal occupant toujours la même position à chaque extrémité de sa course, on puisse régler la longueur de la broche G de façon que, lorsqu'elle touche le point d'arrêt *f*, le registre correspondant B ou B′ soit dans la position où ses lumières sont en coïncidence exacte avec celle du tiroir, comme sur la fig. 8. Par conséquent, le tiroir A partant de cette position extrême pour revenir à celle centrale, à la prochaine introduction les orifices sont entièrement libres pour le passage de la vapeur.

Cette opération du retour de la glissière de détente, qui s'accomplissait à l'aide des mêmes crochets dans la détente d'Edwards (cette glissière s'y trouvant d'une seule pièce), présente ici un très-grand avantage, à cause de la fixité de la butée extrême qui est nécessairement invariable, quel que soit le degré de détente réglé par la position de la camme C. Cette disposition jouit en effet de cette propriété que, pour un degré quelconque de détente, le registre est toujours amené au même point de départ et démasque complétement les lumières du tiroir au moment de l'introduction, tandis qu'avec la détente d'Edwards, cette position change suivant le plus ou moins d'écartement des crochets qui fonctionnent à la fois pour opérer l'obstruction des lumières et pour les démasquer.

Pour nous résumer sur l'ensemble des fonctions de la détente Farcot, suivons le mouvement dont une phase est indiquée par la fig. 5, pl. 11.

Sur cette figure le tiroir A est supposé arrivé dans la position où la détente doit commencer, c'est-à-dire où l'admission, qui avait lieu par l'orifice *a*, doit être entièrement interrompue.

Nous voyons alors que le registre B masque exactement, sans les recouvrir, les

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lumières $a^2$, et son talon $d$ bute sur la camme C. Mais cette butée a déjà lieu depuis quelques instants, puisque ces orifices se trouvaient entièrement découverts au commencement de l'introduction : *la butée du talon* d *contre la camme a eu lieu au moment où le tiroir* A *avait encore à parcourir une distance égale à la largeur des lumières* $a^2$ *pour arriver au point de la détente; le registre cessant de le suivre pendant le même temps, les orifices* $a^2$ *sont donc exactement masqués.*

Telle est la base du tracé géométrique qui permet de calculer les effets de ce mécanisme ainsi que nous le verrons plus loin.

Le tiroir continuant de marcher pour arriver à l'extrémité de sa course, il est clair que le registre reste toujours en butée, et il ne se produit pas d'autre effet que la progression croissante du recouvrement des orifices $a^2$.

Pendant cette action, l'autre registre B′, qui masquait les orifices $b^3$ depuis le moment de la détente du côté opposé du piston, a été détaché du contact de la camme, entraîné par le tiroir A contre lequel nous savons que la pression de la vapeur maintient ces registres assez fortement appliqués. Mais au moment indiqué par la figure, l'ensemble du tiroir A et du registre B′ est arrivé au point où la broche G′ va buter sur la tête de la vis $f'$; cette butée arrêtera la marche du registre, et le tiroir A continuant d'avancer, les lumières $b^2$ se trouveront découvertes et prêtes alors pour l'admission par l'orifice $b$.

On conçoit maintenant que cette dernière opération aura lieu exactement pour le premier registre B, lorsque le tiroir remontera et sera prêt d'atteindre sa position extrême supérieure (en prenant la position même de la figure comme repère).

Ce mécanisme fonctionne très-bien et exige seulement quelques soins pour le bien régler; il fonctionne aussi d'autant mieux que la vitesse de la machine n'est pas trop considérable : il paraît de toute impossibilité de l'appliquer utilement à des machines possédant une vitesse de plus de 90 à 100 tours par minute, ce qui serait certainement une limite extrême. Quel serait, du reste, le système de distribution à détente produisant un bon effet dans ces conditions?

On déduit de ce qui précède que la durée de l'admission à pleine vapeur peut être d'autant plus faible que les lumières $a^2$ sont plus étroites par rapport à la marche totale du tiroir qui doit au moins marcher de leur largeur depuis le début de l'admission, pour les masquer; cette condition de la plus grande détente est donc obtenue lorsque le talon $d$ du registre bute sur la camme dès le départ du tiroir du point d'avance à l'introduction.

D'un autre côté, la plus grande admission à pleine vapeur, qui ne peut pas dépasser la première moitié de la course du piston, comme avec le système d'Edwards, s'en rapprochera d'autant plus que ces lumières $a^2$ seront encore plus étroites, puisqu'il faut que la butée ait lieu contre la camme quand il reste encore au tiroir à parcourir au moins leur largeur pour arriver à son point extrême, ce qui n'amène encore les lumières $a^2$ et $a^3$ que barbe à barbe, et sans recouvrement.

Mais l'admission à pleine vapeur pendant toute la course est facile : il suffit de mettre la camme en travers, de façon qu'elle ne soit pas atteinte par les talons $d$ et $d'$ des registres; les butées extrêmes ramenant toujours ceux-ci à la plus grande

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ouverture des orifices $a^2$ et $b^2$, il en résulte que ces registres restent dans cette position et immobiles par rapport au tiroir A, qui fonctionne comme un tiroir ordinaire.

Détails de la construction. — Bien que la vapeur tende à maintenir les registres constamment appliqués sur le tiroir, on est obligé de les retenir mécaniquement, parce que, dans les moments d'arrêt, cette pression faisant défaut, ils s'en détacheraient complétement.

Le moyen employé pour tenir les registres B appliqués contre le tiroir, indépendamment de la pression de la vapeur, consiste à les presser à l'aide de quatre ressorts arqués H qui sont retenus dans des chapes $g$ fixées à des oreilles $h$ venues de fonte avec le tiroir A; ces ressorts pressent sur deux règles ou carrelets I qui forment aux registres B des joues élastiques sous lesquelles ils peuvent glisser, quelle que soit leur position.

Indépendamment de ces règles qui les maintiennent appuyés sur la face de glissement, les registres sont aussi guidés latéralement par deux rebords dressés parallèlement et appartenant au tiroir principal.

L'axe F, qui porte la camme C, traverse une boîte à étoupe disposée dans le couvercle E de la boîte à vapeur. Au lieu de lui ménager une embase à l'intérieur de la garniture, pour empêcher ses variations longitudinales, on a tout simplement jeté un filet de vis très-serré sur sa partie qui traverse la bague en bronze $i$ qui lui forme alors écrou. A la vérité, lorsque l'on fait tourner l'arbre pour changer la position de la camme, il se produit un mouvement longitudinal par l'effet même de la vis; mais cet effet est sans conséquence nuisible attendu que le mouvement maximum étant un quart de tour, en admettant que le pas de la vis soit même de 2 millimètres, l'axe F ne se déplacerait encore que de 1/2 millimètre.

En dehors de la boîte à vapeur, l'axe F porte un cadran divisé près duquel est une aiguille fixe qui permet de reconnaître la position exacte de la camme et le degré de détente correspondant. Ce cadran peut être manœuvré à la main pour agir sur la camme, ou, comme le pratique M. Farcot, avec le modérateur à force centrifuge qui fait opérer automatiquement les variations de la détente. Seulement, il est remarquable que, lorsque la variation de détente est confiée au régulateur, ceci suppose que le point de détente ne doit éprouver de variation qu'autant que la vitesse de la machine s'écarte elle-même de sa valeur normale, puisque l'action du régulateur, en l'y ramenant, fait aussi revenir le degré de détente au sien.

Mais si le degré de détente devait être modifié, parce que la charge de la machine le serait aussi pendant un certain temps, il faudrait alors déterminer le nouveau point de détente en tournant convenablement la camme, puis en la mettant en rapport dans cette autre position avec le mécanisme qui la relie au régulateur.

Ce mécanisme, qui n'est pas figuré ici, se trouve amplement détaillé sur les planches suivantes représentant diverses machines de M. Farcot. Déjà on en voit un premier exemple par la pl. 17.

Nous avons dit que la camme a le plus souvent la forme dessinée fig. 9. Cette forme nécessite le déplacement des butoirs $d$ et $d'$, qui sont déviés régulièrement de l'axe du mouvement pour se soumettre plus directement aux deux courbes et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

parvenir au contact même du noyau, position indiquée sur la fig. 9, où ces butoirs sont représentés en $d^2$ comme s'ils avaient changé d'axe : mais on sait que c'est la camme qui, en tournant, se trouve ainsi placée par rapport à eux.

Nous avons à remarquer maintenant la construction très-soignée de l'ensemble de la boîte à vapeur et de l'assemblage du tiroir avec son cadre. (Nous avons dit que cette distribution est horizontale comme la machine à laquelle elle est empruntée, tandis qu'elle est posée ici verticalement par l'exigence de notre dessin.)

Le tiroir est pris dans un cadre en fer J, comme on l'a vu plus haut; la liaison de ce cadre avec la tige K est faite très-convenablement au moyen d'un boulonnage à écrou *j*. Il est en outre muni d'une seconde tige K′, assemblée de la même façon, et qui a pour objet de maintenir rigoureusement la rectitude du mouvement du tiroir, en s'ajustant dans une douille cylindrique *k* fondue avec la boîte à vapeur.

La face frottante du tiroir est garnie d'une semelle en bronze *l*, qui rend le frottement plus doux et qui peut aussi être renouvelée dans le cas d'une usure notable. On sait que ces parties frottantes ne sont pas lubrifiées, qu'une graisse quelconque ne pourrait pas se maintenir à cause de la chaleur et de l'exactitude du contact des surfaces planes, et que ces surfaces deviennent polies et brillantes, d'où vient cette expression usitée : *la glace du tiroir*.

Enfin, nous devons signaler l'utile perfectionnement apporté par l'inventeur à sa disposition primitive, et qui consiste en deux regards ménagés au couvercle de la boîte pour permettre l'examen facultatif et la réglementation du mécanisme intérieur. Ces deux regards sont des ouvertures circulaires fermées au moyen de tampons L retenus par des boulons *m* dont la tête est en forme de T.

Notons en passant que sans ces regards il était difficile de régler une telle détente dont toutes les pièces sont renfermées et dont le jeu dépend de la camme, qui ne peut être mise en place que lorsque le couvercle s'y trouve lui-même.

Étude géométrique sur la détente Farcot (fig. 7 et 8, pl. 11). — L'étude actuelle a pour objet principal de se rendre compte des positions relatives occupées par le tiroir et les registres pour chaque degré de détente proposé.

A cet effet, la fig. 7 est le tracé géométrique des mouvements du tiroir principal, suivant la méthode exposée précédemment (fig. 3, pl. 10). Elle consiste à tracer un cercle d'un rayon *o* M, représentant celui décrit par la manivelle, puis un second cercle d'un rayon *o p* égal à la course du tiroir. Menant ensuite les tangentes O N et O′ N′, on y indique les deux orifices *a* et *b*, en tenant compte de l'angle de calage *q o p*, le centre *o* correspondant à la marche de l'extrémité de la bande du tiroir.

Ce tracé ainsi établi, il devient très-simple de trouver les positions du tiroir pour chaque degré de détente.

Pour cela, on doit diviser la course du piston, que le diamètre M M′ représente, en parties égales, attendu que la détente est opérée par volumes proportionnels à cette course. Celle-ci est divisée en 10 parties égales qui correspondent alors successivement à 1, 2, 3, 4 et 5 dixièmes d'admission à pleine vapeur; le premier dixième est en outre divisé en deux pour le degré de détente, assez exceptionnel du reste avec 1/20 seulement de la course du piston d'admission à pleine vapeur.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Puisque l'excentrique et par conséquent le tiroir marchent comme la manivelle, il faut chercher les positions de celle-ci pour chaque degré d'admission. Ceci se fait aisément, ainsi qu'on l'a vu, en traçant, par les points de division de la course du piston, des arcs de cercle avec la longueur de la bielle pour rayon. Ces arcs coupent la circonférence en différents points que l'on joint avec le centre $o$ par des rayons qui correspondent alors aux positions cherchées.

Maintenant, puisque le rayon de l'excentrique est en $qo$ quand la manivelle est au point mort, en $o$M, il est clair que, si l'on reporte l'angle de calage de chacune des positions de la manivelle, on trouvera les positions relatives du tiroir. Si, en effet, des points d'intersection $q'$, $q^2$ et $q^3$, des rayons de la manivelle avec le cercle de l'excentrique, on reporte la corde $pq$ de l'angle de calage, on aura les positions successives $p'$, $p^2$ et $p^3$ du centre de l'excentrique ; et leurs projections sur l'orifice $a$ donneront les positions correspondantes du bord de la bande du tiroir. C'est ce que montre la fig. 7, sur laquelle ces positions sont indiquées sur l'orifice $a$ pour les degrés 1/20, 1/10 et 2/10, correspondant à celles du piston dans la partie $o$M de sa course. Il n'était pas intéressant de continuer la même opération pour 3 ou 4 dixièmes qui correspondraient à l'orifice presque entièrement découvert.

Ainsi, on peut remarquer que, grâce aux mouvements croisés de la manivelle et de l'excentrique, et à l'avance, l'orifice est à moitié découvert pour la faible admission de 1/20, et que, pour celle 2/10, ordinairement adoptée en pratique, cet orifice l'est presque entièrement. Mais comme en ces points le registre doit avoir complétement obstrué les lumières du tiroir, puisque ce sont les moments de détente, il faut donc en retrancher quelque chose pour le passage progressif des lumières du tiroir sous les parties pleines du registre.

Pour bien fixer les idées à cet égard et aider à la solution de cette question importante de l'étranglement des orifices, nous allons donner un diagramme qui montre avec la dernière évidence la valeur réelle de la quantité d'ouverture pour des limites extrêmes des points de détente.

La fig. 73 ci-contre représente, répété deux fois, le même tracé que la fig. 2 de la pl. 11, relativement à la marche d'un tiroir percé de lumières par rapport aux orifices de distribution. Ainsi H′ J étant la largeur de l'orifice $a'$, les droites H′ I et J I′ en sont la projection ; les courbes H I et H′ I′ représentent la marche de la lumière du tiroir, mais seulement pour la moitié de la course du piston, vu que nous n'avons pas à étudier, avec la détente Farcot, une admission plus prolongée.

D'après ce que l'on a vu précédemment, et surtout par l'étude de la fig. 1re de la pl. 10, on comprend que le rectangle H′ I I′ J étant regardé comme proportionnel à la moitié de la section d'un orifice de distribution, la surface de la figure curviligne H′ I I′ est de même proportionnelle à la moitié de la quantité d'ouverture effective due à la marche de l'excentrique, pour le tiroir simple, sans détente.

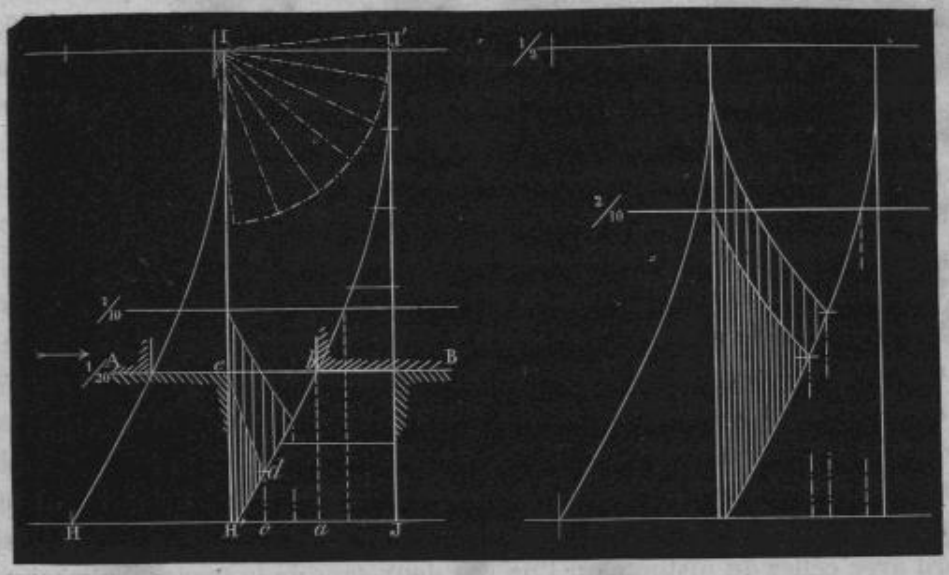
Nous nous proposons alors de chercher quelle fraction plus ou moins grande de cette superficie curviligne exprime l'ouverture effective de l'orifice pour des degrés de détente déterminés.

Soit d'abord le faible degré 1/20 d'admission, pour lequel les fig. 7 et 8 de la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pl. 11 indiquent exactement la position du tiroir par rapport à l'orifice. Prenant ce degré d'ouverture, on le porte, sur le tracé, fig. 73, de H′ en *a*, et projetant ce point

Fig. 73.




parallèlement sur la courbe, son intersection *b* permet de tracer la droite AB qui est alors le lieu géométrique de la détente, c'est-à-dire la position du tiroir au moment où ses lumières sont recouvertes par le registre.

Mais pour que la fermeture ait lieu en ce point, elle doit commencer quand le tiroir a encore à parcourir une distance égale à la largeur de chacune des lumières étroites supérieures; ainsi, en portant cette largeur de *a* en *c*, la ligne *cd* indique la position que doit occuper la lumière du tiroir, lorsque celles de sa face supérieure vont commencer à pénétrer sous le registre.

Par conséquent, tandis que la grande lumière du tiroir s'avance de *cd* en *ab*, celles supérieures (marquées $a^2$ sur les fig. 5 et 8 de la pl. 11) se recouvrent de *cd* en H′*e*, suivant la progression marquée par la courbe *de*; enfin, sur H′*e* la fermeture est complète.

Il résulte de ceci que, pour l'admission à pleine vapeur pendant 1/20 de la course du piston, la quantité effective d'ouverture de l'orifice de distribution est représentée par la petite figure curviligne H′ *de*, dont la superficie est environ 0,4 de celle H′ *be* qui représente l'ouverture réelle de l'orifice par le tiroir principal et suivant laquelle la vapeur serait introduite pour la même marche du piston s'il n'existait pas de détente.

Cela démontre parfaitement ce que l'on doit entendre par l'étranglement des orifices; il est certain que, pour une admission aussi faible, ce qui est du reste assez rare en pratique, il faudrait donner aux orifices une plus grande dimension que pour la pleine vapeur afin que la pression s'établît dans le cylindre au même degré que dans le générateur, pour faire, en un mot, que l'espace fût saturé.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Sur le même tracé, fig. 73, des opérations semblables sont indiquées pour les degrés d'admission 1/10, 2/10 et 5/10, pour lesquels les quantités d'ouverture de l'orifice sont sensiblement égales à 0,53, 0,65 et 0,42 de la section à pleine vapeur, quand il n'existe pas de mécanisme obturateur pour la détente.

Ainsi, par les combinaisons du mouvement du tiroir, il arrive que le maximum proportionnel d'ouverture se trouve aux environs de l'admission aux 2/10, chose assez singulière, mais dont on se rend compte facilement si l'on remarque qu'à partir de ce point l'orifice est presque entièrement découvert et resterait tel pendant longtemps sans le registre qui ferme, au contraire, très-rapidement.

Après avoir fait connaître ces principales conditions de la détente Farcot, déduites du tracé fig. 7, pl. 11, il nous reste à examiner les effets dus à l'influence de la bielle, ce que nous avons déjà montré pour les autres systèmes.

Les points de détente sur la partie $o$ M′, fig. 7, de la course du piston, qui correspond à la plus grande des deux parties de la course circulaire de la manivelle, étant symétriques avec ceux de l'autre partie $o$M, il est clair qu'il n'en peut être de même de la manivelle dont les positions correspondantes ne forment pas les mêmes angles que pour l'autre partie, avec l'axe MM′ du mouvement, ce qui a été déjà amplement démontré. Par conséquent, l'excentrique qui marche avec elle amenant le tiroir aux mêmes positions sur l'orifice $b$ que sur celui $a$, il s'ensuit que ces positions, d'accord avec celles du piston pour l'un des deux sens de la marche, n'y seront plus évidemment pour l'autre pour les mêmes degrés de détente.

Les différences qui en résultent seront facilement appréciées en traçant les positions réelles de la manivelle, partant de $o$M′, pour les points de détente de cette partie, le piston marchant de M′ à $o$. Des intersections $s'$, $s^2$ et $s^3$, des rayons qui les représentent, avec le cercle de l'excentrique, on porte la corde $p\ q$ de l'angle de calage, en $s'r'$, $s^2r^2$ et $s^3r^3$, et ces points $r'$, $r^2$ et $r^3$ étant projetés sur l'orifice $b$, y indiquent exactement les positions que le tiroir doit occuper par rapport à celle du piston pour les points de détente correspondants.

Le simple examen du tracé permet alors de reconnaître que le tiroir *découvre moins l'orifice* quand la manivelle parcourt la plus faible des parties inégales de sa course que dans l'autre de ces deux parties.

Par conséquent, puisque c'est le moment de butée du registre qui détermine celui de la détente, et que cette butée dépend de la camme, c'est donc cette dernière qui doit être tracée de façon que les deux moitiés produisent des effets différents, ce que nous allons essayer de faire comprendre.

Tracé de la camme de détente. — La fig. 8 de la pl. 11 représente, à moitié d'exécution, une partie du tiroir dans la position du moment de l'introduction par l'orifice $a$, le piston moteur se trouvant alors à son point mort correspondant. Les lumières $a^2$ sont complétement démasquées et en coïncidence avec celles $a^3$ du registre B.

Supposons l'emploi d'une camme C de la forme choisie fig. 6, et cherchons à en déterminer la forme et les dimensions principales d'après les données du tiroir et du butoir $d$ qui appartient au registre B. Ces dimensions sont les rayons de lon-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

gueurs différentes qui correspondent à ses courbes excentriques, que nous supposons pour l'instant semblables et symétriques.

Ainsi, admettant que la camme C soit ramenée de face, par un simple rabattement, on trace, parallèlement à la table des orifices, une droite $mn$ vis-à-vis du butoir $d$, et comme cette camme est montée sur l'axe FG du mouvement du tiroir, l'intersection $m$ de ces deux lignes sera le centre du tracé.

Pour trouver les dimensions que doit avoir la camme pour un degré déterminé d'admission à pleine vapeur, remarquons que : *si la face butante du taquet* d *se trouvait justement vis-à-vis du bord de la bande du tiroir quand ce dernier est au point de l'orifice qui correspond à la limite d'admission, le registre* B *découvrant encore complétement la lumière* $a^2$, la camme aurait pour rayon correspondant : *la distance de l'axe* FG *au point de détente sur l'orifice* a, *plus la longueur d'une lumière* $a^2$.

Cela est évident, puisque la butée aurait dû devancer le point de détente de la largeur des orifices à masquer. Partant de cette remarque, voici le moyen que nous proposons pour déterminer la forme de la camme, en lui donnant une courbe d'une progression aussi régulière que possible.

Après avoir porté sur l'axe $mn$, et à partir de la face butante du taquet $d$, une distance $tn$ égale à la largeur des lumières $a^2$, on joint le point $n$ avec le bord $p$ de la bande du tiroir, dans cette position de l'avance où les lumières $a^2$ sont toujours entièrement démasquées.

Indiquant ensuite, sur l'orifice $a$, les positions du bord $p$ aux différents points successifs d'admission, par ces points $p'$, $p^2$, $p^3$ et $p^4$ (ce dernier étant le bord de l'orifice et correspondant à l'admission jusqu'à mi-course), on mène des parallèles à $pn$ qui coupent l'axe $mn$ aux points $n'$, $n^2$, $n^3$ et $n^4$, et du centre $m$ ou décrit des cercles qui ont respectivement pour rayons les distances $mn^4$, $mn^3$, $mn^2$ et $mn'$.

La camme doit alors offrir ces différents rayons aux moments de la butée pour opérer les détentes indiquées sur l'orifice par les points $p'$ à $p^4$.

Pour limiter le développement de la courbe capable de présenter ces rayons successifs à la butée, suivant qu'on fait tourner son axe, on commence par mener au plus petit cercle deux tangentes $uu'$, $vv'$, entre lesquelles nous admettons que la camme soit entièrement comprise; puis de l'intersection $x'$ de la tangente $uu'$ avec le cercle suivant, on mène à ce dernier une seconde tangente qui coupe le cercle du rayon $mn^2$ en un point $x^2$ par lequel on trace de même une tangente $x^2x^3$ déterminant encore une intersection $x^3$ avec le plus grand cercle, auquel, enfin, on mène une dernière tangente $x^3x^4$.

Finalement, il en résulte une figure polygonale $x\ x'\ x^2\ x^3\ x^4$ ayant ces tangentes pour côtés dans lesquels on inscrit la courbe continue $x\ x^4$ qui détermine une moitié de la camme. La courbe ainsi déterminée, on remarque que les déplacements angulaires de cette camme pour les degrés différents de détente sont indiqués par les rayons $mx^3$, $mx^2$, etc., qui devront coïncider avec l'axe $mn$ pour les admissions successives 1/20, 1/10, etc. D'après cela, lorsque la camme sera tournée de façon que $mx$ soit sur l'axe de butée, on marchera à la plus grande admission possible, soit à moitié course.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Mais une telle camme ne permettrait pas de marcher à pleine vapeur, puisqu'au petit diamètre le taquet bute et masque les orifices; il faudrait, pour qu'il n'y eût pas de butée, que le rayon $mx$ fût diminué de la largeur des lumières $a^2$. Elle aurait alors une forme très-allongée et des courbures trop rapides, ce qui démontre que cette camme, qui est d'ailleurs très-simple, convient aux machines dont l'admission ne dépasse pas une limite déterminée.

Cependant, pour permettre toute latitude à cet égard, M. Farcot et d'autres constructeurs adoptent la forme représentée fig. 9, qui consiste en développantes réunies sur un noyau d'un petit diamètre. Moyennant que les butoirs soient répartis des deux côtés de l'axe, comme nous l'avons expliqué plus haut, on obtient facilement de grandes variations entre les moments d'action de la camme.

Peu de chose nous suffira maintenant pour montrer la correction à faire à la camme afin de compenser l'influence de la bielle.

Il est évident que, si cette influence était nulle, les points de détente seraient symétriques par rapport aux deux orifices ainsi que les deux parties de la camme.

Mais cette influence apportant dans les positions du tiroir les modifications examinées ci-dessus, si l'on recommence le tracé de la camme avec les nouvelles positions du tiroir pour l'orifice $b$, on obtiendra une courbe un peu différente, laquelle a été déterminée fig. 7, et tracée en traits ponctués suivant $y w'$.

Ainsi la correction relative à l'influence de la bielle se résume à faire la camme un peu plus longue d'un côté que de l'autre, la partie la plus longue du côté de l'introduction qui correspond à la plus petite des parties du cercle décrit par la manivelle pour chaque demi-course égale du piston.

En résumé, le caractère principal de ce système de détente est la variabilité facile et sans commande extérieure autre que le mécanisme du tiroir principal.

Les améliorations importantes qu'il possède, comparativement à celui d'Edwards, c'est la séparation de la glissière en deux parties qui rendent les deux orifices indépendants l'un de l'autre, et la division des lumières du tiroir en plusieurs parties étroites, ce qui produit une fermeture plus prompte, augmente la valeur effective de la section de l'ouverture et permet des limites d'admission plus étendues.

## DÉTENTE VARIABLE PAR LA LARGEUR DES ORIFICES

Par **M. GEORGE**, ingénieur à Paris

(FIG. 1 ET 2, PL. 12)

M. George, dont nous avons fait connaître précédemment le système de foyer fumivore, est également l'auteur d'une distribution à détente variable qui présente cette curieuse propriété de permettre d'interrompre l'admission de la vapeur à chaque point de la course du piston que l'on puisse fixer, sans autre mécanisme extérieur qu'un excentrique circulaire en plus de celui du tiroir principal.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La fig. 1re de la pl. 12 représente, en coupe longitudinale, une boîte de distribution disposée suivant ce système et appliquée à son cylindre à vapeur ;

La fig. 2 en est une section transversale suivant la ligne d'axe 1-2 passant par l'orifice d'échappement.

Ce mécanisme se compose principalement de deux tiroirs A et B, renfermés dans la même boîte à vapeur C. Ils sont séparés par une cloison D qui les rend entièrement indépendants en même temps qu'elle divise en deux parties à peu près égales la boîte à vapeur, dans laquelle elle joint parfaitement par ses quatre côtés, mais sans être aucunement fixée, afin de reposer toujours avec exactitude sur la face postérieure du tiroir.

Le tiroir A qui opère la distribution est combiné, par rapport aux orifices $a$ et $b$ du cylindre E, de la même façon que ceux qui distribuent la vapeur sans détente; il est, du reste, commandé par un excentrique circulaire analogue à celui de la distribution Farcot, par ses lumières $c$ et $d$ qui s'élargissent du côté de la face supérieure, toutefois sans être divisées par des lumières plus étroites.

Le tiroir B de la détente, commandé également par un excentrique circulaire, n'est, à proprement parler, qu'un cadre rectangulaire percé d'outre en outre et dont les bords intérieurs extrêmes $e$ et $f$ constituent les arêtes des bandes qui agissent pour admettre la vapeur ou l'intercepter.

La cloison D est formée, dans son épaisseur, de deux platines réunies par des vis à tête noyée. La platine supérieure est percée d'une longue ouverture rectangulaire dont la platine inférieure D′ est le fond; celle-ci est également percée de deux lumières $g$ et $h$, continuellement en rapport avec celles du tiroir de distribution.

L'intérieur de la grande ouverture ménagée dans la platine supérieure D est garni de deux registres en bronze $i$ et $j$, de même épaisseur que la platine, et ajustés à queue d'aronde par leurs rives parallèles à la marche du tiroir, comme l'indique la section transversale fig. 2. Ces deux registres peuvent s'éloigner ou se rapprocher l'un de l'autre simultanément, de façon à modifier symétriquement les deux lumières $g'$ et $h'$ qu'ils forment, vis-à-vis de celles $g$ et $h$ de la platine inférieure D′, avec les rives extrêmes de l'ouverture de la platine D; c'est dans cette faculté de modifier la largeur des orifices $g'$ et $h'$ que réside le moyen de varier le degré de détente, ainsi que nous l'expliquons plus bas.

Le déplacement égal et symétrique des deux registres $i$ et $j$ s'opère du reste très-facilement au moyen du pignon $k$ qui engrène avec deux crémaillères $l$ fixées chacune à l'un des registres et de chaque côté du pignon pour en obtenir des mouvements de direction inverse. Ce pignon est monté sur un axe qui traverse une boîte à étoupe appartenant au couvercle, et qui porte une poignée $m$, à l'aide de laquelle on le fait tourner à la main; un cadran $n$ et un index disposé à l'extrémité de la poignée permettent de régler le mouvement du pignon et, par conséquent, la position des registres $i$ et $j$, suivant le degré de détente à obtenir.

D'après ces dispositions, examinons comment ce mécanisme permet, en effet, de choisir le point de détente tout à fait à volonté.

Admettons d'abord que le tiroir A soit au point où la vapeur commence à s'in-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

troduire dans le cylindre par l'orifice $a$, c'est-à-dire au point d'avance; le tiroir B de détente est à l'extrémité de sa course, et découvre entièrement l'orifice $g'$; la vapeur, amenée dans la boîte par la tubulure F, s'introduit librement dans le cylindre en traversant les ouvertures $g'$, $g$ et $c$.

L'excentrique circulaire qui fait mouvoir le tiroir B a son centre mobile placé précisément sur le même rayon que la manivelle, d'où il résulte que ce tiroir marche exactement comme le piston, commence et finit sa course en même temps que lui.

Par conséquent, si nous suivons sa marche à partir du point où nous l'avons supposé placé, l'arête $e$, en s'avançant vers le centre de la boîte C, va recouvrir progressivement l'orifice $g'$ jusqu'à le fermer complétement et intercepter le passage de la vapeur.

Mais puisque le piston et ce tiroir sont partis ensemble de l'extrémité de leur course respective, il est clair qu'ils en ont accompli à chaque instant une même partie ; donc la portion de course effectuée par le tiroir B, pour couvrir l'orifice $g'$ est exactement proportionnelle à celle accomplie dans le même temps par le piston; or, la largeur de l'orifice $g'$ étant variable par le déplacement des registres $i$ et $j$, il s'ensuit qu'elle peut être une partie quelconque de la course du tiroir, laquelle sera toujours en parfaite correspondance avec la course du piston.

Ainsi, la fermeture de l'orifice $g'$ (le même raisonnement est applicable évidemment à celui $h'$) aura lieu exactement en telle position du piston qu'il peut être proposé, dans l'une ou dans l'autre moitié de la course; la précision du résultat est si simple et si facile à obtenir que l'on pourrait diviser la course du piston, pour ainsi dire, en millimètres, et interrompre l'admission de la vapeur successivement en chacun de ces points de division, à volonté.

D'autre part, le changement du degré de détente ne change jamais le point de départ au moment de l'introduction, attendu que le changement de position des registres $i$ et $j$ ne modifie que les arêtes intérieures des lumières $g'$ et $h'$, et que les bords extérieurs auxquels les arêtes $e$ et $f$ reviennent toujours à chaque fin de course sont invariables. Seulement les largeurs des lumières $g'$ et $h'$ et leurs sections sont proportionnelles aux volumes successifs d'admission à pleine vapeur.

Cependant, le rapport des longueurs de la bielle et de la manivelle n'étant pas le même que celui de la tige et du rayon de l'excentrique, les positions du tiroir et du piston ne sont pas rigoureusement identiques et en correspondance parfaite, excepté aux points extrêmes, relativement à leurs courses totales. Mais ce n'est qu'une correction à faire *ad hoc* aux divisions du cadran $n$ qui seraient égales sans cette circonstance. Néanmoins, elles peuvent être chiffrées en fractions exactes de la course du piston, et même suivant la division métrique, de façon à dire que l'admission à pleine vapeur est égale à 5, 6, 7, 8 centimètres, etc.

Quant à l'admission à pleine vapeur, pendant la course entière, elle est tout aussi facile à produire : il suffit de serrer assez les registres $i$ et $j$ pour que les ouvertures $h'$ et $g'$ qu'ils déterminent ne soient jamais recouvertes dans la course entière du tiroir B.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Tel est cet ingénieux mécanisme auquel nous ne connaissons cependant pas de nombreuses applications, malgré son mérite. On lui reproche ses deux excentriques et quelques ajustements demandant de la précision, tel que celui de la cloison séparative D par son pourtour avec la boîte à vapeur et celui des registres *i* et *j* dans leur cadre. Mais aussi elle procure la facilité de choisir le point de détente en un point quelconque de la course du piston, ce que nous avons vu impossible à obtenir à l'aide d'autres systèmes (p. 403) presque aussi complexes. Quant à l'emploi des deux excentriques, nous verrons que bien des constructeurs expérimentés ne craignent pas de les adopter.

M. George a proposé diverses modifications au mécanisme que nous venons de décrire, mais que nous ne croyons pas urgent de développer. Il s'agit principalement d'une détente fixe, mais en un point quelconque de la course du piston, ce qui est obtenu en établissant les glissières à poste fixe au lieu de leur appliquer, comme ici, un mécanisme mobilisateur, à volonté (1).

### DÉTENTE VARIABLE DITE DÉTENTE MEYER

(FIG. 3, PL. 12)

Ce système, imaginé en 1843 par M. J.-J. Meyer, ingénieur, ancien constructeur de machines à Mulhouse, a été non-seulement appliqué souvent par l'auteur, mais encore par plusieurs mécaniciens, et principalement aujourd'hui par la maison Cail et C^e^. Quelques mots suffiront pour faire comprendre en quoi il consiste et sur quel principe il est fondé.

On se rappelle le système de détente fixe opérant par une glissière mobile au moyen d'une commande spéciale par excentrique circulaire, et glissant sur le revers du tiroir principal, percé de deux lumières correspondant aux orifices de distribution. En expliquant les fonctions de ce mécanisme, nous avons montré (p. 396) que le degré de détente dépend de la longueur de la glissière, la course et l'angle de calage de son excentrique restant les mêmes.

Or, le système Meyer est la répétition du précédent, *avec la longueur de la glissière* VARIABLE, et par suite le degré de détente.

La fig. 3 de la pl. 12 représente ce mécanisme de distribution appliqué à une machine à vapeur de 60 chevaux, qui commande une soufflerie horizontale construite par l'ancienne Compagnie des établissements Cavé.

Le tiroir A étant exécuté avec ses deux lumières $a'$ et $b'$, correspondant à celles $a$ et $b$ du cylindre E, la glissière de détente, au lieu d'être d'une seule pièce, est composée de deux registres B et B′ dans lesquels sont encastrés des écrous en

(1) La détente variable de M. George est complétement décrite dans le IX^e^ volume du recueil *la Publication industrielle*. Nous devons dire qu'elle rappelle le système proposé par M. Gozenback pour les machines locomotives, où l'application des détentes variables n'a pu jusqu'ici se répandre à cause de la simplicité que l'on recherche avant tout dans ce genre de moteurs.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

bronze *d*, montés sur une vis C à filets inversement inclinés, et dont la tige prolongée doit mettre la glissière en mouvement à l'aide d'un excentrique circulaire.

Dans cette position, les deux registres sont entraînés par la tige C, comme une glissière d'une seule pièce ayant pour longueur leur distance extérieure, d'où il se produit une détente d'un degré correspondant à cette longueur.

Mais si l'on fait tourner la vis C sur elle-même d'une certaine quantité, les écrous *d*, qui ne peuvent pas tourner, s'écartent ou se rapprochent ainsi que les registres dont l'écartement extérieur est alors modifié, c'est-à-dire que la glissière est rallongée ou raccourcie et le degré de détente changé.

Ainsi, tout le principe de cette disposition réside dans la fonction de la vis à double filet, qui constitue la commande des registres et permet d'en modifier l'écartement suivant le degré de détente à produire.

L'assemblage de la tige filetée C avec l'excentrique doit se faire de façon qu'elle puisse tourner sur elle-même, lorsqu'on veut changer le degré de détente pendant la marche de la machine, sans cesser d'être rattachée aux pièces qui lui communiquent le mouvement de va-et-vient de cet excentrique. Il suffit, à cet effet, de couper cette tige entre la boîte à vapeur et un guide extérieur fixe, et de relier les deux parties par une chape dans laquelle elle forme tourillon à rappel. (Voir cette disposition sur les pl. 18 et 19, qui représentent une machine établie dans les ateliers de MM. Cail et C^e^.)

Pour agir de l'extérieur sur la tige filetée et la faire tourner sur elle-même quand on varie la détente, on lui fait traverser la boîte à vapeur par une seconde garniture, puis son prolongement *e* vient s'engager dans une douille F fixe pendant la marche, et qui lui forme un guide extérieur. Cette douille est ajustée dans un mamelon G appartenant à une console fixée après la boîte à vapeur, et peut y tourner sur elle-même sans s'y déplacer longitudinalement, attendu qu'elle est retenue par des goupilles *f* qui traversent le mamelon G et pénètrent dans une gorge circulaire pratiquée sur la circonférence de la douille.

La tige *e* et la douille étant clavetées ensemble au moyen d'une clef longue, on comprend qu'en agissant sur le volant manivelle H, fixé sur la douille, on fait aisément tourner la tige sur elle-même sans empêcher son mouvement longitudinal.

Pour mesurer cette action et régler le point de détente, on fait usage d'un index I monté à vis sur la douille F, qui est prolongée et filetée en dehors du mamelon G. Cet index porte un petit appendice qui s'appuie contre un arrêt fixe J attaché au mamelon G et l'empêche d'être entraîné par la douille lorsqu'on fait tourner celle-ci. Par conséquent, le mouvement circulaire imprimé à la douille fait déplacer longitudinalement l'index qui indique, par des divisions faites sur l'arrêt J, tous les degrés de détente correspondant aux positions successives qu'il occupe.

Ce moyen d'obtenir la distribution avec détente variable est simple et ingénieux tout à la fois. On lui reproche cependant de ne pas permettre de corriger les inégalités dues à l'influence de la bielle aussi facilement que par le système de M. Farcot, avec lequel il suffit de tracer la camme en conséquence. On pourrait y parvenir néanmoins en rendant les deux pas de vis différents, ce qui aurait pour résultat

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de déplacer aussi les registres simultanément de quantités différentes; les erreurs seraient alors peu sensibles.

Mais il resterait encore la question d'usure qui amène du jeu entre les écrous et la vis : on sait combien le graissage est difficile à maintenir à l'intérieur d'une boîte où règne continuellement une très-haute température.

## DÉTENTE VARIABLE DITE DÉTENTE TRÉZEL

(FIG. 4 A 7, PL. 12)

M. Trézel, ancien constructeur français à Saint-Quentin, a présenté au monde industriel, en 1844, un système de détente variable qui parut assez bien combiné pour atteindre le but proposé dans ses conditions théoriques les plus rigoureuses.

Afin d'en bien reconnaître le principe, il est bon de se rappeler ce qui a été dit sur les procédés de détente par un tiroir et une glissière mobile (p. 390), ainsi que sur l'emploi de la camme curviligne (p. 374) comme organe de commande remplaçant l'excentrique circulaire.

M. Trézel a appliqué le principe énoncé (p. 396), relatif à la variation de la détente par l'angle de calage, en remplaçant les excentriques circulaires par des cammes curvilignes équilatérales qui ouvrent beaucoup plus rapidement les orifices et possèdent certaines propriétés qui ont été mises en évidence. Nous allons expliquer comment l'auteur a mis ce système en pratique pour en obtenir les meilleurs résultats possibles.

DESCRIPTION DE LA DISTRIBUTION A DÉTENTE TRÉZEL. — Le mécanisme de distribution comprend la boîte à vapeur C, qui renferme le tiroir principal A, traversé par des lumières $a'$ et $b'$, et muni d'une glissière obturatrice B, pleine et d'une seule pièce.

D'après la disposition particulière de la machine à laquelle cet exemple est emprunté, le tiroir principal A est relié par sa tige $d$ à un cadre formé de tiges parallèles $e$ assemblées par leur extrémité inférieure, avec un T faisant partie d'un châssis D, à l'intérieur duquel se meut une camme curviligne E; cette dernière (fig. 5 et 7) est montée sur un bout d'arbre F, mis en mouvement par celui de la machine, et qui commande le tiroir presque exactement dans les mêmes conditions que celui représenté par la fig. 4 de la pl. 10.

La glissière de détente B est commandée d'une façon tout à fait analogue, à l'aide de sa tige $f$, qui est directement reliée à un autre châssis G, correspondant à une seconde camme curviligne H (fig. 5 et 6) également fixée sur l'arbre F, près de la première, mais produisant une course plus grande. Ce châssis G diffère du premier en ce que ses côtés actifs sont courbes au lieu d'être droits et parallèles; ils sont concentriques avec un point pris dans la partie supérieure de l'axe de ce mouvement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Cette forme particulière du châssis a pour but de corriger les inégalités dues à l'obliquité de la bielle.

On se rappelle qu'il résulte, en effet, de l'emploi de cet organe que, pour l'une des moitiés exactes de la course du piston, la manivelle décrit des angles plus faibles pour des divisions égales de cette course, et que, pour ces mêmes parties égales du chemin parcouru par le piston, le tiroir découvre *moins* l'orifice dans une moitié de cette course que dans l'autre.

Par conséquent, pour des chemins égaux du piston, dans chacune de ses deux directions, pris comme point de détente, la glissière obturatrice a plus de chemin à faire pour l'un que pour l'autre; ce sont les mêmes raisons qui ont fait augmenter d'un côté la longueur de la camme dans la détente Farcot.

C'est aussi ce qui est produit par le châssis curviligne G, qui, par rapport aux deux positions moyennes de la camme H, s'élève, avec la glissière B, d'une quantité plus grande au-dessus qu'au-dessous; autrement dit, si la position moyenne correspond au moment de l'obstruction de chacun des orifices $a'$ et $b'$, ou de la détente pour chacun de ces deux côtés de l'introduction, la glissière partant de ses positions extrêmes pour y arriver, fait plus de chemin en descendant qu'en montant, ce qui est conforme aux résultats combinés de la marche du piston et du tiroir A, sous l'influence de l'obliquité de la bielle.

Maintenant on varie le degré de détente en changeant l'angle de calage relatif des deux cammes, par la mobilité facultative laissée à celle H de détente. Cette camme n'est arrêtée sur l'arbre qui les porte toutes deux que par une vis de pression $g$ placée sur son moyeu, très-prolongé en dehors du châssis; un cadran I, adapté à ce moyeu, et une aiguille fixée sur l'arbre F permettent de régler les angles pour chaque point de détente.

M. Trézel a modifié plus tard cette partie du mécanisme de façon à pouvoir agir sur la camme et varier la détente (1).

La fig. 5 de la pl. 12 est un détail des deux châssis vus de face avec leurs cammes, suivant leurs positions relatives. Les fig. 6 et 7 représentent ces mêmes châssis, mais détachés l'un de l'autre pour mieux les faire voir, ainsi que les cammes.

Ces dernières diffèrent un peu par la forme avec la camme de Woolf (fig. 4 et 5, pl. 10), à laquelle nous les avons néanmoins comparées. Elles sont en effet disposées de telle sorte que le centre de l'arbre qui les met en mouvement est à leur intérieur, tandis que dans le premier exemple les courbes excentriques de la camme venaient se rencontrer sur ce centre même.

Cela, du reste, n'apporte pas de modification sensible à la loi du mouvement qui en résulte, puisque les arcs de cercle qui les constituent sont concentriques à ceux que l'on tracerait suivant le premier principe, mais augmentés de celui du moyeu réservé autour de l'arbre. Dans tous les cas, les angles arrondis valent mieux que des arêtes vives, et M. Trézel a construit des cammes semblables, dont les deux autres angles ont été arrondis sur un rayon très-prononcé.

(1) Voir la description complète de la détente Trézel dans la *Publication industrielle*, vol. IV, pl. 9 et 10.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Enfin, des expériences exécutées avec ce mécanisme de détente ont prouvé qu'il fonctionne bien et répond aux vues de l'auteur, c'est-à-dire qu'il permet :

1° De détendre en un point quelconque de la course du piston ;

2° De corriger l'influence de la bielle et même de modifier le degré d'ouverture pour les deux côtés, de façon à compenser même la différence de section du cylindre en raison de la tige du piston ;

3° D'ouvrir dans chacun des cas les orifices rapidement et presque entièrement.

Cependant ce système ne s'est pas autant généralisé qu'on aurait pu l'espérer, et cela peut-être à cause de la répugnance des constructeurs à employer plusieurs excentriques, et surtout des cammes avec des châssis mobiles dont l'exécution comporte toujours une grande précision dans le tracé comme dans l'exécution.

## DÉTENTE VARIABLE PAR UN MANCHON A BOSSES

Exécutée par **MM. STEHELIN** et **C^e^**, constructeurs à Thann

(FIG. 8 ET 8 BIS, PL. 12)

On attribue à **M.** Maudslay, en Angleterre, et à **M. J.-J.** Meyer, en France, un système de détente variable par un manchon à bosses, qui a reçu et qui reçoit encore bien des applications dans les machines à vapeur fixes.

En principe, cette disposition a été proposée principalement en vue de perfectionner le régulateur à force centrifuge en lui adjoignant un organe susceptible de mieux régler l'introduction de la vapeur qu'à l'aide du papillon ordinaire, et enfin de rendre ce système de régulateur plus efficace pour la conservation de la vitesse normale de la machine avec laquelle il fonctionne (1).

Si l'on se rend compte, en effet, des fonctions de l'appareil qui produit la détente, on ne tarde pas à reconnaître qu'il n'en varie le degré qu'à chaque écart de vitesse, comme nous l'avons montré à propos de la détente Farcot; mais sans présenter, comme cette dernière, la possibilité de changer à volonté le degré normal pour une même vitesse de la machine.

L'exemple que nous donnons (fig. 8) est pris sur une machine à double cylindre sortie des ateliers de **MM.** Stehelin et C^e^, constructeurs à Thann (Haut-Rhin), qui occupent aujourd'hui le premier rang parmi les constructeurs français.

La fig. 8 de la pl. 12 représente ce mécanisme en vue extérieure et la distribution sur laquelle il agit en coupe verticale.

La fig. 8 *bis* est une section horizontale suivant la ligne 1-2, et qui a pour objet de bien faire voir la forme du manchon à bosses et sa relation avec le châssis à l'aide duquel il communique avec la soupape d'admission.

(1) Ce système de régulateur a été présenté par **M.** Charbonnier ingénieur, à la Société industrielle de Mulhouse, qui en a fait un compte rendu favorable dans son bulletin, n° 83, année 1843.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ce système de détente a pour base une soupape B, appliquée à la boîte C du tiroir de distribution A, dans des conditions analogues à ce qui a été expliqué (p. 391) à l'égard d'une distribution à double boîte et à deux tiroirs; cette soupape est mise en relation par sa tige avec un manchon mobile D qui tourne à l'intérieur d'un châssis E, et qui est muni de deux parties saillantes *a*, en forme de cammes ou virgules, dont la proéminence est variable et progressive suivant le sens des génératrices de la partie cylindrique du manchon.

Chaque fois que ces parties saillantes se présentent vis-à-vis des bouts du châssis E, celui-ci est repoussé et entraîne la soupape qui laisse alors pénétrer la vapeur dans la boîte de distribution; les saillies ayant échappé, le châssis, redevenu libre, est renvoyé à sa position de repos par l'action d'un ressort, et la soupape B, sollicitée surtout par la pression de la vapeur, retombe sur son siége et intercepte le passage de cette dernière.

Or, si nous admettons qu'on se soit réservé le moyen d'élever plus ou moins le manchon sur son axe, même pendant la rotation, il est clair qu'il offrira au châssis des saillies plus on moins intenses; par suite la soupape sera soulevée plus ou moins et pendant des temps différents : de là le moyen de varier le temps d'introduction de la vapeur et le degré de la détente.

Maintenant pour compléter cette explication et bien apprécier la construction de tout le système, nous allons faire connaître les moyens employés par les constructeurs pour relier le manchon mobile au régulateur de vitesse.

L'arbre F sur lequel le manchon est ajusté n'est autre que celui du modérateur à force centrifuge qui a, comme on le sait, pour fonction de régler la vitesse de la machine; seulement ici, au lieu de communiquer avec une simple valve ou papillon, il doit soulever le manchon qui y est retenu par une clef longue, et mettre la détente en rapport avec les variations momentanées du travail qui amèneraient les écarts de vitesse qu'il faut combattre.

Ce manchon de détente, tournant avec le régulateur, s'y trouve aussi suspendu par deux tiges *b* qui sont en effet rattachées à la douille mobile que l'écartement plus ou moins considérable des boules fait élever ou abaisser sur l'axe de rotation F. Par conséquent, si la vitesse de la machine s'accroît, les boules du régulateur soulèvent, en s'écartant, le manchon D, qui présente alors au châssis E des saillies moins fortes; il en résulte que l'admission à pleine vapeur est réduite, et par suite la machine, recevant moins de vapeur, diminue de vitesse.

Dans le cas contraire où une augmentation de charge fait diminuer la vitesse de la machine, les boules du régulateur retombent, et le manchon, en s'abaissant, fait faire au châssis E une plus grande course, ce qui augmente la durée de l'admission de la vapeur et ramène de nouveau la machine à sa vitesse normale, en mettant sa puissance en équilibre avec les efforts qu'elle est appelée à vaincre.

Le châssis E, qui reçoit l'action des cammes *a* du manchon, est composé, pour la facilité du montage, de deux parties à peu près demi-circulaires reliées ensemble par des platines et des boulons. L'une de ces parties est clavetée avec une tige *c* qui sert de guide et, en dépassant à l'intérieur du châssis le mamelon avec lequel elle

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

est clavetée, présente une saillie ronde contre laquelle les cammes viennent agir pour entraîner le châssis et soulever la soupape B de son siége. Pour que ce châssis ne tende pas à varier de sa position horizontale, l'un de ses mamelons est muni d'une clef qui dépasse et glisse entre deux potences *o* fondues avec le bâti G.

La tige *c* traverse l'une des colonnes G composant le bâti sur lequel ce mécanisme est établi; elle pénètre ensuite dans une douille creuse *d*, à l'intérieur de laquelle est disposé un ressort à boudin qui a pour objet de commencer à repousser le châssis lorsque les cammes sont passées; à cette action s'ajoute la pression de la vapeur pour ramener la soupape sur son siége.

Cependant comme il pourrait arriver que cet effet ne se produisît pas assez promptement par suite de l'insuffisance du ressort, ce qui ferait infailliblement emporter la machine, le manchon D a été muni à sa partie inférieure d'une double camme *m* qui vient buter à propos sur un appendice *n* fixé avec l'un des mamelons du châssis E qui est ainsi forcément repoussé, ce qui assure la fermeture de la soupape.

Cette extrémité du châssis est assemblée de même avec une tige *e* qui est reliée avec celle *f* de la soupape par une genouillère dite de *Cardan*, en vue de parer aux dénivellations qui pourraient se produire entre le cylindre de la machine et le bâti G qui ne sont pas montés sur une plaque de fondation unique.

Les deux colonnes qui forment le bâti G sont reliées à leur partie inférieure par une forte semelle nervée, et, près du mouvement du châssis, par une traverse *g* dans laquelle est ménagé un collet pour l'arbre F. Celui-ci étant prolongé plus bas, traverse de même la semelle du bâti et vient reposer, par un pivot, sur une crapaudine fixée sur la maçonnerie et indépendante de cette première partie du mécanisme.

Il reçoit son mouvement par une paire de roues d'angle dont l'une appartient à un arbre de couche spécial, commandé de même par celui de la machine, et qui porte aussi l'excentrique circulaire pour faire marcher le tiroir de distribution.

Si le manchon D était simplement suspendu au régulateur, on comprend que ce dernier devrait exercer un effort considérable pour le soulever, ce qui est contraire aux fonctions ordinaires d'un régulateur à force centrifuge dont les boulets ne doivent être appelés à développer qu'une faible force motrice. Aussi ce manchon doit-il être bien équilibré.

Il est en effet repoussé de la partie inférieure par une rondelle *h* sur laquelle il semble reposer et qui embrasse l'arbre sans tourner avec lui; cette rondelle est assemblée avec deux tiges verticales *i* qui pénètrent dans la traverse *g* de chaque côté de l'arbre F, et sont terminées à leur extrémité inférieure par des galets de friction, contre lesquels viennent agir les branches d'un levier à contre-poids qui prend son point d'appui et d'oscillation sur une console fixée après la semelle du bâti G. On comprend, d'après cela, que le poids du manchon D se trouve complétement soustrait à l'action du régulateur qu'il suit alors dans tous ses mouvements sans le charger.

Il nous reste maintenant à donner quelques détails sur le tiroir distributeur A

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

qui, pour cette application particulière, présente une disposition que nous n'avions pas encore eu l'occasion de citer : nous avons vu, en effet, qu'il dépend d'une machine à double cylindre, dont le mode de distribution offre des circonstances toutes spéciales, ainsi qu'on le verra plus loin, avec beaucoup de développement.

Pour l'instant, nous nous bornons à faire remarquer que le tiroir A est construit pour distribuer à deux cylindres à la fois, l'échappement de l'un fournissant de la vapeur à l'autre, et la sortie du dernier s'effectuant comme à l'ordinaire dans un milieu à basse pression, c'est-à-dire au *condenseur*.

A cet effet, la table de glissement est percée de cinq orifices dont deux $j$ et $j'$ communiquent avec le premier des deux cylindres; deux autres $k$ et $k'$ avec le second cylindre; et l'orifice central $l$ communique avec le condenseur.

D'autre part, en sus du vide ordinaire $n$ pour l'échappement, le tiroir A possède un canal intérieur $m$ dont on va reconnaître aisément les fonctions.

Dans la position indiquée fig. 8, la vapeur que la soupape B a laissé passer remplit la boîte C, et comme le tiroir découvre par son bord extérieur l'orifice $j$, elle y pénètre et parvient dans le premier cylindre sur l'un des côtés du piston. Alors la vapeur qui s'échappe par l'autre côté débouche par l'orifice correspondant $j'$, lequel est maintenant en rapport avec le canal $m$ dont l'extrémité opposée correspond avec la lumière $k$ du deuxième cylindre. Par conséquent, tandis que la vapeur de la boîte est introduite dans le premier cylindre, la vapeur qui s'en échappe est dirigée sur le second par le canal intérieur $m$ du tiroir A; et enfin, la vapeur d'échappement de ce deuxième cylindre passe de $k'$ en $l$ par le vide $n$, pour aller au condenseur.

En un mot, le tiroir A en constitue deux l'un dans l'autre. Cette disposition a pour but, et comme mérite, de diminuer les espaces perdus ou nuisibles que la vapeur, qui passe d'un cylindre dans l'autre, remplirait en pure perte si chacun des deux cylindres possédait ses boîtes et tiroirs distincts.

La détente Meyer ainsi établie représente, comme on le voit, un mécanisme assez important qu'il serait peut-être difficile de simplifier. Dans l'application actuelle, cette objection diminue d'importance à cause de la grande puissance de la machine qui est d'une force nominale de 80 chevaux. Nous en donnerons quelques détails en parlant des machines à deux cylindres.

## EMPLOI DES SOUPAPES ÉQUILIBRÉES

### COMME ORGANES DISTRIBUTEURS

Dans les systèmes divers de distribution, avec ou sans détente, qui ont été passés en revue jusqu'ici, chaque fois que le tiroir ou les organes qui le remplacent, robinets ou disques, a été employé et commandé par un excentrique circulaire, ou même par une camme, on a pu constater le manque de spontanéité dans l'ouverture ou la fermeture des orifices, ainsi que la grande pression de la vapeur qui pèse sur le revers du tiroir et le rend difficile à mettre en mouvement; cette dernière cir-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

constance est alors le motif principal qui s'oppose à faire les orifices beaucoup plus grands, ce qui conduirait à de très-grands tiroirs et à d'énormes efforts à vaincre. Il est vrai de dire que des hommes très-expérimentés ont imaginé des tiroirs *équilibrés;* mais l'application n'en est pas encore générale.

Ce qui se pratique au contraire avec succès, c'est l'emploi de soupapes et surtout des soupapes dites de *Cornouailles* (Cornwall), qui peuvent fournir promptement de très-grandes ouvertures, et qui n'exigent pour être manœuvrées que des efforts relativement faibles.

Ce système de distribution doit son nom à l'application importante qui en a été faite aux grandes machines d'épuisement des mines de Cornwall (Angleterre).

Mais le principe en est assez ancien, et dû, suivant Tredgold, à Hornblower, ingénieur anglais dont nous avons cité le nom dans l'historique.

Si l'application est venue longtemps après que l'auteur l'a proposée, il est vrai de dire que cette invention a été bien perfectionnée depuis que Tredgold en a reproduit une image.

M. Gingembre, ancien ingénieur d'Indret, a été l'un des premiers constructeurs en France qui aient appliqué la distribution par soupapes, mais en séparant alors les soupapes de sortie de celles d'introduction.

Depuis quelque temps l'emploi de la soupape équilibrée s'est propagée, et divers constructeurs français en ont fait des applications. On sait que les machines du chemin de fer atmosphérique de Saint-Germain fonctionnent à l'aide d'une distribution ainsi disposée. M. Farcot a aussi construit, avec des soupapes équilibrées, d'excellentes machines dont nous montrerons un exemple.

Notons, qu'à part les propriétés particulières de ces organes distributeurs, on est conduit par leur adoption à séparer complétement l'introduction de la vapeur de son échappement, ce qui est d'un excellent effet pour éviter le refroidissement de la vapeur active.

Avant de décrire la distribution à soupapes construite par M. Révollier, mécanicien à Saint-Étienne, nous allons examiner en principe la soupape elle-même, en choisissant pour exemple l'une de celles appliquées à l'ensemble et représenté par la fig. 11 de la pl. 12.

## CONSTRUCTION D'UNE SOUPAPE DITE ÉQUILIBRÉE

### (FIG. 11, PL. 12)

L'ensemble d'une soupape du système de Cornwall comprend deux pièces principales : le siége A et une cloche B qui vient y reposer par deux rebords distincts, dont les diamètres respectifs diffèrent d'une quantité telle que l'extérieur de l'un correspond à l'intérieur de l'autre.

Le siége est composé d'un anneau *a* dont la circonférence intérieure est tournée



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

pour recevoir le bord de la cloche et constituer l'un des deux joints. Cet anneau est fondu avec une sorte de coupole pleine *b*, dont le bord est également disposé pour former l'autre point de contact avec la cloche; l'anneau et la coupole sont réunis par quatre nervures perpendiculaires *c*, dont l'extérieur tourné sert de guide à la cloche. L'ensemble du siége se place sur la cloison C qui forme la paroi de la capacité où la vapeur doit pénétrer, en encastrant l'anneau *a* dans une fraisure ménagée autour de l'ouverture percée pour le passage du fluide, et se fixe au moyen d'un boulon *d*, qui traverse un mamelon fondu au centre de la coupole, et dont la tête est arrêtée par une barrette *e* placée en travers de l'ouverture de la cloison.

La cloche B est entièrement circulaire et percée d'outre en outre; elle est munie seulement, à sa partie supérieure, de quatre rayons ou bras *f* au centre desquels se fixe la chappe *g*, par laquelle elle est soulevée.

Deux points de la cloche sont alors tournés avec exactitude pour coïncider par des limbes étroits avec les bords correspondants de l'anneau et de la coupole.

Par conséquent, si nous supposons l'extérieur de la cloche plongé dans la vapeur et en contact exact avec le siége par ces deux parties tournées, il est clair que la pression s'exercera autour de cette cloche et sur la face concave de la coupole, tandis que son passage par l'ouverture de la cloison C sera complétement intercepté.

Mais cette cloche étant soulevée et détachée de son double contact, la vapeur passera par les deux espaces annulaires que le soulèvement détermine à partir de l'anneau *a* et du bord de la coupole *b*.

Pour se rendre compte de la propriété fondamentale de cette disposition de soupape, que l'on regarde comme presque équilibrée, il faut considérer son débit comme correspondant à la section de l'ouverture de la cloison C, et y supposer l'application d'une soupape ordinaire.

Remarquons que si une soupape pleine ordinaire se trouvait placée sur un conduit d'un égal diamètre, l'effort à exercer pour la détacher de son siége serait égal à la différence de pression des deux milieux, multipliée par la section circulaire augmentée du limbe de contact de la soupape.

Avec le système de Cornwall il existe deux orifices d'introduction au lieu d'un seul, et qui, de plus, sont disposés suivant des surfaces cylindriques au lieu d'être parallèles à la direction du mouvement imprimé à la soupape pour la soulever.

Il en résulte que l'effort à exercer dépend uniquement de la superficie des surfaces de contact, mesurée suivant leur projection dans un plan perpendiculaire à l'axe, lequel est aussi celui de son mouvement. Et comme la largeur des deux limbes par lesquels la soupape repose sur l'anneau *a* et sur le bord de la coupole *b*, est *théoriquement* arbitraire, cet effort pourrait être infiniment diminué si la pratique n'indiquait une limite pour obtenir des surfaces de joints suffisantes.

Résumons ceci par un examen des dimensions de la soupape prise pour exemple.

Le diamètre de l'anneau *a*, au contact extérieur de la soupape, est de 160 millimètres et celui de la coupole, à l'intérieur du même contact, est égal à 130. Les deux zones de jonction ayant un diamètre intérieur et extérieur commun, leur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

superficie transversale devient la différence de celles de ces deux cercles, soit :

$$\frac{3{,}1416 \times \overline{16}^2 - \overline{13}^2}{4} = 68^{c.q.}\ 33$$

Par conséquent, si nous supposons que la pression effective de la vapeur à l'extérieur de la soupape égale 1/2 kil. par centimètre carré, il faudra faire un effort de 34 kilogrammes environ pour la soulever, tandis qu'avec une soupape ordinaire dans les mêmes conditions et pour la même ouverture on trouverait :

$$0^k5 \times \frac{3,1416 \times \overline{16}^2}{4} = 100^k5$$

Mais le travail dépensé pour lever la soupape de Cornwall est réduit dans un plus grand rapport, attendu qu'elle ouvre simultanément deux passages, d'où sa levée est moitié moindre pour un même orifice offert au débit. Par conséquent, si l'effort est à peu près réduit au tiers, le travail l'est au sixième, approximativement.

D'après cela on voit qu'il ne faudrait cependant pas dire : *soupapes équilibrées,* comme on les nomme généralement, mais plutôt : *soupapes allégées,* puisque l'équilibre n'est pas complet.

## ENSEMBLE D'UNE DISTRIBUTION A SOUPAPES

Par **M. J. F. RÉVOLLIER**, constructeur à Saint-Étienne

(FIG. 9 ET 10, PL. 12)

Ces figures représentent le détail de la distribution de vapeur qui a été appliquée par M. Révollier à la machine que ce constructeur avait présentée en 1855 à l'Exposition universelle où chacun a pu la voir en fonction (1).

La fig. 9 est une section longitudinale de la boîte à vapeur qui est fondue avec le cylindre : on remarquera que, pour conserver une assez grande échelle, nous n'avons montré que l'une des parties correspondant à une extrémité du cylindre, l'autre étant du reste complétement semblable;

La fig. 10 est une section transversale du cylindre, faite sur l'axe de la boîte à soupapes opposée à celle que représente la fig. 9.

Comme ensemble cette distribution comprend quatre soupapes destinées respectivement deux à deux à l'introduction et à l'échappement de la vapeur. Ces soupapes sont mues par un excentrique circulaire qui actionne un mécanisme permettant, néanmoins, d'opérer une détente, ainsi que nous allons l'expliquer.

(1) La machine de M. J.-F. Révollier se trouve complétement décrite et représentée avec détail dans la *Publication industrielle,* vol. XI, pl. 2.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

(En réalité cette machine possède deux excentriques, attendu qu'elle est à changement de marche à l'aide du mécanisme dit : *Coulisse de Stephenson*, particularité dont nous ne pouvons pas encore tenir compte).

Jeu des soupapes. — Le cylindre A est fondu avec deux boîtes semblables à celle B, et dont la forme extérieure est cylindrique comme les organes principaux qu'elles renferment. Ces deux boîtes sont donc identiques l'une à l'autre et correspondent aux deux sens du mouvement du piston moteur. Elles sont divisées dans le sens vertical en trois compartiments distincts : *a*, *b* et *c*. Les compartiments supérieurs *a* communiquent constamment ensemble par un canal C, fondu de la même pièce que le cylindre et par lequel leur arrive la vapeur sortant du générateur. Ceux intermédiaires *b* sont mis en rapport par le jeu des soupapes, alternativement avec les compartiments inférieurs et supérieurs *a* et *c*, mais communiquant toujours avec l'intérieur du cylindre. Enfin, les compartiments inférieurs *c* se réunissent au canal D, par lequel s'effectue l'échappement de la vapeur après qu'elle a terminé son action motrice sur le piston.

L'admission permanente de la vapeur dans le canal C se règle par une soupape E, surmontée d'une tige filetée à manivelle *d*, que l'on tourne à volonté pour faire reposer la soupape sur son siége ou l'en éloigner, suivant que l'on veut arrêter la machine ou la mettre en marche. Cette soupape est montée dans une boîte *e*, fondue avec le cylindre, ainsi que le canal *f* qui amène la vapeur de la chaudière et dont la tubulure F reçoit la boîte du papillon régulateur.

Pour simplifier l'explication du jeu des soupapes qui mettent ces diverses parties en rapport, il suffira de s'attacher à l'une des deux boîtes B, celle que la fig. 9 représente, puisqu'elles sont semblables toutes deux.

La soupape supérieure H règle la communication du canal C, toujours plein de vapeur, avec le compartiment intermédiaire *b* qui s'ouvre directement dans le cylindre ; lorsque cette soupape se lève, la vapeur s'introduit et pousse le piston. La soupape inférieure I repose en ce moment sur son siége et interrompt nécessairement la communication entre les compartiments *b* et *c*.

Mais au retour du piston, la soupape supérieure est fermée et la vapeur du canal C n'entre plus en *b* ; celle I, qui est au contraire levée, fait communiquer les compartiments *b* et *c*, et permet à la vapeur de s'échapper en s'écoulant par le canal D.

Or, l'opération qui s'effectue dans l'une des boîtes à soupapes B a lieu évidemment dans l'autre, mais inversement, c'est-à-dire que la soupape d'introduction H de l'une se lève simultanément avec celle d'échappement I de l'autre, ou bien elles se ferment dans le même ordre. Cependant, ces mouvements ne sont pas absolument simultanés, attendu que le mécanisme qui fait mouvoir les soupapes agit avec des intermittences pour produire de l'avance et de la détente, comme nous le dirons tout à l'heure.

Il est bon de remarquer que les soupapes d'échappement sont plus grandes que celles de l'introduction, d'accord en cela avec ce qui se fait toujours pour les orifices de sortie, parce que la vapeur qui s'échappe possède une pression relativement moindre, et par conséquent une vitesse moins grande que celle active qui vient du

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

générateur, et parce qu'il existe un grand intérêt à faciliter son prompt écoulement. A cet égard les soupapes permettent, en séparant leur mécanisme de commande, de les faire agir isolément et dans des temps différents.

Mécanisme de la commande des soupapes. — Chaque soupape H ou I est disposée pour être soulevée par un levier horizontal $g$, situé à l'intérieur des boîtes B et ayant son point d'oscillation retenu après leur paroi au moyen d'un goujon fixé extérieurement par un écrou $h$. Chaque levier $g$ traverse en son milieu la chape appartenant à la soupape, et son extrémité s'engage dans une mortaise ménagée à la partie inférieure d'une tige verticale $i$ qui communique avec l'extérieur en traversant une boîte à étoupe $j$. Seulement, la tige qui correspond à la soupape inférieure I devant traverser le compartiment $a$, se trouve entourée dans cet espace par un fourreau métallique $k$ qui pénètre jusque dans la boîte à étoupe, afin d'éviter toute communication anormale de vapeur d'un compartiment dans l'autre. De plus, comme les soupapes H et I sont situées dans un même plan, le levier $g$ commandant celle supérieure H est détourné pour éviter le fourreau.

En dehors des boîtes à étoupe, les tiges $i$ sont assemblées avec des chapes J surmontées chacune d'une tige cylindrique qui traverse l'une des deux douilles K d'un guide fixe K′ ; cette douille renferme un ressort à boudin $l$ qui agit contre le bout de la tige pour aider la descente de la soupape, lorsqu'elle est abandonnée par le mécanisme qui l'a soulevée. L'extérieur de la douille K est filetée et munie d'un écrou à l'aide duquel on règle l'énergie du ressort à boudin.

Les deux soupapes d'une même boîte B sont mises en mouvement par un petit balancier L dont les extrémités sont engagées dans les chapes J sur lesquelles il agit alternativement en les soulevant, ainsi que les tiges $i$ qui entraînent les leviers $g$ et par conséquent les soupapes.

Chaque balancier L est monté sur un axe horizontal $m$, dont l'extrémité porte un levier L′ auquel le mouvement de l'excentrique fait décrire un arc de cercle. La transmission du mouvement de l'excentrique a lieu au moyen d'une barre G qui exécute un va-et-vient en ligne droite dans des guides $n$ fixés au cylindre; cette barre porte deux chapes rectangulaires $o$ dans lesquelles les leviers L′ sont assemblés en coulisse pour la compensation de l'arc de cercle que décrivent leurs extrémités.

Par conséquent, les deux balanciers, pour les deux systèmes semblables B, et leurs leviers de commande L′, forment comme deux T qui se meuvent ou oscillent toujours parallèlement en donnant aux soupapes des mouvements presque simultanés; seulement il est clair que, lorsque la soupape d'introduction H est soulevée d'un côté, c'est celle d'échappement qui l'est de l'autre, *et vice versâ*, tandis que les deux autres soupapes sont immobiles sur leurs siéges.

Moyen d'opérer la détente. — Si l'on considère l'ouverture des chapes J et qu'on en fasse la comparaison avec la dimension de la partie des balanciers L qui y pénètre et les actionne, on voit que la plus grande partie de la course de ces balanciers peut s'effectuer sans produire d'effet, c'est-à-dire en donnant lieu à un temps perdu pendant lequel la soupape correspondante reste en repos.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Or, de cette particularité naît le moyen de produire de la détente puisque chaque soupape d'introduction peut s'ouvrir et se fermer dans un temps plus court que celui de la course complète de l'excentrique et de celle du piston. Cette détente peut même s'effectuer dans des conditions théoriques rationnelles, puisque la levée de la soupape et sa fermeture auront lieu subitement, tout en ouvrant l'orifice en plein, et que le maximum de levée correspond toujours à l'extrémité supérieure de la course des balanciers qui est nécessairement invariable.

Le temps de la levée de la soupape dépendant de la quantité de course à vide des balanciers L dans leurs chapes J, on peut alors, en en modifiant l'ouverture, changer en même temps la quantité de course à vide et varier le degré de détente. On peut obtenir ce résultat en introduisant des cales d'épaisseurs différentes dans les mortaises des chapes, de façon à en réduire convenablement la hauteur.

---

Si les notions que l'on vient de lire dans ce chapitre ne complètent pas ce que l'on pourrait dire sur les divers moyens qui ont été proposés pour opérer la distribution de la vapeur, elles permettent au moins d'en avoir une idée suffisante et surtout de se rendre aisément compte des systèmes que l'on pourra rencontrer sans être mentionnés ou décrits avec détail. D'ailleurs les ensembles de machines que nous décrirons bientôt présentent quelques variétés de mécanismes distributeurs que quelques mots permettront alors de faire comprendre.

La distribution d'une machine à vapeur est une des choses les plus importantes, en général; mais le mécanisme en est aussi bien minutieux, difficile à combiner et à exécuter dans les meilleures conditions. On a beaucoup cherché, beaucoup fait à ce sujet; des ingénieurs éclairés, des praticiens habiles ont imaginé de très-ingénieuses dispositions, et pourtant on n'est pas complétement satisfait : il reste beaucoup à faire encore

FIN DU CHAPITRE DEUXIÈME.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

# CHAPITRE III

## APPAREILS D'ALIMENTATION DES GÉNÉRATEURS A VAPEUR

(PLANCHE 13)

Les appareils qui servent à alimenter les générateurs à vapeur, en leur fournissant l'eau qui est sans cesse enlevée par l'évaporation, sont moins des accessoires affectés aux moteurs mêmes qu'à leurs générateurs proprement dits, et, à ce titre, ils auraient pu trouver place dans la description de ces derniers. Cependant, la pompe alimentaire est tout à fait adhérente à la machine, elle en reçoit directement son mouvement : elle fait donc réellement partie de son mécanisme; nous avons dû, par cela même, la classer avec les divers organes qui la composent.

Disons toutefois que l'on rencontre des machines à vapeur qui n'ont pas de pompe d'alimentation, mais alors leur générateur est alimenté par un appareil spécial indépendant.

Nous avons donc, dans les appareils d'alimentation, à décrire deux systèmes différents et bien distincts, savoir :

1° Les pompes foulantes, dites *pompes alimentaires,* que la machine motrice actionne directement, ou bien qui sont commandées par un moteur spécial connu sous le nom de *petit-cheval*. Les locomotives, et surtout les machines de navigation, sont généralement munies de cet appareil, parce qu'il permet de régler à volonté plus facilement la quantité d'eau envoyée au générateur, et particulièrement d'alimenter celui-ci dans les moments d'arrêt de la machine principale;

2° Les appareils, que l'on appelle *automoteurs,* et qui, sans mécanisme, mais par un jeu convenablement combiné de soupapes mises en relation avec le niveau de l'eau contenue dans le générateur, permettent à l'eau d'un réservoir extérieur d'y pénétrer en surmontant la pression intérieure. Parmi ces derniers appareils on en distingue quelques-uns qui ne peuvent être appliqués qu'autant que la pression dans le générateur dépasse peu celle de l'atmosphère ambiante, et d'autres qui peuvent, au contraire, convenir à des pressions beaucoup plus élevées.

Enfin, il est apparu depuis peu un appareil qui diffère des précédents d'une manière notable. C'est un injecteur qui a pour principe l'action dynamique d'un courant de vapeur, et qui alors, puisant cette vapeur dans le milieu même où l'eau doit être introduite, rend indifférent le chiffre de la pression intérieure, au moins quand elle dépasse celle de l'atmosphère ambiante. Nous avons nommé l'injecteur

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de M. Giffard que nous devrons décrire avec tous les détails nécessaires pour permettre d'apprécier, comme il le mérite, tout ce qu'il renferme d'ingénieux.

Nous allons donc essayer de faire connaître ces divers systèmes d'appareils d'alimentation, en suivant l'ordre indiqué ci-dessus.

## POMPES ALIMENTAIRES

### POMPE FOULANTE SIMPLE

(FIG. 1 A 3, PL. 13)

DISPOSITION GÉNÉRALE. — Les pompes les plus généralement en usage, et que l'on applique directement à la machine motrice, sont analogues à celle dont la fig. 1 de la pl. 13 montre une coupe transversale faite par l'axe commun du corps et des boîtes à clapets.

Une pompe alimentaire *refoule* l'eau en surmontant la pression intérieure du générateur, et en aspirant à une faible hauteur. Cette circonstance, jointe au petit diamètre qu'elle a presque toujours, fait qu'on adopte un piston plein appelé *piston plongeur* ou simplement *plongeur*. C'est, en général, le système adopté chaque fois que l'on doit surmonter une forte pression, soit par l'élévation propre de la colonne d'eau, soit par la pression du milieu dans lequel il faut la faire pénétrer.

La pompe représentée fig. 1 comprend un corps cylindrique A, en fonte de fer ou de bronze, dans lequel joue le piston proprement dit B, qui n'est autre qu'un cylindre plein ou évidé intérieurement, mais tourné très-exactement à l'extérieur. Ce corps de pompe est muni, à sa partie supérieure, d'un *stuffingbox* avec presse-étoupe *a*, qui guide le piston et doit empêcher toute communication avec l'air extérieur. Au-dessous de cette garniture, il est d'un diamètre un peu plus fort que celui du piston, afin que celui-ci y joue sans frottement, le presse-étoupe et le fond du stuffingbox étant ses seuls guides.

Le modèle dont nous donnons ici le type présente cette particularité que le corps de pompe est fondu de la même pièce avec les boîtes à clapets; c'est une disposition qui est très-souvent adoptée, surtout pour les petites forces.

Le corps principal est muni, à sa partie inférieure, d'une boîte ou *chapelle* C, de forme oblongue, dont l'intérieur est divisé de façon à former deux chambres *b* et *b'* pour les clapets D et D', dits d'aspiration et de refoulement; des canaux *d*, *d'* mettent ces clapets en relation respective avec leurs conduits correspondants E, E' et avec le corps principal.

Selon la disposition adoptée pour les pompes foulantes, on voit par le dessin que l'intérieur du corps de pompe A est mis en communication, d'un côté, par l'ouverture latérale *c* avec la première chambre *b* qui renferme le clapet d'aspira-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

tion D, et, de l'autre, par l'orifice inférieur $c'$ avec le dessous du second clapet D′ dit de *refoulement*. Et de même le tuyau d'aspiration E est en relation directe par le canal $d$ avec le dessous du clapet D, tandis que le tuyau E′, qui communique avec la chaudière, correspond, par le canal $d'$, à la seconde chambre $b'$, au-dessus du clapet D′.

On sait, d'après cela, que lorsque le piston se lève, le vide qu'il laisse à [illegible]ieur fait prédominer la pression atmosphérique sur le réservoir dans lequel [illegible]ge le tube E, d'où l'eau s'introduit dans le corps de pompe en soulevant le clapet D. Lorsque le piston descend, au contraire, l'eau refoulée soulève le deuxième clapet D′ en fermant le premier, et pénètre, par le conduit E′, dans le générateur en surmontant la pression, qui est vaincue par l'effort mécanique que développe le piston.

Sans nous arrêter davantage sur cette fonction, qui est celle de toutes les pompes foulantes, nous allons indiquer quelques particularités de la construction de l'appareil choisi pour exemple.

Détails de construction. — Les clapets de cette pompe sont de la forme dite *en champignon;* ils sont semblables et de mêmes dimensions; la fig. 3 représente l'un d'eux en élévation et en plan vu en dessous. Ils se composent d'un disque plat, dont le bord est tourné conique pour l'application sur le siége, avec une douille ou queue cylindrique cannelée ou évidée latéralement en trois parties pour servir de guide tout en laissant le passage au fluide.

Les clapets sont ajustés dans des ouvertures cylindriques dont l'entrée ou le bord supérieur forme le *siége* proprement dit; ces ouvertures sont concentriques avec les chambres $b$ et $b'$, lesquelles sont également circulaires et entièrement ouvertes par le haut, afin de permettre l'introduction des clapets et leur ajustement sur leur siége. Pendant la marche de l'appareil, chacune de ces chambres est fermée très-hermétiquement par un tampon ou couvercle en fonte $e$ dont on fait le joint au moyen d'une rondelle de cuir ou de plomb. Comme il est indispensable de pouvoir au besoin visiter les clapets et opérer dans tous les cas assez rapidement, les tampons $e$ sont retenus par une simple vis de pression à poignée F, taraudée dans un étrier en fer G qui s'accroche à des ergots $f$ venus de fonte avec le corps principal de la pompe.

Cette disposition est facilement comprise à l'aide de la fig. 2 qui est une vue de côté de l'ensemble de la pompe, mais suivant une section transversale faite sur la ligne d'axe 1-2 de la boîte $b'$ du clapet de refoulement.

Si pour une cause quelconque on veut visiter l'un des clapets, il suffit alors de desserrer la vis F suffisamment pour pouvoir dégager l'étrier, puis de soulever le tampon. Cette opération se fait donc très-facilement et en peu de temps, ainsi que la remise en place.

Souvent même, pour être dispensé de mettre l'étrier à sa place en prenant soin de l'accrocher, ses branches sont montées sur des tourillons d'après lesquels on le fait tourner en le rabattant, au lieu de le détacher tout à fait.

Ceci présente l'avantage de rendre toutes ces pièces solidaires et d'éviter qu'elles ne s'égarent accidentellement dans un temps de réparation quelque peu prolongé.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On voit que chaque clapet porte à sa partie supérieure une petite tige *g* qui fait corps avec lui. Elle sert à plusieurs fins, d'abord pour prendre le clapet et le sortir de sa place, mais particulièrement pour le saisir lorsqu'on doit le rôder sur son siége. Lorsqu'il est en fonction, cette petite tige sert à limiter sa course en butant contre le tampon de fermeture, afin d'éviter qu'en se soulevant trop, le clapet n'abandonne la partie cylindrique qui le guide et que, par suite, il ne retombe pas sur son siége.

La garniture dans laquelle joue le piston n'est remarquable que par sa simplicité. Elle se compose de tresses de chanvre bien graissées et maintenues serrées autour du piston par le bouchon ou presse-étoupe *a* et par deux boulons *h* dont les têtes s'appuient contre des oreilles venues de fonte avec le corps de pompe. Le presse-étoupe est rarement muni d'un godet graisseur, attendu que l'étoupe seule, qui doit être grasse, est lubrifiée avec du suif plutôt qu'avec de l'huile; et d'ailleurs l'appareil fonctionnant à de basses températures, relativement, la graisse se conserve assez longtemps.

Nous disons relativement, car on alimente assez généralement avec de l'eau tiède. Cependant, si la température dépasse 30 à 40 degrés environ, la pompe fonctionne mal; et lorsque l'on veut profiter de certaines chaleurs perdues pour chauffer l'eau d'alimentation, il vaut mieux alors effectuer cette opération entre la pompe et le générateur pour que celle-ci ne reçoive que de l'eau froide. Nous avons eu l'occasion de montrer, à propos des générateurs, quelques dispositions relatives à l'utilisation de la chaleur perdue au profit de l'eau d'alimentation.

Le modèle de pompe que nous venons de décrire peut s'exécuter aussi bien en bronze qu'en fonte de fer, même dans les dimensions qu'elle possède sur le modèle représenté. En tout cas, il semble convenable que toutes les pièces qui la composent soient de la même matière, si ce n'est toutefois les clapets qu'il est assez urgent de conserver en bronze à cause de leur délicatesse et de leur ajustement. De l'avis de plusieurs praticiens expérimentés, la présence de métaux différents en contact avec de l'eau, dont l'action est toujours tant soit peu acide ou saline, donne naissance à un courant galvanique qui accélère l'oxydation de l'appareil. Sans vouloir affirmer que cette objection soit tout à fait sérieuse, nous en tenons compte comme d'une remarque propre à fixer l'attention et à provoquer, à l'occasion, des recherches utiles.

Commande des pompes alimentaires. — Dans leur application aux machines à mouvement direct, non à balancier, les pompes alimentaires sont, le plus souvent, commandées par un excentrique circulaire placé sur l'arbre moteur à côté de celui du tiroir. L'excentrique est rattaché à une bielle dont l'extrémité opposée est terminée par une chape qui s'assemble avec l'anneau *i* fixé au piston B par un taraudage ou une clavette.

Suivant la disposition adoptée fig. 1 et 2, la pompe est fixée verticalement; mais elle pourrait être horizontale ou inclinée avec un léger changement dans la position des boîtes à clapets, comme nous aurons l'occasion d'en montrer des exemples.

Quelquefois la pompe alimentaire est rattachée directement au mouvement du piston de la pompe à air, lorsqu'il existe un condenseur; mais alors on est obligé

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de réduire le diamètre du piston parce que la course est relativement considérable. Il est vrai qu'avec l'excentrique on peut tomber dans l'excès contraire lorsqu'on ne veut pas lui donner des dimensions exagérées. Cependant, cette dernière condition est plus d'accord avec la marche ordinaire d'une pompe qui est généralement lente, excepté dans les locomotives et les machines à grandes vitesses.

Appliquée aux machines à balancier, la pompe prend son mouvement sur cet organe et peut avoir une course très-réduite.

Conduite des pompes alimentaires. — La fonction de cet appareil, qui devrait être continue comme la vaporisation, est souvent intermittente, à cause de la difficulté de mettre sa production exactement en rapport avec la dépense par la vaporisation. D'ailleurs, une pompe étant sujette à des irrégularités, on lui donne une puissance toujours plus grande qu'elle ne devrait l'être réellement, sauf à suspendre par instant ses fonctions.

La mise en marche facultative d'une pompe alimentaire s'effectue par deux modes différents, mais qui n'offrent pas les mêmes avantages.

On s'arrange parfois de façon à la débrayer et à l'arrêter complétement : il n'y a pas là d'inconvénient, si ce n'est le mécanisme même d'embrayage qui doit être d'une manœuvre prompte et facile.

Dans d'autres cas, on la laisse marcher sans interruption, et on agit sur le robinet placé sur le conduit d'aspiration, soit pour modérer son ouverture, soit pour le fermer complétement si l'on doit interrompre tout à fait l'alimentation.

Cette dernière méthode n'est certainement pas la meilleure, car si le robinet de l'aspiration est fermé, la pompe marche à vide et une rentrée d'air peut avoir lieu s'il existe la moindre fissure. Mais, ce qui est plus grave, la réglementation par des robinets que l'on ferme plus ou moins, tandis que le piston marche toujours, donne lieu à des méprises qui ont eu souvent pour résultat de faire éclater les tuyaux ou quelque partie de la pompe. Nous avons été témoin d'un fait de ce genre. La bielle commandant une pompe ainsi manœuvrée et appartenant à une forte machine à balancier a été trouvée tordue tout près de son assemblage avec le piston, malgré le fort diamètre de cette tige, qui n'était pas moins de 4 à 5 centimètres.

Un accident de ce genre semble devoir être attribué à la fermeture malencontreuse d'un robinet placé sur le conduit de refoulement, circonstance d'autant plus probable à l'égard du fait que nous citons que le chauffeur qui conduisait cette machine avait à sa disposition des robinets placés sur la chaudière et qu'il ouvrait ou fermait à sa guise pour alimenter.

On a proposé bien des moyens de régler l'alimentation par une pompe, d'après le niveau même de l'eau dans le générateur; peu ont reçu une véritable consécration par la pratique.

Mais, quel que soit le moyen que l'on choisisse, on évitera tout accident en appliquant à la pompe une soupape de sûreté que nous n'avons pas figurée sur celle-ci, attendu que l'on va bientôt en voir des exemples.

Une soupape de sûreté ne prévient pas seulement les accidents, mais peut servir

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à purger la pompe de l'air que l'eau amène toujours avec elle et qui en est l'une des causes d'arrêt les plus fréquentes. On sait, en effet, que si la pompe doit élever l'eau d'une hauteur un peu grande, elle produit un vide correspondant qui fait dégager l'air en dissolution naturelle dans l'eau. L'air parvenu dans le corps de pompe atteint sa partie supérieure, s'y accumule peu à peu et finit par acquérir une pression qui empêche le clapet d'aspiration de fonctionner. On ne peut s'en débarrasser qu'en ouvrant un robinet placé spécialement pour cet usage sur le corps de pompe, ou en soulevant la soupape de sûreté, quand on a eu le soin d'en ménager une.

## POMPES ALIMENTAIRES DE DIVERSES DISPOSITIONS

(FIG. 4 A 7, PL. 13)

POMPE DITE D'EDWARDS, fig. 4. — Cette pompe appartient à la machine à vapeur à deux cylindres de M. Edwards, celle dont nous avons déjà parlé, et qui a été montée, il y a près de 25 ans, aux ateliers du chemin de fer de Saint-Germain.

On la distingue de la pompe précédente par la disposition de la boîte à clapets et par l'addition de la soupape de sûreté.

La boîte à clapets est une sorte de canon C indépendant du corps de pompe et s'y rattachant par une tubulure à bride au moyen de laquelle la communication s'établit entre les deux parties. L'intérieur du canon C est disposé pour recevoir les deux clapets D et D′ qui sont alors l'un au-dessus de l'autre, et de diamètres évidemment différents puisqu'ils doivent être introduits par la même ouverture supérieure fermée par le tampon *e*.

Le tube d'aspiration est alors rattaché au robinet E, qui est relié par un taraudage à la partie inférieure de la boîte à clapets. Celle-ci porte également dans la partie *b′* une tubulure à laquelle s'adapte le tuyau qui correspond au générateur. Quand le piston sort du corps de pompe, l'eau traverse le conduit *d*, soulève le clapet D et pénètre dans le corps de pompe par le conduit *d′* qui est placé entre les deux clapets. Quand le piston refoule, c'est le clapet D′ qui est soulevé, et le fluide passe de la chambre *b′* dans le tube qui le conduit à la chaudière.

Quoique cette disposition de boîte à clapets soit encore très-souvent adoptée, il est clair qu'elle ne vaut pas celles où les deux clapets sont complétement libres comme dans l'exemple précédent. Ici la vérification de l'un des deux peut exiger un démontage complet. Ajoutons encore que le cheminement du fluide, dans la pompe représentée fig. 1 et 2, est plus rationnel que dans celle-ci où l'on peut dire qu'il doit *rebrousser chemin* à chaque coup, et prendre, dans le corps principal et dans la communication *d′*, des vitesses alternativement inverses.

Les clapets ont ici une forme un peu différente des précédents. Ils sont de celle

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dite *à lanterne;* la queue qui les guide est, en effet, un cylindre creux ouvert à la base et percé latéralement.

Nous arrivons à la soupape de sûreté dont nous avons parlé. Cette soupape H, de très-faible dimension, est placée à la partie supérieure du corps de pompe où se loge l'air qui vient s'accumuler au bout d'un certain temps. Cette soupape est chargée par un levier I placé horizontalement et articulé sur des oreilles appartenant à la pompe; ce levier est muni d'un talon d'équerre *g* qui correspond à la soupape et lui transmet, dans un rapport déterminé, l'action du poids J.

Nous avons dit que cette soupape est indispensable pour éviter les accidents, les ruptures qui peuvent être occasionnés par la fermeture inopinée d'un robinet ou par une autre cause capable d'arrêter la circulation de l'eau dans la pompe; elle sert aussi à donner issue à l'air qui s'y trouverait renfermé.

L'établissement de cette soupape est conforme à celles appliquées sur les générateurs. Les conditions de son équilibre ont pour base la pression intérieure du milieu dans lequel on foule le liquide; pour cette pression la soupape de la pompe doit présenter un excès de surcharge, afin d'en assurer la fermeture exacte; on comprend, en effet, qu'elle pourrait, sans inconvénient, tenir la pression jusqu'à la limite pratique de résistance des pièces les plus faibles de la pompe et de celles qui composent le circuit du refoulement.

Pompe avec boites rapportées et clapets a charnière, par M. E. Bourdon (fig. 5 à 7). — Ce constructeur adopte généralement un système de pompe auquel il a su donner une disposition de détail qui paraît rationnelle et d'un service commode.

Le premier exemple que nous en montrons est une pompe horizontale appliquée à une machine de même disposition et d'une puissance nominale de 25 chevaux (1).

La fig. 5 est une section verticale faite sur l'axe du corps de pompe et du piston;

La fig. 6 en est une coupe transversale suivant la ligne 1-2.

La particularité sur laquelle nous insistons réside dans la construction des deux boîtes à clapets et sur ces derniers qui sont à charnière.

Le corps principal A est muni de deux conduits *c* et *c'*, exactement symétriques et se terminant par des brides dressées. On a fixé sur ces brides, au moyen de vis, deux siéges en bronze C et C′ qui portent à la fois des becs recourbés *d* et $c^2$, sur lesquels sont montés les clapets D et D′ et les tubulures E et E′ pour l'application des conduits d'aspiration et de refoulement. Il est remarquable que, suivant le jeu naturel des clapets, le siége ou bec *d* est en communication directe avec le tube d'aspiration, et celui $c^2$ avec le canal *c'* et le corps de pompe, tandis que l'autre canal *c* est en relation directe avec la chambre *b*.

Les siéges C et C′ sont ensuite recouverts par les cloches *e* qui forment les chambres *b* et *b'* des clapets; ces cloches sont maintenues, comme précédemment, par des étriers G et des vis F, pour être démontées facilement au besoin.

Quant aux clapets, ce sont des disques pleins montés à charnière sur le bord des

(1) Machines à vapeur horizontales accouplées des moulins d'Odessa, construites par M. Bourdon pour M. Gosme, et faisant marcher douze paires de meules de 1m 50 de diamètre, avec leurs appareils de nettoyage et de blutage. — *Publication Industrielle*, vol. IX, pl. 20 et 21.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

siéges $d$ et $c^2$. Il est juste de dire que les constructeurs préfèrent généralement, pour d'aussi faibles dimensions, la forme en champignon, moins délicate d'ajustement et moins susceptible de se déranger que par le mode à charnière.

Enfin, cet ensemble présente une bonne harmonie de forme et une circulation intérieure bien rationnelle, exempte de coudes brusques et de changements de direction. L'indépendance des boîtes à clapets et de leurs siéges permet un ajustement précis et des réparations faciles. Le corps de pompe est en fonte de fer, mais les clapets et leurs boîtes sont en bronze.

Passant aux dispositions accessoires, nous ferons remarquer que le piston B est fondu creux de façon à permettre de placer à l'intérieur la bielle de commande J, laquelle est articulée dans un tampon vissé au fourreau B et qui en ferme l'extrémité. On comprend que cette disposition a pour but de diminuer la longueur totale du mécanisme tout en conservant à la bielle une assez grande longueur.

Les pompes verticales, dont nous avons montré des exemples, se fixent directement par leurs bases, soit sur la plaque de fondation de la machine, soit sur un support ménagé *ad hoc*.

Celle-ci, qui est horizontale, porte, fondue avec elle, une patte $j$ (fig. 6), par laquelle on la fixe sur le bord du bâti de la machine.

Cette pompe est pourvue d'une soupape de sûreté H, conformément aux dispositions décrites ci-dessus. Elle a pour siége un tampon à vis placé sur le conduit transversal $c\,c'$, sur la ligne d'axe du piston.

Les boulons $h$ du presse-étoupe présentent une légère différence avec les précédents. La tête est remplacée par un œil oblong qui s'agrafe sur un tenon de même forme fondu avec le corps de pompe.

La fig. 7 représente une pompe verticale exactement composée comme la précédente par rapport aux boîtes à clapets. Destinée à fonctionner comme celle d'Edwards, elle lui est évidemment bien préférable. Les mêmes pièces y sont indiquées par les mêmes lettres que dans les fig. 5 et 6.

Terminons par cette remarque importante relative aux clapets à charnière : quelle que soit la position donnée à la pompe, il est indispensable que celle des clapets soit telle qu'ils reposent naturellement et de leur propre poids sur leur siége, avant toute action quelconque de la part des pressions développées par le jeu du piston. S'il en était autrement, le jeu des clapets, toujours difficile à maintenir régulier, ferait faute à chaque instant, et la plupart du temps la pression du fluide serait sans effet pour les faire revenir à temps à leur place.

On exécute, dans certains cas, et surtout pour les machines locomotives, des pompes alimentaires dont les clapets ou soupapes sont des sphères qui reposent sur des siéges alésés d'une forme correspondante. Nous aurons l'occasion de les faire voir en décrivant ce genre de moteur spécial.

Il resterait à examiner les pompes alimentaires sous le point de vue de leur production. Mais il nous semble préférable de renvoyer cette question au moment où il sera traité de toutes les proportions des organes principaux qui composent un moteur à vapeur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## ALIMENTATEURS AUTOMOTEURS

Les pompes alimentaires ne fonctionnent presque jamais avec une régularité telle que l'on soit dispensé de les surveiller en s'assurant qu'elles fournissent bien réellement l'eau nécessaire à la marche et à la sûreté du générateur. Avec une pompe ordinairement de petites dimensions, sans réservoir d'air, dont les passages sont étroits et qui marche souvent à une vitesse considérable, il faut s'attendre à voir par fois les clapets hors de leurs siéges ou mal fermés, cette dernière circonstance pouvant aussi se produire par l'interposition d'un corps solide, tel qu'un grain de sable ou de gravier entraîné par l'eau.

Après un certain temps d'arrêt elles peuvent aussi se désamorcer; on voit quelquefois un chauffeur obligé, lorsqu'il veut reprendre l'alimentation en embrayant la pompe, de lui faire donner quelques coups à la main ou de démonter un regard pour remplir d'eau la boîte à clapets.

Le travail incertain des pompes, joint à la difficulté de régler leur produit sur la vaporisation, qui peut même être augmentée sans accélérer la vitesse de la machine et de la pompe, a conduit les ingénieurs à chercher des appareils dont les fonctions soient intimement liées à la hauteur même du niveau de l'eau dans la chaudière qui réglerait alors elle-même son gain sur sa perte.

Déjà un moyen s'offre presque naturellement à l'esprit.

Supposons, en effet, que l'on adapte à un générateur un tube assez élevé pour y établir une colonne d'eau en communication avec celle de la chaudière et faisant équilibre à la pression de la vapeur; puis mettons le sommet de cette colonne en relation par un robinet à flotteur avec un réservoir d'eau, il est clair que cette colonne, tendant à s'abaisser comme le niveau lui-même, lui fournira par sa base le volume nécessaire pour se maintenir, tandis qu'elle en recevra une même quantité du réservoir supérieur : voilà en principe un alimentateur automoteur qui fonctionnerait évidemment bien.

Mais ce tube devrait avoir en hauteur autant de fois $10^{m},33$, moins une, que la vapeur possède d'atmosphères; par conséquent, même pour une machine fixe à haute pression, le moyen est à peu près impraticable.

Cependant il en a été employé, mais seulement pour des générateurs marchant à une pression peu supérieure à celle de l'atmosphère; dans ce cas la colonne d'eau peut être d'une élévation assez limitée; nous allons en montrer un exemple emprunté encore aux générateurs de la machine du port Saint-Ouen.

Nous ferons voir ensuite quelques-unes des combinaisons qui ont été imaginées pour les générateurs à haute pression.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## ALIMENTATEUR A COLONNE APPLIQUÉ AUX GÉNÉRATEURS A BASSE PRESSION

(FIG. 8, PL. 13)

Les générateurs de la machine de Saint-Ouen ont été munis, comme la plus grande partie des chaudières à basse pression, système de Watt, de l'appareil représenté par la fig. 8 de cette planche.

Il se compose d'une colonne A, d'environ 3 mètres de hauteur, montée sur la chaudière B avec laquelle elle est en libre communication par un tube plongeur C. Le liquide s'y élève, par conséquent, d'une hauteur correspondante à l'excès de la pression de la vapeur sur celle de l'atmosphère.

La marche étant réglée, avec ces générateurs, sur 1$^{at}$. 2, soit 1/5 en sus de l'atmosphère ambiante, il en résulte que la colonne d'eau se maintiendra à une hauteur d'environ 2 mètres au-dessus du niveau intérieur, soit aussi le cinquième d'une colonne d'eau faisant équilibre à une pression atmosphérique.

Cette colonne est terminée à sa partie supérieure par une cuvette D dont le fond est formé par une pièce E, ayant la forme d'un entonnoir renversé, et destinée à un usage que nous ferons connaître plus loin.

Ce fond est percé d'une petite ouverture munie d'une soupape conique F, suspendue par une tige *a* à un levier G qui a son point d'appui établi sur le bord de la cuvette; l'une de ses extrémités est rattachée à une tige rigide *b* qui pénètre dans la chaudière, en suivant l'intérieur d'un tube H qui plonge librement dans l'eau; cette tige supporte un flotteur I, annulaire à cause du tube H, et d'une densité supérieure à celle de l'eau. L'autre extrémité du levier G supporte un contre-poids *c*, pour équilibrer le flotteur, et dont on peut régler la position en choisissant le cran convenable pour le point de suspension.

Faisons remarquer en passant que la disposition du tube H, où l'eau du générateur se met en équilibre de pression comme dans la colonne principale, n'a d'autre objet que d'éviter une garniture d'étoupe pour le passage de la tige *b*.

Ceci exposé, la machine à vapeur commande une pompe spéciale qui prend une partie de l'eau tiède issue de la condensation et l'élève dans la cuvette D qui termine la colonne A.

Nous dirons quelques mots plus loin sur cette pompe, qui est représenté fig. 9 de la même planche.

Lorsque le niveau dans la chaudière est à son point normal ou au-dessus, le flotteur I ne tend point à descendre, et la soupape F étant maintenue sur son siége, l'eau envoyée dans la cuvette D ne peut pas s'introduire dans la colonne A.

Si le niveau s'abaisse, au contraire, le flotteur le suit et détache de son siége la soupape F qui laisse alors échapper l'eau de la cuvette. Cette eau venant s'ajouter

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

celle de la colonne qui équilibre la pression et dont la hauteur ne peut varier qu'avec elle, il en résulte qu'une quantité d'eau semblable à celle venue de la cuvette pénètre dans la chaudière et ramène le niveau à son point normal. La hauteur rétablie, le flotteur est remonté et la soupape F ramenée sur son siége.

Ajoutons que la cuvette D n'étant pas assez grande pour contenir une quantité d'eau supérieure à celle de l'alimentation continue, on lui adjoint une conduite de trop-plein qui ramène l'eau excédante au réservoir même d'où la pompe l'a puisée.

En décrivant les appareils accessoires des générateurs, nous avons dit (p. 258) qu'il avait été organisé des mécanismes pour relier le registre de la cheminée avec un indicateur de pression, afin de régler l'un par le jeu de l'autre.

L'appareil qui vient d'être décrit, et qui n'est autre chose, en résumé, qu'un véritable manomètre à eau et à air libre, est précisément l'un de ces mécanismes régulateurs du registre placé à l'entrée de la cheminée. Un flotteur J, plongé dans la colonne d'eau, est suspendu à une chaîne *d* qui, d'un bout, traverse l'orifice ménagé au centre du fond E de la cuvette D, et par l'autre extrémité supporte le registre, après avoir été conduite extérieurement par des poulies de renvoi. Par conséquent, la colonne d'eau du tube A variant de hauteur suivant la pression dans la chaudière, le flotteur J s'élève ou s'abaisse en produisant l'effet inverse sur le registre de la cheminée qui en restreint la section quand la pression s'élève, et l'augmente, au contraire, lorsque cette pression diminue.

On peut voir l'ensemble de tout ce mécanisme sur les fig. 24 et 25 du texte, page 110, qui représentent l'une des chaudières établies au port Saint-Ouen.

Pompe alimentaire élévatoire (fig. 9, pl. 13). — Cette pompe appartient à la machine à vapeur de Saint-Ouen, et élève l'eau jusqu'à l'appareil décrit ci-dessus. Elle diffère des autres pompes alimentaires en ce sens qu'elle est *élévatoire* au lieu d'être foulante et à piston plongeur.

Cette pompe n'a, en effet, qu'un faible effort à vaincre, puisque, versant à l'air libre dans la cuvette de la colonne d'alimentation, son piston ne supporte que le poids d'une colonne d'eau égale à la distance verticale de la pompe à la cuvette alimentaire, distance qui est d'environ 5 mètres, soit une 1/2 atmosphère au lieu de 5, et plus, que les pompes foulantes ont à surmonter dans les machines à haute pression.

Le corps de pompe A est complétement ouvert par son extrémité inférieure. Il est boulonné avec la boîte B dans laquelle sont ménagées les chambres des clapets D et D′.

Le clapet d'aspiration D se trouve au-dessus d'une conduite C mise en rapport avec le réservoir dans lequel la pompe puise l'eau, et qui n'est autre que la bâche recevant l'eau de condensation dont la température est un peu élevée.

La chambre du deuxième clapet D′ communique par une tubulure E avec le conduit allant à la cuvette supérieure de la colonne alimentaire; mais les constructeurs ont jugé utile de placer sur cette conduite, et tout près de la pompe, une cloche en fonte qui forme réservoir d'air.

Le piston F est composé d'un manchon à gorge garnie de tresses de chanvre, et fixé sur une tige mince G, guidée par une garniture ordinaire *a* ménagée après la boîte B.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Cette pompe ne présente donc de particularité que la forme du piston et le mode de réunion des différentes parties qui la composent. Aujourd'hui il ne s'en fait guère de semblable, parce que l'on envoie l'eau directement dans le générateur, et pour ce travail une pompe à piston plongeur convient mieux.

### ALIMENTATEURS A HAUTE PRESSION

Nous avons indiqué une façon d'envisager le procédé général de l'alimentation automatique, et l'on vient de voir qu'il peut être en effet facilement réalisé lorsque la pression dans la chaudière excède peu celle de l'atmosphère ambiante.

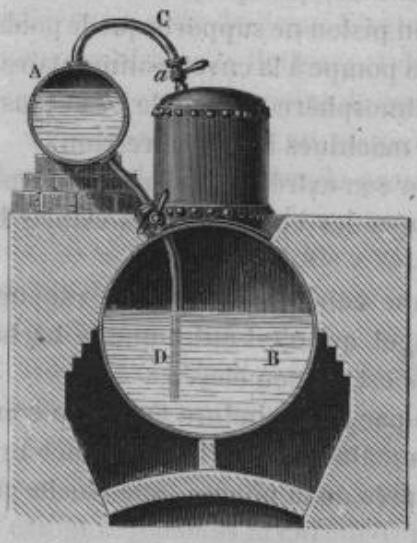
Mais pour des pressions sensiblement plus élevées, on a eu recours à d'autres moyens, dont nous allons faire connaître les plus simples. Il est bon d'ajouter que ces diverses dispositions ont été surtout essayées pour des générateurs qui sont appliqués à un autre travail que celui de fournir de la vapeur à une machine motrice, attendu que, dans ce dernier cas, pouvant se servir d'une pompe, on n'est pas dans l'obligation absolue d'employer un autre moyen, à moins de trouver un meilleur procédé que la pompe.

Il existe aussi des appareils alimentaires qui fonctionnent concurremment avec la pompe, et dont la mission consiste *à régler* la quantité d'eau introduite par le niveau même dans le générateur.

Retour d'eau ou bouteille d'alimentation. — Cet appareil, très-simple, fonctionne sans pompe et sous toutes les pressions; il est employé pour des générateurs appliqués soit au chauffage, soit à des manipulations qui comportent l'emploi de la vapeur, sans machine motrice.

Comme on peut facilement s'en rendre compte à l'aide de la fig. 74, il consiste, en principe, à placer au-dessus de la chaudière un vase A contenant un certain volume d'eau, et que l'on met en relation, à volonté, avec le générateur B, par deux conduits C et D, l'un débouchant au-dessus de la surface libre du liquide dans le vase A et l'autre au-dessous.

Fig. 74.




Le premier tube C correspond de la chambre de vapeur à la partie supérieure du récipient A; le deuxième, partant du fond du même vase, descend également dans la chaudière, soit en plongeant dans l'eau, soit en se terminant un peu au-dessus du niveau.

Ces deux tubes étant pourvus des robinets *a* et *b*, lesquels sont fermés en marche, lorsqu'on veut introduire de l'eau dans la chaudière on commence par ouvrir le premier *a*, et la vapeur pénétrant dans le récipient A, y établit sa pression au-dessus du liquide qu'il renferme.

Quand on juge que cette pression est bien établie, on ouvre alors le robinet *b*, et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

les deux surfaces libres étant également pressées, l'écoulement du liquide du vase supérieur dans l'autre peut s'effectuer dans la même condition qu'à l'air libre, en vertu de la différence de hauteur des deux niveaux. Celui de la chaudière étant rétabli, on ferme les deux robinets et l'alimentation est de nouveau suspendue.

On voit que cette opération exige les soins d'un homme et une surveillance intelligente. Cependant on pourrait la rendre automatique à l'aide d'un mécanisme basé sur le principe des robinets à flotteur, ce qui s'est fait, du reste, quelquefois.

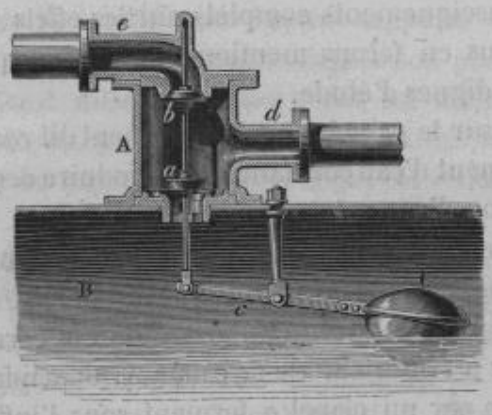
Quant à savoir si le tube inférieur D doit plonger ou non dans l'eau du générateur, cela peut avoir lieu des deux façons; il est cependant préférable de le faire plonger, afin d'éviter les bouillonnements par la vapeur qui chercherait à s'y introduire, s'il s'ouvrait immédiatement dans l'espace qui la renferme; mais il faut alors soigner la manœuvre des robinets : car si celui *b* était ouvert avant que la pression fût bien établie dans le récipient A, on serait exposé à voir l'eau de la chaudière y monter et le remplir, au lieu que le contraire se produisit.

Nous avons supposé que la bouteille d'alimentation était elle-même fournie d'eau à la main, avant de mettre en train, et pour un temps déterminé. Mais on s'est quelquefois arrangé pour que ce récipient pût aussi s'alimenter lui-même de la façon suivante :

On le met en rapport avec la source, ou le réservoir proprement dit, au moyen d'un tube d'ascension muni d'un robinet, puis, pour élever l'eau, on fait passer dans le récipient un courant de vapeur, qui chasse d'abord l'air et se condense ensuite, en laissant un vide qui permet à l'eau de la source de monter et de remplir le récipient. Il est bien entendu que ce procédé n'est praticable qu'autant que le récipient n'est pas situé à une trop grande hauteur au-dessus du réservoir d'où l'eau doit s'élever.

Régulateur d'alimentation fonctionnant avec une pompe. — On a également fait usage de l'appareil suivant, fig. 75, pour régler l'introduction de l'eau d'alimentation fournie par une pompe à marche continue.

Fig. 75.




C'est une boîte cylindrique, en fonte ou en bronze A, qui se place sur le générateur B avec lequel elle peut communiquer à l'aide de la soupape *a*, dont la tige est

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

liée à un flotteur C disposé à l'une des extrémités d'un levier en bascule *c*. Cette boîte est fermée en dessus par un couvercle à tubulure *è* dont l'orifice intérieur est muni d'une soupape *b*, montée sur la même tige que celle *a*, mais tournée en sens contraire de façon que l'une ferme quand l'autre ouvre l'orifice correspondant.

La boîte A est mise en libre relation avec la pompe alimentaire dont le conduit de refoulement vient s'ajuster à une tubulure *d*, située entre les deux soupapes. D'autre part, le conduit *e*, ménagé au couvercle, va aboutir, ou *fait retour*, au réservoir même où la pompe puise son eau.

Supposons d'abord que la soupape *a* repose sur son siége, l'autre sera détachée du sien et mettra l'intérieur de la boîte A et le conduit *e* en communication. Dans cette situation, l'eau fournie incessamment par la pompe ne parviendra pas au générateur, mais, passant par l'ouverture de la soupape *b*, fera simplement retour au réservoir par la tubulure supérieure *e*.

Si, au contraire, les deux soupapes se trouvent dans la situation opposée, l'eau d'alimentation pénétrera exclusivement par l'ouverture de la soupape *a* et sera alors introduite dans la chaudière.

Cette double fonction se résume donc dans le jeu du flotteur C qui, en s'élevant ou en s'abaissant comme le niveau de l'eau, amène les deux soupapes simultanément dans l'une ou l'autre des deux positions que nous venons de supposer.

Si l'on pouvait compter sur la régularité des fonctions du flotteur, un tel appareil serait parfait. Mais un dérangement quelconque dans son mécanisme, capable d'empêcher en tout ou en partie le jeu des soupapes, met dans un grand embarras, puisque toutes les pièces sont soustraites à la vue et qu'on se trouve alors dans l'obligation, pour les remettre en état, d'arrêter complétement le générateur et d'attendre qu'il soit au moins suffisamment refroidi. Il est du reste à remarquer que cette disposition, tout ingénieuse qu'elle paraisse, n'est plus appliquée.

ALIMENTATEUR AUTOMATIQUE A CATARACTE (fig. 10, pl. 13). — Nous empruntons cet appareil au bulletin de la Société industrielle de Mulhouse qui l'a fait connaître par son bulletin, vol. 27, année 1855. Il a été imaginé par MM. Higginbotham et Gray, de Manchester, qui en ont fait quelques applications.

Sans posséder de renseignements complets sur les effets pratiques de cet appareil d'alimentation, nous en ferons mention, néanmoins, pensant qu'il renferme quelques particularités dignes d'étude.

Il est en partie fondé sur le principe de l'instrument dit *cataracte*, qui, ainsi qu'on le sait, utilise un écoulement d'eau constant pour produire des actions intermittentes de la part d'un robinet ou d'une valve quelconque.

Il se compose, d'abord, d'une caisse A posée sur le sommet d'une pièce à deux conduits B et C qui plongent dans le générateur qu'il s'agit d'alimenter.

Le conduit B descend presque au fond du générateur et correspond avec une capacité séparée D, disposée à l'intérieur de la caisse A. Cependant la communication peut en être interceptée par un clapet *a* fermant sous l'influence d'une pression dirigée de bas en haut.

L'autre conduit C s'ouvre dans la chambre de vapeur, et s'élève par un prolonge-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ment C′ ménagé dans la caisse A, ou pour mieux dire à l'intérieur du compartiment D avec lequel il peut communiquer par son sommet lorsque l'autre clapet *b*, qui s'ouvre de haut en bas, est abaissé.

Avant d'expliquer le jeu de la cataracte, qui a justement pour effet de fermer ou d'ouvrir à propos ce dernier clapet, voyons de suite les fonctions qui permettent au liquide de pénétrer dans le générateur.

La caisse A est remplie d'eau qui peut passer en partie dans la capacité D en soulevant un troisième clapet *c*, que notre dessin ne montre qu'en traits ponctués.

Supposons ce clapet fermé, celui *b* ouvert et la capacité D en partie pleine d'eau. La vapeur introduite par le conduit C pourra pénétrer dans le compartiment D, et exerçant sa pression sur le liquide qu'elle renferme, il se produira l'effet que nous mentionnions ci-dessus avec la bouteille alimentaire : les deux surfaces libres également pressées, l'écoulement aura lieu sous l'influence de leur distance verticale, et l'eau descendra dans le générateur en abaissant le clapet *a*.

Si maintenant le clapet *b* est ramené sur son siége, la vapeur qui occupait le sommet de la capacité D, cessant d'être en relation avec sa source, se condensera et déterminera un vide qui aura pour double effet de faire refermer le clapet *a* sous la pression prédominante de la chaudière, et de faire au contraire soulever le clapet de fond *c*, sous l'action de l'atmosphère qui presse constamment sur le liquide contenu dans la caisse A.

Cette deuxième partie du jeu des pressions aura finalement pour résultat de faire passer une partie du liquide de la caisse dans le compartiment D, qui s'en remplira et sera disposé pour la prochaine opération semblable.

Pour achever de faire connaître cette ingénieuse combinaison il ne reste donc qu'à expliquer de quelle façon le clapet *b*, qui devient la cheville ouvrière du système, se trouve ouvert ou fermé à propos, et pour chaque volume d'eau à introduire dans le générateur.

Ce clapet *b* est relié par sa tige à un balancier E ayant son point fixe d'oscillation ménagé sur le couvercle de la capacité D, et dont l'une des extrémités est munie d'un contre-poids F, tandis que l'autre supporte une caisse en tôle G, de section triangulaire, et qui peut basculer d'après son point de suspension.

La caisse en bascule G est mise en rapport, par un tube H, avec un réservoir d'eau supérieur, placé en un point quelconque. Ce tube verse librement dans la caisse G par l'extrémité de la partie recourbée, qui est reliée avec celle extérieure par un robinet I dont la clef est réunie avec le bras d'un flotteur J, lequel doit suivre les mouvements du niveau dans le récipient A.

Si nous prenons le mécanisme dans la situation que la figure représente, l'eau s'écoule dans le déverseur G sur lequel le contre-poids F prédomine actuellement et maintient le clapet *b* fermé : c'est le moment où l'alimentation est suspendue. Mais l'écoulement par le tube H continuant, le déverseur G est bientôt suffisamment rempli pour que sa pesanteur l'emporte sur le contre-poids F et même sur la pression de la vapeur contre le clapet *b*. Alors le déverseur s'abaisse en en-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

traînant le levier E, et il se produit simultanément diverses actions que nous sommes obligé de séparer pour bien les faire saisir.

Le déverseur G, en s'abaissant, produit les effets suivants :

1° D'abord le clapet *b* est détaché de son siége et donne lieu à l'introduction de l'eau dans la chaudière, dans les conditions expliquées plus haut;

2° Le déverseur G rencontre le bord du récipient A, bascule et y renverse l'eau qu'il contenait;

3° Le liquide ainsi reçu par la caisse y fait remonter le niveau, ce qui a pour résultat d'élever le flotteur J, qui, à son tour, ferme le robinet I et arrête l'écoulement de l'eau par le conduit H;

4° Le déverseur vide, le contre-poids F l'emporte, relève le levier E et ramène le clapet *b* sur son siége, ce qui suspend l'alimentation.

D'après ce qui a été exposé précédemment on sait que la fermeture du clapet *b* donne lieu au passage du liquide de la caisse A dans le compartiment D. Alors le niveau dans la caisse A, en s'abaissant, fait redescendre le flotteur J, qui rouvre le robinet I, et l'écoulement par le tube H recommence, ce qui amène enfin une nouvelle série semblable des nombreux effets que nous venons d'énumérer.

Si l'on essaye de résumer les temps suivant lesquels se produisent ces phases diverses, on reconnaît que celui de l'ouverture du clapet *b* est sensiblement fixe puisqu'il ne peut durer que ce qui est nécessaire au déversement du liquide contenu dans la caisse G. Par conséquent, l'introduction de l'eau dans le générateur doit avoir lieu par volumes égaux.

D'autre part, la rapidité de succession des volumes introduits dépend évidemment du temps nécessaire pour le remplissage du déverseur G.

On peut donc faire varier les quantités totales d'eau alimentaires fournies en rendant les déversements de la caisse G plus ou moins précipités, ce qui ne peut être obtenu qu'en modifiant l'écoulement par le tube H, soit, par exemple, à l'aide d'un robinet placé sur ce conduit, entre l'alimentation et le réservoir qui fournit l'eau.

Toutefois, il est important de faire remarquer que si le niveau de l'eau dans le générateur venait à se maintenir plus haut que son point normal, soit par un ralentissement de la production de la dépense de vapeur, soit par un excès d'alimentation, l'introduction de l'eau cesserait à partir du moment où le niveau s'élèverait au-dessus de l'extrémité inférieure du conduit C; il est clair que, dans cette situation, la vapeur ne parvenant plus au sommet du compartiment D, l'écoulement du liquide ne pourrait pas se produire entre lui et la chaudière; mais le jeu du déverseur n'en continuant pas moins, l'eau qu'il fournirait à la caisse A s'écoulerait en trop-plein par un orifice *d* affecté à ce service.

En somme, cet appareil convient à toutes les pressions, mais son jeu n'est pas exempt d'une certaine précision nécessaire dans ses fonctions très-multiples. Il ne semble pas non plus qu'il puisse utiliser de l'eau d'alimentation à une température un peu élevée, comparativement à celle de la vapeur dont la condensation, dans le compartiment D, doit être en rapport, pour la rapidité, avec le jeu du déverseur, afin de laisser à propos l'eau extérieure s'introduire dans cette capacité D.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## INJECTEUR ALIMENTAIRE AUTOMOTEUR

Inventé par **M. GIFFARD**, ingénieur

Et exécuté par M. H. FLAUD, ingénieur-mécanicien à Paris (1)

(FIG. 11, PL. 13)

L'appareil de M. Giffard, quoique de création récente, a déjà obtenu un grand succès, tant pour ses effets réels que par l'originalité de son ingénieux principe. C'est un appareil alimentateur qui marche, cette fois, à l'exclusion de toute pompe, soupapes, flotteurs à contre-poids, etc., et en général sans aucune pièce mécanique mobile.

On sait que lorsqu'on lance un jet de vapeur dans une conduite telle que, par exemple, la *cheminée d'un générateur*, il se produit d'abord un entraînement de l'air qui s'y trouvait contenu, et, par suite, un appel continu de l'air extérieur qui, de proche en proche, participe à la vitesse du courant établi et s'écoule par la conduite avec la vapeur, dont la force vive s'est ainsi directement transformée en travail moteur. Suivant l'expression adoptée par les savants, c'est : *le principe de la communication latérale du mouvement des fluides.*

Plusieurs praticiens ont, depuis longtemps, fait des essais du même principe à des applications analogues.

M. de Mannoury d'Ectot s'est particulièrement, et peut-être le premier, distingué dans ce genre de recherche. On possède de lui un brevet pris le 14 août 1818, où il fait connaître tout le parti que l'on peut tirer d'un jet de vapeur pour faire mouvoir directement un fluide, air ou eau, et il y indique très-bien quelques-unes des principales conditions à observer pour l'établissement de semblables appareils, tels que les orifices coniques et les ajutages récepteurs divergents, afin de conserver aux fluides leurs vitesses initiales, en évitant les pertes de forces vives par les frottements.

D'autre part, M. E. Bourdon s'est fait breveter, le 30 décembre 1848, pour un système de condenseur par surface, à l'aide duquel l'eau servant à la condensation était elle-même vaporisée par la vapeur échappée, puis renvoyée au cylindre à vapeur en la réunissant à de nouvelle vapeur puisée à la chaudière. Pour effectuer cette opération, M. Bourdon a décrit un appareil qu'il appelait *aspirateur* et qui se composait de tubes concentriques *à becs coniques* par lesquels il faisait passer de la vapeur prise à la chaudière; cette vapeur, par l'action dynamique du jet, entraînait celle engendrée dans l'enveloppe du condenseur, et, réunie à elle, parvenait à la boîte de distribution du moteur.

(1) Nous devons à l'obligeance de M. Flaud la communication du dessin d'exécution représenté sur cette planche.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Un peu plus tard, vers 1851, M. Bourdon a construit de véritables injecteurs appliqués à l'élévation de l'eau. On y distingue un tube à bec conique, amenant la vapeur, renfermant une tige pleine pour en modérer le débit et des ajutages spéciaux pour l'arrivée de l'eau; ces tubes et ajutages sont commandés extérieurement par des vis latérales pour régler leurs positions.

Enfin, par un brevet pris le 10 septembre 1857, M. Bourdon a fait connaître les perfectionnements qu'il a apportés à ces divers appareils, employés, soit comme aspirateurs, soit comme injecteurs destinés à l'élévation de l'eau.

M. Giffard, par un brevet pris le 8 mai 1858, et un certificat d'addition du 7 mai 1859, a fait une application très-importante des mêmes principes, en imaginant un appareil, à l'aide de moyens analogues, pour l'alimentation des générateurs, et en se servant, à cet effet, de la vapeur même qui s'en échappe seule par un point, y rentre bientôt par un autre, condensée, mais amenant avec elle le volume d'eau pris en chemin et requis pour l'alimentation.

Ceci exposé, quant à l'esprit du fait, nous allons examiner les combinaisons de l'appareil qui en opère la réalisation.

Construction et fonctionnement de l'injecteur (fig. 11). — L'ensemble complet de l'injecteur, tel qu'il est indiqué par cette figure, présente extérieurement l'aspect d'un canon cylindrique, en bronze ou en fonte de fer, que l'on place près du générateur qu'il doit servir à alimenter, à peu près comme un manomètre. L'injecteur peut être en effet placé près du générateur, contre l'une des murailles voisines. Il fonctionne, sans changement dans ses dispositions intimes, horizontalement tout aussi bien que dans la position verticale qui lui est attribuée par la figure.

Le corps principal de l'appareil est composé de trois parties cylindriques A, B et C réunies les unes aux autres par des portées filetées.

Celle supérieure A porte un robinet D auquel se joint un tube *a* communiquant avec le réservoir de vapeur de la chaudière, et par lequel s'effectue, en effet, l'injection de vapeur motrice. La même partie est aussi munie d'une tubulure E à laquelle est raccordée le tube *c* communiquant avec le réservoir dans lequel l'eau d'alimentation est puisée.

La pièce B est une virole qui raccorde le corps principal A avec une tubulure de prolongement C à laquelle est réunie, par une bride, un tuyau *b* qui correspond aussi au générateur, mais dans la partie qui contient la masse d'eau encore à l'état liquide : c'est par cette conduite *b* que l'eau alimentaire est introduite.

La tubulure inférieure C porte un petit ajutage *l*, dont la fonction se réduit à purger l'appareil du liquide qui vient accidentellement se déposer à son intérieur.

En examinant la structure intérieure de l'appareil, on reconnaît que l'ouverture du robinet D correspond à un évidement circulaire, qui se répète exactement pour le conduit E par lequel l'eau d'alimentation doit arriver. Ces deux évidements, qui semblent d'abord sans communication, sont cependant en rapport au moyen d'un canon creux F, ajusté à frottement doux dans l'intérieur du corps A, et dont l'entrée s'effectue par une garniture à presse-étoupe ordinaire *d*. Ce canon F est percé vis-à-vis de l'ouverture du robinet D d'une multitude de petits trous par

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lesquels la vapeur passe pour pénétrer dans son intérieur. Il est terminé par une tuyère ou buse conique *e*, constituant la seule issue offerte à la vapeur fournie par le robinet D.

La buse conique terminale du canon F vient s'engager en partie dans une ouverture de même forme, pratiquée dans la pièce de raccord B, et qui se rétrécit de façon à présenter un orifice sous forme d'ajutage conique *f*, lequel vient déboucher à une petite distance d'un bec conique semblable *g*, formant l'ouverture de la tubulure C. Cette tubulure est en effet traversée par un conduit qui va en augmentant de diamètre depuis l'extrémité de la buse *g* jusqu'au tuyau de conduite *b*.

Pour expliquer le fonctionnement de cet appareil il faut le supposer d'abord au repos, dans lequel cas sa communication avec le générateur est interceptée, d'une part, par la fermeture du robinet D, et, d'autre part, par un clapet de retenue placé sur le conduit *b*, et que la pression de la vapeur tient elle-même fermé.

Pour mettre l'alimentateur en marche, on ouvre alors le robinet D, et la vapeur, passant par les trous du canon F, s'écoule par son intérieur en formant un jet rapide de la tuyère *e* à celle *f*, d'où elle s'échappe, soit en partie dans l'atmosphère par des regards *h* ménagés à la virole B, soit en partie par la tuyère *g*.

Mais ce courant met bientôt en mouvement l'air renfermé dans l'ajutage E qui se trouve en communication directe avec lui, par l'espace annulaire existant entre le bec de tuyère *e* et l'ouverture de celui *f*, dans lequel le premier n'est qu'engagé ; ce mouvement de l'air se transmet, en quelque sorte par aspiration, à toute la colonne renfermée dans le tube *e* qui correspond à l'eau d'alimentation.

Alors l'air s'écoulant avec la vapeur, la pression atmosphérique qui pèse sur le réservoir d'eau extérieur fait élever celle-ci dans le conduit *c*, d'où elle vient bientôt affluer dans l'appareil même et dans l'espace annulaire communiquant de la tuyère *f* à celle *g*.

Une fois l'eau mise en contact direct avec le courant de vapeur, elle participe à son tour à son mouvement, et, enfin, un courant régulier de l'eau et de la vapeur en partie condensée s'établit d'une tuyère à l'autre, sous la forme d'une *baguette d'eau* très-mince, animée d'une grande vitesse, ce qui se voit parfaitement entre les deux becs *f* et *g* en regardant par les ouvertures *h* de la virole B.

D'après les proportions de l'appareil représenté, le volume d'eau introduit à plein tuyau par l'ajutage E, qui a 19 mil. de diamètre, se trouve ainsi débité tout entier par les orifices des tuyères *f* et *g*, dont le diamètre n'est que de $3^{mil.}5$. Mais faisons remarquer que la tuyère inférieure *g* est sensiblement évasée à l'entrée pour favoriser l'établissement du jet et sa communication d'un orifice à l'autre.

Le courant d'eau, ainsi déterminé dans la tubulure C, s'établit de même dans toute la longueur du conduit *b* allant à la chaudière dans laquelle il s'introduit en forçant le clapet de retenue.

L'introduction de l'eau et de la vapeur doit être réglée avec exactitude et à volonté de façon à établir les conditions convenables de leur écoulement.

A cet effet le canon F est traversé par une tige pointue G, qui peut s'y enfoncer graduellement pour modifier le passage de la vapeur par la buse *e*. Cette tige est



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

filetée dans le canon qu'elle dépasse extérieurement en traversant une boîte à étoupe *i* qui en dépend, et porte une manivelle H à l'aïde de laquelle on peut la manœuvrer.

Le canon F peut être lui-même plus ou moins enfoncé dans l'appareil pour régler le passage de l'eau entre le bec conique *e* et l'orifice évasé de la tuyère *f*. Cette réglementation est opérée au moyen d'une poignée I fixée sur une tige J qui est retenue, par un assemblage à rappel, à une oreille *j* appartenant au canon F, et filetée, suivant un pas allongé, dans une douille *k* fondue avec la partie A de l'injecteur.

Bien que cet instrument marche très-bien d'une manière continue, on le fait fonctionner cependant avec des intermittences, attendu qu'il est toujours difficile de faire concorder très-exactement le poids de vapeur dépensé par la machine avec celui de l'eau injectée, surtout qu'ici l'appareil alimentaire se trouve tout à fait indépendant du moteur.

Mais dans les petites forces, le poids d'eau à fournir est si faible que, pour alimenter d'une manière constante, les orifices de l'injecteur deviendraient beaucoup trop petits pour bien fonctionner. Il est donc préférable, dans ce dernier cas, de conserver de bonnes dimensions à l'injecteur et d'alimenter par phases intermittentes.

Tel est, comme disposition générale, cet ingénieux instrument dont nous venons d'essayer de faire comprendre les fonctions.

Maintenant il resterait à établir la discussion de ses effets et les notions théoriques qui permettent de trouver hypothétiquement les conditions qu'il doit remplir. Cette recherche ne pourrait avoir lieu ici d'une façon complète ; et, d'ailleurs, le système est encore trop nouveau et assez peu étudié, malgré de nombreuses applications, pour qu'il en ait été déduit des données certaines.

Nous ne croyons donc mieux faire qu'en donnant le résumé d'une analyse qui a été faite de cet appareil, et d'une façon si intelligente et si claire, par M. Ch. Combes, le savant ingénieur des mines, travail qui a été publié dans le numéro de juin 1859 du Bulletin de la Société d'Encouragement.

Aperçu sur la théorie de l'injecteur Giffard. — Dans les notions préliminaires, nous avons donné quelques renseignements sur les propriétés de l'écoulement des gaz et des vapeurs, soit par des orifices en minces parois, soit par des tuyaux de conduite (§ 41 à 59). C'est en nous appuyant sur le mémoire de M. Combes et sur ces éléments que nous allons essayer de donner une idée du fonctionnement de l'injecteur de M. Giffard.

Lorsqu'on donne issue dans l'atmosphère à de la vapeur dont la tension est sensiblement plus élevée, cette vapeur s'écoule avec une vitesse qui peut être très-considérable, ainsi qu'on l'a vu, seulement il peut arriver de deux choses l'une : que cette vapeur conserve toute sa pression jusqu'à l'orifice extérieur ou qu'elle se détende préalablement jusqu'à la pression du milieu d'écoulement.

Dans cette dernière condition, si l'on admet qu'elle conserve sa température, sa vitesse d'écoulement sera plus considérable que dans le premier cas, attendu qu'elle représentera un fluide d'une très-faible densité, et correspondant alors à une très-grande hauteur génératrice de la vitesse.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour faciliter les raisonnements qui vont suivre, nous admettrons la première condition, c'est-à-dire la vapeur s'écoulant avec la vitesse due à l'état de compression où elle se trouve dans la chaudière.

Ceci établi, la vapeur s'échappant avec cette vitesse par l'orifice conique supérieur, une certaine quantité d'eau vient s'y mélanger, la condense et forme un jet liquide composé de la masse d'eau et de celle de la vapeur, et dont la vitesse sera d'autant inférieure à celle de la vapeur, que celle-ci représentera une plus petite partie de la masse totale en mouvement.

Pour que ce jet puisse vaincre la résistance du fluide qui presse les parois intérieures de la chaudière et y pénétrer, il faut que la vitesse soit plus grande que celle suivant laquelle ce même liquide jaillirait par un orifice pratiqué dans la chaudière; en d'autres termes, considérant la buse $f$ (fig. 11, pl. 13) comme l'orifice d'échappement du jet d'eau alimentaire et celui $g$ comme étant l'orifice par lequel l'eau du générateur tend à s'échapper, la vitesse du premier jet doit excéder celle du second.

Pour satisfaire à cette condition, il faut que la masse d'eau entraînée soit suffisante pour liquéfier la vapeur, mais pas assez grande, cependant, pour réduire la vitesse du jet à celle de l'eau qui s'échapperait de la chaudière.

Par conséquent, la quantité d'eau que l'on peut ainsi faire pénétrer dans le générateur se trouve intimement liée à sa température primitive et à la pression de la vapeur. Avec de l'eau alimentaire préalablement très-chaude et de la vapeur aussi à une forte pression et à une haute température, il faudrait entraîner une forte masse d'eau, ce qui pourrait réduire la vitesse du jet au point de rendre sa pénétration impossible.

Pour sortir un instant des généralités, posons quelques chiffres, d'après M. Combes.

A 5 atmosphères, nous avons vu (48) que la vapeur s'échappe dans l'atmosphère avec une vitesse de 562 mètres par 1″ environ, en supposant que la détente soit nulle. Pour que cette vapeur soit condensée, l'eau du mélange conservant une température supposée de 58 degrés, il faut lui ajouter à peu près 15 fois son poids d'eau à 15 degrés, ce qui réduirait la vitesse du jet à 1/16 de celle de la vapeur. Soit :

$$\frac{562 \text{ mèt.}}{16} = 35^{\text{m}}12.$$

Mais, d'autre part, l'eau que renferme la chaudière supporte une pression de 5 atmosphères; et si on la suppose jaillir dans l'air ambiant, la pression effective d'écoulement est 4, ce qui revient à dire que la hauteur génératrice de la vitesse de l'écoulement égale :

$$10{,}33 \times 4 = 41^{\text{m}}32;$$

d'où la vitesse d'écoulement devient :

$$v = \sqrt{19{,}62 \times 41{,}32} = 28^{\text{m}}37.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Par conséquent, si les choses avaient lieu exactement ainsi, le jet alimentaire, possédant une vitesse de plus de 35 mètres, vaincrait facilement le liquide contenu dans la chaudière qui ne tend à s'échapper qu'avec 28 mètres de vitesse initiale.

Si la vapeur se détend en arrivant à la buse, suivant l'une des deux conditions supposées, la vitesse d'échappement serait plus grande ; pour la même pression de 5 atmosphères avec détente jusqu'à celle du milieu ambiant, M. Combes démontre que la vitesse d'écoulement atteindrait près de 800 mètres au lieu de 562, indiqués ci-dessus pour la première condition.

Mais, de toute façon, ces chiffres doivent subir une réduction notable, attendu que la vapeur n'est pas dépensée par un orifice en mince paroi, mais bien par un conduit d'une certaine longueur qui a beaucoup d'influence sur la vitesse.

Pour ne citer qu'un exemple, nous dirons que si ce tube *a*, fig. 11, dont le diamètre est 20 mil., avait seulement 2 mètres de longueur du générateur à l'injecteur, la vitesse d'échappement serait réduite à 302 mètres au lieu de 562 (53), dans le cas de la détente nulle, et pour l'orifice en mince paroi, mais toujours en comptant sur la buse conique dont l'orifice d'un diamètre beaucoup plus faible que celui du conduit, conserve au fluide une plus grande partie de sa vitesse initiale (53).

Raisonnant d'après ces conditions hypothétiques, il y a cela de curieux que, plus faible est la pression dans la chaudière, et plus considérable est le volume d'eau que l'on y peut faire pénétrer à l'aide d'un même poids de vapeur en circulation.

La raison de ce fait, qui pourrait sembler paradoxale à première vue, c'est que, pour des pressions de plus en plus faibles, la vitesse d'écoulement de la vapeur décroît bien moins rapidement que celle de l'eau. Les formules de vitesses d'écoulement de la vapeur et des liquides montrent, en effet, que la vitesse d'écoulement de la vapeur est directement proportionnelle à la racine carrée de la pression relative et inversement proportionnelle à celle de la densité (48), tandis que la vitesse d'écoulement de l'eau, dont la densité varie peu comparativement, reste sensiblement proportionnelle à la racine carrée de la pression relative.

Soit, par exemple, de la vapeur à une pression absolue de 1 1/2 atmosphère, s'échappant à l'air libre, et sans détente, sa vitesse d'écoulement sera encore de 343 mètres, tandis que celle de l'eau, sous cet excès de pression de une 1/2 atmosphère, serait seulement de 10 mètres.

Enfin, pour résumer les conditions de marche trouvées déjà par cet examen théorique, nous ajouterons ceci :

1° Un poids donné de vapeur pourra entraîner d'autant moins d'eau avec lui que sa tension sera plus élevée, attendu que la vitesse du jet doit conserver une plus grande intensité pour vaincre celle que l'eau du générateur tend à prendre sous des pressions élevées ;

2° L'eau d'alimentation ne peut posséder, comme température préalable, que celle qui rend possible la condensation du poids de vapeur entraînant, en conformité du

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

principe énoncé tout à l'heure. L'auteur dit lui-même que la température de l'eau d'alimentation doit être inférieure à :

60 degrés pour 2 atmosph. ; 50° pour 5$^{at.}$ ; 40° pour 8$^{at.}$ ;

mais en ajoutant que l'on peut réchauffer cette eau entre l'injecteur et le générateur.

Reste la question d'effet utile, qui n'est pas encore, au moment où nous parlons, entièrement tranchée. Il semblerait d'abord, puisque toute la vapeur employée à l'injection rentre avec sa chaleur et avec l'eau dans la chaudière, moins les pertes dues au rayonnement, que la force motrice dépensée est théoriquement nulle, ce qui est véritablement contraire à toute idée reçue.

Cependant, pour se faire une idée du mode d'absorption de force motrice dans cette circonstance, où aucune quantité de chaleur ne semble dispersée autrement que par les pertes accidentelles de radiation ou d'émission par les surfaces en contact avec l'air ambiant, on est obligé de se reporter aux principes de la nouvelle théorie dynamique de la chaleur qui établit que, dans toute production ou absorption de travail, il y a une quantité de chaleur disparue ou produite équivalente.

On sait que cette théorie dynamique de la chaleur est due, en partie, au célèbre Montgolfier, et qu'elle a été de nouveau étudiée par son neveu, M. Séguin.

Quoi qu'il en soit, et en admettant au moins que cet appareil dépense la quantité théorique de force nécessaire pour effectuer le travail qu'il produit, l'injecteur de M. Giffard est un bon et bel instrument, qui pourra remplacer avec grand avantage les pompes alimentaires dont le fonctionnement est si capricieux. Déjà de nombreuses applications en ont été faites, particulièrement aux machines locomotives et à la manufacture des tabacs de Paris, où cet appareil alimente des générateurs représentant 200 chevaux-vapeur et leur fournit, dit-on, jusqu'à 4 mètres cubes d'eau par heure. Nous ferons voir aussi l'importante application que MM. Mazeline en ont faite récemment sur un navire à vapeur de 500 chevaux, pour remplacer les pompes de cale.

Mais il faudrait bien se garder de penser qu'il fonctionnerait utilement pour élever de l'eau dont on n'utiliserait pas la chaleur que la vapeur lui abandonne en l'entraînant, car, dans ce cas, la quantité de chaleur perdue serait infiniment plus considérable que celle à dépenser pour mettre en fonction un moteur capable du même travail. Cette application, comme appareil pour épuiser la cale d'un navire, n'est donc pas faite au point de vue de l'économie, mais comme moyen rapide, et au défaut de la machine du bâtiment.

L'injecteur représenté par la fig. 11 de la pl. 13 est disposé pour 30 chevaux, et à ce titre doit pouvoir fournir, suivant la garantie même de l'auteur, 900 litres d'eau par heure. Pour un pareil débit, la vitesse du jet, au passage des tuyères, est approchant égale à 39 ou 40 mètres par seconde.

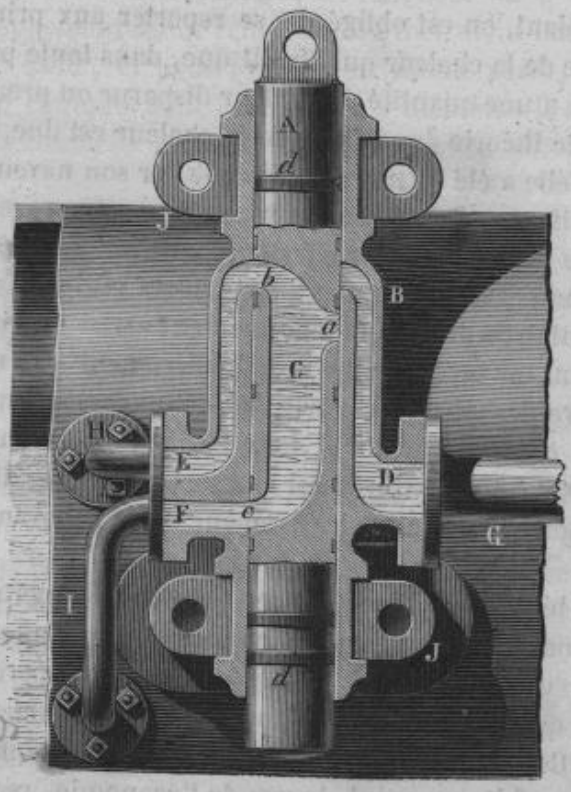
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## RÉGULATEUR AUTOMOTEUR D'ALIMENTATION

Par M. **GARGAN**, ingénieur-constructeur, à Paris

A l'exposition agricole de 1860, M. Gargan, qui a acquis une certaine réputation pour la construction des locomobiles et des wagons, a montré un nouvel appareil, destiné à régler automatiquement l'alimentation des générateurs, qui est très-ingénieux, et promet d'heureux résultats.

Fig. 75 bis.




La fig. 75 bis représente l'une des diverses dispositions que cet appareil peut recevoir, tout en conservant son principe. Il est indiqué en coupe partielle, et monté sur une chaudière dont une partie est aussi coupée en arrachement pour faire voir comment leur relation est établie.

L'auteur en caractérise le principe ainsi : *volume d'eau changé de milieu*, c'est-à-dire pris dans l'atmosphère ambiante et introduit dans un nouveau milieu où règne la pression intérieure de la chaudière, milieu duquel le liquide peut s'écouler librement pour pénétrer dans la chaudière, au fur et à mesure que celui qui s'y

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

trouve renfermé s'épuise : les fluctuations du niveau dans le générateur sont alors la cause motrice et régulatrice de l'alimentation.

Comme le montre la figure, l'instrument comprend d'abord un boisseau en bronze B, fixé en dehors de la chaudière, et à l'intérieur duquel joue une pièce cylindrique A qui le traverse de part en part. Cette pièce, qui forme une sorte de registre cylindrique, est le *mesureur* ou le récepteur mobile de l'appareil; elle est animée d'un mouvement rectiligne de va-et-vient, comme un piston ou un tiroir dont elle remplit simultanément les fonctions.

De chaque côté de l'ouverture centrale ménagée pour le registre, le boisseau B porte deux canaux E et D qui débouchent sur la surface cylindrique intérieure et vis-à-vis l'un de l'autre, vers sa partie supérieure. Celui D correspond à un conduit G qui communique avec le réservoir d'eau d'alimentation, lequel est placé un peu plus haut que l'appareil. Celui E correspond à un tube H qui débouche directement dans la chaudière, *à la hauteur même où le niveau doit être maintenu*.

Enfin un troisième canal F communique de la partie inférieure du boisseau à un conduit ou tuyau I, qui se rend au générateur dans lequel il débouche à une certaine distance au-dessous du niveau normal.

Le mesureur ou piston-tiroir A est muni intérieurement d'une cavité C percée de trois orifices *a*, *b* et *c*. Celui *a* se trouve du même côté que le conduit D du réservoir extérieur; les orifices *b* et *c* sont diamétralement opposés et d'un écartement égal à celui des orifices des conduits E et F, avec lesquels ils doivent correspondre lorsque le piston occupe la position inférieure, tandis que dans celle opposée l'orifice *a* vient coïncider avec l'embouchure du canal D.

En tenant compte du mouvement de va-et-vient du registre qui fait ainsi communiquer alternativement ces orifices, voici comment les choses se passent :

L'eau du réservoir, qui afflue continuellement par le conduit D, remplit tous les vides de l'appareil, y compris les tubes H et I, et prenant pour exemple la position représentée par la figure, c'est-à-dire le registre A au bas de sa course, le liquide renfermé dans l'appareil est en relation libre avec la chaudière dont il supporte la pression, tandis que sa communication avec le réservoir alimentaire est interrompue par suite de l'abaissement de l'orifice *a* au-dessous de celui du canal D.

Or, cette phase des fonctions pourrait correspondre à celui de l'introduction de l'eau dans la chaudière, mais à la condition *que le niveau y fût abaissé* AU-DESSOUS de l'ouverture du tube H : autrement pas une goutte de liquide ne peut s'écouler de l'appareil.

Si les orifices des tubes H et I sont, en effet, couverts par l'eau de la chaudière, qui transmet la pression de la vapeur, le liquide renfermé dans tout l'appareil est dans la même situation que du mercure dans un tube barométrique *trop court* pour équilibrer la pression atmosphérique; ce tube serait alors rempli complétement de mercure, lequel, loin de pouvoir s'écouler, serait au contraire refoulé jusqu'au sommet du tube.

Mais si le niveau vient à s'abaisser suffisamment pour *découvrir* l'ouverture du conduit H, la vapeur divisant la colonne liquide peut s'introduire jusqu'à son som-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

met, et exerçant alors sa pression au-dessus de la masse contenue en C, le liquide se trouve dans un milieu d'égale pression et peut s'écouler par le conduit I sous l'influence de sa hauteur initiale, de *b* en E.

Il résulte enfin de cette disposition que l'appareil, étant constamment en rapport avec le réservoir nourricier, n'en laisse néanmoins introduire dans le générateur qu'autant que le niveau s'y abaisse au-dessous de son point normal; mais cette circonstance se produisant, chaque mouvement du registre A peut fournir à la chaudière tout ce que l'appareil renferme d'eau, quantité aussitôt remplacée par le réservoir au moment où le registre, revenant à l'extrémité supérieure de sa course, ramène l'orifice *a* vis-à-vis de celui du canal D.

Cet ingénieux instrument offre donc l'intéressante fonction d'une alimentation automatique, certainement infaillible, et sans l'emploi de clapets ou robinets quelconques. Sans l'arrêter un seul instant, pas un atome de liquide ne sera introduit dans le générateur tant que le niveau dépassera de la plus faible quantité le point qui lui est assigné; mais aussi le moindre abaissement au-dessous de ce point donnera lieu à l'arrivée de l'eau alimentaire.

En en faisant l'application, il semble alors convenable de choisir pour le point de communication un endroit du générateur où l'eau est relativement en repos, ce qui a lieu naturellement avec les appareils fixes, puisque l'on choisit toujours l'endroit le plus éloigné du foyer pour placer le tube d'injection.

Pour les chaudières de locomotives ou de bateaux, on pourrait faire communiquer les tubes H et I avec un récipient fixé extérieurement au générateur, et formant une sorte de niveau d'eau dont la section transversale, ayant peu d'étendue, rendrait moins sensibles les oscillations accidentelles du niveau général. Ce sont là du reste des problèmes d'application que la pratique permettra de résoudre facilement.

Quant aux détails d'exécution du modèle représenté par la gravure, ils ne méritent qu'une mention très-succincte, attendu que c'est un appareil de principe, loin d'être une disposition définitivement arrêtée.

Le registre cylindrique A, quoique très-exactement tourné et rodé au diamètre intérieur du boisseau, porte de chaque côté de ses orifices des gorges circulaires garnies d'une rondelle élastique *d*, capable d'empêcher les fuites.

Le mouvement de va-et-vient que reçoit ce registre peut lui être communiqué de diverses façons. Mais comme les passages de liquides, qu'ils aient lieu du réservoir à l'appareil ou de ce dernier au générateur, s'effectuent à chaque extrémité de la course, il est utile qu'il y ait là un repos assez sensible. Si celui qui résulte du mouvement de la manivelle ou d'un excentrique n'est pas assez prononcé, il est aisé d'imaginer tout autre mécanisme pour atteindre le but proposé.

La figure représente l'appareil appliqué directement contre la chaudière où il est retenu sur un support en fonte qui porte des brides J pour recevoir le boisseau, comme un arbre dans des coussinets, et qui s'y trouve effectivement retenu par des chapeaux boulonnés avec les oreilles J.

Si on compare cet appareil avec celui de M. Giffard, comme les deux plus récents

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

alimentateurs automoteurs, on remarque que le mesureur du régulateur Gargan fonctionne seul, sans mise en train intermittente comme l'injecteur Giffard; ses résultats semblent aussi plus sûrs, vu que les pièces en sont moins délicates et qu'ils ne dépendent aucunement de la température de l'eau alimentaire ni de celle de la vapeur.

Il est vrai que l'injecteur Giffard n'exige aucun mécanisme de commande, et peut élever lui-même son eau par aspiration, comme une pompe alimentaire, tandis que l'autre appareil nécessite que l'eau alimentaire soit préalablement élevée à sa propre hauteur dans le réservoir nourricier.

En résumé, ces deux instruments, également ingénieux, ont leurs mérites respectifs, et ne peuvent être que très-bien utilisés dans l'industrie, qui offre des circonstances assez diverses pour qu'ils trouvent leur application avec les propriétés qui les distinguent.

---

Ce qui précède pourra suffire pour donner une idée des dispositions diverses qui peuvent être adoptées pour établir de bons appareils d'alimentation. Il resterait cependant à faire connaître quelques procédés employés pour le chauffage de l'eau alimentaire; mais ceci ne dépend pas directement du moteur lui-même, et, d'ailleurs, nous retrouverons l'occasion d'en dire quelques mots plus tard, soit pour les locomotives, soit pour les machines de navigation.

Mais, comme nous l'avons dit en commençant, nous nous réservons de donner les proportions des appareils alimentateurs avec le calcul général des machines à vapeur, et particulièrement les quantités d'eau exactes à dépenser et à vaporiser, pour des puissances déterminées à produire.

FIN DU CHAPITRE TROISIÈME.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

# CHAPITRE IV

## APPAREILS DE CONDENSATION

(PLANCHE 14)

### ORIGINE ET PRINCIPE DE LA CONDENSATION

Nous avons cité fréquemment jusqu'ici, sans le décrire, un système de milieu artificiel d'échappement, d'une résistance moindre que l'atmosphère naturelle, et qui s'adapte à bien des machines à vapeur dans un but d'économie du combustible employé.

On a vu, par l'historique, que le premier perfectionnement apporté aux machines de Newcomen a consisté dans l'introduction d'un jet d'eau froide dans le cylindre, afin d'y condenser la vapeur et de créer un vide qui laissât prédominer la pression atmosphérique, alors réellement motrice, perfectionnement lié intimement à l'invention de Papin qui supposait cependant la condensation effectuée par le refroidissement extérieur du cylindre.

Mais plus tard Watt, reconnaissant l'inconvénient de refroidir à chaque instant le cylindre, qui devait recevoir autant de fois de la vapeur active dont il fallait conserver la chaleur et la tension pour soulever le piston, en surmontant la pression atmosphérique, eut l'idée heureuse de condenser cette vapeur dans un vase séparé du cylindre, et qu'on avait alors intérêt à maintenir constamment froid. De là l'invention du condenseur proprement dit, qui s'applique généralement aux machines à vapeur, mais dans un état de fonctionnement différent.

En effet, lorsque Watt lui-même imagina les machines à double effet dans lesquelles la vapeur est seule motrice, à l'exclusion de la pression atmosphérique, il devait suffire, pour qu'une machine produisît un effet quelconque, que sa pression fût plus grande que celle de l'atmosphère ambiante qui lui formait alors un simple milieu d'échappement. Par conséquent, le piston-moteur agissant en vertu de la différence des pressions de la vapeur et de l'atmosphère, on perdait toute la valeur de cette dernière à laquelle la vapeur devait résister en pure perte ; ceci fait qu'on applique encore le condenseur, non pas cette fois pour laisser prédominer davantage la pression atmosphérique, mais pour créer un milieu d'une résistance moindre, et dans lequel on parvient en effet, aujourd'hui, à créer un vide complet à moins d'un dixième près.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ce mode d'application du condenseur fit faire une distinction entre les machines à double effet de celles qui échappaient leur vapeur à l'air libre : il y eut les machines *à basse pression*, capables de marcher à l'aide du condenseur avec de la vapeur d'une tension peu supérieure à une atmosphère, et celles *à haute pression*, dans lesquelles, par le fait de l'échappement à l'air libre, la vapeur devait atteindre au moins 3, 4 et même 5 atmosphères de pression.

Actuellement, malgré l'application du condenseur, les basses pressions sont en partie abandonnées, comme conduisant à des dimensions de machines très-considérables, pour une même puissance, et parce que, d'ailleurs, l'emploi des moyennes et des hautes pressions présente une économie directe de combustible.

Ainsi, avec ou sans condensation on produit aujourd'hui la vapeur, pour les moteurs d'usine, le plus souvent à 4, 5, et même 6 atmosphères, en faisant usage de la détente qui, ainsi que nous l'avons montré, réduit beaucoup cette pression au moment de l'échappement (1). Il est donc rationnel de désigner les systèmes différents en les appelant : *machines avec ou sans condensation*, suivant qu'elles échappent à l'air libre ou dans un condenseur, la pression initiale dans la chaudière pouvant être la même dans les deux cas.

D'après cette définition du principe d'un appareil de condensation, il est facile d'expliquer sa construction physique générale qui a peu changé, du reste, depuis son immortel inventeur Watt.

Un condenseur comprend d'abord un vase clos mis en relation permanente avec le conduit d'échappement du cylindre ; un jet d'eau froide arrive continuellement à l'intérieur de ce vase, et en condensant la vapeur qui s'y précipite à chaque coup de piston, il détermine un *vide* plus ou moins parfait.

A cet appareil principal, que l'on distingue sous la dénomination de condenseur par *contact direct*, est jointe une pompe élévatoire qui a pour mission d'extraire constamment cette eau de condensation, ainsi que l'air qui s'en dégage sous l'influence du vide partiel, et qui, par cela même, s'appelle *pompe à air*.

A côté de cette disposition, qui est la plus employée et certainement la meilleure, mais qui exige un volume d'eau disponible assez considérable, des essais ont été tentés pour opérer la condensation de la vapeur *par surfaces réfrigérantes* en faisant alors servir la même eau à la condensation, afin d'en dépenser beaucoup moins. Nous dirons quelques mots de ce système qui consiste à faire circuler la vapeur dans des conduits continuellement raffraîchis par un courant d'eau froide.

(1) Les appareils de navigation, surtout ceux qui sont appliqués par la marine de l'État, sont généralement à condensation et fonctionnent avec de la vapeur de 1 1/2 à 2 ou 3 atmosphères au plus. Les machines locomotives et les locomobiles sont, au contraire, sans condensation et marchent à des pressions de 6 à 7 atmosphères.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## APPAREILS DE CONDENSATION DE CONSTRUCTIONS DIVERSES

### CONDENSEUR AVEC POMPE A AIR CONCENTRIQUE

Du système dit de **MAUDSLAY**

(FIG. 1, PL. 14)

Ce système de condenseur est très-souvent employé à cause de sa simplicité, bien qu'il ne présente pas les mêmes avantages que d'autres dispositions que nous décrivons plus loin. On le désigne par le nom de Maudslay qui l'a appliqué, peut-être le premier, aux machines fixes à directrices qu'il construisait. Il a pour caractère distinctif que la pompe à air est située à l'intérieur même du condenseur proprement dit, contrairement à ce que faisait Watt qui formait de ces deux organes deux corps séparés.

La fig. 1 de la pl. 14 représente l'ensemble de cet appareil suivant une coupe verticale passant par son axe général.

On y distingue un premier corps cylindrique en fonte A, qui est le *condenseur*, et dans lequel est ajusté le cylindre B de la *pompe à air*. Leur ensemble se trouve établi dans une cuve C, d'une forme générale rectangulaire ou cylindrique que l'on appelle la *bâche* du condenseur; elle se remplit de l'eau froide qui lui est amenée, soit directement, soit par une pompe élévatoire, dite pompe à eau froide, et qui alimente le jet condensateur.

A l'intérieur du cylindre A est ménagé un rebord circulaire *a*, avec une fraisure conique, pour recevoir la pompe à air B, que l'on y place en la scellant au mastic de fonte, afin d'obtenir un joint parfait. L'extrémité inférieure du condenseur est fermée de même à l'aide d'un bouchon *b*, aussi ajusté dans une fraisure à queue d'hironde, et scellé au mastic ferrugineux.

De cette façon, l'espace annulaire existant autour du corps de pompe, est complétement étanche, par rapport à la pression atmosphérique, en admettant, bien entendu, que ce corps de pompe lui-même le soit également. Cet espace forme la capacité du condenseur; il est mis en relation avec l'orifice d'évacuation du cylindre à vapeur, par un conduit D abouché à la tubulure *c*, fondue de la même pièce avec le corps A.

L'injection d'eau froide a lieu par une sorte de pomme d'arrosoir E qui pénètre dans la tubulure *c*, aussi près que possible de l'entrée de la vapeur; cet injecteur est en communication par un robinet F, avec un tuyau G qui plonge dans l'eau de la bâche. Par conséquent, ce robinet étant ouvert et le vide existant à un degré convenable dans le condenseur, la pression extérieure agit sur la surface libre du

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

liquide et le fait monter dans le tube G, d'où il jaillit par les nombreux trous de l'injecteur E.

L'eau, ainsi introduite dans le condenseur, le remplirait bientôt sans la pompe à air qui doit l'en extraire au fur et à mesure qu'elle s'y accumule. Le piston est composé, comme celui de toutes les pompes élévatoires, d'une pièce creuse à gorge H enveloppée d'une garniture de chanvre (1), et surmontée d'un clapet circulaire *d*. Celui-ci a pour guide la tige *e* qui traverse la boîte à étoupe d'un couvercle en fonte I fixé sur le dessus du cylindre. Ce couvercle est également percé et muni d'un clapet *f* ayant pour guide l'extérieur de la même boîte à étoupe.

Quant à la partie inférieure du cylindre B, elle est complétement ouverte et en libre communication avec le condenseur; c'est au moins ce qui s'est fait ainsi bien des fois. Mais il est préférable d'y placer un clapet de retenue comme nous en montrerons de nombreux exemples.

Admettant donc la disposition actuelle, on voit que l'eau introduite dans le condenseur se répartit entre lui et le corps de pompe, espace dans lequel elle peut éprouver des pressions différentes. Si le vide obtenu dans le condenseur était aussi complet que celui engendré dans le cylindre A, lorsque le piston s'élève, il est clair que l'eau, également pressée, ou aussi peu pressée dans un espace que dans l'autre, se mettrait de niveau dans les deux au lieu de s'élever dans le cylindre en suivant l'ascension du piston. Celui-ci ne l'extrairait donc qu'en traversant sa masse et lorsque son niveau serait assez élevé pour soulever le clapet *d*, le piston étant à bout de course.

Mais la pression de la vapeur naturellement émise par l'eau de condensation excède suffisamment celle du degré de vide engendré par le piston pour que l'eau soit déprimée dans l'espace annulaire et s'élève dans le corps de pompe, de façon que le piston, en redescendant, traverse cette eau élevée qui soulève le clapet, lequel la retient alors pendant le mouvement ascensionnel du piston. Ce mouvement a pour effet de faire lever le clapet supérieur *f*, de sorte que l'eau enlevée par le piston peut se rendre dans la cuvette ou capacité supérieure qui surmonte le condenseur au-dessus de la pompe à air. Cette cuvette est munie d'un conduit de trop-plein J par lequel l'eau s'écoule au dehors, après en avoir fait puiser une partie par la pompe alimentaire, afin de profiter de la légère élévation de température de l'eau de condensation.

Il est évident, d'après cela, que l'absence de clapet de retenue à la base du corps de pompe donne lieu à des fluctuations incessantes du niveau de l'eau dans le condenseur, et quoique l'appareil puisse fonctionner ainsi, un clapet rend la marche plus régulière et plus sûre.

Comme il faut évidemment que la quantité d'eau injectée soit maintenue en rapport avec le volume et la température de la vapeur dépensée, ainsi qu'avec la température même de cette eau, on règle cette quantité à l'aide d'un robinet F

(1) Nous donnerons dans un article spécial les détails de construction des pistons à vapeur et des pistons de pompes à air.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dont la clef est surmontée d'une tige verticale $g$ qui s'élève jusqu'au point où son extrémité peut être accessible au conducteur de la machine.

La fig. 2 représente le détail du mécanisme de commande de ce robinet d'injection. La tige $g$ passe dans une sorte de petite colonne K qui se place sur la plaque de fondation de la machine. Cette tige porte une poignée $h$ munie d'un index $i$, qui correspond à un cadran $j$ sur lequel sont tracées des divisions en rapport avec les degrés d'ouverture du robinet. Ces divisions sont souvent chiffrées par rapport à la marche de la machine, tels que ses divers degrés de vitesse, de détente, etc.

Cependant la manœuvre pratique, à l'aide de laquelle on juge de l'état de marche de la condensation, consiste simplement, de la part du chauffeur, à tâter avec la main l'eau élevée dans la cuvette du condenseur pour apprécier sa température et régler, d'après cela, l'ouverture du robinet d'injection (1). Mais pour toute machine montée avec soin le condenseur doit être mis en rapport avec un indicateur de vide (p. 268) qui fait connaître, mieux que toute autre épreuve, le degré de perfection du fonctionnement de l'appareil.

La disposition indiquée par la fig. 1 de cette planche est applicable à une machine verticale, à balancier, ou à une machine horizontale avec une transformation de mouvement convenable pour attaquer la tige de la pompe à air. Cette tige, guidée d'abord par la boîte à étoupe du couvercle, l'est également dans une traverse L fixée sur la cuvette; au-dessus de ce guide la tige est ordinairement assemblée avec une tringle reliée au mouvement de la machine.

Il est important de faire remarquer que toutes les parties susceptibles de présenter des garnitures sont noyées afin d'empêcher les rentrées d'air. Ainsi le joint du conduit D avec la tubulure $c$ et le robinet $f$ doivent être maintenus rigoureusement au-dessous du niveau de l'eau dans la bâche C. Le clapet $f$ et la boîte à étoupe de la tige $e$ doivent être en contre-bas du tuyau de trop plein J.

Remarque sur la mise en train d'un condenseur. — En état de marche régulière, le condenseur et les conduits qui aboutissent au cylindre à vapeur doivent être aussi exactement que possible purgés d'air et ne renfermer que du fluide condensable. Mais au moment de la première mise en train, tout est rempli d'air, et pour l'en extraire il n'existe que le jeu simple de la pompe qui agit comme la machine pneumatique pour faire le vide dans son récipient.

Or, on sait que la machine pneumatique la mieux exécutée ne produit qu'un vide partiel, mais d'autant plus avancé que *les chambres d'air* sont mieux évitées, c'est-à-dire qu'il ne reste pas d'espace nuisible entre le clapet d'aspiration et celui du piston arrivé à la fin de sa course.

La pompe à air d'un condenseur étant élévatoire, c'est le clapet du couvercle qui figure celui du piston de la machine pneumatique, puisque c'est lui qui se lève pour l'évacuation, tandis que le clapet du piston figure celui d'aspiration et se lève au moment où le volume de gaz à extraire se partage entre les deux côtés du

(1) On estime en général que, pour la bonne marche, la température de l'eau de condensation ne doit pas s'élever à plus de 38 à 40° centigrades.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

piston. Alors la chambre d'air nuisible se trouve entre le clapet du piston, en haut de la course, et le clapet du couvercle; autrement dit le clapet du piston ne peut se lever pour laisser passer les gaz à extraire qu'autant que l'air qui serait confiné au-dessus de lui s'est suffisamment dilaté par l'effet de la descente du piston.

On comprend, d'après cela, que, pour mettre un condenseur en train et faire extraire par la pompe l'air qu'il renferme, il faut la remplir d'eau au-dessus du piston et de la cuvette supérieure, afin de favoriser la sortie de l'air qui pourrait rester renfermé entre les deux clapets. Cette sortie est du reste facile, puisque l'air, plus léger que l'eau, vient en occuper la partie supérieure.

Néanmoins, ceci démontre une fois de plus la nécessité des joints parfaits et de noyer les garnitures. L'eau de condensation, et la vapeur même, amènent assez d'air sans éprouver encore des rentrées de l'extérieur.

Avant d'examiner dans ses détails la relation d'un appareil de condensation avec le cylindre à vapeur, nous allons de suite en décrire les principaux types de construction.

## APPAREIL DE CONDENSATION AVEC CORPS SÉPARÉS

(FIG. 3 A 5, PL. 14)

Cet appareil est analogue à ceux construits par Watt, mais les détails de sa construction sont en partie de M. E. Bourdon.

La fig. 3 en est une coupe verticale passant par l'axe commun du condenseur et de la pompe à air;

La fig. 4 est une projection horizontale extérieure de l'ensemble.

On voit qu'il se distingue du précédent en ce que le condenseur A et la pompe à air B sont complétement séparés l'un de l'autre; ils sont montés tous deux sur un coffre en fonte C qui établit la communication de l'un à l'autre. Cependant, ainsi disposé, il est utile que l'appareil entier soit plongé dans une cuve pleine d'eau comme celui décrit précédemment.

Outre que la séparation des deux corps rend leur montage plus facile, elle a pour principal avantage de disposer l'injection de façon à lui faire former une gerbe qui remplit, pour ainsi dire, le condenseur et se répand plus uniformément dans la masse de vapeur affluente, ce qui doit amener une condensation d'autant plus prompte.

La caisse ou base C porte à sa partie supérieure deux ouvertures circulaires vis-à-vis desquelles on fixe le condenseur et le cylindre de la pompe par leurs rebords et par des boulons. Cette caisse étant fondue entièrement creuse, on ajuste à son intérieur un clapet *a* destiné à remplir la fonction dont nous avons parlé, c'est-à-dire de former la retenue des eaux dans le corps de pompe lorsque le piston descend.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ce clapet est monté sur un siége indépendant *b*, que l'on introduit à sa place en l'y retenant simplement par du mastic de fonte, opération qui se fait facilement avant que le condenseur soit en place. On comprend, du reste, que, puisque ce clapet pourrait même ne point exister, le joint du siége n'exige pas d'aussi grandes précautions que dans une autre circonstance. Toutefois on se réserve de le visiter par un regard ménagé dans la pièce C et fermé à l'aide d'un tampon boulonné *l*.

Le principe de l'injection conduit à une disposition différente de la précédente : le robinet est remplacé par une bonde conique F dont le siége est à l'orifice d'un ajutage en bronze E qui s'abouche avec une tubulure *k*, appartenant à la base C, et à laquelle correspond un conduit G qui amène l'eau froide. La bonde F est fixée à l'extrémité d'une tige *g* qui sort du condenseur en traversant la boîte à étoupe ménagée dans son couvercle M; elle est aussi guidée près de l'orifice par un étrier *j* portant un anneau fileté sur l'extrémité du conduit E. La tige est carrée dans ce guide, pour l'empêcher de tourner quand on fait agir le mécanisme qui sert à la faire mouvoir.

Par conséquent, en élevant la bonde elle donne issue à l'eau qui vient jaillir dans le condenseur suivant une veine initiale annulaire, et forme une gerbe qui va se briser contre les parois du condenseur et finit par retomber en gouttelettes très-divisées qui en remplissent la capacité presque entièrement.

A l'égard du procédé employé pour soulever ou abaisser la bonde, il peut consister dans celui indiqué. La tige *g* traverse une petite colonne K (détaillée fig. 5), formant support comme ci-dessus, et se taraude dans un écrou fixé au centre d'un volant manivelle *h*, arrêté par un assemblage à rappel au sommet de la colonne K. En tournant ce volant à la main, on fait monter ou descendre la tige dont les mouvements sont appréciés à l'aide de l'index *i*, qui traverse une rainure pratiquée dans la colonne sur laquelle se trouve en ce point une échelle graduée.

Cette disposition de l'appareil injecteur est très-rationnelle; elle donne, du reste, à M. Bourdon qui en a fait beaucoup d'applications, d'excellents résultats.

Ajoutons qu'au lieu de supposer l'eau froide venant d'un réservoir placé à la même hauteur que le condenseur, comme fig. 1, nous admettons que le tube G plonge dans un puits ou une citerne, et y puise l'eau par aspiration, sous l'influence du vide créé au condenseur. C'est, en effet, ce qui peut avoir lieu, mais à condition que la hauteur de l'aspiration ne soit pas trop considérable, et qu'elle n'atteigne même pas celle qui ferait équilibre au vide le moins parfait.

Ainsi, pour fixer les idées, supposons que ce vide soit fait à un dixième près, c'est-à-dire qu'il existe encore dans le condenseur une pression mesurée à l'indicateur (p. 269) par une colonne de 76 millim. de mercure, ce qui rendrait la pression atmosphérique prédominante d'une hauteur de

$$0^m 760 - 0^m 076 = 0^m 684.$$

Une colonne d'eau équivalente aurait donc pour hauteur,

$$0^m 684 \times 13{,}598 = 9^m 301.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Si le niveau du puisard était en contre-bas du condenseur d'une quantité égale à cette hauteur, il est évident que l'eau s'y élèverait, mais ne jaillirait pas. Or, non-seulement il faut qu'elle jaillisse, mais elle doit conserver une vitesse capable de fournir au débit, en tenant compte des dimensions de l'orifice injecteur et des diverses résistances ou contractions qui altèrent la vitesse et la dépense.

Si donc on possède un réservoir distant seulement de quelques mètres (soit 4 ou 5 mèt., par exemple) en contre-bas du condenseur, on évitera une pompe élévatoire par l'aspiration directe. Mais pour une hauteur qui laisserait des doutes sur la réussite, on devra élever l'eau préalablement dans une bâche, comme le montre la fig. 1, ce qui présente le double avantage de noyer le condenseur et de le tenir constamment rafraîchi.

Les clapets *d* et *f* de la pompe ont une forme conique souvent adoptée pour la facilité qu'ils présentent de retomber bien exactement sur leurs siéges, et aussi pour favoriser la formation de la veine d'écoulement de l'eau.

On a construit des pompes à air dans lesquelles le couvercle I est supprimé et remplacé par le clapet *f* tout seul, qui glisse alors le long de la tige même par une garniture d'étoupe. Il est, dans ce cas, enlevé autant par l'adhérence de la garniture que par l'eau que le piston soulève, et dans la descente du piston la pression atmosphérique le ramène sur son siége. Cette disposition fonctionne convenablement et a été adoptée par des constructeurs expérimentés.

## CONDENSEUR HORIZONTAL AVEC POMPE A AIR A DOUBLE EFFET

Construit par **M. LECOUTEUX**, ingénieur-mécanicien

(FIG. 6 A 10, PL. 14)

On a remarqué que, dans les deux appareils qui viennent d'être décrits, la pompe est à simple effet; et comme son piston donne le même nombre de coups, dans un temps donné, que le piston moteur, il s'ensuit que le vide n'est réglé dans le condenseur qu'une fois sur deux cylindrées de vapeur qui lui sont envoyées.

Bien que ce mode de fonctionnement ait été généralement appliqué, et qu'il le soit encore, on comprend que l'on peut mieux faire en rendant l'action de la pompe à air exactement correspondante à celle du piston moteur, c'est-à-dire en la rendant à double effet. C'est ce qui se fait maintenant de plus en plus. Nous croyons que MM. Thomas et Laurens sont les premiers ingénieurs, en France, qui aien proposé des condenseurs avec des pompes à air à double effet; M. Farcot est aussi l'un des premiers constructeurs qui aient appliqué ce système sur des machines horizontales, ce qu'ils font encore journellement. MM. Séraphin frères, MM. Cail et C^e^ ont également exécuté un grand nombre d'appareils à condensation, parti-



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

culièrement pour les sucreries et les raffineries de sucre, avec des pompes à air à double effet, comme ayant l'avantage de réduire notablement les dimensions et par suite le poids et le prix de l'appareil.

Le condenseur représenté par les fig. 6 et 7 est un exemple de cette disposition perfectionnée, et renferme aussi les principales améliorations apportées à ce genre d'appareil, telle que la position horizontale, mieux appropriée aux machines qui affectent cette structure, et l'emploi des clapets en caoutchouc. Il appartient à la machine que nous avons déjà citée (p. 405), et qui a été établie par M. Lecouteux à la Manutention militaire de Paris.

La fig. 6 est une coupe longitudinale de ce condenseur, faite par l'axe de la pompe.

La fig. 7 en est une section transversale faite sur le condenseur proprement dit, et suivant les tubes injecteurs.

L'ensemble de l'appareil est composé de plusieurs parties réunies par des boulons. L'une d'elles comprend le corps de pompe B, qui est fondu avec un coffre rectangulaire C, dans lequel sont ménagés deux compartiments $a$ et $a'$, où sont rapportés les clapets.

Cette première partie est surmontée d'une caisse K, de même forme, qui constitue la cuvette de déversement de l'eau de condensation, et dont l'intérieur présente un compartiment séparé, lequel, étant en correspondance avec l'intervalle des chambres $a$ et $a'$, forme le condenseur proprement dit A.

Cette capacité porte une tubulure à laquelle se joint un conduit D qui communique avec un récipient vide interposé entre le conduit d'échappement du cylindre à vapeur et l'appareil actuel. Ces récipients et conduits extérieurs viennent alors ajouter leurs capacités à celle du compartiment A, et constituent avec lui la capacité totale du condenseur. Nous verrons plus tard que cette disposition est celle adoptée par M. Farcot, avec cette différence que l'injection est dirigée directement dans le récipient extérieur, au lieu d'être effectuée, comme ici, dans un compartiment réservé à la pompe à air.

Du côté opposé à l'arrivée de la vapeur sont ménagées deux autres tubulures auxquelles s'ajuste une pièce formée de deux conduits bifurqués $c$ et $c'$, correspondant à un robinet F qui règle l'arrivée de l'eau d'injection.

Ce robinet possède un boisseau fondu avec une cuvette en forme d'entonnoir, et d'une grande capacité, qui permet d'y tenir une couche d'eau préservatrice des rentrées d'air. La clef est surmontée d'une tige $g$, maintenue par son embase et par le moyen d'un disque $j$ fixé sur la cuvette. Cette tige porte une poignée $h$ par laquelle on manœuvre le robinet, et qui est munie d'un prolongement avec un index $i$, correspondant à une division faite sur la circonférence du disque.

Le boisseau étant réuni par sa base avec le tuyau G qui amène l'eau d'injection, la clef du robinet est percée d'une lumière coudée qui s'ouvre à ce conduit et à celui de la pièce bifurquée $c\,c'$. L'eau froide, arrivant par ces deux branches, pénètre dans le condenseur par deux tubes en cuivre rouge E et E′, percés d'un très-grand nombre de petits trous. Elle jaillit par conséquent dans l'intérieur de la capacité A, sui-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vant deux centres rayonnants dont les jets s'entrecroisent et remplissent, aussi complétement que possible, l'espace offert à la vapeur.

On a si bien senti l'importance d'étendre la sphère d'activité de l'injection, que l'on a fait le tube E plus long que l'autre, en profitant de sa position vis-à-vis de la tubulure D d'entrée de la vapeur.

Nous arrivons maintenant aux fonctions de la pompe, qui est, comme nous l'avons dit, à double effet, extrayant l'eau du condenseur à chaque coup simple.

Son piston H est formé d'un disque plein, garni de tresses de chanvre. Sa tige $e$ est guidée par une première boîte à étoupe ménagée dans le couvercle I ; celui-ci est fondu avec une cuvette I', dans laquelle on met de l'eau pour noyer cette première garniture. Cette cuvette porte extérieurement une seconde garniture pour laisser traverser la tige et empêcher les fuites.

Le cylindre B communique librement par les lumières $b$ et $b'$ avec les compartiments $a$ et $a'$, dans lesquels s'ouvrent, d'une part, les clapets d'aspiration $d$ et $d'$, et de l'autre, ceux de retenue ou de décharge $f$ et $f'$.

Les deux premiers clapets $d$ et $d'$ sont appliqués contre les parois du condenseur, et sont appelés à s'ouvrir pour laisser passer l'eau de cette capacité dans les compartiments $a$ ou $a'$, suivant le sens de mouvement du piston.

Les deux autres clapets $f$ et $f'$ sont placés sur les ouvertures que l'eau traverse, lorsqu'elle se trouve refoulée, pour pénétrer dans la cuvette de décharge.

Ainsi, on comprend que, pour chaque course du piston, l'eau passe à la fois du condenseur dans l'une des chambres $a$ ou $a'$, et s'élève repoussée de l'autre dans la cuvette K. Celle-ci est munie d'un canal déverseur $k$, dont l'orifice est situé assez haut pour que le condenseur soit constamment couvert d'eau; ce canal est mis en rapport avec la conduite J qui dirige les eaux hors de la machine.

Suivant la phase choisie sur notre dessin, on voit que le piston appelle l'eau du condenseur par le clapet $d'$, et la refoule dans la cuvette par celui $f$. Les clapets $d$ et $f'$ sont alors fermés, et, au retour du piston, l'inverse aura lieu.

On remarque que cet appareil n'est pas disposé pour être entièrement plongé dans une bâche, mais que les précautions sont prises pour que toutes les parties susceptibles de laisser des fuites soient noyées. C'est du reste un excellent procédé, que nous avons vu appliqué aux pompes à eau, dès 1845, par M. Ch. Faivre, ingénieur de mérite.

L'ensemble du condenseur présente une caisse à peu près cubique, qui se fixe près de la machine, sur la maçonnerie et par des boulons de fondation. Toutes les parties en sont facilement accessibles; et pour visiter les deux clapets intérieurs $d$ et $d'$, deux regards, fermés par des bouchons $l$, ont été ménagés dans les parois latérales.

Pour terminer la description de ce système de condenseur, il nous reste à mentionner la construction spéciale des clapets et celle d'un robinet valve appliqué à la même machine par M. Lecouteux, pour diriger à volonté l'échappement de la vapeur dans le condenseur ou dans l'atmosphère.

Construction des clapets en caoutchouc (fig. 6, 9 et 10, pl. 14). — L'emploi des

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

clapets en caoutchouc est un des perfectionnements les plus importants qui aient été apportés aux pompes à air et à eau, et principalement à celles des appareils de condensation. Ils ont à la fois pour avantages la durée, la conservation et la facilité d'exécution. Il est juste d'ajouter que cette innovation est due au procédé de vulcanisation qui a rendu l'emploi du caoutchouc si général.

Chaque clapet est formé d'une lame rectangulaire d'une épaisseur qui varie, suivant son étendue, de 10 à 30 millimètres; ceux de l'appareil actuel portent 10 millimètres d'épaisseur, pour une surface rectangulaire de 40 centimètres sur 19. Cette lame est simplement pincée par le bord, entre le siége et une feuille de métal contre-coudée *m* (fig. 6), qui lui sert de retenue au moment de l'ouverture.

Le siége est une plaque de fonte L (fig. 9 et 10( que l'on appelle *grille*, en raison des ouvertures rectangulaires qu'elle présente. On comprend que la lame de caoutchouc, par sa flexibilité, demande à être soutenue suivant une grande portion de son étendue, lorsqu'elle tombe sur son siége et que la pression tend à l'y appuyer fortement.

La fig. 9 est la vue de face de l'une de ces grilles, qui se fixent au moyen de boulons sur les orifices où les clapets sont appliqués; la fig. 10 en est une coupe transversale par le milieu de la largeur. Cette coupe indique la forme donnée aux barreaux pour favoriser le passage du fluide.

Les lames d'arrêt *m*, contre lesquelles les clapets viennent buter en se détachant du siége, sont aussi percées pour qu'ils n'y restent pas collés et que la pression même de l'eau les en détache lorsqu'ils retombent sur leur siége.

Robinets a soupapes pour échappement variable (fig. 8). — Prévoyant le cas où une machine à condensation serait susceptible d'échapper à l'air libre accidentellement, lorsque, par exemple, l'eau de condensation viendrait à manquer ou qu'elle serait trop chaude par l'élévation de la température ambiante, divers constructeurs font usage d'un appareil qui permet de changer la direction de l'échappement de la vapeur, sans avoir rien à démonter du mécanisme.

M. Lecouteux a fait cette application à sa machine de la Manutention militaire, et la fig. 8 représente la disposition qu'il a adoptée.

A est le conduit qui vient directement du cylindre; il est fondu avec un boisseau cylindrique B portant une tubulure C par laquelle il est en rapport avec le tuyau qui va au condenseur.

Ce boisseau est surmonté d'une boîte D formant couvercle et communiquant par une série de tuyaux E avec l'atmosphère extérieure.

De chaque côté du conduit A sont deux siéges coniques, l'un *a*, rapporté en bronze, et l'autre ménagé à l'ouverture de la boîte D. Une soupape en bronze F, montée sur une tige centrale *b*, est tournée suivant deux limbes coniques opposés, de façon à être appliqué exactement sur les deux siéges.

Alors, si l'échappement doit se faire au condenseur, on élève la soupape contre le siége supérieur, tel que l'indique la fig. 8, et la communication avec l'atmosphère est supprimée.

Dans le cas contraire, on abaisse cette soupape sur le siége inférieur *a*, et la va-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

peur, arrivant toujours du cylindre par le conduit A, s'échappe directement, par celui E, dans l'atmosphère.

On voit très-bien que la soupape est retenue sur sa tige *b*, entre une embase et un écrou taraudé. Cette tige, qui est guidée à sa partie inférieure par la douille ménagée au siége *a*, est filetée dans une partie de sa longueur et traverse un écrou ajusté dans la petite colonne *c* venue de fonte avec la pièce D, laquelle colonne est terminée par une boîte à étoupe pour le passage de la tige.

Par conséquent, les changements de position de la soupape s'opèrent en faisant tourner la tige par son volant-manivelle *d*.

Lorsqu'on marche avec le condenseur, et qu'il est alors indispensable d'empêcher les rentrées d'air, la soupape, étant sur son siége, laisse au-dessus d'elle une cavité que l'on remplit d'eau ; mais pour marcher à l'air libre, la même précaution n'est plus nécessaire, attendu qu'une rentrée d'air accidentelle au condenseur, alors sans usage, ne peut plus avoir d'inconvénient.

## CONDENSEUR AGISSANT PAR SURFACES RÉFRIGÉRANTES

(FIG. 11, PL. 14)

On a essayé de pratiquer la condensation de la vapeur en agissant par le refroidissement extérieur des conduits qu'on lui faisait traverser en sortant du cylindre moteur, et qui consistaient alors en un grand nombre de tubes en métal très-diathermane ou bon conducteur de la chaleur.

Un ingénieur anglais, M. Sem Hall, a particulièrement fait connaître, en 1835, un système de condenseur fondé sur ce principe, et qui paraît avoir été appliqué en Angleterre avec assez de succès (1).

Il est vrai que M. Hall avait surtout pour but de séparer l'eau de condensation de la vapeur condensée, afin d'employer exclusivement celle-ci à l'alimentation de la chaudière, ce qui aurait pour mérite d'éviter les incrustations, puisque cette eau est alors naturellement distillée.

Aussi l'application de cet appareil a-t-elle eu lieu principalement sur des appareils de navigation pour lesquels on n'a à sa disposition que l'eau de la mer, qui occasionne des dépôts si considérables.

Le condenseur de M. Hall était composé d'une caisse traversée par des tubes minces, en laiton, par lesquels la vapeur venant du cylindre se divisait et se condensait par un courant d'eau froide enveloppant les tubes. L'eau issue de la condensation de la vapeur était alors reprise exclusivement par la pompe à air, employée en même temps à faire le vide dans les tubes ; puis elle était renvoyée au générateur, en passant par un appareil alimentateur analogue à ceux qui ont été

(1) Le Bulletin de la Société d'encouragemen (année 1836) a publié ce système avec détails.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

décrits dans le chapitre précédent. Mais il était urgent d'ajouter à cela un appareil distillatoire pour fournir une certaine quantité d'eau pure additionnelle, destinée à réparer les pertes inévitables de la vaporisation.

On doit à M. Dutrembley, qui s'est beaucoup occupé des machines à éther, un système de condensateur tubulaire ayant quelque analogie, quant au principe, avec celui de HALL, mais qui en diffère sous le rapport de la construction, en ce que, au lieu d'employer des tubes ronds, il avait imaginé des tubes très-aplatis qu'il pouvait, par cela même, loger en plus grand nombre dans un espace donné, afin d'obtenir une très-grande surface réfrigérante sous le moindre volume possible (1).

Plus tard divers constructeurs ont essayé l'emploi d'un condenseur analogue, moins la séparation de la vapeur condensée de celle employée à la condensation ; la pompe à air fonctionne alors pour l'extraction de la vapeur condensée et pour établir le courant d'eau réfrigérateur.

La fig. 11 de la pl. 14 pourra donner une idée de cette disposition ; elle représente un appareil de condensation appliqué, il y a plusieurs années, par MM. Legavrian et Farinaux, anciens mécaniciens de Lille, à des machines à vapeur à deux cylindres qu'ils construisaient (2).

Le condenseur est un cylindre de fonte A, traversé par un certain nombre de tubes en laiton *a*, en communication directe, par une coupole E, avec le tuyau D qui amène la vapeur sortant du cylindre. Ils communiquent, de même, avec une capacité inférieure F, mise en rapport avec la caisse C sur laquelle est montée la pompe à air B.

Les tubes *a* sont pris par deux cloisons en tôle *b* et *b'* entre lesquelles on fait circuler de l'eau froide qui enveloppe alors les tubes, et peut s'écouler par une ouverture ménagée au fond *b'*, dans la chambre inférieure F, avec l'eau issue de la condensation de la vapeur et qui s'écoule des tubes.

Par conséquent, la pompe à air forme un appel qui entretient le courant d'eau froide, en entraînant avec elle la vapeur condensée et en maintenant le vide dans les diverses parties qui reçoivent la vapeur.

La fig. 11 suffit pour faire comprendre l'ensemble de cette construction, y compris la pompe à air qui diffère peu de ce qui a été expliqué précédemment.

On voit qu'elle est munie d'un clapet de retenue *c*, et d'un autre, *f* communiquant avec la cuvette de déversement K. Cette cuvette est un coffre rectangulaire, placé latéralement, au lieu de surmonter directement le corps de pompe.

Dans la machine dont cet appareil fait partie, la commande a lieu par un excentrique circulaire relié à une bielle G qui attaque la tige du piston de la pompe.

Aujourd'hui on a presque entièrement renoncé à ce système, qui exige, en réalité, un plus grand volume d'eau froide, avec une circulation très-active, que la condensation par voie d'injection directe.

(1) La description et le dessin de l'appareil de M. Dutrembley ont été donnés dans le vol. v de la *Publication industrielle*.

(2) Une machine de ce système a été décrite dans la *Publication industrielle*, vol. VII, pl. 27.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Comprenant cette objection, M. E. Bourdon a fait des expériences avec un condenseur à tubes, mis en mouvement de rotation dans le récipient où passe le courant d'eau froide. Ce procédé avait évidemment pour objet de renouveler activement les couches d'eau froide sur les tubes condensateurs, et, en résumé, produire la liquéfaction de la vapeur avec rapidité.

De plus, l'ingénieux inventeur se proposait de vaporiser l'eau de condensation par l'absorption de la chaleur de la vapeur condensée, et de renvoyer cette nouvelle vapeur au cylindre en l'additionnant à celle du générateur. Nous avons cité ce procédé (p. 447) à propos de l'injecteur Giffard.

Cependant, ces essais n'ont pas eu de suite, et le système par injection ou par contact direct a toujours prévalu.

## PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES APPAREILS DE CONDENSATION

Un appareil de condensation agit sur le travail de la machine suivant deux modes différents. Il opère d'abord par la grandeur de l'espace presque vide qu'il offre à la vapeur pour s'y répandre en se dilatant, et, ensuite, par l'eau froide qui condense cette vapeur en lui empruntant la quantité de chaleur latente qui la maintenait à l'état de fluide élastique, plus une très-grande partie de la chaleur sensible, de façon à produire, en résumé, une certaine quantité d'eau moins chaude, n'émettant que de la vapeur d'une faible tension.

On peut donc considérer deux points principaux pour l'établissement d'un appareil de condensation :

1° Le volume de l'espace vide total qu'il doit présenter en rapport avec celui de la vapeur qui doit s'y détendre;

2° La quantité d'eau froide à y injecter suivant la température de cette eau et le volume ou le poids de la vapeur et sa température.

Nous allons dire quelques mots de ces deux conditions, réservant pour le calcul général des proportions des machines à vapeur la détermination directe de celles du condenseur en rapport avec chaque machine en particulier.

Volume d'un appareil de condensation. — On pose généralement, comme principe des appareils de condensation cette loi physique, très-bien démontrée par tous les observateurs :

*Lorsqu'on établit la communication entre deux récipients renfermant chacun un même liquide, mais à des températures différentes, l'équilibre de tension, entre les vapeurs qu'ils émettent, s'établit dans les deux récipients suivant la tension qui correspond à la vapeur émise par le liquide le plus froid.*

En appliquant cette loi aux condenseurs des machines à vapeur, on doit faire observer que le condenseur est en effet presque complétement privé d'air et ne renferme que du liquide qui émet de la vapeur capable d'en saturer l'espace, ou au maximum de force élastique, tandis que l'autre récipient, c'est-à-dire le cylin-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dre, contient bien de la vapeur à une plus haute tension, mais hors du contact de l'eau qui l'a émise, et qui, en pénétrant dans le condenseur, commence par se dilater comme un gaz permanent, suivant la somme des volumes du cylindre et du condenseur, et dans un certain rapport entre sa propre tension et celle du milieu d'échappement.

C'est au moins ce qui peut arriver au premier moment de la communication; mais la condensation ne tardant pas à se produire, la réduction de tension s'opère au fur et à mesure, et finit par n'être plus qu'égale à celle de la vapeur émise par le liquide existant dans le condenseur.

Il est vrai que, pour obtenir ce résultat, il faut en même temps ajouter la quantité d'eau froide nécessaire pour s'emparer de la chaleur dégagée par la vapeur en se condensant, sans quoi cette chaleur s'ajoutant au liquide primitivement renfermé par le condenseur, la température en serait élevée, et la vapeur émise serait d'une tension bien supérieure à celle qui régnait au début de la communication.

Par conséquent, puisque l'effet recherché n'est véritablement obtenu que par l'addition de l'eau froide, qui exige, évidemment, un certain temps pour opérer, il existe un intérêt réel à donner au condenseur une capacité telle que la vapeur éprouve immédiatement, en se répartissant entre le cylindre et lui, une notable détente, avant même que la condensation n'en soit effectuée.

Ceci nous fournit l'explication d'un fait contradictoire entre les constructeurs, dont les uns cherchent à placer le condenseur aussi près que possible du cylindre, tandis que d'autres ne craignent pas de l'en éloigner, parfois même d'une distance assez importante, telle que la longueur totale d'une machine horizontale, qui, pour une puissance moyenne de 20 à 30 chevaux, peut être de 5 à 6 mètres.

En effet, le condenseur étant aussi éloigné du cylindre, se trouve en communication avec lui par un conduit d'une grande capacité, qui s'ajoute à la sienne propre et rend l'effet avantageux dont nous venons de parler. Cependant, placé tout près du cylindre, le condenseur n'en sera pas plus mal en lui donnant, de toute façon, une capacité suffisante.

En examinant les machines établies par les constructeurs les plus expérimentés, on reconnaît que la capacité du condenseur ajoutée à celle des conduits de communication n'est jamais inférieure à la moitié, ou au moins au tiers du volume engendré par le piston pour un coup simple. Nous reviendrons plus tard sur ces proportions en traitant des dimensions générales d'un moteur à vapeur.

L'état normal des fonctions d'un condenseur peut donc être résumé ainsi :

1° La vapeur se répartit entre le cylindre et le condenseur et éprouve, par cela même, une dilatation qui d'abord réduit approximativement sa tension dans un rapport inverse des volumes;

2° Suivant la loi physique exposée ci-dessus, la pression de la vapeur, déjà réduite, tend à se mettre en équilibre, par la condensation, avec celle qui règne dans le condenseur;

3° Mais pour que la basse pression initiale dans le condenseur puisse être conservée, il faut introduire des quantités d'eau froide pour chaque volume successif

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

de vapeur introduite, de façon à accélérer d'abord la condensation, et que le mélange forme un liquide à la température de celui qui, dans le condenseur, donne naissance à la pression initiale.

Valeur des quantités d'eau a injecter. — Les notions préliminaires (1re section), fournissent tous les renseignements nécessaires, pour résoudre ce problème relatif à l'établissement d'un appareil de condensation.

Les données particulières de ce problème sont les suivantes :

Mélanger à un certain poids de vapeur, à une température fixée, une quantité d'eau froide dont la température est aussi déterminée, et obtenir, après le mélange, de l'eau chaude dont la vapeur, qu'elle est capable d'émettre dans le vide, ne dépasse pas une certaine limite de force élastique.

Ordinairement la quantité de vapeur est exprimée en volume et par sa tension, ce qui exige une traduction en poids et en température, mais qu'il est facile d'effectuer. Il en est de même pour le mélange dont il faut trouver la température d'après la tension proposée. Le volume de vapeur est celui introduit à pleine pression dans le cylindre moteur à l'unité de temps.

Exemple. — Trouver le poids P′, d'eau à injecter pour opérer la condensation, dans les conditions suivantes :

| | |
|---|---|
| Volume de vapeur dépensé par seconde..... | 200 litres. |
| Pression absolue..... | 4 atmosph. |
| Température de l'eau disponible pour l'injection... | $t = 12$ degrés. |
| Pression de la vapeur émise par le mélange, en hauteur de mercure..... | $0^{met.}04$. |

*Solution.* $0^{m.c.}200$ de vapeur à la pression de 4 atm., pèse, d'après la table (p. 19) :

$$P = 0^{m.c.}200 \times 2^{k}0997 = 0^{k}420.$$

La température de la vapeur à 4 atmosphères est, d'après la même table :

$$T = 145°,4.$$

La valeur du calorique latent, pour 1 kilog. de vapeur à 4 atmosphères est, environ, suivant la table (32) :

$$l = 500 \text{ calories.}$$

Enfin, la table de la page 13 nous fait connaître que de l'eau, pour émettre dans le vide de la vapeur dont la tension ne dépasse pas, au maximum de force élastique, 40 millimètres de mercure, correspond à la température de 35 degrés; soit :

$$t' = 35°.$$

Alors par la formule J (33), des problèmes de mélanges, on trouve :

$$P' = \frac{(T + l - t')\,P}{t' - t} = \frac{(145°,4 + 500 - 35) \times 0^{k}420}{35° - 12} = 11^{k}14.$$



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ainsi, pour chaque volume de 200 litres de vapeur à 4 atmosphères dépensé par la machine et envoyé au condenseur, il faudrait injecter plus de 11 kilogrammes d'eau à 12 degrés pour que la température ne dépassât pas 35°, et que la contre-pression ne fût que de 40 millimètres à l'indicateur du vide; soit 1/19 d'atmosphère.

C'est aussi la quantité d'eau que doit enlever la pompe dans le même temps; mais nous verrons qu'on lui donne toujours une puissance beaucoup plus grande que celle nécessaire à l'extraction de l'eau de condensation, à cause de l'air qu'elle doit également enlever et qui se dégage de l'eau introduite sous l'influence du vide, et même de la vapeur qui en conserve encore.

Faisons remarquer, en passant, que ce poids d'eau à injecter est indépendant de la puissance nominale de la machine, attendu qu'un même volume de vapeur dépensée peut développer des quantités de travail différentes, suivant son mode d'emploi, sans détente ou avec une détente plus ou moins prolongée.

Toujours est-il qu'une condensation exige de très-grandes quantités d'eau disponible et relativement à une basse température; car si nous nous arrêtons à l'exemple ci-dessus, nous voyons que le poids d'eau froide à injecter est près de 30 fois celui de la vapeur dépensée.

Il est vrai que nous avons admis une opération très-avancée, c'est-à-dire que l'eau de condensation soit à une faible température, tandis qu'au lieu de 35° elle possède plus souvent 40 et même 44 à 45 degrés.

Mais enfin, le poids d'eau à injecter est toujours 20 à 30 fois celui de la vapeur, ce qui est, de toute façon, considérable.

Quelques savants moteurs ont fait observer qu'il peut bien n'être pas avantageux de pousser le vide très-loin, attendu que l'effort nécessaire pour faire mouvoir la pompe s'en augmente d'autant, et qu'il peut alors arriver moins qu'une compensation. Cependant les constructeurs actuels cherchent, au contraire, à rendre ce vide aussi avancé que possible, en réduisant la pompe à ses moindres dimensions, et en perfectionnant sa marche.

Nous n'ajouterons rien, quant à présent, à ce qui vient d'être dit sur les appareils de condensation, que nous aurons souvent encore l'occasion de décrire, en même temps que les machines auxquelles ils sont appliqués. Mais en traitant particulièrement des proportions générales des moteurs à vapeur, celles des appareils de condensation y trouveront naturellement leur place.

FIN DU CHAPITRE QUATRIÈME.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

# CHAPITRE V

## MACHINES A VAPEUR VERTICALES A MOUVEMENT DIRECT

(PLANCHES 15, 16 ET 17)

Nous nous proposons de montrer maintenant divers exemples de machines dont la position est verticale, position qui est alors celle que le cylindre à vapeur occupe lui-même, mais en faisant toutefois la distinction des machines dites à mouvement direct, de celles dites à balancier dans lesquelles le cylindre est aussi placé verticalement et que nous décrirons dans un chapitre spécial.

Nous n'avons guère à insister, pour cette revue, que sur les détails de construction, attendu que tout ce qui précède explique complétement les fonctions des organes principaux d'un moteur à vapeur, tels que la transformation du mouvement, les mécanismes de distribution, les appareils d'alimentation et de condensation, caractères que l'on retrouve, quelle que soit, en résumé, la disposition générale du moteur.

On sait que toutes ces machines ne possèdent pas d'appareil condensateur; mais telles qu'elles se présentent il est toujours possible d'en supposer un, ou de l'y ajouter réellement; on a vu, en effet, que l'adjonction de cet appareil n'exige qu'une prise de mouvement pour la pompe à air, ce qui n'apporte aucune modification essentielle au mécanisme de la machine et à sa construction.

Les machines verticales à mouvement direct ont été et sont encore, surtout pour les faibles puissances, très-souvent employées. D'une disposition et d'une construction plus simples que les machines à balancier, elles sont venues tout naturellement après celles-ci, et les ont remplacées dans certains cas avec avantage, particulièrement à cause de leur moindre prix de revient et de l'économie qu'elles permettent de réaliser dans les frais d'installation. Elles exigent moins de place, et peuvent se loger dans des espaces beaucoup plus restreints; les organes qui les composent étant plus ramassés, sont aussi d'une surveillance et d'un entretien plus faciles. Leur montage se fait plus rapidement, avec moins de peine et de précaution.

Si à ces avantages on joint celui d'avoir, quand il est nécessaire, l'arbre moteur placé à la partie supérieure de la machine, condition opposée à la structure du système à balancier, on doit comprendre que le système vertical ait été préféré dans bien des circonstances.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Il faut ajouter cependant que la machine à balancier *représente* mieux que la machine à mouvement direct; elle est plus monumentale, ce qui peut être quelquefois un motif pour son adoption. Mais elle a surtout ceci d'important, qu'elle peut acquérir un très-haut degré de régularité par le fait de son mécanisme en quelque sorte mis en équilibre par le balancier ; et puis, une fois bien montée et solidement assise, elle exige peu de réparations. Ceci fait qu'on lui donne souvent la préférence dans les établissements importants, qui ont besoin d'une grande force motrice et qui recherchent surtout la grande régularité de mouvement.

En résumé, pour les petites forces, lorsque ce n'est pas la machine horizontale, on adopte généralement les machines verticales sans balancier et sans condensation comme moteurs de construction économique.

Bien des dispositions ont été imaginées dans ce but; il nous paraît utile de faire connaître les principales dans lesquelles nous distinguerons les types suivants :

1° La machine à deux colonnes prenant son point d'appui en partie sur son propre bâti et en partie sur un mur voisin;

2° La machine à chevalet, dans laquelle les deux colonnes sont remplacées par un simple bâti triangulaire, avec le même mode de point d'appui;

3° La machine à quatre colonnes, qui, portées sur une seule et même plaque de fondation, sont réunies par un entablement en fonte sur lequel repose l'arbre moteur, afin d'isoler tout le système des murs du bâtiment et de permettre de le placer par suite partout où on peut le désirer;

4° La machine à socle ou à tabouret, surmontée de glissières ou coulisses verticales, et qui porte également tous les organes pour isoler de même tout l'ensemble;

5° La machine à cylindre renversé et porté à la partie supérieure du bâti;

6° La machine à colonne creuse et à jours, renfermant tout le mécanisme.

Toutes ces machines se distinguent non-seulement par la forme et la disposition de leur bâti, mais souvent aussi par leur mode de distribution, comme par le mécanisme employé pour diriger la marche rectiligne du piston.

Elles sont d'ailleurs susceptibles de fonctionner avec ou sans détente, et avec ou sans condensation, comme aussi d'être modifiées dans les détails d'exécution.

Nous n'avons pas compris dans ce genre de machines verticales, que nous avons appelées *machines à mouvement direct*, les moteurs à vapeur dans lesquels le piston opère directement son effet, comme dans les *marteaux-pilons*, par exemple, que l'on emploie beaucoup aujourd'hui dans les forges et dans les ateliers de construction. Ces moteurs, qui devront nécessairement faire le sujet d'un article séparé, se distinguent d'une manière toute spéciale, par la dénomination de *machines à action directe*.

Nous en avons aussi séparé les machines oscillantes (p. 357), qui sont, du reste, susceptibles d'affecter à la fois tous les divers modes de construction des machines verticales et même horizontales, mais dont le caractère distinctif spécial doit être l'objet d'une mention particulière.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## MACHINE A DEUX COLONNES ET A DIRECTRICES

Construite par **M. MARTIN**, mécanicien à Paris

(FIG. 1 ET 2, PL. 15)

Cette machine est l'exemple moderne d'un type adopté depuis longtemps pour les forces moyennes, surtout avant l'extension du système horizontal. Presque tous les constructeurs de machines à vapeur en ont exécuté un grand nombre. Nous pourrions rappeler particulièrement M. Imbert, ancien mécanicien de Paris, dont le nom est encore conservé pour désigner ce système de construction, simple et économique.

Le bâti se compose de deux colonnes en fonte boulonnées par leur base sur une forte plaque d'assise, et reliées à leur sommet par une grande corniche dont les côtés latéraux vont se sceller dans le mur même du bâtiment. Pour diminuer les proportions générales du bâti, le cylindre repose sur la plaque de fondation par le milieu de sa hauteur, tandis que dans les premières machines analogues il y reposait directement par sa base, la plaque formant elle-même la fermeture inférieure.

Cette machine n'a pas de condenseur, ce qui signifie que l'échappement de la vapeur a lieu directement dans l'atmosphère.

### ENSEMBLE DE LA CONSTRUCTION

La fig. 1 de la pl. 15 est une vue de face extérieure de la machine;

La fig. 2 en est une section transversale, faite par l'axe du cylindre et de l'ensemble du mouvement.

Le cylindre A de cette machine est fondu avec une bride circulaire *a* ménagée au milieu de sa hauteur, et par laquelle il est boulonné sur la plaque de fondation B, qui repose sur deux dés en pierre C.

Sur la plaque B sont montées, de chaque côté du cylindre et en arrière de son axe, deux colonnes en fonte D sur la tête desquelles repose un entablement également en fonte E, qui a pour double fonction de porter le palier F de l'arbre moteur G, et de consolider le tout, en venant se relier au mur transversal du bâtiment dans lequel est montée la machine.

Cet entablement présente, en plan horizontal, une sorte de rectangle dont un des deux grands côtés est supprimé et remplacé par le mur latéral contre lequel les deux petits côtés sont boulonnés et scellés. Sa longueur doit être suffisante pour y renfermer le volant H.

Cette première partie du bâti est complétée par celle relative aux glissières qui servent à guider la marche rectiligne du piston.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les guides de ces glissières sont deux petites colonnes en fer I, tournées bien cylindriques, et boulonnées par leur base aux oreilles venues de fonte avec la bride supérieure du cylindre à vapeur et sur l'axe du mouvement. Les extrémités opposées sont assemblées avec une petite corniche ou traverse J qui se relie aux deux colonnes principales D. Cette corniche est cintrée à chaque bout pour se mettre en retraite de l'axe, afin de livrer passage à la bielle L.

Les glissières proprement dites sont des demi-coquilles cylindriques en bronze *c*, fondues chacune avec une douille par laquelle elles s'assemblent avec la traverse M de la tige du piston. Ces deux pièces suivent alors les deux guides qui maintiennent la verticalité de la tige dans tous les sens. Comme dans la disposition horizontale, l'une des deux colonnettes I supporte, exclusivement, une pression latérale qui résulte de la décomposition de mouvement entre la bielle L et la manivelle N, suivant le sens du mouvement de l'arbre moteur; il peut donc en résulter une usure inégale qui tende à rejeter la tige hors de la verticale; mais on s'est arrangé de façon à rétablir très-exactement cette position en fixant les glissières *c* sur la traverse M au moyen de clavettes de serrage *s*, qui agissent comme pour les coussinets de la bielle et permettent, soit de regagner le jeu, soit de régler, dans tous les cas, le contact avec les guides, en observant la verticalité de la tige du piston.

La distribution appliquée à cette machine est celle à détente du système Farcot. La boîte de distribution O est placée en avant du cylindre, pour en faciliter l'accès, et dans la partie supérieure, à cause de la bride *a* et par suite du mode même de montage du cylindre. Pour cela un renvoi de mouvement devenait nécessaire, afin de communiquer du tiroir *d* à l'excentrique P, lequel commande également le piston de la pompe alimentaire Q.

L'ensemble du mécanisme de renvoi se compose d'abord d'un châssis R, auquel est rattachée la tige du tiroir, et qui entoure la boîte de distribution. Les deux tiges verticales qui entrent dans la composition du châssis, traversent la bride *a* par des ouvertures garnies de gobelets en bronze pour le graissage. Ceci concourt alors, avec la garniture de la boîte à vapeur, à maintenir la rectitude du mouvement du châssis. Celui-ci est relié, au-dessous de la plaque B, par une tige articulée *e*, à un levier *f*, dont le point d'appui et d'oscillation est pris sur le fond du cylindre. L'extrémité opposée du levier *f* est assemblée avec une tige verticale *g*, qui traverse la plaque B, et vient se relier, par une partie taraudée et deux écrous *h*, avec un goujon *i*, formant le tourillon d'assemblage de la barre d'excentrique *j* et du piston de la pompe alimentaire, qui est conforme à celle dite d'*Edwards*, par la disposition de la boîte à clapets.

Quoique ce système soit adopté par plusieurs mécaniciens dans un but d'économie, nous devons faire remarquer que la solidarité de la commande entre le tiroir et la pompe peut être regardée comme un inconvénient, surtout par le jeu que peut prendre le goujon *i*, qui est tout à fait en porte-à-faux.

La machine est pourvue d'un régulateur à force centrifuge S, qui est organisé pour agir sur la camme de détente, comme le font bien des constructeurs.

L'axe *k* de ce régulateur est appuyé sur un chevalet triangulaire T fixé sur la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

plaque de fondation. Il est guidé à sa partie supérieure par un petit support $l$, boulonné après le palier F, et tout près des deux roues d'angle $m$ par lesquelles l'arbre principal lui communique le mouvement.

La transmission du manchon du régulateur à la camme de détente a lieu par la tige $n$ agissant sur un levier $o$, disposé comme celui $f$, et assemblé par l'autre bout avec une tige $p$ qui actionne, à son tour, un petit levier à segment denté $q$, engrenant avec un pignon monté sur l'axe de la camme. Cet axe porte aussi une aiguille qui montre sur le cadran $r$ chaque degré de la détente.

On voit que le chevalet T est utilisé pour servir de guide à la tige $g$ qui commande le tiroir; cette tige est, en effet, maintenue dans son mouvement vertical par deux supports $t$ fondus de la même pièce que le chevalet.

Construction du cylindre. — Le cylindre moteur A est fondu avec deux canaux circulaires $u$ qui correspondent respectivement à l'arrivée et à l'échappement de la vapeur. On a vu (p. 321) en quoi consiste ordinairement la disposition de ces canaux par rapport aux orifices distributeurs. Mais ici ils contournent tous deux le cylindre et se terminent par deux tubulures $u'$, auxquelles viennent se raccorder deux conduits U, dont la fig. 2 permet d'apercevoir l'un d'eux.

Le reste de la structure du cylindre n'offre de particulier que le mode de fermeture du fond, qui s'opère au moyen d'un bouchon $v$, sans bride saillante, à cause de la mise en place du cylindre, en l'introduisant par l'ouverture circulaire ménagée dans la plaque de fondation.

### DIMENSIONS ET CONDITIONS DE MARCHE

Voici les dimensions principales de cette machine, et desquelles on peut déduire ses conditions de marche :

| | |
|---|---|
| Diamètre du cylindre ou du piston | $0^m 290$ |
| Course du piston | $0^m 630$ |
| Diamètre des tourillons de l'arbre moteur | $0^m 080$ |
| Rapport de la longueur de la bielle au rayon de la manivelle | 4 : 1 |
| Rayon moyen de la jante du volant | $1^m 400$ |
| Poids de la jante du volant | 1000 kil. |

D'après cela, la pression étant de 5 atmosphères dans la chaudière, la détente étant réglée à une durée égale aux 3/4 de la course du piston, et sachant que l'échappement se fait à l'air libre, il est facile de calculer sa puissance théorique (p. 333).

*Solution.* — Volume en mètre cube engendré par le piston à chaque coup simple :

$$D = \frac{\overline{0,29}^2 \times 3,1416}{4} \times 0^m 63 = 0^{m.c.} 0416.$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Volume de vapeur, à pleine pression, dépensée par coup simple :

$$d = \frac{D}{4} = \frac{0{,}0416}{4} = 0^{m.c.}0104.$$

Travail de 1 mètre cube de vapeur à la pression de 1 atmosphère, et détendu quatre fois (72) :

$$t = 24658 \text{ kilogrammètres.}$$

Pression absolue de la vapeur..... $p = 5$ atm.
Pression du milieu d'échappement..... $p' = 1$ atm.

Quantité théorique de travail développé par coup double du piston ou par tour de l'arbre moteur (p. 333, formule A) :

$$T = 2(dtp - 10333\,Dp');$$
$$T = 2\,(0{,}0104 \times 24658 \times 5 - 10333 \times 0{,}0416 \times 1) = 1704^{k}726.$$

Mais la vitesse de la machine étant réglée à 45 tours par minute, on trouve alors, pour le travail total théorique par seconde :

$$T' = \frac{Tn}{60} = \frac{1704{,}726 \times 45}{60} = 1278{,}544.$$

Enfin, cette dernière valeur ramenée à l'unité ordinaire, en chevaux-vapeur, et en admettant un effet utile de 60/00, fournit en résumé, pour la puissance nominale de la machine :

$$\frac{1278{,}544}{75} \times 0{,}60 = 10{,}22 \text{ chevaux-vapeur.}$$

Telle serait la puissance nominale de la machine représentée fig. 1 et 2, pl. 15, dans les conditions exposées ci-dessus, et en admettant que son état d'entretien et de régularité de marche permît d'obtenir 60 p. 0/0 de la puissance théorique, correspondant au volume et à la pression de la vapeur dépensée.

## MACHINE A MOUVEMENT DE PARALLÉLOGRAMME

Construite par **M. LECOUTEUX**, mécanicien à Paris

(FIG. 1, PL. 16)

Cette machine est donnée ici particulièrement pour le mécanisme destiné à diriger la tige du piston en remplacement des glissières dont nous avons vu plusieurs fois la disposition. La construction d'ensemble, hors de ce point que nous voulons examiner, est presque entièrement analogue à celle de la machine précédente, si ce n'est que le cylindre A repose par sa base sur la plaque de fondation, au lieu

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

d'être pris par le milieu de sa hauteur. Elle est conforme, en cela, à la plupart des premières machines verticales construites par MM. Bourdon, Imbert et par d'autres mécaniciens.

Sur la plaque d'assise B on ménage une partie saillante, qui pénètre dans le cylindre et permet de le bien centrer en favorisant aussi la confection du joint. Sur cette plaque sont établies les deux colonnes D qui supportent un entablement E disposé comme précédemment, toutefois avec cette différence que le palier F de l'arbre moteur G est rapporté, au lieu d'être fondu de la même pièce que l'entablement.

Celui-ci, au lieu d'être réduit à trois côtés, fait entièrement le tour du volant H, afin de recevoir le deuxième palier de l'arbre moteur, condition préférable à toutes celles qui conduisent à placer ce palier sur le mur, et par suite à l'isoler relativement du bâti de la machine.

La distribution est faite avec l'application de la détente Farcot; elle fonctionne avec un excentrique distinct de celui qui fait marcher la pompe alimentaire. Le régulateur S, auquel on a donné le chapeau du palier pour point d'appui, reçoit son mouvement par deux poulies placées, la première sur l'arbre moteur, et la seconde sur un bout d'axe monté sur un cadre *m*, à l'intérieur duquel se trouvent deux petites roues d'angle, dont l'une est fixée sur ce bout d'axe et l'autre sur celui du régulateur.

En somme, cet ensemble est si simple que la seule vue de face, fig. 1re, le représenterait complétement, si l'on pouvait apercevoir la boîte de distribution et la pompe alimentaire, toutes deux situées dans l'axe du cylindre qui les masque. On ne peut pas davantage apercevoir les conduits de vapeur qui ont été habilement dissimulés dans la plaque de fondation même.

Nous pouvons donc reporter toute l'attention sur le mécanisme qui sert à diriger la tige du piston, mécanisme que l'on peut appeler *parallélogramme*, par analogie avec celui qu'a fait Watt pour atteindre le même but dans les machines à balancier.

La tige *b* du piston est surmontée d'une tête fourchue à deux branches, *a*, traversées par le tourillon M, lequel établit la réunion articulée entre cette fourche et la bielle motrice L, dont la tête est également fourchue, comme pour les machines précédentes, pl. 9 et pl. 15, fig. 1 et 2. La partie libre de la traverse M, entre les branches de la fourche, porte alors, monté par le milieu de sa longueur, un petit levier ou *lien* K, dont les extrémités sont assemblées à articulation avec deux *balanciers* I, de même longueur, qui ont leurs points d'oscillation sur des supports J fixés aux deux colonnes D.

D'après cela, on comprend que la tige du piston, en se déplaçant, fait mouvoir l'ensemble de ce mécanisme dans lequel les deux balanciers décrivent des arcs de cercle égaux, mais dirigés en sens contraire, et que les extrémités du lien K suivent exactement. Par les dimensions de ces pièces et leur positon respective, le centre du levier K, qui est celui de la traverse M et de la tige *b*, reste constamment sur l'axe général du mouvement rectiligne du piston, dont la marche est ainsi maintenue parfaitement en ligne droite.



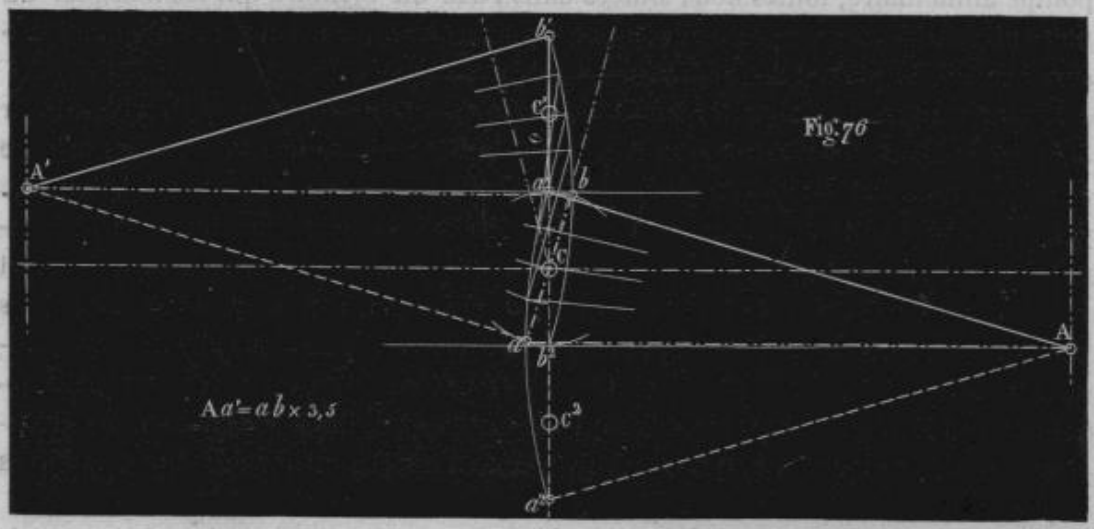
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'avantage d'un pareil mécanisme, sur les glissières simples, est de remplacer le frottement par glissement, auquel elles donnent lieu, par des frottements de roulement qui, comme on le sait, absorbent comparativement peu de force motrice, pourvu qu'on ait le soin de ne donner aux axes tournants que la grosseur strictement nécessaire. On conçoit, en effet, que le mouvement décomposé, dû à l'obliquité de la bielle motrice (p. 346), donne lieu à des efforts de poussée et de traction sur les balanciers I, lesquels efforts se résument en pressions supportées par leurs tourillons d'assemblage, soit avec les supports J, soit avec le lien K.

C'est à M. feu Gengembre, ancien ingénieur de l'usine d'Indret, que l'on attribue les premières applications faites en France de ce système de parallélogramme, qui est d'un bon effet. M. E. Bourdon a également construit, il y a environ vingt-cinq ans, des machines semblables pourvues du même mécanisme.

Peu de mots suffiront maintenant pour en expliquer le tracé géométrique. Soient, (fig. 76), $b' a^2$ la ligne d'axe parcourue par le point d'attache de la tige du piston, et C, C′ et $C^2$ les points occupés par le centre du lien K, dessiné sur la fig. 1re, pl. 16, au milieu et aux extrémités de la course.

On adopte généralement, en principe, que les deux arcs de cercle décrits par les bielles I ont leurs cordes $a' a^2$ et $b' b^2$ exactement confondues avec l'axe $b' a^2$, ce qui a pour résultat d'amener à chaque fin de course le lien K sur cet axe. De plus, on suppose les centres d'oscillation A et A′, situés sur des horizontales passant par les milieux $a'$ et $b^2$ des distances entre les points extrêmes C′ et $C^2$ et le point C central de la course.




D'après cela, lorsque le piston est à l'extrémité supérieure de sa course, le lien est sur la ligne d'axe, en $a' b'$, et les deux balanciers occupent les positions A′ $b'$ et A $a'$.

A l'extrémité opposée, le lien est encore sur la ligne d'axe, en $a^2 b^2$, et les balanciers en A′ $b^2$ et A $a^2$.

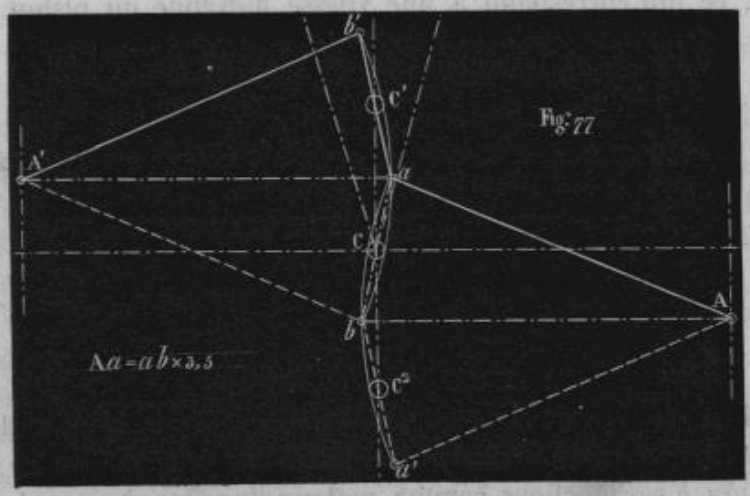
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour trouver la position moyenne, il suffit de décrire du point C un cercle ayant pour diamètre la longueur du lien; les intersections $a$ et $b$ de ce cercle, avec les arcs décrits par les balanciers, donneront à la fois l'inclinaison $ab$ de ce lien et les positions relatives $A'b$ et $Aa$ des deux balanciers.

En résumé, la longueur de ces pièces, et la position des centres A et A', sont évidemment variables; mais on doit chercher à donner au lien la plus grande longueur possible, comparée à la grandeur des flèches $a'b$ ou $ab^2$ des arcs décrits par les balanciers. Il faut aussi que ces derniers soient très-sensiblement parallèles dans la position moyenne, et l'on s'en rapprochera d'autant plus que le lien lui-même sera plus long par rapport aux flèches des arcs.

De toute façon, on n'obtient pas la rectitude demandée avec la rigueur mathématique, qui ne peut exister dans cette combinaison d'arcs de cercle, pas plus que dans d'autres analogues, tels que le fameux parallélogramme de Watt. Cependant, en observant des rapports convenables entre les pièces du mécanisme, on peut s'approcher aussi près du but que la pratique l'exige.

Ainsi, pour la machine qui nous occupe, la longueur du lien K est égale au rayon de la manivelle, et la corde des arcs décrits par ses extrémités est nécessairement double, c'est-à-dire égale à la course du piston; les balanciers sont assez longs pour que la flèche de ces arcs ne soit que 1/8 de la longueur du lien; ils ont, à cet effet, pour longueur, 3,5 de fois le rayon de la manivelle.




Dans ces conditions, un tracé fait avec soin, et de grandeur d'exécution, ne suffit même pas pour découvrir le défaut de rectitude dans le cheminement de la traverse M, (pl. 15) ce qui ne serait réellement appréciable que par le calcul, mais alors pour des quantités tout à fait négligeables en pratique.

Il est remarquable que ce parallélogramme peut être exécuté dans des conditions un peu différentes, sans que les résultats soient sensiblement modifiés. Nous en donnons un exemple par la figure ci-contre.

La fig. 77 est le tracé géométrique du même mécanisme établi, en admettant que

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la flèche des arcs décrits par les balanciers soit coupée en deux parties égales par la verticale qui représente l'axe du mouvement du piston.

Par cette combinaison le lien a juste pour longueur la corde de la moitié de l'arc engendré par chacun des balanciers; mais il est alors incliné dans chacune de ses positions extrêmes, au lieu d'être sur la verticale.

En donnant au lien et aux balanciers des longueurs relatives égales à celles admises dans l'exemple précédent, la déviation totale du lien, par rapport à l'axe du mouvement est aussi la même, sauf que, dans le dernier cas, elle se trouve répartie également de chaque côté.

Les premières applications de ce mécanisme ont été faites sur ce second mode de tracé. Il ne nous semble pas qu'il existe de raisons sérieuses pour faire préférer l'une à l'autre méthode, si ce n'est peut-être là question de la poussée en direction fixe due à la décomposition du mouvement par l'inclinaison de la bielle motrice (p. 347), qui peut rendre préférable la première méthode, par laquelle le lien conserve aussi son inclinaison dirigée dans le même sens entre ses positions extrêmes, qui sont, comme on l'a vu, précisément verticales.

Faisons remarquer que l'exécution de cette machine est irréprochable, aussi bien par les proportions de ses divers organes que par le fini de ses ajustements. Elle fonctionne sans appareil de condensation, quoiqu'on puisse en ajouter un, en prolongeant l'un des balanciers I pour y rattacher le mouvement d'une pompe à air. Sa puissance nominale effective est de 8 chevaux-vapeur pour 40 tours de l'arbre par minute, ce qui correspond à une vitesse moyenne du piston de $0^m$ 80 par seconde.

## MACHINE A DIRECTRICES AVEC BATI ISOLÉ

Construite par **M. BERTRAND**, mécanicien à Paris

(FIG. 2, PL. 16)

Cette machine, tout à fait identique, en principe, à celle représentée fig. 1 et 2, pl. 15, se distingue par une grande simplicité d'exécution, qui ne nuit aucunement, d'ailleurs, à ses fonctions comme moteur d'une moyenne puissance.

Le cylindre A est fondu de la même pièce que la plaque de fondation B, qui forme comme un socle, par la forte moulure dont elle est munie au pourtour. De plus, le cylindre est fondu avec une enveloppe A′, pour y amener de la vapeur et conserver la température de celle qui agit sur le piston. Cette enveloppe n'est reliée au cylindre, aux deux extrémités, que par quelques points, entre lesquels il est très-facile de soutenir le noyau, pour le moulage, et de l'extraire ensuite, la pièce étant fondue. La fermeture de l'espace annulaire, qui existe entre l'enveloppe et le cylindre, est alors opérée par le couvercle même de celui-ci et par son fond *v*.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le constructeur a disposé le cylindre tout à fait en contre-bas de la plaque de fondation, en vue, d'abord, de diminuer la hauteur totale de la machine, et ensuite pour tenir complétement libre la partie dans laquelle est ménagée la boîte de distribution.

Cette particularité de l'abaissement du cylindre, jointe à la puissante assise donnée aux colonnes D, a permis de limiter l'entablement de fonte E à ces deux colonnes, sans chercher de point d'appui sur le mur contigu. Le montage de la machine se réduit donc à l'asseoir par sa base sur les dés en pierre C, et à placer l'arbre moteur entre le bâti et le mur voisin sur lequel est fixé son deuxième support, le premier F étant fondu de la même pièce avec la corniche.

Cette machine a pourtant toute la solidité requise; la forme particulière de son entablement permet aussi plus aisément d'augmenter le diamètre du volant H, qui est du reste très-puissant.

La traverse M est forgée de la même pièce que la chape qui surmonte la tringle du piston et à laquelle s'assemble la bielle. Les deux glissières *c* sont ajustées aux deux bouts de la traverse, sans aucun moyen de regagner le jeu par l'usure. Le constructeur préfère rapporter des rondelles minces derrière les embases, quand le jeu est devenu considérable, que d'employer des clefs de serrage, parce que, soit par négligence, soit par inattention, il arrive que l'on serre trop, et qu'on augmente le frottement. Cette observation est juste, lorsque la machine est confiée à des mains inhabiles; elle a d'ailleurs le mérite de conduire aux dispositions les plus économiques.

Cependant, un moyen de serrage facultatif a bien son avantage, si l'on veut prendre le soin et les précautions nécessaires dans le service.

Le montage des deux guides I offre également des conditions de simplicité. Chacun d'eux porte une embase et un tenon cylindrique qui s'ajuste librement dans la plaque de fondation. La partie supérieure est appuyée dans un talon évidé circulairement, et qui appartient à la traverse J; elle y est fixée au moyen d'une vis à tête fraisée.

L'ensemble de cette construction a pour caractère la plus extrême simplicité dans les ajustements et en même temps une grande solidité. L'arbre moteur est forgé de la même pièce avec la manivelle N, condition toujours favorable, quand on peut l'adopter.

Les seules parties que la figure ne montre pas sont le mécanisme de distribution et la pompe alimentaire. Mais la distribution est encore celle à détente du système de M. Farcot; et la pompe, commandée par un excentrique spécial, ne présente rien de particulier, si ce n'est que son piston est relié à la bielle de l'excentrique par une douille avec vis de pression pour l'arrêter ou le faire fonctionner à volonté, conformément à des procédés qui ont été indiqués (p. 435).

Les dimensions de cette machine correspondent à une puissance nominale de 10 chevaux-vapeur pour 50 tours par minute, en admettant, comme précédemment, que la pression soit de 5 atmosphères dans la chaudière, et que la détente ait lieu pendant les trois derniers quarts de la course du piston.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## MACHINE A DIRECTRICES AVEC BÂTI TRIANGULAIRE

Construite par **M. LEQUESNE**, mécanicien à Paris

(FIG. 3, PL. 16)

Ce mode de construction, qui est adopté par plusieurs mécaniciens, a pour lui la simplicité et l'élégance, et comporte toute la solidité désirable, en l'appliquant à de petites machines.

Celle représentée fig. 3 est d'une puissance nominale de 4 chevaux-vapeur pour 40 tours de l'arbre à manivelle par minute.

Les colonnes et l'entablement, qui constituent le bâti dans les machines précédentes, sont remplacées dans celle-ci par un bâti en fonte D dont la forme générale est triangulaire, moins le sommet qui est arrondi et se raccorde avec le palier F, fondu de la même pièce. On voit que la structure de ce bâti consiste dans un panneau de peu d'épaisseur, renforcé sur les bords par des nervures en saillie. Il est terminé par des patins qui s'ajustent avec des coins entre des talons ménagés à la plaque de fondation, et fixés ensuite par des boulons.

La plaque reçoit le cylindre à vapeur A, qui est pris par le milieu de sa hauteur, où il est muni d'une bride ou rebord *a*. Les guides I de la traverse M sont reliés, d'un bout avec des oreilles appartenant au cylindre, et de l'autre avec des douilles cylindriques en fer J rapportées au bâti, pour la facilité de leur alésage.

Comme dans les machines décrites ci-dessus, l'arbre moteur est porté d'un côté par le sommet du bâti et de l'autre par un deuxième support appuyé sur le mur, derrière le volant. On construit aussi des machines analogues, avec deux bâtis semblables à celui D, qui permettent alors le montage complet du mécanisme, sans autre appui que la pierre de fondation C.

La distribution adoptée ici par M. Lequesne se compose d'un tiroir ordinaire, sans mécanisme de détente. La vapeur s'introduit dans la boîte par le conduit U et s'échappe du cylindre dans l'atmosphère par celui U'. On remarque sur le conduit d'entrée une boîte cylindrique *p* dans laquelle est ajusté *le papillon* (p. 325), mis en rapport avec le régulateur S, pour régler la marche de la machine. Cette relation est établie par un petit levier *q*, monté sur l'axe du papillon, et rattaché à une tringle *n* correspondant à une bascule *o*, dont l'une des extrémités est fourchue et engagée dans le manchon du régulateur.

Ce dernier est monté sur un support spécial rattaché au bâti par des boulons *r*; il est mis en mouvement par deux roues d'angle, dont l'une est montée sur son axe *k*, et l'autre sur l'arbre moteur.

Cet arbre porte le volant H ainsi que deux excentriques, dont on voit les bielles *j* et *j'*, pour commander le tiroir et la pompe alimentaire.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## MACHINE AVEC BIELLE DISPOSÉE EN CADRE TRAPÉZOIDAL

(FIG. 3, PL. 15)

On a vu dans les exemples précédents, que l'arbre moteur était placé au-dessus de la machine, disposition qui permet de communiquer le mouvement à l'arbre par une bielle simple, et qui est préféré dans diverses usines pour la facilité qu'elle présente de transmettre son action aux métiers ou appareils à faire mouvoir.

Mais quand, par une nécessité locale, l'arbre doit être situé près du sol, et qu'on n'adopte pas le système horizontal ni le système à balancier, l'obligation de donner une base au cylindre à vapeur conduit à appliquer soit une disposition de double bielle, qui comporte un arbre à trois manivelles (p. 337), ou bien l'une de celles dont nous montrons des exemples sur les fig. 3 des pl. 15 et 17.

La machine représentée par la fig. 3 de la pl. 15 a cela de remarquable, que l'arbre moteur G devant être placé au-dessous du cylindre, la bielle est constituée par un cadre en forme de trapèze, composé de deux tiges L assemblées avec deux traverses E et E′, dont l'une est articulée avec la traverse M qui guide la tige du piston, et l'autre avec le bouton de la manivelle N.

Ainsi, la transmission du mouvement du piston à la manivelle a lieu comme avec une bielle simple, dont l'élément géométrique est une ligne droite joignant les centres d'articulation des traverses. La disposition du cadre permet que l'ensemble du mécanisme puisse être compris dans un même plan passant par l'axe du cylindre.

A part ce point qui la caractérise, la construction de cette machine est simple et peu dispendieuse. Cependant, elle pourrait paraître d'abord un peu isolée par rapport au bâtiment, si l'organe principal du mouvement, l'arbre moteur, n'était appuyé directement sur le sol et à l'abri de toute cause d'ébranlement. D'ailleurs, il s'agit d'une faible puissance, de 2 à 3 chevaux-vapeur seulement; dans ce cas on peut aisément donner un excès de résistance aux pièces qui seraient susceptibles de vibrer, comme, par exemple, aux guides de la tige du piston.

Le cylindre A est fixé par quatre boulons sur un socle en fonte B, de forme carrée, et assujetti de même sur la maçonnerie. Il est évidé sur ses quatre faces, suivant des ouvertures de forme ogivale, dont deux le coupent entièrement pour le passage de la traverse E′. L'une des parois parallèles à cette dernière est continuée au-dessous du sol par un appendice B′, qui reçoit le premier palier F de l'arbre à manivelle, disposition plus convenable que si ce palier était indépendant du bâti de la machine.

La bride supérieure du cylindre est carrée pour permettre l'application de deux supports en arcade I′, sur lesquels se fixent, par un tenon cylindrique et un écrou, les deux tiges I qui servent à guider la traverse M, montée sur la tige du piston.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Cette traverse est formée d'un axe cylindrique qui s'assemble avec une chape clavetée à l'extrémité de la tige, et sur lequel oscille le côté supérieur E du cadre tropézoïdal, entre les joues de la chape. Les deux glissières *c* sont alors montées aux extrémités du même axe.

Les deux guides I sont assemblés à leur extrémité supérieure, de la même façon que par le bas, avec une petite traverse en fonte J, au centre de laquelle se trouve ménagé un boisseau cylindrique pour y monter le régulateur S. Son axe *k* s'y appuie, au fond, par un pivot, et porte vers l'entrée un collet par lequel il est retenu au moyen d'une bague *b* disposée à peu près comme un presse-étoupe.

L'axe du régulateur porte, pour le mettre en mouvement, une petite poulie *m* qui correspond, par une courroie horizontale croisée, avec une autre poulie de renvoi placée contre le mur voisin et sur un bout d'axe commandé de même par l'arbre principal G de la machine. On sait que ces diverses parties du mécanisme sont extrêmement légères, parce que la machine et son régulateur ont de très-petites dimensions. Quant à la relation entre celui-ci et la valve d'introduction, elle a lieu comme dans la machine représentée fig. 3, pl. 16, par un système de tringle agissant sur une bascule dont le point d'appui est pris sur la traverse J.

L'arbre moteur G porte, comme ci-dessus, deux excentriques pour le tiroir de distribution et pour la pompe alimentaire; celle-ci est disposée dans une fosse ouverte à la hauteur de l'arbre G. Il porte également le volant H, dont la jante est disposée pour former poulie et communiquer directement le mouvement à une autre poulie H, appartenant à la transmission générale.

L'emploi du volant, comme organe immédiat de transmission par courroie, se rencontre fréquemment, et pour des puissances qui vont même jusqu'à plus de 20 chevaux, sans que la vitesse de la machine dépasse 25 à 30 révolutions par minute. Telles sont : les machines des établissements de MM. Nillus et Mazeline, au Havre, et celles des ateliers des chemins de fer d'Orléans, de Lyon, du Midi, etc. Pour de très-grandes puissances, on arme souvent d'une forte denture la circonférence du volant qui devient encore, dans ce cas, le premier organe de transmission. Nous en donnerons des exemples dans les machines à deux cylindres.

Quant au volant de la machine actuelle, son faible diamètre a permis de le fondre d'une seule pièce et d'éviter une coupure à la jante en faisant ses bras courbes. Les praticiens savent que l'on est obligé, pour fondre un volant d'une seule pièce, avec des bras droits, d'établir une solution de continuité dans la jante au moment de couler la pièce, sans quoi l'inégalité des masses, et le retrait du métal, en se refroidissant, occasionneraient inévitablement des ruptures.

La petite machine que nous venons de décrire a été construite par M. Dikhoff, mécanicien à Bar-le-Duc. M. Hermann, mécanicien bien connu à Paris pour ses appareils concernant la fabrication du chocolat, exécute également des machines sur une disposition semblable. M. Pauwels avait adopté un système analogue (1), mais avec des modifications qui lui donnaient trop de hauteur, et nuisaient à sa stabilité.

(1) La machine de M. Pauwels a été complétement dessinée dans la troisième partie du Recueil de M. Leblanc.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## MACHINE A TABOURET AVEC BATI A QUATRE COLONNES

Construite par **M. FARCOT**

(FIG. 1 A 5, PL. 17)

Cette machine a été établie, il y a quelques années, par M. Farcot, pour des établissements spéciaux, comme les chocolateries, où un certain luxe est nécessaire, quand le moteur doit être placé en vue du public, et au milieu d'appareils en quelque sorte décoratifs. Le constructeur désigne cette disposition par le titre de *machine à tabouret*, à cause du socle qui sert de base au cylindre.

Ce système a quelque analogie avec les petites machines fixes de Maudslay, en Angleterre, et de M. Saulnier aîné, en France, quant à l'emploi des deux bielles latérales et à la composition du bâti.

La machine de Maudslay, dont on peut voir un modèle dans les galeries du Conservatoire des arts et métiers de Paris, présentait, comme celle de M. Farcot, le cylindre établi au centre de quatre colonnes et monté sur un socle carré, les angles en pan coupé, mais beaucoup plus élevé que celui de la machine actuelle. Ce dernier point était motivé par l'application d'un condenseur et de tout son mécanisme de commande qui exigent beaucoup d'emplacement. Les deux bielles latérales se trouvaient reliées à un arbre à deux coudes, prenant ses points d'appui sur des paliers situés vers le milieu de la hauteur du socle. Nous avons montré (p. 380) comment la distribution de la vapeur y était effectuée à l'aide d'un robinet.

Quant à la machine de Saulnier, dont le mécanisme comportait également un arbre doublement coudé, le cylindre était monté sur un socle carré, mais de très-peu de hauteur, celle rigoureusement nécessaire pour le passage de l'arbre, cette machine ne possédant pas de condensation.

M. Farcot a apporté à ce type de machine des modifications très-utiles, et l'a doté de la plus grande partie des perfectionnements qui lui sont dus. Il a évité l'arbre coudé par l'application du T que nous avons fait connaître (p. 338). On y trouve encore, il est vrai, pour guider la tige du piston, les galets mobiles, qui, dans les machines actuelles, sont remplacés par des glissières plates comme celles décrites précédemment.

### ENSEMBLE DE LA CONSTRUCTION

La fig. 1 de la pl. 17 est une section verticale de la machine, passant par l'axe du cylindre à vapeur et perpendiculaire à l'arbre principal;

La fig. 2 est une vue extérieure, regardée perpendiculairement à la coupe précédente;



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La fig. 3 est une section horizontale faite sur la ligne 1-2 passant par le centre de la boîte de distribution;

Les fig. 4 et 5 sont des détails qui complètent l'appareil d'alimentation.

Disposition générale. — L'ensemble de la machine comprend le socle en fonte B recevant le cylindre à vapeur A et quatre colonnes D, qui sont elles-mêmes surmontées d'un entablement à quatre faces E, sur deux desquelles sont disposées les coulisses verticales I qui guident la traverse M du piston.

La face de l'entablement, située du côté de la boîte de distribution O, est augmentée d'une arcade T pour servir au montage de l'axe du régulateur S.

Toute la machine est donc comprise dans l'étendue du socle B, à l'exception de la pompe alimentaire Q qui est placée en dehors et horizontalement sur une caisse en fonte V, dans laquelle elle puise l'eau d'alimentation que la vapeur échappée du cylindre y réchauffe avant d'être abandonnée définitivement dans l'atmosphère.

La tige *b* du piston K est assemblée avec le *joug* ou traverse M aux extrémités de laquelle sont montés librement deux galets *c* qui roulent dans les deux coulisses I, en suivant le piston dans sa marche, qu'ils doivent maintenir rectiligne.

On a renoncé à l'emploi des galets, à cause de l'usure que prenaient les axes, par leur mouvement de rotation rapide, sous la pression due à la décomposition des efforts de la bielle et de la manivelle. Pour être assuré néanmoins que le mouvement de rotation se produisait sans glissement, on était obligé de donner aux galets un peu de jeu dans les coulisses, car s'ils y avaient touché exactement des deux côtés, on comprend qu'ils auraient été entraînés par la traverse sans tourner sur eux-mêmes.

Cette traverse porte, en dedans des galets, des tourillons pour l'assemblage des deux bielles L, qui descendent de chaque côté du cylindre et traversent la base du socle B par des ouvertures oblongues *a* (fig. 3). A l'intérieur de celui-ci, ces bielles sont assemblées rigidement avec une seconde traverse M′ à laquelle est réunie la tige L′, terminée par une tête à coussinets qui est reliée au bouton de la manivelle.

On voit que, par le report de l'axe au-dessous du cylindre, la bielle possède une très-grande longueur qui est plus de 8 fois celle du rayon de la manivelle. Aussi les mouvements du piston sont-ils presque symétriques pour les deux moitiés de la course, et la décomposition de mouvement sur la traverse extrêmement faible.

L'arbre moteur G a son premier palier F boulonné sur une traverse B′, qui est elle-même rattachée au socle B au moyen de boulons et de clavettes, ce qui établit une solidarité très-nécessaire entre toutes les parties du mécanisme.

Cet arbre porte deux excentriques P et P′, pour actionner le tiroir de distribution et la pompe alimentaire, plus une poulie *m* pour commander le régulateur; enfin plus loin se trouve le volant H, et derrière ce dernier, appuyé sur la maçonnerie, est situé le deuxième palier. On sait que près du volant se place une poulie ou une roue d'engrenage pour transmettre la puissance de la machine.

Nous allons examiner maintenant en détail les parties principales de ce moteur, dont l'ensemble est très-harmonieux et qui est assez bien combiné pour dissimuler la plupart des organes accessoires et principalement les conduits de vapeur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

### DÉTAILS DE LA CONSTRUCTION

CYLINDRE ET ENVELOPPES. — Le cylindre à vapeur A est joint au mastic de fonte dans une enveloppe A′ fondue avec les canaux de distribution, et qui repose sur le socle B. Son couvercle $x$, qui est boulonné avec la bride de l'enveloppe, présente dans sa masse des vides isolants contre les déperditions de chaleur. L'autre extrémité du cylindre est fermée par un tampon $v$ scellé au mastic de fonte.

L'enveloppe A′ est fermée de la même façon par un tampon auquel on a ménagé une tubulure $u$ pour y adapter le conduit qui amène la vapeur de la chaudière. Cette vapeur se répandant dans tout l'intervalle du cylindre et de l'enveloppe, on lui donne entrée dans la boîte de distribution O au moyen d'une ouverture à soupape $h$ (fig. 3), que l'on manœuvre de l'extérieur à l'aide d'une manivelle $h'$ fixée sur son axe, lequel est fileté dans une partie de sa longueur. La vapeur, avant son introduction dans le cylindre, est donc employée à le chauffer et le maintient ainsi à une température très-élevée. Nous aurons l'occasion de revenir sur cette disposition, qui est employée aujourd'hui par la généralité des constructeurs, principalement dans le cas d'une détente un peu prolongée, afin de réaliser le principe de l'égalité de température d'un gaz soumis à l'expansion.

Outre cette première enveloppe, une chemise extérieure $A^2$ renferme le tout et possède le double avantage de protéger l'enveloppe elle-même du refroidissement et de procurer une décoration facile. Cette chemise est, en effet, régulièrement cylindrique, sans aucune partie saillante non circulaire, qui puisse s'opposer au tournage. Aussi est-elle tournée et polie dans toute son étendue, y compris sa partie supérieure qui est un véritable couvercle au-dessus de celui du cylindre.

Pour concourir au même but, la boîte de distribution est aussi circulaire extérieurement, et forme avec la chemise une pénétration très-régulière. Afin de faciliter la mise en place, cette chemise est formée dans sa hauteur de deux tambours qui s'emboîtent à l'endroit du cordon ménagé à la hauteur du centre de la boîte O.

DISTRIBUTION. — La boîte à vapeur O renferme le tiroir de distribution $d$ organisé pour opérer la détente, suivant le système de M. Farcot.

Nous avons vu précédemment comment la vapeur passe de l'enveloppe dans la boîte de distribution, en ouvrant la soupape $h$, d'où elle est dirigée dans le cylindre comme à l'ordinaire. Son échappement ne diffère pas des dispositions décrites jusqu'ici, sauf la position du canal $u'$ qui, dans l'intention de dissimuler tout conduit extérieur, est placé parallèlement aux canaux de distribution et vient déboucher sur le fond de l'enveloppe, d'où part alors un tuyau extérieur que l'on peut encore dissimuler dans l'intérieur du socle, avant de lui faire traverser le massif C en un point favorable, suivant la localité. Ce conduit extérieur d'échappement ne pouvait être aperçu sur notre dessin où il se trouve enlevé par la coupe; mais au moyen de la section horizontale, fig. 3, qui indique le canal $u'$, ménagé à l'enveloppe, il est aisé de se rendre compte de ce qu'il devrait être à l'extérieur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La tige du tiroir sortant de la boîte O par une première garniture étanche, traverse la première enveloppe $A^2$ par un fourreau qui vient se raccorder avec une boîte à étoupe, de la même pièce que le couvercle $x$ du cylindre. Cette tige est alors assemblée avec une traverse R′, aux extrémités de laquelle sont rattachées les deux tringles verticales R; celles-ci sont assemblées à deux petites manivelles $i$, dépendantes d'un axe horizontal $f$ monté sur des paliers $g$ fixés à l'intérieur du socle. Cet axe porte une troisième manivelle $e$ avec laquelle l'excentrique P est relié par sa barre $j$, et lui donne ainsi un mouvement oscillatoire alternatif qui se communique, par les tringles R, au tiroir de distribution.

Bien que les rapports de mouvement entre l'excentrique et la manivelle semblent être différents de ce que nous avons supposé, pour l'étude de la marche du tiroir, on comprend aisément qu'il ne s'agit cependant que de rapports d'angles, et que les quantités d'avance et l'angle relatif de calage doivent être calculés comme à l'ordinaire, sauf à tenir compte ensuite des inclinaisons et des inversions qui résultent de la transmission même. La position du rayon de l'excentrique doit être déterminée en prenant, comme axe de la marche du piston, la ligne qui passerait par le centre de l'arbre G, et par le milieu de la flèche de l'arc engendré par la petite manivelle $e$, à laquelle est rattachée la barre de l'excentrique.

Mécanisme du régulateur. — Nous renvoyons, pour la description détaillée de cet ingénieux mécanisme, à celle d'une machine horizontale de grande puissance construite aussi par M. Farcot, et représentée pl. 22; il suffira de donner ici une idée de l'ensemble de ses fonctions.

En principe, il est organisé pour agir sur la camme de détente, et modifier le degré de cette dernière en raison inverse des variations de résistance que la machine éprouve et qui tendent à rendre la vitesse irrégulière.

Le régulateur est commandé par l'arbre principal sur lequel est la poulie $m$, qui communique par une courroie avec une autre poulie $m'$, montée sur un arbre intermédiaire X; celui-ci porte un pignon $l$, à denture hélicoïdale, qui engrène avec un deuxième semblable $l'$ fixé sur l'axe $k$ du régulateur.

Lorsque, par suite d'un changement de vitesse, les bras du régulateur s'ouvrent ou se ferment, le manchon $o$ se déplace sur l'axe, et, par une combinaison mécanique dont on verra plus loin le détail, fait embrayer l'une des deux roues d'angle $p$ et $p'$, qui sont immobiles et inactives en vitesse normale. Suivant que l'une ou l'autre de ces roues devient active, une troisième roue $p^2$, avec laquelle elles engrènent d'une façon permanente; se met en mouvement, et par deux autres pignons $n'$ et $n^2$, fait tourner la tige $n$, dont la partie inférieure renferme, dans une douille $q'$, une vis sans fin qui engrène avec une denture pratiquée à la circonférence du cadran $r$, solidaire de l'axe de la camme de détente. La douille $q'$ n'est autre chose que le guide fixe de la tige $n$, et fait partie de la traverse $q$, qui est retenue par les axes de la camme et de la soupape $h$; cette traverse est aussi munie d'un index en relation avec les divisions du cadran.

Ainsi, supposons que la vitesse de la machine augmente, ce qui fait écarter les boulets du régulateur et soulève le manchon $o$. C'est alors la roue $p'$ qui devient

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

active, et qui communique à la roue $p^2$ un certain mouvement en rapport, comme sens, avec celui de l'axe du régulateur. Ce mouvement communiqué à la tige $n$, fait alors tourner le cadran $r$, et par suite la camme, dans le sens correspondant à une diminution de l'admission à pleine vapeur.

Si la vitesse de la machine tend au contraire à diminuer, le manchon $o$ s'abaisse, et c'est la roue $p$ qui devient active. Comme cette roue tourne, ainsi que l'autre, avec l'axe du régulateur, mais qu'elle attaque la roue $p^2$ du côté opposé, le mouvement imprimé à tout le mécanisme est en sens contraire de ce qui avait lieu tout à l'heure, et la camme de détente est déplacée de façon à augmenter le degré d'admission à pleine vapeur.

Ces modifications du degré de détente ont lieu ainsi en marche sous l'influence exclusive du régulateur qui, en le changeant, ramène la machine à sa vitesse normale; et la modification de détente persiste autant que la variation de résistance qui l'a déterminée (1). S'il est nécessaire, néanmoins, de changer le degré de détente à la main, on opère ce changement, les roues $p$ et $p'$ étant libres, en agissant sur la manivelle $n^3$ fixée sur la tige $n$ qui, en tournant, amène alors le cadran $r$ et la camme dans la nouvelle position requise.

Pompe alimentaire. — La pompe alimentaire Q n'offre de particulier que le récipient en fonte V, qui lui sert de base, et dans lequel elle puise directement son eau préalablement réchauffée par la vapeur qui s'échappe du cylindre.

Par la fig. 1re et par la fig. 4, qui est une vue détachée en projection horizontale, de la bâche d'alimentation, on voit que cette caisse V est munie de plusieurs tubulures, destinées à la circulation de la vapeur et à l'introduction de l'eau froide. La vapeur, en sortant du cylindre par le canal $u'$ (fig. 3), pénètre dans la caisse par la tubulure latérale $s$, et après s'être répandue dans l'intérieur, au-dessus de la surface libre du liquide, ce qui ne s'est pas condensé s'échappe dans l'atmosphère par la tubulure supérieure $s'$, à laquelle s'adapte un conduit vertical dirigé au dehors du bâtiment.

La tubulure $t'$ correspond à l'arrivée de l'eau alimentaire dans ce vase V, qui est véritablement un réchauffeur, et qui la reçoit d'un réservoir indépendant, situé en un point plus élevé. Une tubulure intermédiaire $t$ permet d'adapter un trop-plein, de façon à réserver constamment au-dessus de l'eau le vide nécessaire à la circulation de la vapeur.

La pompe alimentaire est munie d'un tube d'aspiration $y$, d'une disposition particulière, dont le détail, fig. 5, pourra donner une idée complète.

Ce tube d'aspiration est adapté, comme à l'ordinaire, à la boîte qui renferme les deux soupapes; mais son extrémité plongeante est recourbée, et forme le siége d'une troisième soupape $y'$, que l'on manœuvre extérieurement par la manivelle $y^2$ placée sur la tige qui est filetée dans une partie de sa longueur.

(1) En parlant de ce régulateur à la page 408, une faute de rédaction tendrait à laisser comprendre qu'il ramène nécessairement le même degré de détente avec la vitesse normale. C'est une erreur, qu'il est facile de rectifier, surtout à l'aide de la description détaillée que l'on verra plus loin de ce régulateur, qui est aussi représenté complétement pl. 22.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

On comprend que ce mécanisme est destiné à opérer avec beaucoup de facilité la mise en train ou la suspension de l'alimentation.

Comme il est facile, d'après tout ce que nous avons montré à cet égard, de calculer la puissance de cette machine, nous dirons simplement qu'en lui supposant une vitesse de 50 tours par minute, une pression de 4 1/2 à 5 atmosphères dans la chaudière et l'admission à pleine vapeur pendant un quart de la course du piston, sa puissance nominale serait de 12 à 15 chevaux-vapeur, puissance à laquelle les pièces de la transmission peuvent très-bien correspondre.

## MACHINE VERTICALE A COLONNE ÉVIDÉE

M. Fairbairn, habile mécanicien anglais, a exécuté, il y a plusieurs années, une disposition particulière de machine verticale, dite à *colonne* creuse et à jours, qui a été trouvée d'un bon aspect et reproduite en France par quelques constructeurs, particulièrement par M. Alexander et par M. Farcot, qui l'a, du reste, bien perfectionnée en y ajoutant son système de détente et un appareil de condensation (1).

Le modèle que nous indiquons en coupe sur la fig. 78, est de M. Alexander. C'est une machine à haute pression, sans condenseur.

Ce système est surtout caractérisé par la forme générale de son bâti et par la disposition particulière du parallélogramme destiné à maintenir la tige du piston en ligne droite, disposition qui est due à Oliver Évans, et qui a été suivie par divers constructeurs dans différents genres de machines.

Le bâti se compose d'une grosse colonne creuse en fonte A, percée de quatre ouvertures destinées à en diminuer le poids et à permettre d'atteindre les pièces situées à l'intérieur; elle est boulonnée sur un socle carré B, à l'intérieur duquel le cylindre à vapeur C se trouve fixé par sa partie supérieure. Le sommet de la colonne reçoit le premier palier de l'arbre moteur ainsi que le régulateur à force centrifuge.

L'aspect extérieur d'une telle machine est harmonieux, et se prête aux applications dans lesquelles la question de luxe entre pour quelque chose. Elle a l'avantage de présenter peu d'étendue comme base, tout en réunissant la solidité nécessaire, par la grande résistance de la colonne qui donne à l'axe moteur un point d'appui parfaitement rigide.

Mais, d'un autre côté, le service et la surveillance en sont plus difficiles par la raison même que la plupart des pièces du mécanisme sont renfermées; il n'est pas facile en effet de les entretenir et surtout de les démonter pour les réparations. Aussi ce système est-il peu appliqué aujourd'hui. Néanmoins, on a pu voir à l'Exposition universelle, en 1855, une machine semblable, double, venant de l'Angle-

(1) La machine à colonne de M. Farcot est décrite avec beaucoup de détails dans la *Publication industrielle*, vol. III, pl. 20 et 21.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

terre; les pistons des deux cylindres actionnaient un même arbre moteur appuyé sur les deux colonnes.

Il existe au Conservatoire des arts et métiers de Paris, dans la galerie des modèles en mouvement, deux machines de ce système, dont l'une a été construite par M. Fairbairn, et l'autre par M. Farcot.

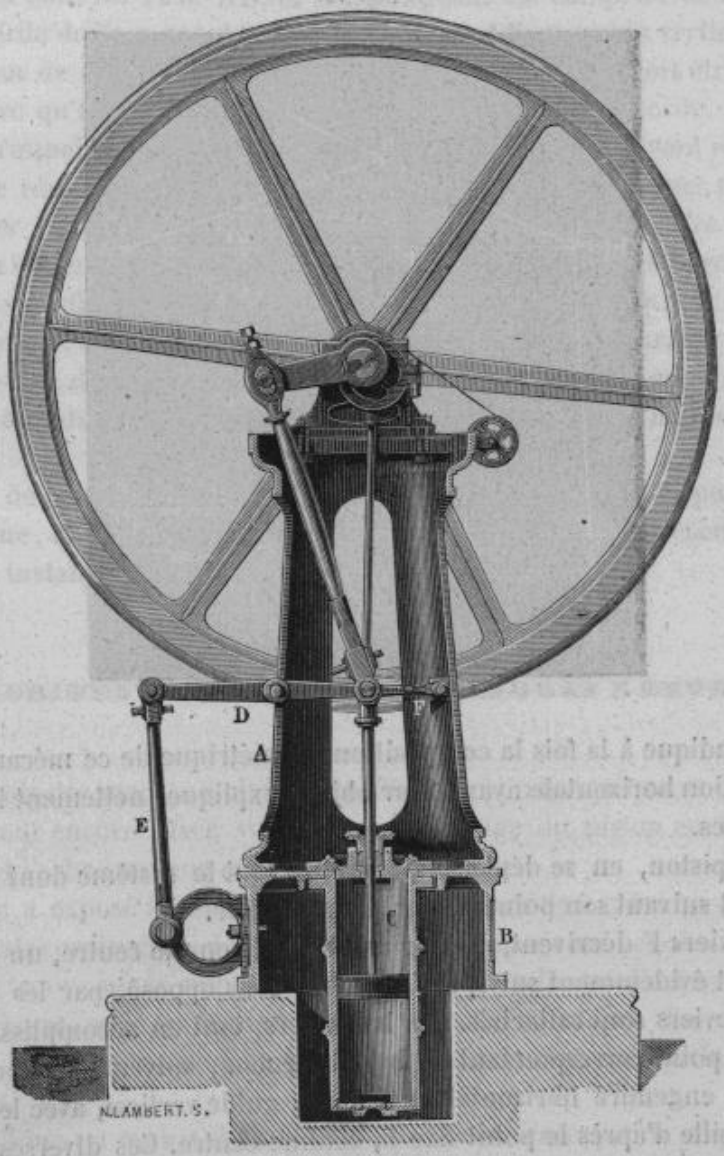



Fig. 78. Échelle de 1/30e.

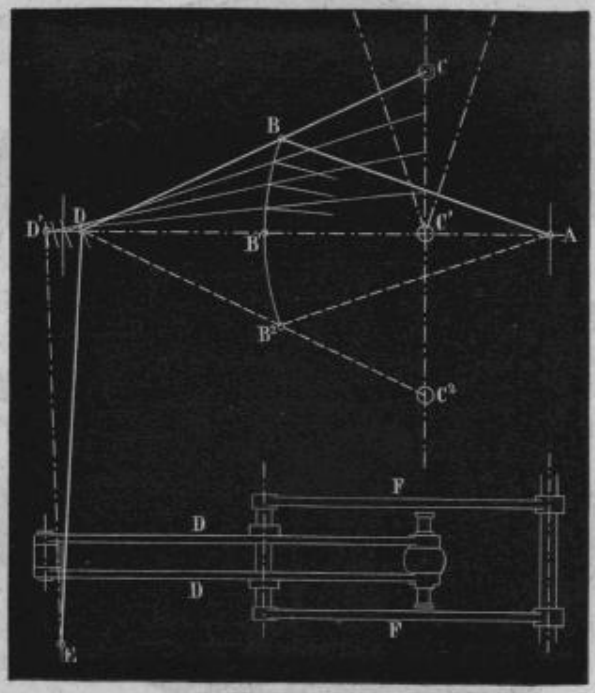
Le parallélogramme comprend d'abord deux guides F, oscillant sur un axe fixé à la colonne, et dont le sommet, qui décrit des arcs de cercle d'une très-faible amplitude autour de ce centre, est assemblé par une traverse à deux balanciers D, vers le milieu de leur longueur; ces balanciers sont réunis d'un bout avec le goujon qui assemble la bielle à la tige du piston, et de l'autre avec un bras de levier E

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

qui peut osciller librement d'après son extrémité opposée qui est rattachée, par articulation, à un support fixé au socle B.

Comme la figure d'ensemble ne permettrait pas de comprendre aisément le fonctionnement de ce système de parallélogramme, nous en donnons ci-après le tracé géométrique à une plus grande échelle.

Fig. 79.




La fig. 79 indique à la fois la composition géométrique de ce mécanisme et une vue en projection horizontale ayant pour objet d'expliquer nettement la disposition des assemblages.

La tige du piston, en se déplaçant, entraîne tout le système dont chacune des pièces se meut suivant son point d'attache particulier.

Les deux leviers F décrivent, de leur axe fixe A, comme centre, un arc de cercle B B′ B², qui est évidemment suivi, mais dans le sens opposé, par les balanciers D auxquels les leviers sont rattachés. Ces balanciers, tout en accomplissant ce mouvement par le point correspondant de leur longueur, suivent par leur extrémité l'arc de cercle engendré horizontalement par le guide vertical, avec lequel ils sont liés, et qui oscille d'après le point fixe E, comme centre. Ces diverses amplitudes étant combinées convenablement, il en résulte que l'extrémité des balanciers, assemblée avec la tige du piston, suit sensiblement l'axe vertical tracé suivant cette ligne, et vient occuper, aux positions principales, les points C, C′ et C².

Les dimensions de ces diverses pièces ne sont pas absolues, mais conservent entre elles certains rapports qu'il est facile de déterminer. Dans tous les cas on s'approche d'autant plus de l'effet théorique que les angles décrits sont moindres.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Supposons qu'après avoir indiqué les trois positions principales C, C′ et C², on se donne la longueur CD des balanciers, qui devra être au moins égale à la course, soit à plus du double de la manivelle. Il est évident qu'aux positions extrêmes le point d'attache des balanciers avec le lien E sera au même point D sur l'axe AD, point qu'on obtient directement en traçant, de l'un de ceux C ou C², un arc de cercle avec la longueur du balancier pour rayon. Mais dans la position centrale, les balanciers sont sur l'axe AD, et leur longueur est comprise de C′ en D′, d'où DD′ est la corde de l'arc que doit décrire, du point E, le guide vertical (fig. 79).

La longueur de ce guide est évidemment arbitraire, mais doit être assez grande pour que l'arc qu'il décrit se confonde sensiblement avec la corde.

Pour déterminer ensuite les conditions que les leviers F doivent remplir, on fixe leur point de réunion B avec le balancier, puis on porte la distance CB de C′ en B′; faisant passer par ces deux points un arc de cercle dont le centre soit situé sur l'axe AD, on obtient ainsi le centre d'oscillation des leviers F et leur longueur AB.

Cet aperçu suffira pour les personnes qui voudraient exécuter ce système de parallélogramme, à la condition qu'elles étudient un tracé en grand où elles découvriront alors les dimensions les plus convenables à adopter, soit en général, soit par rapport aux dimensions particulières de la machine où l'application devra en être faite.

Ce mode de parallélogramme n'est pas absolument lié à la disposition générale de la machine, quoiqu'un mécanisme ordinaire de glissières présente de certaines difficultés à installer à l'intérieur de la colonne.

## MACHINES VERTICALES A CYLINDRES RENVERSÉS

On construit des machines dans lesquelles le cylindre se trouve renversé, c'est-à-dire qu'étant encore placé verticalement, la tige du piston en traverse le fond inférieur, et l'arbre moteur est posé au-dessous.

M. Duvoir a exposé à Rouen, en 1859, une machine à colonne évidée avec des glissières plates ordinaires, dont la disposition est basée sur ce principe. Le cylindre à vapeur se trouve sur le sommet de la colonne, tandis que l'arbre moteur est à la partie inférieure, et la transmission étant directe, au moyen d'une bielle simple, le cylindre est alors *renversé* et fonctionne comme ceux qui actionnent les marteaux-pilons.

Cette machine est munie d'un mécanisme de détente par le manchon à bosses (système Meyer, p. 421); l'axe du régulateur occupe la hauteur totale de la machine, pour atteindre l'arbre principal qui le commande par deux roues d'angle; il est enfermé dans une colonne creuse d'un faible diamètre, située tout près de celle qui constitue le bâti principal.

Cette disposition a été employée quelquefois en vue de placer l'arbre moteur près du sol, tout en réduisant le mécanisme au mouvement direct composé d'une



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

bielle simple reliant directement la tige du piston à la manivelle. Mais l'exemple que nous venons de citer est une exception, quant à la forme du bâti qui est le plus souvent composé de chevalets ou supports qui servent de guides pour la tige du piston, et dont le sommet supporte une plaque où repose le cylindre.

M. Nasmyth, grand constructeur anglais, a exécuté de semblables machines pour commander directement des trains de laminoirs, ce qui est un exemple important de mécanismes placés sur le sol.

M. Weimberger, qui a dirigé pendant plusieurs années les ateliers de construction des mines du Grand-Hornu, en Belgique, a aussi adopté ce procédé pour commander des scieries de pierre et de marbre.

Les marteaux-pilons sont, également, des machines à vapeur à cylindres renversés; nous avons dit que nous en ferions l'objet d'un article séparé, comme machines *à action directe*.

Il est évident que cette position du cylindre présente le double inconvénient d'avoir ses boîtes à étoupe renversées, condition contraire à la facilité du graissage, et de reporter loin de la main du mécanicien les organes ordinaires de la manœuvre. Par conséquent, lorsqu'on pourra disposer de la place nécessaire pour une machine horizontale, ce système devra être préféré, comme permettant aussi d'attaquer directement l'axe moteur près du sol, mais avec un bâti plus simple et toutes les pièces dans une position commode pour le service.

---

Si les divers systèmes qui viennent d'être passés en revue ne constituent pas la totalité de ceux imaginés pour les machines à vapeur verticales sans balancier, ils représentent au moins les plus importants par le nombre d'applications qui en ont été faites, et surtout les types encore en usage aujourd'hui.

D'ailleurs, il ne s'agit réellement que de la position de l'ensemble du moteur, ce qui ne peut pas amener de différences fondamentales dans les organes principaux. Les caractères distinctifs existent plus particulièrement dans la forme des bâtis et dans la nature des points d'appui.

Il est clair que le choix du système dépend de la disposition des mécanismes à actionner et du local disponible pour loger le moteur. Cependant, si l'emplacement n'est pas une question, ce choix peut encore dépendre de la nature du service.

En commençant cet article, nous avons déjà dit quelques mots sur la différence d'emploi des diverses dispositions de machines; nous pourrons compléter cet examen et la discussion à établir à ce sujet lorsque nous aurons décrit tous les systèmes en usage.

FIN DU CHAPITRE CINQUIÈME.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

# CHAPITRE VI

## MACHINES A VAPEUR HORIZONTALES

Les machines horizontales empruntent leur caractère essentiel à la forme spéciale de leur bâti, qui est naturellement combiné en vue de la disposition d'ensemble et du point d'appui qui lui est réservé. Par un simple changement de position du cylindre, ce système a presque fait une révolution dans l'emploi des moteurs à vapeur, et en peu de temps on vit se monter dans les usines un grand nombre de machines horizontales, qui devaient évidemment plaire, à cause de leur simplicité et de la solidité qu'elles présentent. Occupant peu de hauteur, elles peuvent être visitées facilement; par leur large assise, aussi considérable que le développement total de leur ensemble, elles permettent de marcher à de grandes vitesses sans craindre les vibrations qui seraient inévitables avec les divers systèmes verticaux. Si l'on joint cette propriété d'une grande vitesse, aisément applicable, à une certaine économie réalisée dans les fondations, on comprendra que les machines horizontales puissent être établies, à puissance égale, dans des conditions moins onéreuses que les autres systèmes.

C'est depuis moins de 20 ans que ce genre de moteur a vu ses applications se multiplier. Avant cette époque, on pensait que la position horizontale devait amener l'ovalisation du cylindre par le poids du piston, et, en raison de cette crainte, comme par préjugé, on ne voulait pas d'un tel système. Cependant on en possédait, comme précédent, l'importante application aux machines locomotives, ce qui date d'avant 1827, époque du mémorable concours qui eut lieu en Angleterre sur le chemin de fer de Liverpool à Manchester.

Néanmoins, l'idée première de donner cette disposition aux machines à vapeur n'est pas nouvelle : elle date déjà de plus d'un demi-siècle, et semble appartenir à M. Périer, qui a pris pour cet objet un brevet d'invention, en France, le 24 août 1792 (1). A cette même époque, Périer proposait aussi, comme étant nouveau, l'accouplement de deux machines ayant leurs manivelles disposées à angle droit, afin d'augmenter la régularité du mouvement de rotation.

Aujourd'hui, il se construit chez nous un très-grand nombre de machines horizontales, et on peut dire qu'il n'existe plus aucune hésitation à en faire l'application. Pour noter, en passant, un point intéressant de leur histoire, nous rappellerons qu'à l'Exposition universelle, en 1855, les machines de ce système ont participé aux plus hautes récompenses.

(1) Il est remarquable que ce brevet est le premier qui ait été pris en France, relativement aux machines à vapeur.

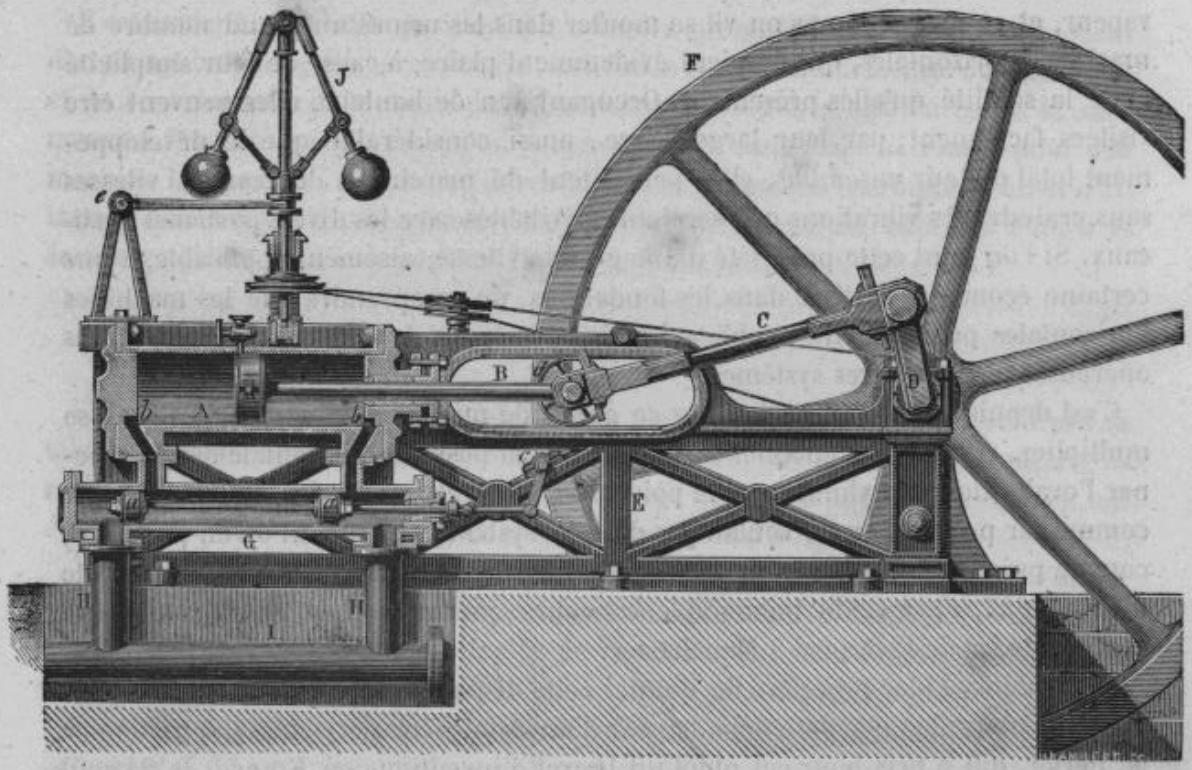
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## MACHINE HORIZONTALE DE PH. TAYLOR

Avant de décrire les dispositions actuellement adoptées, nous devons dire quelques mots de la machine horizontale de M. Philippe Taylor, qui est, selon nous, un point important, comme l'une des premières applications de ce système.

Le Conservatoire des arts et métiers de Paris possède, depuis une trentaine d'années, un très-joli modèle d'une machine exécutée en 1828, pour actionner des pompes foulantes destinées à opérer la compression du gaz d'éclairage (1).

Fig. 80.




La fig. 80 en représente une coupe longitudinale, faite par l'axe du cylindre à vapeur. C'est un moteur très-simple, fonctionnant sans appareil de condensation. Excepté le mécanisme de distribution, dont le système est abandonné aujourd'hui, on pourrait presque dire qu'elle est semblable aux machines modernes, sauf quelques changements de forme dans la structure du bâti et dans le mode de direction de la tige du piston.

Le cylindre à vapeur A est monté entre deux flasques parallèles E, en fonte et à jour, munies chacune de l'un des paliers qui reçoivent l'arbre moteur D, lequel est

(1) Cette machine a été publiée dans le *Cours de dessin* de l'éminent professeur Leblanc.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

coudé, ou disposé en forme de *vilbrequin*. Ce bâti est beaucoup plus élevé qu'on ne le fait aujourd'hui, à cause de la distribution que le constructeur avait cru devoir placer au-dessous du cylindre, ce que l'on évite soigneusement dans les constructions actuelles ; on la place, au contraire, soit au-dessus, comme on a pu le voir sur la pl. 9, soit sur le côté, comme nous en donnerons un grand nombre d'exemples.

La tige B du piston est reliée à la bielle C par une traverse, aux extrémités de laquelle sont montés deux galets *d* qui cheminent dans de larges coulisses ménagées à chacune des deux flasques E (voir une disposition semblable pl. 17).

Le cylindre est muni, à ses extrémités, de deux canaux *b* qui s'ajustent à deux tubulures appartenant à un corps cylindrique G, parfaitement alésé, et dans lequel se meuvent deux pistons *a* fixés sur une même tige. Le corps G, qui constitue exactement la boîte de distribution, reçoit la vapeur du générateur par un conduit aboutissant à une tubulure située entre les deux pistons distributeurs *a*, mais que la vue en coupe de la figure ne permet pas d'apercevoir.

Tandis que l'introduction de la vapeur a lieu ainsi dans la boîte, vers le milieu de sa longueur, l'échappement s'effectue par les extrémités, auxquelles sont ménagées deux tubulures en correspondance avec les deux branches H d'un conduit en fonte I, qui communique avec l'atmosphère.

Pour achever cet aperçu, nous dirons que la tige des distributeurs *a* est reliée à un petit levier solidaire de l' axe *c*, qui en porte extérieurement un semblable, auquel est rattachée la barre d'un excentrique circulaire monté sur l'une des extrémités de l'arbre moteur, comme sur le type (pl. 9).

D'après cela, on comprend que le mouvement de va-et-vient, donné simultanément aux deux pistons, les reporte tantôt d'un côté et tantôt de l'autre de chacun des canaux *b*. Par conséquent, ces canaux sont mis alternativement en relation avec la partie centrale de la boîte G où afflue la vapeur arrivant de la chaudière, et avec chaque extrémité mise en rapport avec l'extérieur.

Ainsi, suivant la position indiquée sur la fig. 80, la vapeur active pénètre dans le cylindre par l'orifice *b* de gauche, et la vapeur du coup précédent s'échappe par l'orifice opposé.

Comme le tiroir de Watt, dont on a vu précédemment la description (p. 378), le système à pistons a été complétement abandonné à cause de la difficulté de rendre les garnitures parfaitement étanches. Il y a là une différence essentielle avec les tiroirs adoptés maintenant, et tout en faveur de ces derniers. C'est que la bonne fonction des pistons dépend de leur garniture et de leur ajustement, tandis qu'un tiroir plat a la pression même de la vapeur pour garantie du joint, et que l'usure ne peut altérer, si l'on admet, au moins, que la table de glissement, ou *la glace*, soit en métal suffisamment homogène.

L'arbre moteur D porte à l'une de ses extrémités, en dehors du bâti, le volant F, l'excentrique circulaire pour la distribution, et une poulie qui transmet, par des cordes, le mouvement au régulateur J, dont les effets sont communiqués à la valve d'introduction de la vapeur par un axe *e*. L'autre extrémité de l'arbre porte un second excentrique qui commande la pompe alimentaire.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## MACHINE HORIZONTALE A DÉTENTE VARIABLE ET SANS CONDENSATION

Construite par les établissements **CAIL** et C^e^, à Paris

(PLANCHES 18 ET 19)

D'une machine déjà ancienne, nous arrivons, sans transition, à l'une des plus modernes et des plus perfectionnées. Mais la première est plutôt un incident dans l'ordre suivi jusqu'ici, et que nous ne donnons pas comme un modèle à suivre, mais qui peut servir à apprécier le degré d'avancement actuel de la construction.

La machine de MM. Cail et C^e^ est exactement composée, pour l'ensemble, comme celle qui nous a servi de type (pl. 9). Mais, outre le mode de direction qui diffère, elle possède un mécanisme de distribution à détente du système mentionné précédemment, et représenté par la fig. 3 de la pl. 12.

La fig. 1 de la pl. 18 est une vue extérieure en élévation de cette machine, regardée du côté opposé à la distribution;

La fig. 2, de la même planche, en est une projection horizontale extérieure sur laquelle le bâti du régulateur est supposé démonté pour laisser apercevoir d'autres parties essentielles;

La pl. 19 est spécialement destinée aux détails du mécanisme de distribution et au cylindre à vapeur;

La fig. 3 représente le cylindre monté sur le bâti, en élévation extérieure, et la boîte de distribution en coupe suivant l'axe de la commande des glissières de détente;

La fig. 4 est une section horizontale faite sur l'axe du cylindre et sur la distribution;

La fig. 5 est une coupe transversale du même ensemble, faite suivant une ligne brisée qui passe par l'orifice d'évacuation du cylindre et par la tubulure d'entrée de la vapeur dans la boîte;

La fig. 6 est une autre section transversale faite en avant du cylindre;

Les fig. 7 à 9 représentent des détails de cette même partie de la machine.

### ENSEMBLE DE LA CONSTRUCTION

La construction de cette machine se distingue par ce que l'on peut appeler: *le genre locomotive*, c'est-à-dire que son organisation et la forme de ses organes ont la plus grande analogie avec ce qui est généralement adopté dans ce système de moteur, pour lequel on sait, du reste, que l'on recherche la meilleure construction et la sûreté du fonctionnement.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le cylindre A, fondu avec ses canaux et même avec la boîte de distribution, est fixé par deux patins *a*, qui en ont toute la longueur, sur un bâti B, d'une seule pièce de fonte, qui est établi sur un massif en maçonnerie et assujetti par de nombreux boulons *b*.

La tige *c* du piston C (fig. 4) est guidée, sur son axe même, par une seule glissière formée de deux règles à nervures en fonte D, qui sont réunies d'un bout avec le couvercle du cylindre, et de l'autre avec une traverse B′ appartenant au bâti. Cette tige est terminée par une tête *d*, dressée pour suivre les glissières, et traversée par le goujon cylindrique qui l'assemble avec la bielle E.

Ce goujon est prolongé en dehors de la bielle et vient se rattacher au piston de la pompe alimentaire F, qui est posée horizontalement sur le bâti et se trouve ainsi commandée directement par le piston à vapeur, dont elle possède alors la course.

La bielle, en raison de la glissière unique, est fourchue suivant une partie suffisante de sa longueur pour la course qu'elle effectue; après la fourche, elle présente une partie simple, de section rectangulaire, et se termine par la tête à coussinets par laquelle elle est assemblée avec la manivelle G.

Celle-ci est en fer et calée, comme à l'ordinaire, sur l'arbre moteur H qui porte le volant I, plus deux excentriques circulaires J et K pour le tiroir de distribution et pour les registres de détente qui exigent, en effet, une commande séparée dans ce système, dont on a vu (p. 417) la description détaillée.

Comme l'indique le dessin, l'arbre a son premier palier fondu avec le bâti. Il est légèrement incliné, ainsi que le font plusieurs constructeurs, pour les machines horizontales.

La vapeur est amenée du générateur par un conduit L, adjoint à une tubulure L′ fondue avec la boîte de distribution M, et, comme nous l'avons dit, avec le cylindre. Une soupape *e* (fig. 5), disposée à l'intérieur de cette tubulure, et manœuvrée de l'extérieur à l'aide d'un volant-manivelle *f*, sert à établir à volonté la communication avec la boîte, et à mettre la machine en marche ou à l'arrêter.

L'échappement de la vapeur, qui s'effectue dans l'atmosphère, a lieu, comme à l'ordinaire, par le canal central *g* qui contourne le cylindre jusqu'à sa partie supérieure où il est terminé par une tubulure à bride pour recevoir le conduit N allant à l'extérieur.

Le régulateur O est établi à l'intérieur d'un cadre P en fonte, d'une forme à peu près elliptique dans le haut, mais qui, vers le bas, se prolonge par deux pieds-droits pour se fixer sur les côtés du bâti principal. Cette disposition, que les constructeurs appliquent dans toutes leurs machines à vapeur, leur donne un aspect particulier qui les fait aisément reconnaître.

L'axe du régulateur est commandé par une paire de roues d'angle dont l'une appartient à un axe intermédiaire monté sur le cadre P, et qui, dans les petites machines, reçoit le mouvement de l'arbre principal à l'aide d'une courroie qui embrasse les deux poulies *h* et *h′*. Dans les machines de grande puissance, cette commande s'effectue à l'aide de plusieurs paires de roues d'angle et d'un arbre oblique intermédiaire.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Les mouvements du régulateur sont transmis à un papillon qui est ajusté à l'intérieur d'une tubulure spéciale $i$, attenante à celle L′ par laquelle se fait l'introduction de la vapeur. Cette transmission s'effectue, comme nous l'avons déjà vu, par un axe oscillant $j$, dont les supports sont fixés sur le cadre P, et qui porte une branche en relation avec le manchon du régulateur, et un levier $k$, lequel est relié par une tringle $l$ avec une petite manivelle $m$ montée sur l'axe du papillon. L'axe $j$ est aussi muni d'une tige à contre-poids $k'$ destinée à équilibrer les pièces que ce régulateur doit mettre en mouvement.

Ce qui précède suffit pour avoir une idée générale de l'ensemble de cette machine, qui, du reste, ne diffère pas, en principe, du type représenté pl. 9. Seulement celle-ci est complète, quant à ses accessoires, et conforme à la construction.

Il existe, cependant, entre la machine représentée pl. 9 et celle-ci, les différences suivantes :

1° La glissière est unique et centrale, au lieu d'être composée de deux glissières disposées latéralement;

2° La distribution est placée sur le côté du cylindre au lieu d'être au-dessus, ce qui avait été admis dans le premier cas pour faciliter la démonstration;

3° La distribution est munie d'un mécanisme de détente, ce qui devait être évité dans un premier exemple.

## DÉTAILS DE CONSTRUCTION.

Cylindre a vapeur (fig. 3 à 7, pl. 19). — Le cylindre à vapeur constitue une pièce admirablement disposée, mais qui serait difficile à construire pour un atelier moins bien monté que ceux de MM. Cail et C^e^. Outre qu'il est fondu avec la boîte à vapeur, les masses en sont si habilement réparties, que l'on pourrait presque dire qu'il est composé de parois uniformes d'épaisseur, ne laissant nulle part de parties pleines inutiles. Aussi chaque canal ou évidement vient se répéter à l'extérieur, suivant sa forme ou son contour particulier.

L'intérieur du cylindre présente une partie alésée au diamètre même du piston, et les deux extrémités qui reçoivent les fonds sont d'un diamètre un peu plus fort. On comprendra l'utilité d'élégir les extrémités du cylindre, si l'on remarque que le piston ne les atteignant pas, l'usure ne doit se manifester que sur l'étendue qu'il parcoure; par conséquent, lorsque, par suite d'une réparation faite au piston, on voudrait l'introduire dans le cylindre, après quelque temps de marche, s'il n'existait pas de liberté à l'entrée, le piston forçant d'abord aurait du jeu dans la partie contre laquelle il doit, au contraire, parfaitement joindre.

La réunion du cylindre avec le bâti a lieu par quatre boulons $b'$ qui traversent les deux patins $a$, lesquels sont de plus fixés par des coins en fer entre des ergots appartenant au bâti. L'un de ces boulons est à tête fraisée et affleurée, à cause de la position qu'il occupe.

Le cylindre est muni à chacune de ses extrémités, et à la partie inférieure, de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

deux robinets purgeurs (p. 325). Ces deux robinets peuvent être aisément manœuvrés simultanément à l'aide d'un levier à main $m$ (fig. 1 et 2, pl. 18), dont l'axe correspond à la clef de l'un des deux robinets, laquelle clef porte une manivelle $m'$ qui est reliée par une tringle $m^2$ à la manivelle $m^3$ fixée sur le second robinet.

Le graissage intérieur du cylindre s'effectue à l'aide d'un robinet spécial $n$ (fig. 3 et 4), fixé au fond A′, qui est à cet effet percé d'un trou au centre.

Ce robinet, représenté en détail fig. 9, pl. 19, est semblable à tous ceux que l'on applique aujourd'hui aux machines à vapeur, pour lubrifier les parties dans lesquelles il règne une pression supérieure à celle de l'atmosphère ambiante.

Comme, par ce fait, l'huile ne pourrait pas être introduite, et que, s'il s'agit au contraire d'un milieu dans lequel l'air extérieur ne doit pas pénétrer, il ne serait pas possible d'établir un robinet à ouverture directe, ces appareils sont composés d'un réservoir $n$, situé entre deux robinets, et d'une cuvette extérieure dans laquelle on verse l'huile. On ouvre alors le premier robinet $n'$ qui laisse passer celle-ci dans le réservoir $n$, et en ouvrant ensuite le second robinet $n^2$, elle s'introduit alors dans le cylindre, soit par écoulement simple, parce que la vapeur y établit sa pression, soit au moment du retour du piston pendant lequel on se retrouve en rapport avec l'atmosphère, ou avec le condenseur si la machine est à condensation.

Boite de distribution. — La boîte à vapeur M est fondue avec le cylindre et porte d'un côté deux boîtes à étoupe pour l'entrée des tiges $J^2$ et $K^2$, qui commandent le tiroir principal Q et les registres R de détente. Elle est complétée par un couvercle M′ et un fond $M^2$ avec lequel sont fondues les deux boîtes à étoupe qui guident les mêmes tiges à leur sortie, du côté opposé à la commande. Ce fond fait également partie de la même pièce que l'arcade $M^3$, qui, dans ce système de détente, a pour fonction de guider l'extrémité de la tige des glissières, dans des conditions que nous avons déjà fait connaître (p. 417).

Le couvercle M′ est aussi fondu avec une arcade $f'$, fig. 5, dont le mamelon central est garni d'un écrou, dans lequel passe la tige $e'$ de la soupape $e$ qui règle l'entrée de la vapeur dans la boîte. Cette tige $e'$ est munie d'un arrêt $e^2$ qui glisse entre deux tasseaux fondus avec la tubulure L′ et l'empêche de tourner lorsqu'on vient agir sur elle. C'est alors l'écrou qui tourne avec le volant $f$ auquel il est fixé.

La glace du tiroir est formée par une table de bronze $o$, dressée et rapportée à plat sur la fonte. Nous avons déjà montré une semblable disposition (p. 409), excepté que la partie de bronze se trouvait rapportée après le tiroir. Nous faisions remarquer, en même temps, que le graissage de cette table est difficile à cause de la chaleur qui règne à l'intérieur de la boîte de distribution ; néanmoins, celle-ci porte un robinet-graisseur $n^3$, destiné à cet usage, ce qui n'a pas toujours lieu.

Distribution et détente. — Le mode de distribution à détente adopté par la maison Cail et Ce étant identique à celui représenté fig. 3, pl. 12, il serait superflu de le décrire de nouveau. Nous avons seulement à faire ressortir quelques détails d'exécution que les fig. 3 à 6 de la pl. 19 feront très-bien comprendre.

La fig. 3 représente la boîte de distribution coupée suivant l'axe même de la tige à vis $K^2$, et le mécanisme des registres complétement en vue extérieure ;



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

La fig. 5 étant une section transversale d'ensemble, la coupe est faite, quant aux registres, exactement sur le milieu de l'un des deux;

Enfin, la coupe horizontale, fig. 4, est faite, à l'égard des mêmes organes, pour l'un des deux sur l'axe de la tige et de l'écrou R′, et, pour l'autre, sur le tenon carré qui relie le registre à l'écrou.

Le tiroir principal est encore enclavé dans un châssis en fer de la même pièce que sa tige $J^2$. Celle-ci est clavetée avec une douille $p$ qui sert à établir l'assemblage avec la barre de l'excentrique, et qui porte une tige guidée dans un support $p'$ fixé au moyen d'une clavette à un mamelon $p^2$, ménagé spécialement à cet effet, après le bâti de la machine. Ce guide extérieur $p'$ est d'un très-bon effet pour concourir avec les deux boîtes à étoupes, qui maintiennent déjà la tige $J^2$, à soustraire le tiroir au mouvement d'oscillation de la barre d'excentrique.

La face de ce tiroir de distribution est nécessairement dressée afin de recevoir les registres R. Mais les constructeurs ont jugé convenable, pour diminuer l'étendue du dressage, comme on le fait du reste dans un grand nombre de pièces mécaniques, d'y ménager à la fonte des nervures saillantes, à peu près disposées en quinconces, et que les fig. 3 et 5 permettent d'apercevoir.

La tige $K^2$, sur laquelle sont montés les registres de détente, est assemblée avec la barre d'excentrique K′ de façon que cette tige puisse tourner sur elle-même, tout en suivant le mouvement de va-et-vient que lui transmet l'excentrique.

A cet effet, cette barre K′ est assemblée avec une douille $q$ (fig. 2), qui est guidée dans les mêmes conditions que la précédente. Mais on voit, par la fig. 8, pl. 19, qui en est un détail, que cette douille forme une chappe évidée, et que la tige $K^2$ des registres s'y relie par un tourillon à écrou qui établit le mouvement de traction, sans empêcher cette tige de tourner.

Le montage des registres R mérite une mention particulière et diffère, du reste, sensiblement de l'exemple que nous avons montré (pl. 12).

La liaison de chacun de ces registres, avec l'écrou R′ correspondant, est établie par deux portées carrées qui pénètrent dans des ouvertures semblables ménagées à l'écrou. En dehors de ces portées, et aux deux extrémités de celui-ci, est ménagé un évidement cylindrique dans lequel se loge un ressort à boudin $r$ (fig. 5), qui presse sur le registre, et assure son contact avec le tiroir. On ne doit pas compter, en effet, sur la tige $K^2$ dont la position est rigide, et qui doit plutôt laisser au contact des registres une certaine liberté, alors compensée par l'action des ressorts.

La même tige $K^2$ porte à l'intérieur de la boîte à vapeur une bague $r'$ fixée par une clavette. L'objet de cette bague est de limiter l'écartement des registres R, et d'empêcher qu'en tournant la tige d'une trop grande quantité, on ne les fasse sortir des filets de la vis. On comprend qu'une seule butée suffit, puisqu'ils ne peuvent marcher qu'ensemble et toujours d'une même quantité.

Mécanisme de variation de la détente. — Ce mécanisme, à l'aide duquel on agit pour changer le degré de la détente, est disposé d'une façon analogue à celui représenté sur la fig. 3, pl. 12. Nous avons néanmoins quelques différences à signaler dans la construction.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'extrémité de la tige $K^2$ est carrée et ajustée dans la douille *s*, dans laquelle elle glisse en exécutant son mouvement de va-et-vient; cette douille est elle-même ajustée cylindriquement dans le mamelon de l'arcade $M^3$, et porte, claveté avec elle, le volant-manivelle S à l'aide duquel on la fait tourner lorsqu'on veut changer la position des registres R.

La même douille est munie d'un fourreau mince en bronze *s'* destiné à enfermer l'extrémité de la tige $K^2$, qui s'y meut, et afin d'éviter que l'on en soit choqué lorsqu'on s'en approche pour s'emparer du volant. Ce fourreau est seulement percé d'un petit trou pour éviter la compression de l'air à son intérieur.

L'extrémité opposée de la douille *s* est alésée et filetée pour recevoir un écrou en bronze *t*, dont l'intérieur est carré pour le passage de la tige $K^2$. Il porte un index *t'* qui est coudé, et correspond à une petite plaque, fixée sur le mamelon de l'arcade $M^3$, sur laquelle sont tracées des divisions en rapport avec les divers degrés de détente. Lorsqu'on fait tourner la douille *s*, qui entraîne avec elle la tige $K^2$, l'écrou *t* ne pouvant pas tourner, empêché par l'index *t'*, se déplace longitudinalement avec cet index qui fait connaître alors, sur la plaque graduée, la valeur de tous les mouvements imprimés à la tige et aux registres de détente.

Glissières du piston. — Lorsque les machines sont de faible puissance, MM. Cail, et avec eux divers constructeurs, adoptent la disposition d'une seule paire de glissières, comme celle qui est indiquée sur la gravure, ce qui présente évidemment une économie sensible dans l'exécution, et serait préférable, dans tous les cas, à deux points d'appui et une traverse dont le *carrément* est toujours difficile à obtenir; mais pour des machines puissantes, on préfère adopter les deux paires de glissières placées latéralement sur les côtés mêmes du bâti, comme on l'a vu, pl. 9, et comme on en montre plus loin d'autres exemples.

Les deux règles à nervures D, entre lesquelles glisse la tête *d* de la tige du piston, sont rattachées, ainsi qu'il a été dit, après la boîte à étoupe du couvercle.

La fig. 7, pl. 19, représente cet assemblage en coupe longitudinale, et en rapport avec la section transversale, fig. 6.

L'extérieur de la boîte à étoupe présente, à cet effet, deux faces dressées sur lesquelles les deux glissières sont appliquées et fixées par deux boulons à deux écrous chacun. On insère dans les joints une plaque de laiton qui peut être facilement remplacée par de plus minces, lorsqu'il s'est manifesté trop d'usure par le frottement du guide de la tige.

Les extrémités opposées des règles D sont réunies par une courte entretoise et traversées par un boulon qui fixe l'ensemble à la traverse B'.

Ce mode de direction, qui est principalement usité pour les locomotives et pour des machines fixes de moyenne puissance, assure, comme nous venons de le faire remarquer, une rectitude plus certaine qu'avec deux glissières placées latéralement à une certaine distance de l'axe; mais il donne lieu à quelque assujettissement, quant au couvercle du cylindre, qui ne peut être démonté isolément. Il faut alors opérer la visite du piston par le fond opposé au couvercle, ce qui, du reste, est facile avec une machine horizontale.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pompe alimentaire. — La disposition de la pompe d'alimentation ne diffère pas sensiblement de celles qui ont été décrites jusqu'ici. On remarque, néanmoins, que les boîtes à clapets $x$ et $x'$ sont placées aux deux extrémités du corps de pompe. Le clapet d'aspiration est surmonté d'un mécanisme, avec volant à main $x^2$, à l'aide duquel on peut à volonté le maintenir sur son siége pour arrêter l'alimentation.

L'installation de cette pompe est simple, en raison de sa commande directe par le piston à vapeur qui lui donne la même course. Cependant, bien des constructeurs évitent cette disposition à cause de la grande vitesse, qui n'est jamais favorable aux fonctions d'une pompe.

Volant. — Nous proposant de faire un article spécial sur l'emploi et le calcul des volants qui, comme on sait, jouent un rôle important dans les machines à vapeur, disons seulement, avant de terminer, quelques mots de la construction de celui appliqué à la machine qui nous occupe.

Bien que ce volant soit d'un diamètre peu considérable, il est construit en plusieurs parties, ce qui est toujours avantageux pour en faciliter le transport, et qui est adopté, du reste, à peu près généralement aujourd'hui, aussitôt que cette pièce atteint une certaine limite de poids. Il est formé de six pièces distinctes, comprenant chacune un bras fondu avec un segment de moyeu et une portion de jante. Les six bras sont réunis et fixés, au moyen de boulons, sur un plateau en fonte ou tourteau I', lequel est fondu avec un mamelon cylindrique claveté sur l'arbre moteur. La jonction des jantes a lieu à l'aide d'un tenon rapporté, et claveté avec chacune des deux parties rapprochées.

### DIMENSIONS ET CONDITIONS DE MARCHE.

Cette machine est établie pour une puissance nominale de 8 chevaux-vapeur, en la faisant marcher à la vitesse de 52 tours par minute.

Les dimensions principales sont les suivantes :

| | |
|---|---|
| Diamètre du piston | $0^m$ 320 |
| Superficie correspondante | $8^{d.q.}$ 04 |
| Course | $0^m$ 600 |
| Vitesse linéaire du piston par 1″ | $1^m$ 040 |
| Volume engendré par coup simple | $0^{m.c.}$ 048 |
| Diamètre des tourillons de l'arbre moteur | $0^m$ 110 |
| Poids de la jante du volant | 1100 kilogrammes. |

Dans ces conditions, on trouve que la détente devrait être réglée aux 5/6 environ de la course entière du piston, soit l'admission à pleine vapeur pendant 1/6 de la course, pour produire la puissance nominale qui lui est attribuée, en admettant que la pression de la vapeur soit de 5 atmosphères dans le générateur, et l'effet utile de 60 p. 0/0. Mais, par les dimensions de ses organes de transmission, et principalement par le diamètre des tourillons de l'arbre moteur, qui est en fer forgé, on re-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

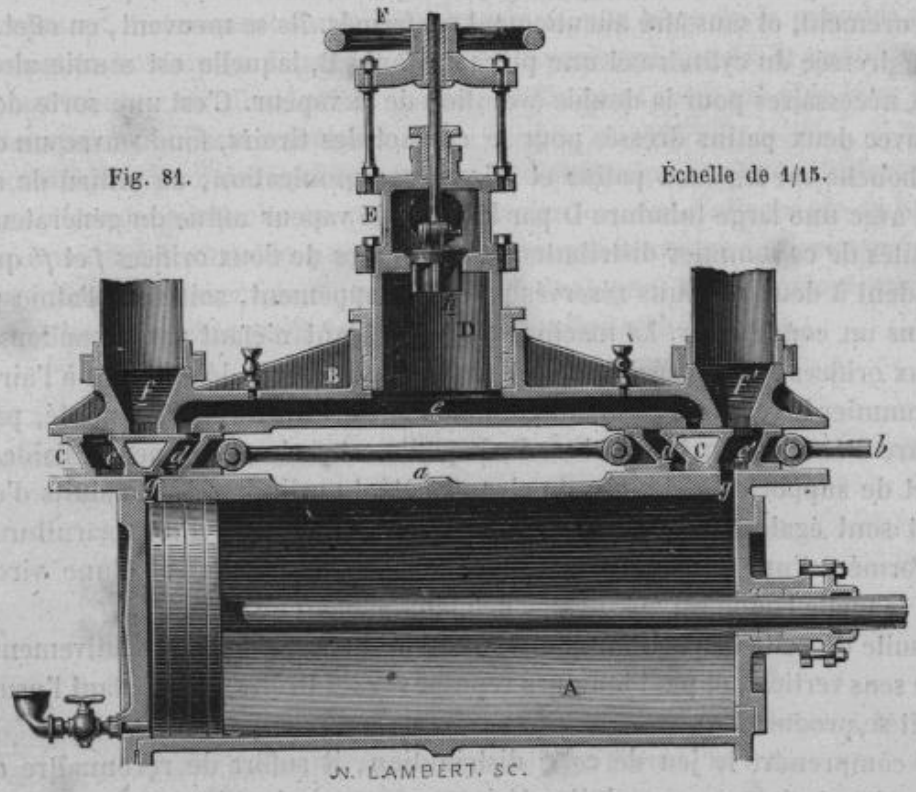
connait qu'on peut lui faire produire davantage sans danger; ainsi, en changeant le degré d'admission de la vapeur, il serait possible de développer une puissance de plus de 12 chevaux-vapeur, en conservant la même vitesse de 52 tours à la minute.

## MACHINE HORIZONTALE A DISTRIBUTION DITE RATIONNELLE

Par **M. E. MALDANT**, constructeur à Bordeaux

M. Maldant avait présenté à l'Exposition universelle de 1855, et à l'Exposition de Bordeaux, en 1859, une machine à vapeur horizontale qui s'est fait surtout remarquer pour son mode de distribution différant notablement des dispositions

Fig. 81. Échelle de 1/15.




ordinairement adoptées. C'est cette partie essentielle du moteur que nous avons cru devoir spécialement représenter comme offrant un certain intérêt actuel, attendu que les autres parties sont analogues à celles des machines du même genre (1).

En proposant cette disposition, l'auteur a eu pour but de supprimer l'excès de pression que les tiroirs supportent dans les conditions ordinaires, ainsi que les espaces qui se remplissent d'une certaine quantité de vapeur qui ne peut être uti-

(1) La machine de M. E. Maldant est complétement représentée et décrite dans le x^e^ volume de la *Publication industrielle*.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lisée. Bien des dispositions ont été imaginées dans le même but, sans parler des soupapes équilibrées (p. 424). Nous aurons à montrer des exemples de tiroirs équilibrés, et principalement les dispositions proposées par MM. Mazeline, qui, ainsi que M. Cavé, ont proposé d'excellents moyens de résoudre la question.

La fig. 81 représente, en coupe longitudinale, à l'échelle de 1/15, l'ensemble du cylindre et de la distribution de la machine de M. E. Maldant.

On remarque d'abord que le cylindre à vapeur est fondu sans canaux; il est muni seulement, à chaque extrémité, d'un orifice $g$ débouchant à la surface d'une table dressée sur laquelle glissent les deux tiroirs de distribution C. Ce sont deux pièces plates, percées chacune de deux lumières $c$ et $d$ affectées respectivement à l'échappement et à l'introduction de la vapeur; ils sont réunis par une bielle $a$, qui les rend solidaires du mouvement de va-et-vient que leur communique un excentrique circulaire, à l'aide d'une bielle en fer $b$, attachée à l'un d'eux.

Ces tiroirs présentent cette particularité qu'ils fonctionnent, pour ainsi dire, extérieurement, et sans être aucunement renfermés. Ils se meuvent, en effet, entre la table dressée du cylindre et une pièce de fonte B, laquelle est munie alors des canaux nécessaires pour la double évolution de la vapeur. C'est une sorte de sommier, avec deux patins dressés pour le contact des tiroirs, fondu avec un canal $e$ qui débouche sur les deux patins et mis en communication, au milieu de sa longueur, avec une large tubulure D par laquelle la vapeur afflue du générateur. Les extrémités de ce sommier distributeur sont munies de deux orifices $f$ et $f'$ qui correspondent à deux conduits réservés pour l'échappement, soit dans l'atmosphère, soit dans un condenseur. La machine de M. Maldant n'étant pas à condensation, ces deux orifices $f$ et $f'$, préalablement réunis en un seul, débouchent à l'air libre.

Le sommier B repose de son simple poids sur les tiroirs; il est monté, par une garniture d'étoupe, sur la tubulure D, laquelle est fixée rigidement à l'aide d'une bride et de supports boulonnés de chaque côté du cylindre; les conduits d'échappement sont également joints aux orifices $f$ et $f'$, à l'aide d'une garniture élastique formée d'une bague extérieure en caoutchouc recouvert d'une virole en cuivre, laquelle bague est aussi rattachée latéralement au cylindre.

Il résulte de cette disposition que l'ensemble du sommier est relativement libre dans le sens vertical, et peut toujours reposer sur les tiroirs, nonobstant l'usure qui pourrait se produire.

Pour comprendre le jeu de cette distribution, il suffira de reconnaître que la vapeur est amenée par un conduit extérieur, correspondant à une première boîte E qui recouvre la soupape d'admission $h$, disposée sur le dessus de la tubulure D, et que l'on manœuvre par le volant F dont le moyeu est claveté sur un écrou dans lequel passe sa tige. Du conduit central D, la vapeur se répand dans le canal $e$, et de là elle s'introduit dans le cylindre en traversant celle des deux lumières $d$ qui se trouve en rapport avec l'un des orifices $g$. Pendant que l'introduction s'effectue ainsi à l'un des bouts du cylindre, on comprend que l'autre est en relation, par son orifice, avec la lumière $e$ du tiroir correspondant, laquelle est alors en communication avec un conduit d'évacuation $f$.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans la position indiquée, fig. 81, l'introduction va commencer d'un côté et l'échappement est déjà ouvert à l'autre extrémité, de $c'$ en $f'$. Les lumières d'échappement $c$ et $c'$ des tiroirs sont beaucoup plus larges que celles $g$ du cylindre, ce qui permet de donner beaucoup d'avance.

En résumant les points fondamentaux du mécanisme, on voit que la charge supportée par les tiroirs se compose du poids du sommier B, plus une pression égale à celle que la vapeur exerce sur la section des orifices extrêmes du canal $e$. Cette charge totale est évidemment bien inférieure à celle qui pèserait sur un tiroir ayant les dimensions convenables pour le même cylindre, et qui serait plongé dans une boîte à vapeur. Ajoutons, enfin, que les tiroirs étant situés entre le cylindre et le canal distributeur, les espaces perdus sont presque nuls, et que la distinction établie entre les conduits d'évacuation et ceux qui amènent la vapeur active est une condition excellente, ainsi que nous l'avons déjà fait remarquer.

Quant à l'ensemble de la machine, il est composé simplement de deux bâtis latéraux, reposant directement sur la maçonnerie et sur lesquels le cylindre est fixé par des patins boulonnés. L'un des deux n'est prolongé que de la quantité nécessaire pour recevoir les glissières du piston, tandis que l'autre est plus long à cause du palier qui reçoit l'arbre moteur.

L'excentrique circulaire, qui commande la distribution, agit par l'intermédiaire d'une coulisse dans laquelle on peut faire varier le point d'attache de sa barre, et obtenir une détente variable, par la modification que la course du tiroir en éprouve. On verra plus loin l'exemple d'un mécanisme analogue, mais employé pour obtenir une détente variable par la course d'une glissière additionnelle.

## MACHINE HORIZONTALE A DÉTENTE VARIABLE ET A CONDENSATION

Par M. E. BOURDON, ingénieur-constructeur à Paris

(PLANCHES 20 ET 21)

Cette belle machine, exposée en 1855 par M. Bourdon, participait à la mise en mouvement des machines-outils avec celles de MM. Farcot, Révollier, etc., et a valu à son auteur la médaille d'or. Elle se distingue non-seulement par tout l'ensemble de sa construction et par l'application d'un condenseur, mais encore par son mode particulier de distribution et de détente, et par ses dimensions relativement grandes en ce qu'elles correspondent *à une course longue* et à une marche *lente*.

La fig. 1, pl. 20, représente l'ensemble de cette machine en coupe longitudinale, passant par l'axe du cylindre et de la condensation.

Les fig. 2 à 4, pl. 21, sont des détails, à une plus grande échelle, du cylindre moteur et de la distribution;

Les fig. 5 à 11, pl. 20 et 21, sont divers détails des organes principaux.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

### ENSEMBLE DE LA CONSTRUCTION

Le cylindre moteur A, dont la pl. 21 fait voir tous les détails, est fixé, par des pattes *a*, sur un bâti en fonte B formé de deux flasques séparées, reliées d'un bout par le cylindre même, et qui, après la jonction, forment un demi-cercle à l'extrémité opposée. Le cylindre est ajusté dans une enveloppe en fonte A′, qui porte les oreilles *a*, la table des orifices et les conduits de distribution. L'enveloppe est elle-même recouverte d'une chemise $A^2$, en bois, pour la conservation du calorique.

La tige du piston C est guidée suivant le mode indiqué pl. 9, c'est-à-dire qu'elle est assemblée avec une traverse D, dont les extrémités sont munies de coussinets rectangulaires en bronze, qui cheminent entre le dessus du bâti, dressé à cet effet, et une règle à nervure, ou glissière E, montée sur chacune des deux flasques B.

La bielle F, qui relie la traverse D à la manivelle motrice G, est fourchue sur plus de la moitié de sa longueur, pour le passage du mécanisme destiné à faire mouvoir la pompe à air; en dehors de la fourche, qui est formée de deux parties méplates, elle devient cylindrique et se termine par une tête à coussinets, avec bride démontante.

L'arbre moteur H a son premier palier fondu avec le bâti ; il porte le volant I, l'excentrique J qui fait mouvoir le tiroir de distribution, et une poulie K sur laquelle on recueille la puissance développée pour la transmettre, par une courroie, aux appareils à faire mouvoir.

L'introduction de la vapeur s'effectue directement dans la boîte L du tiroir, par un robinet valve M, monté sur une tubulure fondue avec celle-ci, et auquel vient s'adapter le conduit N communiquant avec le générateur.

La vapeur étant distribuée au cylindre par les orifices *b* et *b′* (fig. 2 et 3, pl. 21), son échappement s'effectue par le canal central *c*; ce canal contourne l'enveloppe et vient se terminer à la partie inférieure par une tubulure circulaire à bride, à laquelle est joint un conduit en fonte *d*, qui communique avec le condenseur.

Cet appareil, qui a été complétement décrit en principe, diffère seulement du modèle qui en a été donné, fig. 3, pl. 14, par quelques détails de construction.

Il se compose du condenseur proprement dit, qui est un récipient O, exactement cylindrique, et en communication avec la pompe à air P par un simple conduit *e*, au-dessus duquel se trouve le clapet de retenue *f*.

On a vu comment l'eau d'injection est introduite dans le condenseur par une tubulure *g*, dont l'ouverture est réglée au moyen d'une bonde conique *h*, qui peut être aisément manœuvrée du dehors. Le piston *i* de la pompe est aussi semblable à celui qui a été mentionné; il est muni d'un clapet plat *i′* jouant librement sur la tige *j*. Quant au clapet supérieur *k*, il porte, ainsi que nous l'avons annoncé (p. 465), la boîte à étoupe de la tige qui s'élève avec elle d'une certaine quantité, lorsque le piston remonte l'eau dans la cuvette P′.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

L'appareil de condensation a, dans cette machine, le mérite d'être complétement rattaché au bâti, condition très-avantageuse pour le montage et pour la commande de la pompe à air (1).

Le condenseur est muni, à sa partie supérieure, de deux oreilles par lesquelles il est fixé, au moyen de deux boulons, aux deux flasques du bâti B, qui portent également des pattes en rapport avec celles du condenseur.

La pompe à air est aussi suspendue au bâti, et le conduit inférieur *e*, qui la réunit au condenseur, rend l'ensemble parfaitement solidaire du restant de la machine. Comme le corps de la pompe est moins haut que le condenseur, la réunion avec les patins du bâti est opérée par quatre boulons-entretoises *l*, fixées par des écrous, avec quatre oreilles fondues avec la cuvette et quatre autres appartenant au bâti.

Le mouvement du piston de la pompe à air est pris sur la bielle motrice, au moyen d'une petite bielle Q disposée à l'intérieur de la fourche où elle est articulée sur un boulon-tourillon qui en traverse les deux côtés, près de la double tête. La bielle Q est assemblée de l'autre bout avec un levier R monté sur un axe d'oscillation *m*, dont les supports sont ménagés sur deux chaises *n* boulonnées avec les deux côtés du bâti. Cet axe porte deux autres leviers R′, d'équerre avec le précédent, lesquels commandent alors deux bielles R² qui sont rattachées, de chaque côté de la cuvette P′, avec une traverse *o* montée sur l'extrémité de la tige *j* du piston de la pompe.

Cette traverse, qui doit être guidée dans son mouvement vertical pour maintenir la rectitude de la tige du piston, est terminée à ses extrémités par des renflements cylindriques percés, emmanchés sur deux tiges *p* qui forment des guides parallèles. Ces tiges sont fixées, d'un bout, avec des bossages fondus avec la cuvette P′, et de l'autre avec des oreilles ménagées en prolongement des glissières E du piston.

La pompe alimentaire S reçoit sa commande de l'axe *m*, dont on utilise le mouvement oscillatoire, en fixant à l'une de ses extrémités un petit levier *m′* assemblé avec la bielle qui commande son piston. Cette pompe est le seul organe de la machine qui ne soit pas absolument adhérent au bâti : elle est fixée simplement sur une console en fonte rattachée au massif.

Avant d'examiner les détails des parties principales de cette machine, faisons remarquer l'installation du régulateur T, dont l'axe est monté sur une arcade U qui est boulonnée avec les deux glissières E. Le mouvement lui est donné par une paire de roues d'angle *q* et *q′*, dont l'une est fixée sur un bout d'axe tournant dans une douille fondue avec l'arcade; cet axe est actionné par l'arbre moteur à l'aide de deux poulies réunies par une courroie.

Ce régulateur n'est pas en communication avec la détente. Son action se fait sentir sur un papillon *r* (fig. 2 et 3, pl. 21), ajusté sur le conduit qui relie le robinet-valve M à la boîte à vapeur.

(1) C'est une disposition adoptée depuis longtemps par M. Bourdon, qui déjà, en 1849, en a fait l'application à deux machines accouplées, d'une puissance collective de 50 chevaux, et destinées à mettre en mouvement un moulin de 12 paires de meules. Ces machines sont complétement représentées et décrites dans le vol. IX de la *Publication industrielle*.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## DÉTAILS DE CONSTRUCTION

**Cylindre a vapeur** (fig. 2 à 4, pl. 21). — La fig. 2 est une élévation extérieure du système de distribution, tout monté sur le cylindre et sur le bâti;

La fig. 3 est une section transversale du même ensemble, suivant la ligne 1-2, passant par l'axe de l'introduction et de l'échappement de la vapeur;

La fig. 4 est une coupe horizontale faite par l'axe 3-4 du cylindre et de la distribution.

Le cylindre A est fondu à part de son enveloppe A', dans laquelle il est simplement ajusté sur des cordons saillants appartenant aux deux parties, et tournés très-exactement. Les cordons sont élargis à l'endroit des deux canaux $b$ et $b'$, pour empêcher la solution de continuité du joint.

L'intervalle compris entre le cylindre et l'enveloppe reçoit de la vapeur qui lui vient directement de la chaudière par un petit tube $s$, avec robinet $s'$, branché sur le robinet valve M. Le chauffage de l'enveloppe a lieu ainsi séparément, au lieu d'y établir d'abord la circulation de la vapeur avant de l'envoyer dans la boîte de distribution.

Quoique ce dernier mode soit assez généralement adopté aujourd'hui, il n'est pas absolument prouvé qu'un système présente des avantages très-marqués sur l'autre. Mais ce qui est mieux établi, c'est que la chemise ne doit pas être chauffée avec la vapeur de l'échappement, surtout lorsqu'il y a un condenseur. Cette méthode serait évidemment très-défectueuse et aurait pour résultat de refroidir le cylindre, au lieu de le réchauffer. Seulement on peut remarquer que, si le cylindre est chauffé séparément, il faut alors établir la communication par intermittence, ou, de toute façon, faire évacuer de temps à autre la vapeur de l'enveloppe, d'où elle n'a pas d'issue en marche, et où elle peut se condenser. Elle est d'ailleurs munie, à cet effet, d'un robinet de purge $t$ (fig. 1), branché sur le même conduit $t'$ que ceux $t^2$ adaptés, pour le même service, aux deux fonds du cylindre.

Le graissage de l'intérieur du cylindre est opéré par le robinet spécial $u$, qui est d'abord taraudé dans l'enveloppe, et qui porte, après le taraudage, une partie cylindrique, plus faible de diamètre, laquelle pénètre alors au travers de la paroi du cylindre A dans lequel l'huile doit être introduite.

La fig. 5, pl. 20, représente en détail la disposition de la boîte à étoupe traversée par la tige du piston, et le moyen employé pour la lubrifier.

La position horizontale s'opposant à ce que l'huile puisse être versée dans le godet qui accompagne ordinairement un presse-étoupe, la boîte est munie d'un robinet $u'$ dont l'usage est alors de faire pénétrer l'huile directement dans l'étoupe. Mais, comme celle-ci est fortement serrée et d'ailleurs séchée par la chaleur, il pourrait arriver que l'huile ne s'y introduisît pas. M. Bourdon, ainsi que d'autres constructeurs, place dans la boîte, et vis-à-vis du robinet graisseur, une bague en bronze $u^2$, qui entoure la tige, sépare l'étoupe en deux parties, et, recevant l'huile

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

dans une gorge pratiquée extérieurement, la laisse parvenir à la tige par la gorge intérieure qui est mise en relation, avec la première, par une série de petits trous.

Ce qui formait alors le godet du presse-étoupe n'est plus qu'une capacité close à l'aide d'une contre-partie qui s'y emboîte, et retient l'huile que la tige entraîne, et qui tomberait en dehors, au détriment de sa conservation et de la propreté.

Dans bien des machines horizontales, et surtout dans les locomotives, cette disposition est remplacée par un graisseur en forme de godet, ménagé sur le bord du presse-étoupe, à l'intérieur duquel est pratiquée une gorge qui retient l'huile.

Les fig. 2 et 3, pl. 21, montrent exactement la disposition de la chemise en bois $A^2$, dont l'intervalle avec l'enveloppe $A'$ est rempli de matière pulvérulente, non conductrice de la chaleur, telle que de la sciure de bois, de la poudre de charbon, etc. Nous avons déjà insisté sur cette précieuse méthode de protéger un cylindre à vapeur des refroidissements, et qui constitue l'un des procédés indispensables concourant à l'économie du combustible.

Piston moteur (fig. 6 et 7, pl. 20). — Nous avons dit qu'en général les pistons de machines à vapeur sont composés de segments métalliques, que des ressorts poussent sans cesse au contact des parois du cylindre. Ce fait général donne lieu à une infinité de dispositions différentes, soit dans la forme des segments, soit dans la manière d'y adapter les ressorts.

Voici la construction adoptée par M. Bourdon pour les pistons de ses machines.

La fig. 6 est une coupe longitudinale du piston, suivant la ligne brisée 5-6-7 ;

La fig. 7 en est une coupe transversale, faite suivant la ligne 8-9, le coin conique $v$ étant supposé retiré.

La partie frottante, celle qui constitue les segments dans une autre disposition, est formée de deux lames minces circulaires et concentriques $c'$ et $c^2$, coupées chacune en un point de leur circonférence et maintenues entre deux plateaux en fonte C et C', qui s'emboîtent par leurs moyeux, et sont réunis par trois boulons.

Le cercle $c^2$ est muni intérieurement d'une portée, tournée conique, et refendue sur tout son pourtour ; il peut ainsi, comme le premier, s'ouvrir et s'étendre circulairement en cédant à l'action de 24 ressorts à boudin $v'$. Ces derniers sont pris entre le plateau C et une bague $v$, qui porte des fraisures cylindriques dans lesquelles ils s'engagent ; la bague est tournée conique, de façon à s'ajuster exactement sur les portées intérieures du cercle $c^2$.

L'effort des ressorts, combiné avec la forme conique de la bague $v$, tend alors à faire ouvrir le cercle $c^2$, lequel exerce la même action sur celui $c'$, qui l'enveloppe, et le maintient en contact avec les parois du cylindre.

Comme la coupure du cercle extérieur $c'$ laisserait passer la vapeur d'un côté à l'autre du piston, on y enfourche une plaque $c^3$ (fig. 1), fixée sur le cercle intérieur, et qui, tout en laissant le premier jouer sur elle, ferme la communication.

Quant à la réunion de la tige avec le corps du piston, elle a lieu au moyen d'une clef qui traverse à la fois cette tige et le moyeu du plateau C', et appelle ce dernier à joint contre l'embase conique que porte la tige, et qui est encastrée dans une fraisure pratiquée *ad hoc* dans le plateau.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Distribution (fig. 2 à 4, pl. 21). — Le système de distribution à détente appliqué à cette machine peut être résumé par les observations suivantes :

1° Glissière de détente d'une seule pièce, et percée de lumières (p. 397);

2° Division des orifices du tiroir pour en accélérer les effets et étendre les limites des admissions possibles (p. 407);

3° Jeu de la glissière identique au système d'Edwards (p. 401), mais les crochets remplacés par une camme adaptée en dehors de la boîte à vapeur.

En rapprochant ces propriétés, qui ont été complétement expliquées, on possédera toutes les conditions remplies par ce mode de distribution, sur laquelle nous n'aurons à revenir que pour sa construction particulière, et principalement sur le procédé imaginé par l'auteur pour placer extérieurement la camme qui règle la course de la glissière de détente.

Ce but a été atteint en faisant la tige du tiroir creuse, afin d'y laisser passer une seconde tige $x'$, reliée à la glissière $x$, et qui porte extérieurement un châssis $x^2$ dont la fonction est d'arrêter la marche de la glissière, en butant contre une camme Y montée sur un axe fixe.

A cet effet, le tiroir principal V est enclavé dans un châssis en fer auquel est adaptée, par un taraudage, une tige creuse K', dirigée par le stuffing box de la boîte à vapeur, et qui vient se relier extérieurement avec un châssis $J^2$ auquel la bielle J' de l'excentrique est rattachée. Ce châssis est lui-même guidé par ses deux tringles longitudinales, qui glissent dans deux paliers appartenant à un support L' fixé sur le dessus du bâti B.

A l'endroit de son assemblage avec le châssis, la tige K' forme elle-même boîte à étoupe à la tige $x'$ de la glissière qui porte alors le cadre $x^2$, à l'intérieur duquel se trouve la camme Y. La tige continue au delà du cadre, et se trouve encore guidée par une douille en bronze montée sur une pièce $L^2$, boulonnée avec celle L' et qui est contre-coudée d'équerre, pour venir également supporter le tourillon $d'$ sur lequel la camme est fixée.

Ce tourillon est monté sur une douille fondue avec le support L'; la camme Y est clavetée avec lui, ainsi qu'un cadran $e'$ monté à son extrémité. Lorsqu'on veut changer la position de la camme, on fait tourner le cadran à la main, à l'aide d'un bouton $e^2$ dont il est muni à cet effet; le cadran entraîne avec lui le tourillon et la camme, et lorsqu'il est arrivé dans la position requise, on l'arrête au moyen d'une pince $e^3$, que l'on fait serrer à l'aide d'une vis de pression $e^4$.

Cette pince fait l'office de repère pour reconnaître la position donnée à la camme; elle porte une ouverture avec laquelle on fait coïncider des cercles tracés sur le cadran (fig. 2), et où sont inscrites les indications qui correspondent aux divers degrés d'admission.

Peu de chose suffira maintenant pour achever de faire comprendre les fonctions de ce mécanisme. Le tiroir, en marchant, entraîne avec lui la glissière, comme dans le système d'Edwards; mais lorsque le cadre appartenant à la tige de cette glissière rencontre la camme, elle cesse de suivre le tiroir dont les orifices se recouvrent, et la détente s'effectue. Ensuite on change le degré d'admission en tour-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

nant la camme, dont la plus grande dimension fait faire à la glissière de détente la plus faible course, ce qui correspond à la moindre admission, et *vice versâ*.

Quant à la marche à pleine vapeur, il suffit de mettre la camme en travers, ce qui amène la glissière au milieu du tiroir, position qu'elle conserve alors.

Si ce mécanisme, nécessité par le mouvement extérieur de la camme, est un peu compliqué, on recueille au moins, comme compensation, l'extrême réduction de la boîte à vapeur et des espaces nuisibles, et une réglementation facile.

Pour compléter ce qui est relatif au mécanisme de distribution, nous ajouterons quelques mots sur la construction de l'excentrique et du robinet-valve.

La fig. 8 représente cet excentrique et son collier en vue extérieure de face;

La fig. 9 en est une coupe transversale suivant la ligne 10-11.

On remarque, par ces figures, que les boulons $f'$ servant à réunir les deux parties du collier de l'excentrique se prolongent pour se relier par l'extrémité opposée avec la tringle principale J', qui porte à cet effet un renflement carré. Pour empêcher les vibrations de ces pièces et augmenter la roideur de l'ensemble, elles sont soutenues vers le tiers de leur longueur par un arc $f^2$ (fig. 1), qui traverse un bossage ménagé à la tringle J', et s'assemble à tenon dans des bossages semblables appartenant aux liens $f'$.

On a profité de l'excentrique pour y adapter, par trois vis, la couronne $r^2$ qui forme poulie de commande au régulateur, en évitant ainsi un calage spécial sur l'arbre.

Le robinet-valve M est analogue aux soupapes de prise de vapeur du générateur type (pl. 1). Il est composé d'un clapet conique disposé sur son siége, à l'intérieur de la boîte M, et qui est manœuvré de l'extérieur au moyen du volant-manivelle M', dont le moyeu forme écrou à sa tige, qui est filetée. Le volant est pris dans un collier à chapeau mobile, appartenant à un étrier en fer boulonné avec le couvercle de la boîte.

On se rappelle que la prise de vapeur servant à chauffer l'enveloppe a lieu sur la boîte M. Le robinet $s'$, affecté à cet usage, est adapté à un petit canal $s^2$, venu de fonte avec elle, et contourné de façon que son orifice intérieur débouche en arrière du clapet, dans la partie qui est toujours en rapport avec le générateur, tandis que l'orifice extérieur est ramené sur l'axe de figure de la boîte de distribution.

On a vu autre part le jeu du papillon $r$, qui est en relation avec le régulateur à boules, et a pour mission de conserver à la machine sa vitesse normale. On sait que ce papillon peut être supprimé et remplacé par l'organe de variation de la détente mis en rapport avec le régulateur.

Ainsi que l'indiquent les fig. 1 à 3, ce papillon est placé sur la tubulure communiquant avec la boîte à vapeur, entre le tiroir V et le robinet-valve. Il est monté sur un axe prolongé extérieurement par une tringle $r^3$ que le manchon du régulateur fait osciller lorsqu'il se déplace; cet effet est obtenu, comme à l'ordinaire, par une combinaison d'équerres et de leviers de renvoi.

Appareil de condensation. — Nous avons fait connaître cet appareil assez amplement pour n'avoir à parler que de quelques détails d'exécution qui ne pouvaient entrer dans la description d'ensemble.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Dans les premières machines de M. Bourdon, le clapet de retenue *f* était à charnière, et disposé, comme nous l'avons indiqué (fig. 3, pl. 14), à l'intérieur d'un conduit rectangulaire réunissant le condenseur à la pompe à air. Ici il est plat, à soulèvement libre; la levée est limitée par un trépied ajusté sur la bride de la tubulure cylindrique *e*, qui établit la communication avec le corps de pompe. Cela est très-simple et facile à monter comme à démonter. Il est vrai que le clapet *f* est enfermé; mais outre qu'il est aussi aisé d'enlever la tubulure *e* qu'un regard spécial, on sait que ce clapet a peu d'importance, puisque dans certains cas, on a pu s'en passer; et d'ailleurs, sa forme actuelle exclut l'idée de réparations fréquentes.

De même, dans des machines construites antérieurement, le piston de la pompe était commandé directement par un bras de levier solidaire de l'arbre oscillant *m*, ce qui obligeait de faire de sa tige un fourreau dans lequel la bielle oscillait. Cette tige, très-grosse alors, conduisait à des diamètres considérables, réduisait l'ouverture du clapet supérieur, et enfin donnait lieu à une augmentation de frottement. Le constructeur a préféré revenir à une tige mince, avec des directrices spéciales et les bielles $R^2$.

Enfin, on voit ici l'application d'un mécanisme déjà décrit (p. 464) pour manœuvrer la soupape d'injection *h*. L'extrémité supérieure traverse le couvercle du condenseur par une boîte à étoupe, puis est filetée dans le pignon d'angle *h'* qui lui forme écrou. Ce pignon engrène avec un autre pignon semblable $h^2$, dont l'axe porte une poignée à index en rapport avec un cadran placé en dehors du bâti B, et sur le côté même de la distribution, afin que toutes les manœuvres soient en même temps sous la main du conducteur de la machine.

Pompe alimentaire (fig. 10 et 11, pl. 20). — Cette pompe est fondue d'une seule pièce avec la chapelle des chambres à clapets, dont la fig. 11 montre une section faite sur leur axe commun 12-13. Elle est analogue à celle que nous avons décrite (p. 432), excepté l'assemblage du piston avec la bielle qui le commande.

Pour ne pas descendre cette pompe trop bas et la laisser à la portée du chauffeur, qui l'embraye, à volonté, à l'aide d'une clavette, on a fait le piston creux, en forme de fourreau, afin d'y loger la bielle $m^2$ qui est assemblée avec sa partie inférieure. Mais comme elle n'est pas adhérente au bâti et qu'il peut se produire de légères dénivellations entre elle et le mécanisme auquel elle est reliée, l'assemblage de la bielle avec le piston est à rotule sphérique. La tige $m^2$ est, en effet, terminée par une sphère; une moitié de son coussinet est prise sur le piston même, et l'autre moitié est rapportée par un taraudage.

Cette pompe est munie d'une soupape de sûreté *y*, fonctionnant dans les conditions qui ont été expliquées en décrivant spécialement les appareils d'alimentation.

Rappelons que, dans la plupart des machines munies d'un condenseur, la pompe alimentaire y prend, comme dans celle-ci, son eau d'alimentation, qui est toujours à une température assez élevée et d'environ 40 degrés. A défaut d'un meilleur procédé, tel que l'emploi d'un réchauffeur direct, on réalise ainsi une économie de combustible en rapport avec les températures de l'eau de condensation et de celle, ordinairement disponible, d'un réservoir indépendant ou d'un puits.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

VOLANT. — Le volant est composé de six bras, fondus séparément, et fixés par des boulons sur un plateau en fonte claveté sur l'arbre moteur. La couronne est également formée de six parties réunies par des tenons et des clavettes. Les bras s'y trouvent réunis par des entailles à queue d'hironde dans lesquelles leur extrémité est ajustée ; vis-à-vis de chaque bras un boulon traverse la couronne et pénètre d'une certaine quantité dans le bras où il est serré au moyen d'une clavette.

### DIMENSIONS ET CONDITIONS DE MARCHE

La puissance nominale de cette machine est de 25 chevaux-vapeur, sa vitesse de rotation réglée à 30 tours par minute. Nous allons en résumer les dimensions principales, et surtout celles qui peuvent servir de base à la quantité de travail qu'elle est capable de développer.

| | |
|---|---|
| Diamètre du piston à vapeur | $0^{m}$ 420 |
| Superficie correspondante | $13^{d.q.}$ 85 |
| Course | $1^{m}$ 160 |
| Vitesse linéaire moyenne par 1″ | $1^{m}$ 160 |
| Volume engendré pour un coup simple | $160^{d.c.}$ 660 |
| Diamètre du piston de la pompe à air | $0^{m}$ 290 |
| Superficie correspondante | $6^{d.q.}$ 60 |
| Course | $0^{m}$ 465 |
| Volume engendré pour un coup simple | $19^{d.c.}$ 140 |
| Volume du condenseur (y compris le conduit qui communique avec le cylindre) | $73^{d.c.}$ 00 |
| Diamètre du piston de la pompe alimentaire | $0^{m}$ 060 |
| Superficie correspondante | $0^{d.q.}$ 28 |
| Course | $0^{m}$ 225 |
| Volume engendré pour un coup simple | $0^{d.c.}$ 630 |
| Diamètre des tourillons de l'arbre moteur | $0^{m}$ 180 |
| Diamètre moyen de la jante du volant | $4^{m}$ 000 |
| Vitesse à la circonférence moyenne par 1″ (avec 30 tours) | $6^{m}$ 283 |
| Poids de la jante, approximativement | 2500 kilogr. |

Si l'on calcule la puissance de la machine à l'aide de la formule A (p. 333), on trouve qu'elle développera la puissance utile, pour laquelle elle est établie, dans les conditions suivantes :

Le rendement étant supposé égal à 0,6 de l'effet total sur le piston ;

La contre-pression dans le condenseur égale à $0^{atm.}$ 05 ;

La pression dans la chaudière égale à $3^{atm.}$ 5 ;

La détente pendant les 4/5 de la course du piston.

Mais l'arbre moteur est assez fort pour permettre de lui faire développer près de 40 chevaux, à la même vitesse, en changeant les conditions de pression et de détente de la vapeur.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## MODE SPÉCIAL D'APPLICATION DU CONDENSEUR

### A UNE MACHINE HORIZONTALE

L'application d'un appareil de condensation aux machines horizontales a toujours présenté quelques difficultés, pour le rendre adhérent au bâti de la machine, à cause de la commande; la diversité des moyens employés par les constructeurs en est une preuve. Il est donc utile d'en multiplier les exemples; c'est pourquoi nous avons choisi particulièrement pour les modèles que nous présentons à nos lecteurs, des machines à condensation, afin de leur montrer les dispositions adoptées par les meilleurs mécaniciens. Ainsi, après avoir vu celle de M. E. Bourdon, on étudiera, nous en sommes persuadés, avec beaucoup d'intérêt, celles de MM. Farcot qui ont tant fait sur les machines à vapeur, et ensuite celles de M. Bréval, de M. Legavrian, etc. Mais avant de les décrire, il nous a paru utile de parler de la disposition suivante qui a été essayée récemment sur une machine horizontale, afin d'en faire ressortir les avantages et les inconvénients.

La fig. 82 représente l'ensemble de cette machine en vue extérieure avec le condenseur B disposé comme dans la machine précédente (pl. 20 et 21), et en communication avec le cylindre par le conduit C. La pompe à air est alors placée extérieurement et fixée au bâti par des oreilles venues de fonte avec sa cuvette. Pour la mettre en mouvement, dans cette position, on a réuni au bouton de la manivelle motrice une manivelle plus faible, montée sur un bout d'arbre qui porte, en dehors du bâti, un plateau claveté F armé d'un tourillon auquel est assemblée une bielle E; celle-ci actionne une équerre en fer H, clavetée sur un arbre posé transversalement devant le cylindre sur deux supports de fonte fixés sur les bords du bâti; la deuxième branche de cette équerre est assemblée avec la petite bielle G attachée à la tige du piston de la pompe; cette tige est du reste guidée verticalement par une traverse posée sur le bord de la cuvette.

Une pompe comme celles de ce genre, qui marche avec un vide très-avancé, n'offrant de grande résistance que pour élever le piston, on a eu le soin que la bielle E ne travaille aussi qu'en tirant; lorsque le piston de la pompe descend, il est énergiquement repoussé de haut en bas par la pression atmosphérique, ce qui produit encore des efforts de traction sur les pièces auxquelles il est relié.

Tout ce mécanisme paraît dans de bonnes conditions, et rend la machine aussi simple que solide. Afin de conserver cette simplicité, on a profité de l'arbre transversal, qui oscille avec l'équerre H, pour commander le tiroir de distribution, ainsi que la pompe alimentaire, dont le piston est actionné par un bras de levier fixé à l'extrémité opposée de l'arbre. On supprime ainsi du même coup les excentriques ordinairement employés à ces deux services; on a dû seulement rendre le bouton d'assemblage de la bielle E avec le plateau F mobilisable à volonté, afin de régler facilement l'angle de calage, à cause du tiroir de distribution.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Fig. 82.

MODE SPÉCIAL D'APPLICATION D'UN CONDENSEUR

A UNE MACHINE HORIZONTALE.

Échelle de 1/30.




Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Rien ne s'oppose évidemment à ce que la pompe alimentaire soit commandée par les mêmes organes que la pompe à air. Mais pour le tiroir de distribution, il en est autrement. L'expérience a démontré qu'il peut se produire, dans le mouvement du piston de la pompe à air, des secousses ou des à-coup qui se répercutent alors sur le tiroir. C'est un inconvénient qu'il faut absolument éviter.

Par conséquent pour adopter cette disposition d'appareil de condensation, qui a certainement des avantages, il faudrait au moins commander le tiroir à part, au moyen d'un excentrique spécial, et placer la boîte à vapeur sur le côté du cylindre, car elle ne se trouve ici sur le dessus que par la position même de l'arbre transversal auquel le mouvement du tiroir était emprunté.

## MACHINES HORIZONTALES A DÉTENTE VARIABLE ET A CONDENSATION

Par **M. FARCOT** et ses fils

(PLANCHES 22 ET 23)

Les machines à vapeur construites dans les ateliers de M. Farcot et ses fils, jouissent aujourd'hui d'une considération européenne pour le degré de perfection auquel ces ingénieurs sont arrivés, soit sous le rapport des proportions générales bien entendues, soit pour les détails de construction qui ne laissent rien à désirer. On les regarde aussi comme économisant le combustible jusqu'à la limite maximum que l'industrie ait pu atteindre jusqu'à ce jour. Cette qualité dépend de diverses causes parmi lesquelles on doit évidemment distinguer, d'une part, l'exécution même de la machine pour obtenir le meilleur effet utile, et, d'un autre côté, le système particulier de générateur qui, comme on l'a vu pl. 2, est rationnellement établi, et permet de produire beaucoup de vapeur.

Il est également exact de dire que l'économie que ces machines procurent dépend de la détente prolongée à laquelle elles sont réglées, et qui ne peut rendre tout son effet que par une distribution en bon état de marche, des enveloppes protectrices contre les pertes de chaleur, un vide très-avancé dans le condenseur, etc.

Nous avons choisi deux modèles de machines à vapeur horizontales sorties récemment de la maison Farcot. L'une de ces machines est de la force nominale de 60 chevaux, et l'autre de 20 seulement. En principe, ces deux machines sont semblables, mais elles diffèrent toutefois, non-seulement par leurs dimensions, mais encore par l'application de leur appareil de condensation.

Par la description générale que nous allons en donner, nous renverrons successivement le lecteur tantôt à l'une et tantôt à l'autre, suivant les similitudes ou les différences qui existent entre chacune de leurs parties respectives.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## ENSEMBLE DE LA CONSTRUCTION DES MACHINES DU SYSTÈME FARCOT

(FIG. 1 A 8, PL. 22, ET FIG. 9 A 12, PL. 23)

La fig. 1 de la pl. 22 représente l'élévation extérieure de la machine de 60 chevaux, regardée du côté de la distribution, la pompe à air et la pompe alimentaire étant supposées vues en coupe ;

La fig. 2 est une section horizontale partielle du cylindre à vapeur et de la boîte de distribution ;

Les fig. 3 à 8 sont des détails du mécanisme du régulateur et du palier de l'arbre de la manivelle ;

La fig. 9, pl. 23, représente l'élévation extérieure de la machine de 20 chevaux, avec la pompe à air en coupe longitudinale ;

La fig. 10 est une projection horizontale du même ensemble qui est complétement dessiné en vue extérieure ;

La fig. 11 est une vue de bout du côté du cylindre à vapeur, la pompe à air étant en coupe transversale ;

La fig. 12 est une section transversale partielle du cylindre et de la boîte de distribution, faite par l'axe du canal d'échappement.

Dans les deux machines, le cylindre à vapeur A, renfermé dans une enveloppe en fonte A′, est fixé sur le bâti B, qui est fondu d'une seule pièce. Ce bâti, ayant très-peu de hauteur, ses côtés sont formés de panneaux sans évidements. Des parties saillantes sont ménagées des deux côtés pour former, avec les règles en fonte C, les glissières du piston, et diminuer l'épaisseur des coussinets-guides. Le bâti se rétrécit à partir du cylindre, afin de ne laisser à la traverse du piston que la longueur qui lui est strictement nécessaire pour recevoir la double tête de la bielle D, et deux petites bielles E qui commandent la pompe à air. Ces deux bielles se voient sur le plan de la machine de 20 chevaux (fig. 10, pl. 23).

La bielle principale est ronde dans la grande machine et à section carrée dans la deuxième ; dans les deux cas, elle est terminée par une tête fermée, ou sans bride mobile, dans laquelle sont ajustés les coussinets où joue le bouton de la manivelle F. Celle-ci est calée, comme à l'ordinaire, sur l'arbre moteur en fer G reposant sur un premier palier B′, venu de fonte avec le bâti, tandis que son deuxième palier doit être fixé sur une maçonnerie voisine.

L'arbre moteur porte un excentrique circulaire H pour le tiroir de distribution, une poulie pour commander le régulateur, et de plus le volant I, qui a dû être enlevé sur le dessin pour ne pas cacher d'autres parties de la machine.

La boîte à vapeur J renferme le tiroir de distribution et les organes spéciaux pour la détente, suivant les formes et dispositions représentées pl. 11, fig. 5 à 9.

L'installation du régulateur à force centrifuge K, dans ces machines, a cela de particulier qu'elle se fait sur le cylindre à vapeur, dans le but de le rapprocher de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la boîte de distribution et d'en débarrasser les glissières. Il est monté sur un bâti en arcade K′ qui se fixe sur des oreilles venues de fonte avec l'enveloppe A′.

Les fonctions de ce régulateur ont reçu un commencement d'explication en décrivant la machine verticale représentée pl. 17. Nous en donnons plus loin un complément détaillé.

L'appareil de condensation appliqué sur la grande machine (pl. 22) se compose d'une pompe à air à double effet L, mise en rapport avec un récipient M, disposé à côté de la machine, qui est le condenseur proprement dit, où se fait l'injection, et où se rend directement la vapeur échappée du cylindre. (Ce condenseur, indiqué seulement en lignes ponctuées sur la pl. 22, est représenté complétement, et en coupe, sur la pl. 23.)

La pompe à air est installée au-dessous du bâti principal, sur le massif en maçonnerie dans lequel une fosse a été ménagée à cet effet. Elle est commandée par un fort balancier en fonte N, qui oscille d'après un support fixe établi sur le fond de la fosse, et qui reçoit son mouvement de la traverse du piston moteur à l'aide des deux petites bielles F mentionnées ci-dessus. Le piston de la pompe alimentaire se trouve sur le même axe que celui de la pompe à air avec lequel il est alors relié et commandé, simultanément.

Cette disposition a l'inconvénient d'en séparer les divers points d'appui et surtout de placer les deux pompes dans une situation qui rend leur visite difficile.

C'est pour cela que MM. Farcot la remplacent actuellement par celle indiquée pl. 23, et qui consiste à reporter la pompe à air en arrière du cylindre, en la commandant au moyen d'un mécanisme dont les points d'appui importants sont tout à fait inhérents au bâti principal.

Ainsi, le balancier à deux branches N est monté sur un axe d'oscillation posé horizontalement sur deux supports N′, exactement clavetés et boulonnés avec les deux côtés du bâti B. Transformé en levier du premier genre, ce balancier est prolongé au delà de son point d'appui, et s'assemble avec une longue bielle P à laquelle est attachée directement la tige de la pompe à air. Cette bielle suit un couloir ménagé dans le massif en maçonnerie et au-dessous du cylindre, tandis que la pompe à air se trouve tout à fait dégagée, quoique étant encore au-dessous du sol.

Cette bielle ne comporte aucune brisure ou charnière entre la tige de la pompe et le balancier, en vue de compenser l'arc d'oscillation de ce dernier. Guidée par un seul support P′ appuyé sur la maçonnerie, elle *flèchit* suivant un angle qui a pour rayon sa longueur même, et pour corde la flèche de l'arc engendré par son point de réunion avec le balancier N.

Suivant les proportions mêmes des pièces relatives à cette machine, la distance de l'axe vertical du balancier à celui du support P′ est de $2^{m}46$, et la flèche de l'arc est égale à 32 millimètres environ. Il en résulte que l'angle de flexion totale est à peu près de $0^{o},45'$, pour lequel la tige de la bielle, dans le support, résiste par un diamètre de 42 millimètres. Dans ces conditions, les constructeurs ont constaté que la flexion s'opérait bien, sans influer sur la rigidité du métal et sans désorganiser le point d'appui.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le déplacement de la pompe à air amène forcément celui de la pompe alimentaire O, dont le corps est ici fondu de la même pièce; son piston est commandé par la bielle P, au moyen d'un piton fixé perpendiculairement, près de son assemblage avec la tige de la pompe à air.

Nous ferons remarquer que MM. Farcot adoptent de préférence, pour le sens de la rotation, de l'arbre moteur, dans leurs machines, celui qui est indiqué par des flèches sur les figures, et qui peut être désigné par cette expression : *Le volant rabattant du côté du cylindre.*

Pour comprendre cette préférence, il faut se rappeler que, lorsqu'une machine tourne dans le sens opposé, c'est la glissière inférieure qui supporte la pression due à la décomposition du mouvement (p. 346). Mais, comme elle supporte de toute façon le poids propre des pièces, on se rapproche mieux de l'équilibre en faisant tourner la machine en sens contraire, ce qui a pour résultat de reporter alors l'effort, par décomposition, sur la glissière supérieure (p. 347).

## DÉTAILS DE CONSTRUCTION

Cylindre et distribution. — Le cylindre et la distribution sont semblables dans les deux machines.

L'enveloppe A′ est fondue avec deux patins *a* qui en ont toute la longueur, et par lesquels le cylindre est fixé sur le bâti. Autant pour la stabilité de cet assemblage que pour la régularité du coup d'œil, ces patins sont complétement encastrés dans la plate-bande supérieure du bâti, et les oreilles qui reçoivent les boulons figurent pour les chapiteaux des colonnes ménagées au bâti, au passage des boulons.

Les deux fonds du cylindre sont creux pour les motifs déjà exposés (p. 491).

La boîte de distribution J, dont la disposition intérieure a été très-complétement décrite (p. 404 à 414), est fondue avec une tubulure ouverte de part en part (fig. 12, pl. 23), et mise en rapport avec un canal *b* qui appartient à l'enveloppe A′, et débouche librement dans le vide existant entre elle et le cylindre. Cet orifice, qui est muni d'une soupape *c*, est destiné à permettre l'introduction, dans la boîte du tiroir, de la vapeur qui est amenée préalablement du générateur dans l'enveloppe par une tubulure spéciale *d*. La soupape *c*, par laquelle on règle cette introduction, et qui sert à la mise en train et à opérer l'arrêt de la machine, est manœuvrée du dehors au moyen d'une petite manivelle *c′*, laquelle est montée sur un axe taraudé dont l'écrou est fixé dans le couvercle qui recouvre simultanément la boîte à vapeur et la partie qui renferme la soupape.

L'excentrique, qui commande le tiroir de distribution, est encore un disque plein H, monté en deux parties sur l'arbre G, pour pouvoir le mettre en place, après que la manivelle et le volant sont à la leur; un collier *e* en fonte, et également en deux parties, entoure le disque; l'une des deux est fondue avec une queue qui est assemblée avec la barre, ou tige cylindrique *f*, laquelle est reliée à la tige du tiroir. Pour empêcher la flexion de cette tige, les boulons servant à réunir les deux par-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ties du collier sont prolongés de façon à former des jambes de force $f'$, qui viennent se réunir et se boulonner avec la barre $f$. Dans la grande machine, pl. 22, où ces pièces sont beaucoup plus développées, l'ensemble de la barre $f$ et des jambes de force $f'$ est, de plus, réuni par une entretoise $f^2$.

La réunion de la barre d'excentrique avec la tige du tiroir mérite une mention particulière, à cause du moyen très-simple employé pour assurer la rectitude du mouvement.

Dans le deuxième modèle de machine, pl. 23, la barre $f$ est terminée par une fourche qui est articulée avec une moufle $g$, montée par une douille clavetée sur la tige du tiroir. Cette moufle est forgée avec un bout de tige en prolongement de celle du tiroir, et toutes deux sont maintenues, en glissant, dans deux pitons $g'$, boulonnés avec la plate-bande du bâti, qui présente un élargissement ménagé *ad hoc*.

Dans la grande machine, pl. 22, cette disposition est un peu différente. L'excentrique ne se trouvant pas sur le même axe que la tige du tiroir, cette dernière suit directement les deux pitons $g'$ et porte entre eux une douille, avec bouton en porte à faux avec lequel s'assemble la barre de l'excentrique; celle-ci est alors simplement droite et terminée par une tête ovale et ouverte, pour y loger des coussinets. On remarque aussi que, pour diminuer la longueur des pitons, le bâti porte, pour les recevoir, une saillie très-prononcée.

Mécanisme du régulateur. — Nous avons dit quelques mots (p. 492) du jeu de ce mécanisme, qui relie les mouvements du régulateur à la camme de détente, et dont les fonctions remplacent le papillon employé dans d'autres machines.

Nous allons maintenant l'examiner dans tous ses détails.

Les fig. 1 et 3, ou 9 et 11, permettent de comprendre l'ensemble de la disposition du régulateur, et sa relation avec la camme de détente par le cadran monté sur l'axe de cette camme, à l'extérieur de la boîte à vapeur.

L'axe du régulateur étant pris dans des collets ménagés au bâti K′, porte une roue d'angle $h$, commandée par une semblable $h'$, montée sur un axe transversal $i$, qui a pour point d'appui une douille ménagée au bâti K′, et un palier fixé sur une console fondue avec le même bâti. L'extrémité de l'axe $i$ porte une poulie $j$, mise en relation, par une courroie, avec celle $j'$ montée sur l'arbre moteur.

Nous avons dit que les mouvements verticaux de la douille, qui est enlevée par le jeu des boulets du régulateur, avaient pour résultat de faire embrayer l'une ou l'autre des deux paires de cônes $k$, et de faire tourner, dans les deux sens, un arbre horizontal $l$, qui communique ses mouvements à une tige verticale $m$, laquelle agit alors sur le cadran $n$, à l'aide d'une vis sans fin.

Les fig. 4 à 6, pl. 22, nous permettront de compléter cette explication.

La fig. 4 est une section, à une plus grande échelle, de l'axe principal et des pièces qui composent le mécanisme d'embrayage du régulateur de la grande machine (pl. 22).

Les fig. 5 et 6 représentent, en vue de face extérieure et en section horizontale, la disposition du cadran monté sur l'axe de la camme et sa relation avec l'ensemble de ce mécanisme.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pour arriver à bien faire comprendre les combinaisons de cet appareil, ce qui présente de prime-abord quelques difficultés, nous en expliquerons les fonctions avant d'insister sur les détails.

Des quatre plateaux coniques $k$, $k'$, $k^2$ et $k^3$, il est important de remarquer d'abord que les deux extérieurs, $k$ et $k^3$, peuvent être considérés comme *invariablement fixés* à l'arbre $o$ du régulateur, et *tournant* alors avec lui, indépendamment de tout autre effet.

Les plateaux intérieurs $k'$ et $k^2$ seront, au contraire, regardés, *à priori*, comme *fixes*, soit sans mouvement rectiligne ni circulaire, lorsque le régulateur ne produit pas d'effet.

Ces deux plateaux $k'$ et $k^2$, portent, réunies avec chacun d'eux, les roues d'angles $l^2$ et $l^3$, et sont montés, indépendants l'un de l'autre, sur une douille à double portée $q$, ajustée sans clavetage et à friction libre sur l'axe du régulateur. Cette douille, qui dans aucun cas ne tourne sur elle-même, est armée d'une portée cylindrique qui sert de support à l'une des extrémités de l'arbre $l$, lequel communique avec l'axe vertical $m$. L'arbre $l$ porte une roue d'angle $l'$ qui engrène simultanément avec les deux autres $l^2$ et $l^3$, et ces trois roues, dans l'hypothèse qui nous sert de point de départ, sont complétement immobiles, ainsi que les plateaux $k'$ et $k^2$, l'arbre $l$, celui $m$, et enfin de tout ce qui est relié à la camme de détente.

Mais le manchon $p$, que le régulateur fait mouvoir lorsque les boulets s'élèvent ou retombent, est rattaché rigidement par une longue clef $p'$, logée dans l'arbre $o$ qui est creux, à la douille $q$, que nous avions supposée immobile avec tout ce qu'elle porte.

Alors, admettons successivement les deux effets contraires dus au régulateur, et voyons ce qui en résulte.

Si les boulets s'écartent, le manchon $p$ est soulevé, entraînant avec lui la longue clef $p'$; celle-ci soulève la douille $q$, et tout son équipage, en faisant osciller légèrement l'arbre $l$, d'après son point d'appui intermédiaire dans la rotule, dont le support $q'$ est fixé au bâti K'; mais la douille étant ainsi enlevée, le plateau $k'$ vient s'emboîter sur celui $k$, tournant avec l'arbre $o$, et se trouve alors entraîné par friction dans son mouvement de rotation. Par conséquent, la roue $l^2$, qui en dépend, tourne également, fait tourner celle $l'$ avec l'axe $l$ qui la porte : constatons ce premier résultat avant d'énumérer son effet définitif sur la camme de détente. Notons encore que le mouvement de rotation du plateau $k'$ et des deux roues $l^2$ et $l'$ a évidemment été communiqué à la roue $l^3$ et au plateau $k^2$, mais sans qu'il en résulte d'autre effet, puisque ce dernier est, en cet instant, tout à fait libre.

Dans le cas contraire où les boules du régulateur retombent, parce que la machine diminue de vitesse, le manchon $p$ s'abaisse, la clef longue fait descendre la douille $q$, et cette fois c'est le plateau $k^2$ qui vient se mettre en prise avec celui $k^3$. Comme précédemment, ce plateau, se mettant en mouvement, fera tourner l'axe $l$; mais par la propre disposition des roues d'angle cet axe tournera dans un sens différent de la première fois : c'est là l'un des points importants de la démonstration actuelle qui nous a permis de faire comprendre comment le régulateur, suivant que ses branches s'écartent ou se rapprochent, fait tourner l'arbre $l$ dans un sens

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ou dans l'autre, tandis qu'il reste immobile lorsque le régulateur tourne à la vitesse que la machine doit conserver.

Ainsi que l'indiquent les figures d'ensemble, l'arbre $l$ porte une petite roue d'angle $r$ engrenant avec une seconde $r'$, qui est fixée sur l'axe vertical $m$; cet axe est guidé à sa partie inférieure par une douille en bronze $s$, faisant partie d'une pièce retenue d'un côté par une tige $s'$ taraudée dans le couvercle de la boîte à vapeur, et de l'autre par l'axe $s^2$ de la camme de détente. La branche horizontale de la pièce $s$ forme un index fixe, en rapport avec les divisions tracées sur le cadran $n$ qui, comme nous allons le dire, tourne avec l'axe de la camme.

Ce cadran est en effet muni, sur une partie de sa circonférence, d'une denture qui engrène avec une vis sans fin ménagée à la tige $m$, à son passage dans la douille $s$ qui est ouverte latéralement, et porte une barbe opposée à l'index pour laisser à la fois pénétrer le cadran et le maintenir engrené avec la vis.

D'après ce qui précède, on comprendra facilement que l'arbre oscillant $l$, en tournant dans un sens ou dans l'autre, communique ces mouvements à la tige verticale $m$ qui, par sa vis sans fin, fait alors tourner le cadran $n$ ainsi que l'axe $s^2$ de la camme. Celle-ci, en changeant de position, fait, comme on le sait, varier le degré de la détente.

Cette disposition de régulateur lié à la détente a pour mérite, comme nous l'avons déjà montré (p. 493), de modifier la détente quand les résistances, en variant, influent sur la vitesse de la machine, mais tout en lui permettant de reprendre sa vitesse normale, et en conservant le nouveau degré de détente acquis, si les résistances persistent dans leur modification.

On vient, en effet, de voir que les mouvements verticaux du manchon $p$ du régulateur font mettre en prise l'un ou l'autre des cônes $k'$ ou $k^2$, ce qui fait tourner l'arbre $l$ d'une certaine quantité; mais quand ce dernier effet a eu tout son résultat, que le degré de détente a changé de façon à ramener la machine à sa vitesse, le régulateur reprenant la sienne, le cône qui était en prise est abandonné, ce qui ne change rien au résultat obtenu, tant que le régulateur tournant à sa vitesse, les cônes $k'$ et $k^2$ se tiennent éloignés des deux autres.

Si le mécanicien veut lui-même régler le degré de détente auquel doit marcher la machine, il fait tourner à la main la tige $m$ qui peut être munie, pour cela, d'un petit volant $m'$ (fig. 1, pl. 22).

Quelques détails sont nécessaires maintenant pour faire comprendre certaines parties de ce mécanisme.

Par la fig. 4, pl. 22, on voit que l'arbre du régulateur est composé de trois parties, deux pleines $o'$ et $o^2$, et une intermédiaire formée d'un tube creux $o'$, pour loger la tige $p'$ qui relie la douille $q$ au manchon mobile $p$.

Le cône, ou plateau supérieur $k$, est rattaché au tube $o'$ par l'intermédiaire d'un manchon à bride $o^3$, avec lequel il est assemblé au moyen de boulons qui permettent de régler l'écartement, de ce plateau $k$ par rapport à celui inférieur $k^3$. Le manchon $o^3$ est fixé au tube $o$ par une clef dont le passage au travers de la tige $p'$ s'effectue par une mortaise allongée, de façon à laisser à cette tige la liberté de ses mouvements verticaux.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le plateau inférieur $k^3$ est aussi monté, et retenu par une clef, sur la partie $o^2$ de l'arbre. Ce dernier est alors entouré par un ressort à boudin $o^4$, qui a pour mission de tenir le même plateau constamment à sa position, tout en lui laissant une certaine élasticité au moment de sa mise en prise avec celui $k^2$. Un procédé analogue a été employé pour garder l'élasticité du plateau supérieur $k$.

La douille $q$, qui porte les plateaux $k'$ et $k^2$ et les roues $l^2$ et $l^3$, est surmontée d'une espèce de cuvette rapportée $q^2$, dans laquelle est une rondelle en fer qui reçoit la clef d'assemblage avec la tige $p'$. Cette cuvette est disposée pour recevoir l'huile nécessaire au graissage de la douille $q$, en son frottement sur l'arbre du régulateur. A ce propos, nous dirons que chaque plateau, et principalement celui $k$, au lieu d'être un disque plein, comme le dessin semble l'indiquer, doit être formé, dans les grandes dimensions, de la couronne conique reliée au moyeu central par des bras minces et courbes comme ceux d'une poulie. C'est par l'intervalle des bras que l'on peut alors verser l'huile dans la cuvette $q^2$.

On a remarqué que l'arbre horizontal $l$ est oscillant, sans pour cela que la tige $m$, qu'il commande, soit réellement extensible. Comme il faut néanmoins que cet effet soit rendu, l'arbre $l$ est percé pour recevoir un boulon à fourchette qui vient s'assembler avec une douille $q^3$ ajustée à frottement libre sur la tige $m$, au-dessus de la roue d'angle $r'$. Celle-ci peut glisser sur cette tige et fait en quelque sorte partie d'un petit plateau $r^2$ (fig. 1), qui repose simplement sur un plateau semblable appartenant à un canon $m^2$ monté sur la même tige $m$, qui le traverse. Ce canon renferme un ressort à boudin qui, prenant son point d'appui sur une bague à poignée $m^3$, taraudée sur la tige $m$, tend à pousser constamment le canon et son plateau contre celui $r^2$ de la roue dentée. Il en résulte que, si l'arbre $l$ vient à osciller, la douille $q^3$ peut le suivre en se déplaçant sur la tige $m$, et le ressort renfermé dans le canon $m^2$, qu'il soit comprimé ou qu'il se distende, maintient toujours l'engrenement des roues $r$ et $r'$.

Quant à la bague $m^3$, qui sert de point d'appui au ressort, son taraudage permet d'en régler la tension en la faisant tourner par ses poignées (1).

Appareil de condensation. — Cette partie des machines de MM. Farcot est très-perfectionnée, et mérite une mention toute particulière. Nous nous reporterons, pour le décrire, à la pl. 23 où il se trouve représenté avec le plus de détails.

La pompe à air L, qui est à double effet, est fondue avec une caisse en fonte, dont l'intérieur est divisé en deux capacités complétement distinctes comme le double jeu du piston. Elle est aussi fondue, comme on l'a fait remarquer, avec le corps de la pompe alimentaire.

Cette partie est surmontée d'une autre caisse rectangulaire L', ouverte par le haut, et percée dans le fond de deux ouvertures sur lesquelles sont disposés les clapets de refoulement Q et Q', correspondant aux deux divisions du corps de pompe.

Cette caisse, qui forme la bâche dans laquelle se rend l'eau élevée par la pompe,

(1) MM. Farcot ont imaginé tout récemment un nouveau système de régulateur dont on pourra voir la description complète dans le recueil la *Publication industrielle*, vol. XIII. Nous en ferons mention néanmoins dans ce traité à propos d'autres machines des mêmes constructeurs.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

est munie d'une tubulure $L^2$ pour recevoir le conduit de trop-plein par lequel l'eau de condensation est dirigée à l'extérieur.

Les clapets d'aspiration R et R′ sont placés (fig. 11) au débouché d'une tubulure $t$ fondue de la même pièce que la pompe, et qui est bifurquée à son entrée pour fournir une issue distincte dans les deux divisions de la caisse.

Cette même tubulure $t$ possède, au-dessus de chacun des clapets d'aspiration, un autre débouché $t^2$, sur lequel on place un clapet additionnel fonctionnant comme ceux R et R′, mais qui s'ouvre très-près du fond de la bâche L′. On désigne ces clapets additionnels sous le nom de *reniflards*, parce que leur fonction est de donner une issue spéciale à l'air ou aux gaz non condensables qui se dégagent de l'eau et de la vapeur, et qui peuvent ainsi s'échapper par les clapets supérieurs Q sans pénétrer dans la pompe.

Tous les clapets sont en caoutchouc et d'une construction analogue à ce qui a été décrit (p. 467). Ceux R et R′, qui sont complétement enfermés et d'un accès difficile, sont disposés sur un siége indépendant, qui permet de les y monter avant la mise en place; on vient ensuite les appliquer, tout prêts à fonctionner, sur l'ouverture qui leur est réservée. Comme, dans cette position, on ne peut pas non plus pratiquer de taraudage pour fixer le siége, et qu'il faut pourtant se réserver la faculté de le sortir aisément, le constructeur a appliqué, pour maintenir chacun d'eux, quatre boulons $u$, agissant comme des entretoises *répulsives*, c'est-à-dire que chaque boulon, s'appuyant d'un bout sur le siége du clapet, l'écrou qu'il porte à l'autre bout vient serrer contre une saillie venue de fonte tout exprès avec le corps principal L, et permet de faire le joint avec toute la solidité désirable.

Nous avons dit que le condenseur était un récipient cylindrique M posé horizontalement, un peu au-dessous du sol de la machine, et tout à fait en dehors du massif. La vapeur échappée du cylindre se rend au condenseur par le canal $A^3$ (fig. 12), terminé par une bride qui est boulonnée avec un bout de conduit $u'$ (fig. 9 et 11), lequel est joint au condenseur par un emboîtement.

L'entrée de la vapeur a lieu ainsi, tout à fait à l'extrémité du condenseur où se fait aussi l'injection par le robinet M′, dont la construction a été représentée sur la fig. 7 de la pl. 14. Il y a néanmoins entre ces deux exemples de légères différences, qui portent surtout sur des détails d'exécution que l'on peut négliger ici.

Ce condenseur offre cette particularité, qu'il est divisé en deux par un diaphragme $u^2$, percé d'un très-grand nombre de petits trous qui achèvent la division de l'eau injectée.

La disposition générale de l'appareil ne se prête pas à ce qu'il puisse être enveloppé d'eau. Cependant la boîte à étoupe, traversée par la tige du piston de la pompe, est *noyée*, suivant des procédés qui diffèrent dans les deux machines.

Dans la grande machine (pl. 22), c'est le même moyen qui a été indiqué pl. 14 : une cuvette et deux garnitures pour le passage de la tige.

Dans la deuxième machine (pl. 23), la boîte à étoupe est simple et renferme une bague creuse qui entoure la tige; cette bague communique avec un petit conduit $t^3$ qui lui amène de l'eau de la bâche L, de façon que la tige a pour garnitures deux

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

parties d'étoupe entre lesquelles se loge une tranche d'eau qui rend impossible toute rentrée d'air.

Pour terminer ce sujet, il reste à expliquer le mécanisme de commande de la pompe à air appartenant à la grande machine (pl. 22).

La tige de cette pompe et celle de la pompe alimentaire sont clavetées sur un manchon qui traverse une mortaise ménagée au balancier M, avec lequel il est réuni par deux tourillons ajustés dans des trous cylindriques; il en résulte que ce point du balancier doit être conduit *en ligne droite*, au lieu de décrire un arc de cercle, comme cela aurait lieu si l'extrémité inférieure du balancier était montée sur des tourillons dont le centre soit invariable.

Ces tourillons inférieurs sont, au contraire, engagés dans des coussinets qui peuvent glisser verticalement dans deux guides rectangulaires S appartenant aux supports N′, et le balancier est *suspendu* par deux bielles latérales S′ dont le point fixe d'oscillation est pris sur les chevalets N′, à la hauteur de l'axe même des tiges.

Il s'ensuit que le balancier, étant entraîné par sa partie supérieure, se déplace en obéissant aux bielles S′ qui ne peuvent que décrire un arc de cercle 1-2 autour de leur point fixe. Cet arc établit une compensation qui permet au point d'attache des tiges de rester sur leur axe horizontal rectiligne, et dans ce mouvement, les tourillons inférieurs du balancier se déplacent légèrement dans leurs guides S.

Nous n'insisterons pas davantage sur cette disposition que les constructeurs ont presque abandonnée pour la remplacer par celle que la pl. 23 représente.

Palier principal (fig. 7 et 8). — On a vu (p. 349) que la position horizontale de la machine pouvait donner lieu à une observation particulière à l'égard du palier de l'arbre-moteur, et que quelques constructeurs l'inclinent.

M. Farcot lui conserve sa position verticale, mais il établit la coupure des coussinets dans le même sens, ce qui tend au même but et est assez généralement imité aujourd'hui.

Par les fig. 7 et 8, qui représentent, en coupes perpendiculaires l'une à l'autre, le palier B′ de la grande machine (pl. 22), on peut voir, en effet, que les deux coussinets $v$ sont disposés pour être rapprochés sur l'arbre suivant la direction horizontale, autrement dit, dans la direction même de l'axe du mouvement.

Ils sont soumis au serrage de deux coins en fer ou en fonte $x$, que l'on fait descendre à volonté à l'aide de leurs vis $x'$, assemblées à rappel avec les coins et taraudées dans le chapeau. Ce dernier est alors complétement fixe et réuni au corps du palier par des boulons spéciaux $y$; il porte le godet graisseur dont le trou est rempli par une vis $z$, à la circonférence de laquelle on a pratiqué une entaille triangulaire et en sifflet, destinée à laisser écouler l'huile. En serrant la vis à fond, l'huile ne peut aucunement pénétrer dans les coussinets; mais, en la détournant plus ou moins, il en passe des quantités plus ou moins grandes, parce qu'on amène à l'orifice des sections différentes de sa rainure triangulaire.

Nous complétons les documents relatifs à ces machines, aussi bien ecmbinées qu'exécutées, par un résumé de leurs dimensions principales et de leurs conditions de marche.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

### DIMENSIONS ET CONDITIONS DE MARCHE

### DES DEUX MACHINES REPRÉSENTÉES PL. 22 ET 23.

PREMIER MODÈLE (pl. 22). — Cette machine, dont la puissance nominale est de 60 chevaux-vapeur, avec 36 révolutions par minute, a les dimensions principales suivantes :

| | |
|---|---|
| Diamètre du piston à vapeur | $0^{m}$ 650 |
| Superficie correspondante | $33^{d.q.}$ 18 |
| Course | $1^{m}$ 300 |
| Vitesse linéaire par 1″ | $1^{m}$ 560 |
| Volume engendré par un coup simple | $431^{d.c.}$ 340 |
| Diamètre du piston de la pompe à air | $0^{m}$ 380 |
| Superficie correspondante | $11^{d.q.}$ 34 |
| Course | $0^{m}$ 450 |
| Volume engendré pour un coup simple | $51^{d.c.}$ 00 |
| Volume du condenseur (y compris les conduits qui communiquent avec le cylindre) | $178^{d.c.}$ 00 |
| Diamètre des tourillons de l'arbre moteur | $0^{m}$ 200 |

Avec ces dimensions, les constructeurs admettent que la machine, pour développer sa force nominale, doit marcher avec de la vapeur à 5 atmosphères dans la chaudière, et une admission de 1/15 seulement, c'est-à-dire une détente à 15 fois le volume primitif. Ils admettent, en outre, que le vide dans le condenseur soit avancé jusqu'au point de ne présenter que 1/10 d'atmosphère de contre-pression; cette résistance passive s'abaisse souvent, avec des machines *lentes*, à une pression mesurée, à l'indicateur de vide, par 3 centimètres de mercure, soit environ 1/25 d'atmosphère.

Si, d'après ces données, on calcule la puissance théorique de cette machine à l'aide de la formule A (p. 333) et au moyen de la table (72), indiquant, pour le travail de 1 mètre cube de vapeur à 1 atmosphère détendu à 15 fois son volume primitif, 38317 kilogrammètres, on trouve, pour cette puissance théorique développée directement sur le piston, 81 chevaux-vapeur.

Par conséquent, la puissance nominale, celle que l'on doit recueillir sur l'arbre du volant au moyen du frein, étant 60, il s'ensuit que l'effet utile doit atteindre

$$60 \div 81 = 0{,}74.$$

Les expériences faites sur les machines de MM. Farcot donnent, généralement, 78 p. 0/0 d'effet utile, en rapportant la quantité de travail trouvée à l'aide du frein sur l'arbre du volant, à celle calculée et développée directement sur le piston, et en faisant abstraction des espaces perdus du cylindre, lesquels doivent être rapportés à la dépense réelle de vapeur. C'est un point qui sera développé plus tard à propos des proportions générales des machines.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ce chiffre d'utilisation est très-considérable en le comparant à celui sur lequel on comptait ordinairement, et qui ne dépassait guère 60 p. 0/0. Il doit être attribué à la bonne exécution de la machine, dont la distribution est assez bien réglée, le vide au condenseur assez parfait et les résistances passives suffisamment atténuées, pour que des détentes aussi prolongées rendent tout leur effet.

Le volume total du condenseur, y compris les conduits de communication avec le cylindre à vapeur, est égal aux 2/5 du volume engendré par le piston moteur dans un coup simple;

Le rapport des volumes engendrés par le piston de la pompe à air et le piston à vapeur, est de 1 à 8.

Deuxième modèle (pl. 23). — Cette machine est d'une puissance nominale de 20 chevaux-vapeur, avec 48 tours par minute. Ses conditions de marche, comme pression, détente de la vapeur et contre-pression du condenseur, sont les mêmes que pour la précédente.

Le rapport calculé de la puissance théorique à celle nominale, est aussi 74 p. 0/0, autrement dit, si l'on compare le résultat du calcul au chiffre de la puissance nominale qui doit être recueillie sur l'arbre moteur, on obtient ce même chiffre d'utilisation. Ordinairement l'effet utile s'élève avec la puissance de la machine, attendu que les pertes dues, soit aux refroidissements, soit aux diverses résistances passives, n'augmentent pas dans le même rapport que les dimensions.

Néanmoins, dans les limites de proportion des deux machines précédentes, MM. Farcot adoptent une même base, c'est-à-dire une même quantité de vapeur dépensée par force de cheval à l'unité de temps, ce qui fait que dans les deux cas aussi, l'effet utile, résultant des dimensions et des conditions de marche, doit être identique.

Voici les principales dimensions de la machine de 20 chevaux :

| | |
|---|---|
| Diamètre du piston à vapeur | $0^{m}$ 415 |
| Superficie correspondante | $13^{d.q.}$ 53 |
| Course | $0^{m}$ 800 |
| Vitesse linéaire par $''$ | $1^{m}$ 280 |
| Volume engendré par un coup simple | $108^{d.c.}$ 24 |
| Diamètre du piston de la pompe à air | $0^{m}$ 250 |
| Superficie correspondante | $4^{d.q.}$ 90 |
| Course | $0^{m}$ 280 |
| Volume engendré pour un coup simple | $13^{d.c.}$ 72 |
| Volume total du condenseur | $62^{d.c.}$ 00 |
| Rapport des volumes de la pompe à air et du cylindre à vapeur | 0, 125 = 1/8 |
| Rapport des volumes du condenseur et du cylindre à vapeur | 0, 6 = 3/5 |
| Diamètre des tourillons de l'arbre moteur | $0^{m}$ 150 |

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## MACHINE HORIZONTALE A DÉTENTE VARIABLE ET A CONDENSATION

Par M. BRÉVAL, à Paris

(PLANCHE 24)

M. Bréval, ingénieur-mécanicien, que nous avons eu déjà l'occasion de citer (p. 282), construit aussi des machines à vapeur horizontales perfectionnées, qui se distinguent, particulièrement, par leur système de distribution à détente variable et par la disposition de l'appareil de condensation, qui appartiennent spécialement à ce constructeur. Nous allons décrire une machine sortie de ses ateliers; mais en insistant surtout sur ces deux points.

La fig. 1 de la pl. 24 en est une vue extérieure de face, l'appareil de condensation seul en coupe;

La fig. 2 est une section transversale faite sur le cylindre, par le centre de la boîte de distribution;

La fig. 3 est une section horizontale partielle de la boîte à vapeur et du cylindre moteur;

Les fig. 4 et 5 représentent, en détail, le tiroir circulaire affecté à l'introduction de la vapeur dans la boîte de distribution.

### ENSEMBLE DE LA CONSTRUCTION.

Considérée sous le point de vue de ses organes moteurs principaux, cette machine ne diffère pas sensiblement de celles décrites ci-dessus, et pourrait être comparée, jusqu'à un certain point, à la machine représentée pl. 20 et 21, à l'exception, comme nous l'avons dit, de la distribution et du condenseur.

Le cylindre à vapeur A, muni de son enveloppe en fonte et d'une chemise en bois, est fixé par ses patins *a* sur un bâti B fondu d'une seule pièce.

La traverse du piston est guidée latéralement dans deux glissières formées chacune par une partie dressée, ménagée au bâti, et une règle à nervure D, qui est isolée par des douilles-entretoises et fixée par des boulons *b* qui traversent le tout.

A la traverse du piston est assemblée la bielle E dont le fût est rond et galbé en vue de la résistance à la compression; l'extrémité qui correspond à la traverse est fourchue et l'autre est simple.

Comme le constructeur s'est appliqué à ramener tous les mécanismes de service du même côté, opposé à celui du volant, l'arbre moteur F est coudé, ou en vilbrequin, pour former la manivelle et recevoir l'action de la bielle; la partie droite principale porte le volant G et l'organe de commande, poulie ou engrenage; l'autre bout de l'arbre, celui qui est en avant, reçoit les excentriques de distribution, et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

la manivelle qui commande la pompe à air. Il est à peine nécessaire d'ajouter que l'arbre moteur s'appuie alors sur deux paliers ménagés symétriquement aux deux côtés du bâti.

Conformément à ce que nous avons déjà montré plusieurs fois, la vapeur est introduite d'abord dans l'enveloppe, par le conduit H, et de l'enveloppe elle parvient à la boîte de distribution I, lorsqu'on lui livre passage en ouvrant le robinet-valve J. Le conduit *c*, qui communique de l'enveloppe à ce robinet, est muni du papillon *d* mis en rapport, comme à l'ordinaire, avec le régulateur à force centrifuge, dont nous expliquerons plus loin l'installation.

Voyons, dès à présent, en quoi consiste le système particulier de distribution appliqué à cette machine par le constructeur.

La boîte à vapeur renferme un tiroir principal K, mis en mouvement par un excentrique circulaire L, lequel tiroir est percé de deux lumières, comme celui d'Edwards (p. 401), et se trouve muni d'une glissière mobile M, commandée par un second excentrique N, ainsi que cela a été expliqué pour une détente fixe (p. 390). Mais ici la détente est rendue variable, à l'aide d'un mécanisme qui permet de changer la course de la glissière et de rendre cette course : inférieure, égale ou supérieure, à volonté, à celle fournie directement par l'excentrique spécial N.

A cet effet, la barre N′, de cet excentrique, est assemblée avec un bouton, dont la base est engagée dans une coulisse O qui oscille sur un tourillon pris dans une douille $D^2$ fondue avec la règle à nervure D; cette coulisse porte une oreille à laquelle s'assemble, par articulation, une petite bielle P, reliée directement à la tige de la glissière M, de détente. Il en résulte que le mouvement ordinaire de l'excentrique N fait décrire un arc de cercle à la coulisse O, qui agit comme un levier intermédiaire, et donne à la glissière de détente un mouvement de va-et-vient.

Mais si l'on remarque que le point d'assemblage de la barre de l'excentrique avec la coulisse est variable à volonté, on comprendra que la distance au point fixe d'oscillation, en changeant, modifie, en même temps, l'amplitude de l'oscillation et la course de la glissière de détente. On déplace facilement, en effet, le point d'attache de la barre N′ à l'aide d'une vis *e*, taraudée dans le prolongement du tourillon *f*, et maintenue dans un piton *g* fixé après la coulisse; il suffit, pour cela, de faire tourner la vis en agissant, à la main, sur le volant-manivelle *h* qu'elle porte; la vis tournant sans avancer, c'est le tourillon *f* qui se déplace dans la coulisse en entraînant l'ensemble de la barre N′ et du collier qui doit, pendant cette manœuvre, tourner sur l'excentrique, comme cela se produit dans tout appareil à changement de marche.

Ainsi, prenant la position indiquée fig. 1, puisque la barre d'excentrique est assemblée, pour l'instant, vers l'extrémité de la coulisse, et que, d'ailleurs, l'arc d'oscillation, en ce point d'assemblage, a invariablement pour corde la course même de l'excentrique, il en résulte que le point d'attache de la bielle P, et par suite la glissière de détente, décrivent une course *moindre*, et actuellement à peu près moitié, puisque ce point d'attache occupe environ le milieu entre le point fixe d'oscillation et le bouton *f*.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Supposons maintenant ce bouton relevé dans la coulisse et amené sur l'axe même de la bielle P, la glissière de détente effectuera exactement la course fournie par son excentrique.

Enfin, relevons le point d'assemblage de la barre N′ plus haut; et la course de la glissière de détente sera *plus grande* que celle de l'excentrique.

En se reportant à ce qui a été dit (p. 392) sur le mode de détente par une glissière mobile, on conçoit aisément comment on peut obtenir une détente variable à l'aide de ce mécanisme, dont nous dirons encore quelques mots plus loin.

Nous devons parler maintenant de l'appareil de condensation, qui forme un ensemble placé verticalement au-dessous de l'arbre moteur, dont l'extrémité porte une petite manivelle $k$ pour commander la pompe à air par une bielle $l$, laquelle pompe est à double effet, et, par conséquent, à piston plein.

L'appareil est composé de deux parties superposées, reposant sur une plaque de fondation qui en forme en même temps le fond; celle inférieure comprend le corps de pompe Q et deux colonnes latérales creuses $i$ et $i'$, qui établissent la communication entre ce corps de pompe, le condenseur proprement dit, et le conduit d'expulsion; l'autre partie est constituée par deux récipients verticaux symétriques R et R′, fondus avec le couvercle du corps de pompe, et formant le prolongement des conduits latéraux $i$ et $i'$; l'un R est mis en relation avec le cylindre à vapeur par un vaste tuyau de fonte $R^2$, et constitue le condenseur, et l'autre R′ forme la colonne d'ascension de l'eau expulsée qui s'échappe de l'appareil par un conduit déverseur $j$ communiquant avec l'extérieur.

Les faces intérieures des colonnes R et R′ sont munies de parties dressées qui servent de guides à la traverse de la tige du piston de la pompe. Celle-ci est mise en relation avec ces deux colonnes par quatre clapets en caoutchouc $m$, $m'$, correspondant à l'aspiration dans la première et au refoulement dans la seconde.

La capacité qui constitue le condenseur proprement dit est composée de celle du conduit $R^2$ ajoutée à la partie supérieure de la colonne R, à laquelle vient aboutir le conduit d'injection $o$ muni de son robinet $o'$ (fig. 2). Le conduit $R^2$ est un simple tube cylindrique primitivement ouvert à chacune de ses extrémités, fermé du côté du cylindre par une plaque pleine et assemblé de son autre bout avec une tubulure appartenant à la colonne R; sa relation avec le cylindre à vapeur est établie par une tubulure d'équerre boulonnée avec celle qui termine le canal circulaire d'évacuation $R^3$, venu de fonte avec le cylindre.

En ménageant au tube $R^2$ une issue indépendante, fermée en marche par une plaque pleine, le constructeur s'est réservé la possibilité de marcher accidentellement sans condensation, ce qui peut se faire en retirant cette plaque pour adjoindre au tube un conduit dirigeant la vapeur dans l'atmosphère, le mouvement de la pompe à air ayant été préalablement suspendu.

Cette disposition de condenseur est recommandable pour sa simplicité, et a l'avantage de ne pas apporter à la machine de modification importante pour son installation : autrement dit, le même modèle de machine peut très-bien être employé pour marcher avec ou sans condensation. Faisons remarquer encore que cette

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

machine nous offre, par ce condenseur placé loin du cylindre à vapeur, un exemple d'un fait dont il a été parlé plus haut (p. 472).

La pompe alimentaire S, est également horizontale, et ramenée, ainsi que tous les appareils de service, sur le devant de la machine. Son piston est commandé par l'excentrique L, affecté déjà à la mise en mouvement du tiroir de distribution. Comme la distance entre la pompe et l'excentrique est trop petite pour employer une bielle à la transformation du faible mouvement oscillatoire du collier, auquel le piston est rattaché, cet assemblage a lieu au moyen d'un coussinet rectangulaire monté dans une chappe $q$, fixée au piston, lequel coussinet est pris dans une glissière formée par une partie dressée sur le collier et une plaque $p$ qui s'y trouve fixée parallèlement, par des boulons à double écrou. Alors le collier de l'excentrique fait mouvoir le piston qui est maintenu en ligne droite dans sa garniture d'étoupe, tandis que le mouvement oscillatoire est racheté par un léger glissement du coussinet d'assemblage dans la glissière.

C'est un mode de transformation de mouvement qui est fréquemment employé, même pour des pistons à vapeur, et sur lequel nous aurons l'occasion de revenir, particulièrement à propos des machines marines dans lesquelles l'appareil spécial d'alimentation, que l'on nomme *petit cheval*, a quelquefois été disposé ainsi, dans dans le but de diminuer l'étendue de la commande, par la suppression de la bielle.

Comme dans la plupart des machines pourvues d'un condenseur, la pompe alimentaire prend l'eau par un conduit $z$, qui relie la boîte du clapet d'aspiration avec la partie inférieure de la colonne $i'$, où s'élève l'eau refoulée par la pompe à air.

## DÉTAILS DE CONSTRUCTION.

Distribution. — On a vu que la vapeur arrive directement du générateur dans l'enveloppe du cylindre, d'où elle se rend à la boîte de distribution I qui renferme le tiroir et la glissière de détente.

Cette enveloppe est munie, à cet effet, d'un conduit $c$ qui correspond à un orifice circulaire $c'$, d'un plus grand diamètre, et appartenant à la boîte à vapeur avec laquelle il communique par un orifice latéral $r$.

Les fig. 4 et 5 de la pl. 24 représentent en détail cette partie de la boîte de distribution. Elles permettent de voir que l'orifice $r$ peut être ouvert ou fermé, à volonté, par un segment circulaire en bronze $s$, parfaitement ajusté et rodé dans l'ouverture cylindrique $c'$. Ce registre, ou segment, porte un évidement où pénètre librement une portée carrée qui appartient à un axe J, lequel traverse une boîte à étoupe ménagée au couvercle qui ferme à la fois l'ouverture $c'$ et la boîte de distribution.

Par conséquent, en agissant à la main sur le volant J', fixé sur l'axe J, on entraîne le segment dans le sens convenable pour recouvrir ou dégager l'orifice $r$, suivant qu'il faut empêcher ou favoriser l'introduction de la vapeur.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Ce système de robinet est d'un bon effet. N'étant pas lié rigidement à son axe, l'excès de pression sur la face supérieure le tient parfaitement appuyé sur son siége; l'usure est sans effet et ne donne lieu à aucun serrage ni réparation.

Le tiroir K et la glissière M sont pris dans des cadres en fer reliés aux tiges K′ et M′, lesquelles sont guidées d'abord par leurs boîtes à étoupe respectives, et ensuite par une console T à paliers jumeaux qui est boulonnée au bâti. C'est à la suite de ce support que les deux tiges sont rattachées, l'une directement à la barre L′ de son excentrique, et l'autre après l'oreille de la coulisse de détente O.

Régulateur. — Le régulateur U est monté, par son axe, sur une arcade D′ venue de fonte avec l'une des deux glissières D du piston. Son manchon mobile est mis en rapport avec un petit bras de levier $t$ formé, dans sa longueur, de deux parties qui se renfoncent l'une dans l'autre, pour racheter l'amplitude de l'arc qu'il engendre, lorsque les mouvements verticaux du manchon le font osciller. Ce levier est fixé sur un axe transversal $u$ qui porte un second levier $t'$, d'équerre avec le précédent, et relié par une tringle $v$ à la petite manivelle $v'$ montée sur l'axe du papillon $d$ (fig. 2). L'axe transversal $u$ a pour supports, d'un bout l'arcade D′, et de l'autre une tige $u'$ clavetée sur la glissière D située du côté correspondant.

Quant à la commande du régulateur, elle s'effectue encore par une paire de roues d'angle $x$ et $x'$, cette dernière portant sur son axe une poulie qui communique, par une courroie $y$, avec celle fixée sur l'arbre moteur.

Étude du mode particulier de détente variable. — Nous allons maintenant examiner, sous son point de vue théorique, le fonctionnement du mécanisme qui opère la variation de la détente, mécanisme dont nous n'avons constaté ci-dessus que les effets extérieurs.

Ces considérations théoriques sont simples et se résument ainsi :

1° La longueur de la glissière égale à la distance, de centre en centre, des lumières d'introduction, mesurée sur le revers du tiroir;

2° L'excentrique, qui commande la coulisse, calé à 45° d'avance (par rapport au sens de la rotation) sur celui du tiroir.

La variation de la détente s'obtient donc d'après les bases suivantes :

*La longueur de la glissière et l'angle de calage* invariables;

*La course de la glissière, seule,* variable. La plus petite course correspond à la détente la plus prolongée, *et vice versâ*.

Ces conditions forment un cas particulier de plus à ajouter à ceux qui ont été résumés et prévus (p. 396).

En examinant avec soin les conditions du fonctionnement de la coulisse O, on trouve qu'elles ne produisent pas autre chose que la réduction ou l'augmentation, *ad libitum,* de la course de la glissière, excepté une légère perturbation apportée par l'obliquité de la barre de l'excentrique, lorsque cette barre est rattachée à la coulisse à une distance assez sensible de la ligne horizontale des centres, au-dessous ou au-dessus.

Néanmoins, ces perturbations peuvent être sans influence nuisible : pour cela il faut, d'abord, que la barre N′ soit d'une grande longueur comparée au développe-

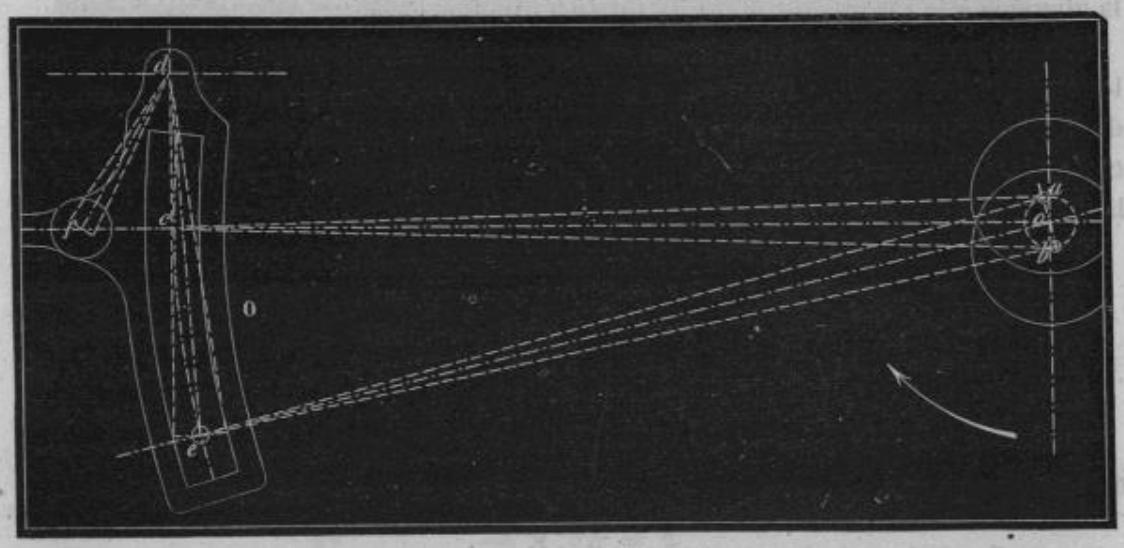
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ment circulaire de la coulisse, et que le rayon de courbure de cette dernière soit déterminé dans de certaines conditions, que nous allons faire connaître.

Supposons la glissière de détente exactement au milieu de sa course et la barre de l'excentrique amenée sur la ligne des centres, d'où la glissière aurait alors pour course le diamètre du cercle d'excentricité, et l'excentrique serait aussi au milieu de sa course circulaire. Si nous prenons cette position pour point de départ, il faut, pour que le mécanisme soit dans de bonnes conditions, qu'en déplaçant le bouton *f* dans la coulisse, ce mouvement n'apporte aucun dérangement dans la position de la glissière qui doit, en effet, conserver sa position centrale en rapport avec celle de l'excentrique, *quelle que soit l'obliquité de la barre*, par suite de son changement de position sur la coulisse.

Soit, fig. 83, le tracé géométrique des mouvements de l'excentrique N, de la barre N′ et de la coulisse O. Le centre de l'arbre moteur est *o*; *o a* ou *o b* est le rayon d'excentricité, et *d* le point fixe d'oscillation de la coulisse, à laquelle nous savons que la glissière est rattachée en un point *f*.

Fig. 83.




Si nous mettons l'excentrique au milieu de sa course, son centre en *a* ou en *b*, et que le point d'attache de la barre sur la coulisse soit justement en *c* sur la ligne horizontale *o c* des centres, en même temps que sur l'axe vertical passant par le centre *d* d'oscillation de la coulisse, il est clair que la glissière effectuera exactement une course égale à *a b*, le diamètre du cercle engendré par le centre de l'excentrique, et *c* ou *f* sera le point de repère de la position centrale du tiroir.

Or si, dans cette position, l'on vient à déplacer angulairement la barre de l'excentrique pour amener, par exemple, son bouton en *e*, il faut *que la coulisse n'éprouve aucun mouvement*, afin que la glissière ne soit point dérangée de cette position centrale, qu'elle doit conserver tant que l'excentrique n'est pas lui-même déplacé.

Pour obtenir cet effet, il faudrait que la courbure de la coulisse fût un arc de

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

cercle passant par le point $c$, et décrit du centre autour duquel tourne le collier de l'excentrique quand on déplace la barre; mais comme le centre de l'excentrique peut être en $a$ ou en $b$, il en résulte que la courbure cherchée doit être une moyenne entre les arcs que l'on décrirait des points $a$ et $b$ avec la longueur $ac$ ou $bc$ pour rayon : il paraît donc convenable de choisir le centre même $o$ de l'arbre moteur, et $oc$ pour rayon, ce qui donne à la coulisse l'arc géométrique de courbure $ce$, que l'on prolonge un peu au-dessus de la ligne des centres.

On ne peut donc pas obtenir un résultat mathématiquement rigoureux; mais si l'on fait le tracé en donnant à ces pièces les dimensions qu'elles ont sur la pl. 24, on verra que les erreurs commises sont presque inappréciables.

En résumé, pour toutes les positions occupées par la barre sur la coulisse, celle-ci décrit, du point $d$ comme centre, un arc de cercle dont le rayon, qui est ici $de$, est variable, et qui a $ab$ pour corde invariable, d'où la course correspondante de la glissière est exprimée par la corde d'un angle égal, mais qui a $dc$ pour rayon. Il est vrai que le point d'attache réel de la glissière est à une distance $df$, du point d'oscillation $d$, plus grande que $dc$; mais ce rayon $df$ n'étant pas normal à l'axe $oe$ du mouvement produit, il en résulte une décomposition qui ramène la course de la glissière à la valeur qui vient de lui être attribuée.

Pour calculer les effets définitifs de cette combinaison, il suffit alors de chercher les courses diverses que l'on donne à la glissière de détente, en variant la position de la barre N′ sur la coulisse, ce qui se réduit à comparer les valeurs des rayons $de$ et $dc$, dont l'un, celui $dc$, est invariable, ainsi que la corde engendrée par l'autre; la valeur à déterminer est alors la corde engendrée par le rayon $dc$.

Nommant,

$dc$, le rayon invariable;
$de$, le rayon variable, donné par la position de la barre N′;
$ab$, la corde invariable de l'angle décrit par le rayon variable $de$;
$x$, la corde cherchée, ou la course de la glissière dans chaque cas,

on aura toujours :

$$x = ab \times \frac{dc}{de}.$$

Appliquant cette simple proportion aux conditions que les dimensions actuelles de ce mécanisme permettent de remplir, on trouve que la glissière de détente peut accomplir des courses variables entre 25 et 100 millimètres, celle directe de l'excentrique N étant 60.

Pour terminer ce sujet, nous montrerons un exemple du jeu de la glissière au moyen d'un tracé basé sur le même principe que celui représenté sur la fig. 2 de la pl. 11.

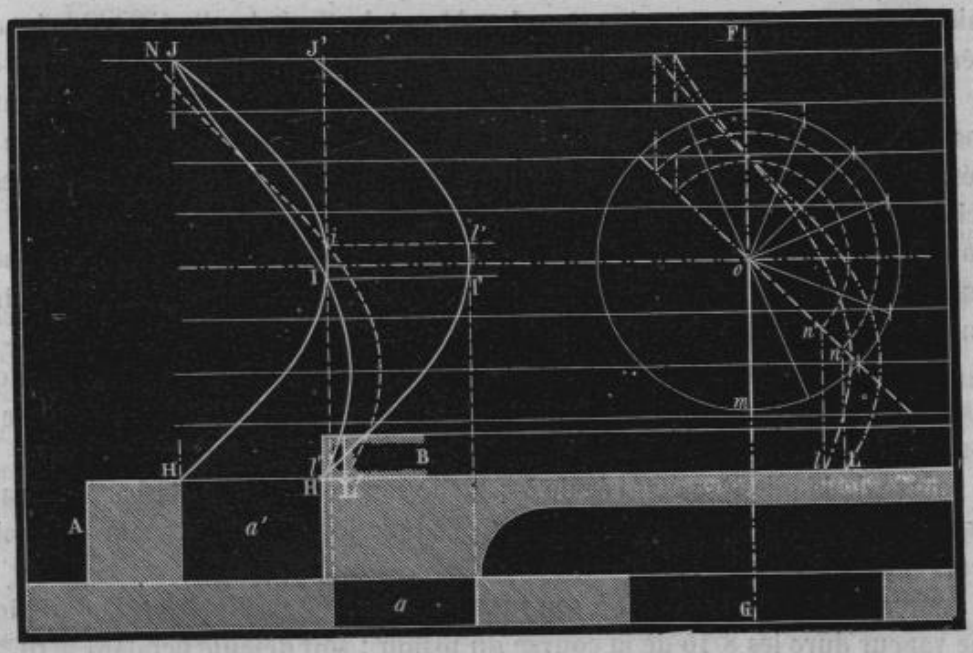
Suivant cette méthode, dont la fig. 84 est une application à la distribution qui nous occupe, FG représente l'axe du mouvement du tiroir et de la glissière B; $a$ est l'un des orifices d'introduction au cylindre, et $a'$ la lumière correspondante du tiroir. Les courbes HIJ et H′I′J′ indiquent la marche de cette lumière, par rapport

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

à l'orifice, et pour un demi-tour de l'excentrique, dont le cercle décrit par le centre est tracé sur l'axe FG avec son rayon *om*.

Pour trouver la marche de la glissière de détente et la mettre en relation avec celle du tiroir, il faut se rappeler, d'abord, qu'elle a pour longueur la distance de centre en centre des lumières du tiroir, mesurée sur la face même contre laquelle elle glisse. Pour simplifier le tracé, fig. 84, nous supposons que les lumières du tiroir ne sont point obliques, ce qui ne changera rien aux conditions définitives, moyennant que l'on donne alors à la longueur de la glissière la distance des centres des lumières, prise sur la face du tiroir en contact avec la table même des orifices. Il faut noter encore que l'excentrique qui commande la coulisse est calé invariablement à 45 degrés par rapport à l'excentrique de distribution.

Fig. 84.




Ces deux points de départ établis, on constate que le jeu de la coulisse O (fig. 1, pl. 24) a exactement pour résultat de modifier la course de la glissière dans la même condition que si l'on substituait à l'excentrique N d'autres excentriques de courses successivement différentes, mais suivant le même angle de calage.

Par conséquent, du centre *o* (fig. 84), traçons le rayon *om* de l'excentrique du tiroir au milieu de sa course et le tiroir lui-même dans cette position ; puis, menons un rayon *on*, à 45 degrés, correspondant au calage invariable des excentriques idéals, de courses différentes, dont il s'agit d'étudier les fonctions.

Si l'on suppose, d'abord, que la coulisse soit réglée de façon à figurer un excentrique ayant *on* pour rayon, *n*L sera l'axe de la glissière, le tiroir A étant au milieu de sa course, et la glissière sera complétement indiquée en portant la moitié de sa longueur, déterminée, comme il a été dit tout à l'heure, de L en L'.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

En procédant comme on l'a vu (p. 394), on tracera alors la courbe de marche L′ *i* N de la glissière, et son intersection *i*, avec celle H I J du tiroir, qui correspond au moment de la détente, permettra de connaître où celui-ci se trouve au même instant; par les notions relatives à une recherche semblable (p. 368), on en déduira facilement la position correspondante du piston.

Enfin, supposons une autre réglementation de la coulisse, et qui donne à l'excentrique un rayon plus petit *o n′*; *n′ l* sera l'axe de figure de la glissière dont la demi-longueur invariable sera reportée en *l l′*; la courbe de marche correspondante *l′* I J indique encore, par son intersection I avec H I J, le moment de la détente pour cette réglementation particulière.

En résumé, chaque réglementation différente de la barre d'excentrique sur la coulisse change la course et la position de la glissière par rapport au tiroir, et par conséquent la détente, bien que l'angle de calage reste invariable.

Faisons remarquer, en terminant, qu'au départ du tiroir la glissière marche dans le même sens que lui, quelle que soit la réglementation de la coulisse, ce qui fait que, pour tous les degrés de détente, la lumière du tiroir reste découverte pendant un temps relativement plus long qu'avec la plupart des autres systèmes de glissière employés. C'est ce que la fig. 84 permet de juger par la direction des courbes de marche de ces deux organes de la distribution.

D'après les courses diverses que la glissière est susceptible d'effectuer, comme on l'a vu précédemment, et, pour cette machine spéciale, on trouve, à l'aide du tracé géométrique, les limites de détente suivantes :

La course de la glissière réduite à la course minimum 25 millimètres, la durée de l'admission à pleine vapeur correspond environ aux 15/100 de la course du piston : soit à la détente pendant les 85/100;

La course de la glissière étant égale à celle de son excentrique (la barre N′ ramenée sur l'axe horizontal, dans la coulisse), l'admission à pleine vapeur est égale à la demi-course du piston;

La course de la glissière étant à son maximum de 100 millimètres, l'admission à pleine vapeur dure les 8/10 de la course du piston : soit détente pendant 2/10.

Remarque. — Il est dit précédemment que la glissière de détente a pour longueur la distance de centre en centre des lumières du tiroir, mesurée sur son revers : c'est en effet sur cette donnée que le tracé a été fait. Mais le plus généralement le constructeur augmente cette longueur d'environ la moitié de la largeur d'une lumière, attendu que, dans le cas d'une détente très-prolongée, l'orifice masqué pour la détente se trouverait démasqué avant la fin de la course du tiroir, ce qui doit être évité dans tous les cas. Le tracé (fig. 84) peut servir à étudier cette circonstance. On voit que, la glissière ayant pour course le cercle dont le rayon est *o n′*, sa courbe de marche *l′* I J rencontre de nouveau, en J, celle du tiroir, et que, à partir de cet instant, l'orifice serait découvert si le tiroir n'était pas lui-même parvenu à son point mort.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

### DIMENSIONS ET CONDITIONS DE MARCHE

DE LA MACHINE REPRÉSENTÉE PL. 20.

La puissance nominale de cette machine est de 20 chevaux, avec une vitesse de rotation de 50 tours par minute. Elle a les dimensions principales suivantes :

| | |
|---|---|
| Diamètre du piston à vapeur | $0^{m}$ 350 |
| Superficie correspondante | $9^{d.q.}$ 62 |
| Course | $0^{m}$ 900 |
| Volume engendré par un coup simple | $86^{d.c.}$ 58 |
| Diamètre du piston de la pompe à air | $0^{m}$ 220 |
| Superficie correspondante | $3^{d.q.}$ 80 |
| Course | $0^{m}$ 280 |
| Volume engendré pour un coup simple | $10^{d.c.}$ 64 |
| Volume total de l'espace disponible pour la condensation | $56^{d.c.}$ 00 |
| Diamètre des tourillons de l'arbre moteur | $0^{m}$ 125 |
| Diamètre moyen de la jante du volant | $3^{m}$ 500 |
| Poids id. id. | 2780 kilogrammes. |

Dans ces conditions, cette machine devra fonctionner avec de la vapeur à 4 atmosphères de pression absolue, la détente réglée à la durée des 4/5 de la course du piston, soit 1/5 d'admission à pleine vapeur, et la contre-pression dans le condenseur à 1/10 d'atmosphère, pour développer la puissance nominale de 20 chevaux-vapeur, en admettant un rendement minimum de 50 p. 0/0 de l'effet théorique direct sur le piston.

## MACHINE HORIZONTALE A DÉTENTE VARIABLE ET A CONDENSATION

Par **M. LEGAVRIAN** et fils, constructeurs à Moulins-Lille

(PLANCHE 25)

Cette machine, par laquelle nous terminons notre choix de modèles du type horizontal à un seul cylindre, est construite par MM. Legavrian, de Moulins-Lille, ingénieurs-mécaniciens, connus depuis longtemps pour la construction mécanique en divers genres.

La différence principale à signaler, comparativement aux précédentes, réside dans la disposition de l'appareil de condensation, dont la pompe à air est inclinée, comme l'ont fait déjà, depuis une douzaine d'années, MM. Thomas et Laurens, et

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

ensuite d'autres constructeurs, pour des machines actionnant directement des soufflerie à piston.

La distribution, du système Farcot, offre également certaines particularités.

Il est surtout important de faire observer que MM. Legavrian donnent généralement à toutes les pièces de leurs machines des dimensions qui les rendent relativement plus robustes que celles qui sont du domaine de la construction parisienne. Ces dernières ne manquent pas néanmoins de solidité, comme on le sait; mais si les constructeurs de Lille peuvent y ajouter encore sans augmenter sensiblement leur prix de vente, ils font bien. Ce qui est sérieusement entendu et pris en considération dans la machine qui nous occupe, c'est la solidité du massif en maçonnerie qui n'est aucunement découpé et semble tout d'une pièce, l'appareil de condensation, qui est le plus souvent la cause du morcellement des massifs, ayant été reporté entièrement à l'extérieur.

## ENSEMBLE DE LA CONSTRUCTION.

La fig. 1 de la pl. 25 représente la machine de MM. Legavrian, en vue extérieure de face, du côté de la distribution et de l'appareil de condensation dont la pompe à air est figurée en coupe;

La fig. 2 est une projection horizontale d'ensemble, vu extérieurement;

La fig. 3 est une section transversale faite sur le cylindre à vapeur, par l'axe du canal d'échappement et du condenseur;

La fig. 4 est une section partielle, à une plus grande échelle, faite sur l'axe longitudinal de la pompe à air et des pistons plongeurs alimentaires;

Les fig. 5 à 9 sont des détails d'organes principaux de la distribution.

Le cylindre à vapeur A, avec son enveloppe, le bâti B, fondu d'une seule pièce, et la traverse du piston guidée dans les glissières C, ne présentent pas, dans leur ensemble, de différences sensibles sur les précédentes machines, si ce n'est que les glissières sont maintenues au maximum d'écartement sur les deux côtés du bâti qui sont alors complétement rectilignes, sauf l'élargissement des plate-bandes pour recevoir les patins *a* du cylindre.

La pompe à air est formée d'une première partie L comprenant le corps cylindrique incliné, et ceux de deux pompes alimentaires Q; ces trois corps sont fondus de la même pièce qu'un coffre ramené dans la direction verticale et qui renferme les clapets d'aspiration *b* et *b'*; cette partie est surmontée de la bâche L', dont le fond est muni des clapets de refoulement *c* et *c'*, et porte intérieurement une tubulure de trop-plein *d* mise en relation avec le conduit extérieur J. Enfin, cette bâche reçoit un couvercle $L^2$, en forme de coupole quadrangulaire, qui couronne et ferme l'appareil, avec certaines conditions de détail énumérées plus loin.

Par la fig. 4, qui est une section faite sur l'axe de la pompe à air, perpendiculairement au plan vertical, on peut voir les deux corps de pompes alimen-

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

taires Q, disposés symétriquement, et dont les pistons sont reliés à la même traverse que celui de la pompe à air. Ces deux pompes, dont les boîtes à clapets ne sont pas figurées, fonctionnent simultanément comme une seule, et ne forment deux corps séparés que pour rendre la résistance symétrique avec la direction de la commande.

Tout l'ensemble de la pompe à air repose, par des patins, sur le fond d'une fosse réservée à côté du massif principal qui reçoit la machine. La tige *e* du piston est rattachée à une bielle fourchue O, dont l'autre extrémité est assemblée avec un petit bras de levier O′, fixé sur un axe horizontal P, lequel est monté sur des paliers P′, au-dessous du bâti principal B; l'un de ces paliers appartient à une plaque de fonte fixée indépendamment du bâti, tandis que l'autre, qui n'a pu être indiqué qu'en traits ponctués, est renversé et fixé au bâti même.

Cet axe P reçoit un mouvement d'oscillation à l'aide de deux grands leviers N, clavetés avec lui, et qui sont eux-mêmes assemblés avec deux bielles F rattachées à la traverse du piston à vapeur; ces bielles, comme dans les machines représentées pl. 22 et 23, font décrire aux leviers un arc de cercle ayant pour corde la course du piston moteur. L'oscillation de l'axe P fait alors décrire au levier O′ un arc correspondant, mais d'un rayon plus faible et dont la corde exprime l'amplitude du mouvement transmis par la bielle O au piston de la pompe.

Dans la plupart des machines munies d'une pompe à air inclinée, le mouvement est donné au piston de celle-ci par un excentrique circulaire monté directement sur l'arbre moteur. La raison qui peut motiver le remplacement de l'excentrique par la disposition actuelle, c'est qu'à moins de réduire beaucoup la course de la pompe, on est conduit à des dimensions exagérées pour un excentrique, qui, de toute façon, donne lieu à un frottement considérable. Peut-être, pour une machine de petite force, pourrait-on le conserver comme étant plus simple qu'une combinaison de leviers et de bielles; mais, arrivé à certaines limites de puissance, l'emploi de l'excentrique, pour cet usage, paraît au moins délicat.

Le condenseur, dont le fonctionnement est tout à fait analogue à celui représenté en détail, fig. 3, pl. 14, et dont une application a été montrée par les pl. 20 et 21, est formé d'un corps cylindrique M, placé verticalement. Il communique, par une tubulure, avec le conduit d'échappement *i* du cylindre, et l'injection d'eau froide a lieu de bas en haut, sous la forme d'une gerbe, par un conduit *j* dont l'ouverture est réglée par une bonde conique *j′*. Celle-ci appartient à une tige verticale $j^2$, qui traverse un couvercle à boîte à étoupe, disposé un peu au-dessous de l'ouverture, de façon à laisser une partie vide que l'on remplit d'eau pour noyer ce joint. L'extrémité supérieure de la tige est filetée dans une arcade *k*, boulonnée avec le rebord du corps cylindrique M, et porte un volant *k′* par lequel on la fait tourner pour soulever la bonde *j′* ou la faire descendre sur son siége.

La partie inférieure du condenseur est munie d'une tubulure par laquelle il est mis en relation avec la pompe à air, à l'aide d'un tuyau en fonte M′, qui est contourné pour atteindre la face antérieure, et vient aboutir à la capacité comprise entre les clapets *b* et *b′*. Le condenseur, pris ainsi entre les conduits *i* et M′, se trouve comme suspendu, mais néanmoins très-bien assujetti.



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Le régulateur à force centrifuge, dont on a vu les applications fréquentes, est remplacé dans la machine actuelle par celui du système de M. Larivière, qui fonctionne au moyen de l'air, suivant un principe analogue à celui du régulateur inventé, il y a environ vingt-cinq ans, par feu M. Molinié.

Le régulateur Larivière est composé d'un cylindre renfermant un piston au-dessus duquel une petite pompe, mue par la machine même dont il s'agit de régler la vitesse, tend à faire le vide, tandis que la partie inférieure reste en communication avec l'atmosphère. La tige du piston est mise en relation avec le papillon qui règle l'entrée de la vapeur dans l'appareil de distribution; elle est chargée d'un poids qui fait équilibre à l'action que la pression atmosphérique exerce à la partie inférieure, et qui est calculé de façon à ce que ce piston reste immobile quand la machine marche à sa vitesse normale.

L'air extrait du régulateur par la pompe y effectue sa rentrée par un orifice dont la section est réglée de telle sorte, qu'il y ait une exacte compensation entre l'air rentré et celui aspiré, pour une vitesse déterminée de la pompe. Par conséquent, si la machine conserve sa vitesse normale, le piston du régulateur, également poussé de bas en haut et chargé de haut en bas, conserve sa position d'équilibre, et reste immobile ainsi que le papillon. Dans le cas contraire, la vitesse de la pompe venant à changer, l'air extrait n'est plus en rapport avec celui qui rentre par l'orifice invariable, d'où le piston du régulateur se déplace et communique son mouvement à la valve ou papillon qui règle l'introduction de la vapeur. Cependant M. Larivière, qui a construit un grand nombre de ces régulateurs, les dispose indifféremment pour fonctionner par le vide ou par l'air atmosphérique.

Dans la machine qui nous occupe, le corps principal S, renfermant le piston régulateur, est posé au-dessus d'une sorte de dôme $A^2$, qui surmonte le cylindre et renferme le papillon ainsi qu'un tiroir de mise en train, organes dont le détail est donné plus loin.

La petite pompe aspirante R, qui complète l'appareil, communique avec lui par un tube de caoutchouc dont la direction, qui n'a rien d'absolue, ne se trouve pas indiquée ici; elle est placée horizontalement, en dehors du bâti, et reçoit sa commande de l'arbre oscillant P, dont l'extrémité, réduite de diamètre, porte, à cet effet, une petite manivelle $l$ à laquelle la bielle $l'$, du piston de la pompe R, est rattachée par articulation.

## DÉTAILS DE CONSTRUCTION

Cylindre et admission de vapeur. — Le cylindre à vapeur A, ajusté dans son enveloppe en fonte, présente une disposition dont le principe a été déjà expliqué précédemment. Mais l'admission de la vapeur et sa distribution ont des caractères qui leur sont propres et que nous allons indiquer.

La vapeur est amenée du générateur par un conduit $m$, qui aboutit à une tubulure appartenant à l'enveloppe. De l'intervalle qui sépare celle-ci du cylindre, la

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

vapeur s'introduit, par un orifice $m'$, dans une boîte close, ou dôme polygonal en fonte $A^2$, monté sur une table dressée ménagée à l'enveloppe.

A l'aide des fig. 5 et 6, qui représentent cette pièce en détail, suivant deux coupes verticale et horizontale, on voit que son intérieur est divisé en deux parties, dont l'une est en libre relation avec l'orifice $m'$, tandis que l'autre se trouve en rapport avec l'ouverture d'un canal $n$ fondu avec l'enveloppe, et communiquant avec l'intérieur de la boîte de distribution. Les deux divisions du dôme sont néanmoins en relation par une ouverture ménagée à la cloison qui les détermine, et dans laquelle ouverture est ajusté le papillon régulateur T.

Faisant abstraction, pour l'instant, du jeu du papillon, on voit que la vapeur, passant par l'orifice $m'$, peut s'introduire dans le canal $n$ et parvenir à la boîte de distribution. On a fait choix alors de l'ouverture du canal $n$ pour y placer un tiroir U qui sert à opérer l'arrêt et la mise en train de la machine. Cet organe est une glissière plate percée d'une lumière rectangulaire qui doit venir coïncider à propos avec l'orifice du canal $n$. Cette ouverture est occupée vers le milieu par un mamelon dans lequel s'engage l'extrémité d'un piton $o$, dont la partie supérieure porte un goujon pour lui servir de guide; le corps du piton est monté, entre deux écrous, sur une tige $o'$ qui peut y tourner sur elle-même, et qui, traversant le dôme, vient se tarauder dans un écrou $o^2$ fixé sur un bossage venu de fonte avec le cylindre. (Voir fig. 1 et 2.)

En faisant tourner cette tige, par son volant $o^3$, elle se déplace longitudinalement dans son écrou et entraîne avec elle le piton $o$ et le tiroir U dans lequel il est engagé. On favorise ainsi le passage de la vapeur ou on l'intercepte à volonté, suivant que la lumière du registre U vient ou non coïncider avec l'orifice du conduit $n$.

Le papillon T est, comme à l'ordinaire, une petite plaque de bronze dont les bords actifs sont coupés en chanfrein et dont le milieu est traversé par une tige mince qui traverse une boîte à étoupe. Il est ajusté carrément dans son ouverture, et mis à sa place en l'introduisant par un regard ménagé vis-à-vis et fermé par un tampon $p$.

La relation entre le régulateur et le papillon est établie au moyen d'un petit mécanisme de renvoi ordinaire. L'axe du papillon est terminé par un levier pris entre deux écrous montés sur une tige filetée $p'$, laquelle est assemblée avec l'une des extrémités d'une bascule $p^2$, tandis que celle opposée est reliée avec une tige $p^3$. Cette dernière est assemblée, par articulation, avec une sphère fixée sur la tige du piston du régulateur S, pour faire équilibre à la pression atmosphérique qui tend à le soulever continuellement.

La combinaison de ces divers leviers et tiges a pour effet de transmettre les oscillations verticales du piston régulateur au papillon, qui ferme alors plus ou moins l'ouverture dans laquelle il est ajusté, et modifie la section de passage de la vapeur à chaque écart de vitesse de la machine.

Distribution. — Au lieu d'être isolée du cylindre et rapportée simplement contre la table dressée des orifices, la boîte à vapeur est formée, par moitié, d'une capacité vide réservée à l'enveloppe même et d'un cadre V, qui la complète, en s'y fixant suivant un joint établi sur le centre de la boîte à étoupe et de la douille, par

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

lesquelles la tige du tiroir et son prolongement sont guidés; un couvercle V′, boulonné sur le cadre, ferme alors la boîte, comme à l'ordinaire.

Le tiroir de distribution X est enchâssé dans un cadre en fer auquel appartiennent la tige $q$ et celle qui sert de guide, par l'extrémité opposée; il glisse sur une semelle dressée, rapportée sur le fond de l'évidement, ménagé à l'enveloppe, qui constitue la moitié de la profondeur de la boîte à vapeur.

Cette disposition, unique dans les exemples montrés jusqu'ici, a pour objet de diminuer la saillie totale de la boîte de distribution. Les figures du dessin permettent de voir que cette boîte est en effet très-aplatie et ne possède que bien juste la dimension nécessaire pour le jeu des pièces qu'elle renferme.

Le tiroir est construit pour opérer la détente, suivant le système Farcot. Mais la camme, qui sert à régler la marche des registres, est remplacée ici par un coin trapézoïdal dont les fig. 7 à 9 font voir la disposition.

Ce coin en fer ou en acier $r$ est ajusté, par une saillie rectangulaire, dans un évidement dressé appartenant au couvercle V′, et dans lequel il peut glisser verticalement; il est monté, et fixé par une goupille, sur un axe $r'$ qui traverse le cadre V par une boîte à étoupe ménagée à la partie supérieure, tandis que l'autre extrémité est guidée par une bague rapportée à l'ouverture d'un trou fermé extérieurement par un bouchon à vis. Le sommet de cette tige étant fileté dans un écrou retenu dans une douille qui fait corps avec le rebord de la boîte V, lorsqu'on fait tourner l'écrou, par le volant manivelle $r^2$ avec lequel il est fixé, la tige $r$ monte ou descend en entraînant le coin $r$ avec elle; le déplacement du coin produit alors le même effet, sur la butée des registres de détente, que celui d'une camme que l'on fait tourner plus ou moins pour changer le degré d'expansion de la vapeur.

Les degrés de variation, rapportés au déplacement du coin, peuvent être inscrits sur une échelle, que notre dessin n'indique pas, et qui se trouve repérée avec un index fixé au sommet de la tige $r'$, dont il permet d'observer les mouvements verticaux.

Il serait inutile d'entrer dans l'examen comparatif des effets de la camme et du coin, qui peuvent évidemment rendre chacun les mêmes services, à peu de chose près. Mais on ne peut pas négliger de faire observer que la réglementation de la distribution offre beaucoup de facilité avec le coin, dont le tracé est déjà très-simple, mais surtout qui peut fonctionner et être mis en place sans que le couvercle soit à la sienne, ce qui permet d'en étudier les effets sans tâtonner, au moment du montage.

Mécanisme de l'excentrique. — L'excentrique H, qui commande le tiroir de distribution, est remarquable par son mode de liaison avec la tige du tiroir, qui est d'un système tout particulier.

La barre H′ et la tige $q$ sont rattachées, indépendamment, à une coulisse $s$ qui glisse comme le chariot d'un tour, dans un support Y, rapporté et boulonné sur le bord du bâti principal B. La barre H s'y trouve assemblée par un boulon et une tête de bielle, afin de former articulation; la liaison de la tige du tiroir est opérée, au contraire, rigidement au moyen d'une oreille et deux écrous, qui permettent cependant de régler la position.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pompe a air. — En raison de la commande simultanée du piston de la pompe à air et des deux pompes alimentaires, la tige principale *e* est très-soigneusement guidée en son point d'assemblage avec la bielle de commande.

Cette tige est assemblée avec une traverse *h* (fig. 4) dont les extrémités sont réunies avec les pistons des pompes alimentaires Q; des portées y sont ménagées pour son assemblage avec les deux branches de la bielle O. La traverse porte deux patins *f* perpendiculaires au plan des trois tiges, et à l'aide desquels elle est guidée par deux glissières *g* fondues de la même pièce que le couvercle du corps de pompe L. A l'autre extrémité, ces glissières sont maintenues dans leur écartement par une entretoise *g'*, dont le milieu est un mamelon percé et traversé par le prolongement de la tige *e*.

La coupole $L^2$, qui recouvre la bâche de la pompe à air, est munie d'une cuvette *t* dont le fond est percé d'un certain nombre de petits trous. Cette précaution des constructeurs a pour objet de recueillir les gouttelettes d'eau qui pourraient être projetées dans l'échappement de l'air expulsé par la pompe, et qui sort par les trous de cette cuvette.

Pièces principales de la transmission. — La bielle D est méplate et simple dans toute sa longueur. Au lieu d'être terminée par une partie fourchue, c'est la tige du piston qui est assemblée avec une tête ou chappe *u*, traversée d'outre en outre, ainsi que la bielle D et celles F, par le T ou joug *v*, dont les extrémités portent les coussinets qui suivent les deux glissières C.

La manivelle E et l'arbre moteur G sont en fonte de fer. Ce dernier est d'un très-fort diamètre, et les parties qui doivent recevoir le volant ou les organes de transmission sont taillées à huit pans, de façon à rendre le calage plus sûr.

## DIMENSIONS ET CONDITIONS DE MARCHE

Cette machine possède, ainsi que les précédentes, les moyens qui permettent d'en faire varier la puissance dans des limites assez étendues. Son cylindre est timbré à 5,5 atmosphères, bien qu'elle ne doive marcher habituellement qu'à 3,5, et la détente, qui peut varier entre les limites de 1/6 et 1/25 d'admission à pleine vapeur, est réglée, pour sa puissance nominale de 35 chevaux, à la durée de 9/10 de la course du piston.

Cette puissance est basée, du reste, sur les conditions suivantes :

| | |
|---|---|
| Vitesse de rotation..... | 38 tours par 1'. |
| Pression de la vapeur dans la chaudière..... | 3,5 atmosphères. |
| Durée de la détente, par rapport à la course du piston..... | 9/10 |
| Contre-pression par le condenseur..... | 0,1 atmosphère. |

Voici maintenant les principales dimensions :

| | |
|---|---|
| Diamètre du piston moteur..... | $0^m$ 600 |
| Superficie correspondante..... | $28^{d.q.}$ 27 |

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

| | |
|---|---|
| Course | $1^{m}$ 000 |
| Volume engendré pour un coup simple | $282^{d.c.}$ 70 |
| Diamètre du piston de la pompe à air | $0^{m}$ 300 |
| Superficie correspondante | $7^{d.q.}$ 07 |
| Course | $0^{m}$ 376 |
| Volume engendré pour un coup simple | $26^{d.c.}$ 58 |
| Rapport de ce volume à celui engendré par le piston moteur | 0, 094 |
| Volume total offert à l'échappement de la vapeur, comprenant celui du condenseur et des conduits de communication | $57^{d.c.}$ 00 |
| Rapport de ce volume à celui engendré par le piston moteur | 0, 2 |
| Diamètre des tourillons de l'arbre moteur (en fonte) | $0^{m}$ 220 |
| Rayon moyen de la jante du volant | $3^{m}$ 000 |
| Poids de la jante du volant | 3930 kilog. |

En comparant, comme nous l'avons fait jusqu'ici, les résultats fournis par le calcul basé sur ces dimensions avec la puissance nominale, on trouve que l'état de la construction de la machine et ses conditions de marche doivent permettre d'atteindre à un rendement de 67 p. 100 environ.

En effet, si on veut répéter l'opération, comme nous l'avons fait plusieurs fois, on trouve :

Volume, en mètre cube, engendré par le piston à chaque coup simple :

$$D = \frac{\overline{0,60}^{2} \times 3,1416}{4} \times 1^{m}00 = 0^{m.c.}\,2827.$$

Avec la détente 9/10, le volume de vapeur, à pleine pression, dépensé par coup simple égale :

$$d = \frac{D}{10} = \frac{0,2827}{10} = 0^{m.c.}\,0,02827.$$

Travail de 1 mètre cube de vapeur, à la pression de 1 atmsophère, et détendu 10 fois (table du § 72) :

$$t = 34127 \text{ kilogrammètres.}$$

| | |
|---|---|
| Pression absolue de la vapeur | $p = 3,5$ atmosph. |
| Pression du milieu d'échappement | $p' = 0,1$ — |

Opérant suivant ces données et à l'aide de la formule générale (A de la page 333), on a pour le travail théorique T dû à un coup double de piston :

$$T = 2\,(d\,t\,p - 10333\,D\,p');$$

$$T = 2\,(0^{m.c.}\,02827 \times 34127 \times 3^{at.}5 - 10333 \times 0^{m.c.}\,2827 \times 0,1^{at.}) = 6169^{kilgr.}$$

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Enfin, on obtient, pour la quantité de travail correspondante, par seconde et en chevaux-vapeur :

$$T' = \frac{T\,n}{60 \times 75} = \frac{6169 \times 38^t}{60 \times 75} = 52 \text{ chevaux-vapeur.}$$

Par conséquent, puisqu'en fonctionnant dans les conditions qui correspondent à cette puissance théorique, on doit recueillir 35 chevaux disponibles sur l'arbre moteur, il s'ensuit que le coefficient d'effet utile doit s'élever à :

$$35 : 52 = 0{,}673.$$

Ce résultat démontre encore que nos constructeurs expérimentés ont atteint un degré de perfection, dans l'établissement des machines à vapeur, qui leur permet de compter sur un effet utile plus élevé qu'il y a une quinzaine d'années, époque à laquelle on n'obtenait guère plus de 50 p. 0/0, et avec des machines condensation.

A quoi doit-on attribuer principalement l'amélioration du rendement? Nous l'avons dit : à une distribution bien réglée, permettant aux grandes détentes de produire tout leur effet; à la condensation opérée de façon à rendre la contre-pression presque nulle, et fonctionnant avec une pompe à double effet; aux moyens préservatifs des déperditions de calorique; à l'emploi de volants puissants, etc., etc.

## CONCLUSION SUR LES MACHINES HORIZONTALES

### A UN SEUL CYLINDRE

Nous aurions pu continuer l'examen des machines horizontales à un seul cylindre par plusieurs modèles d'autres bons constructeurs qui, à Paris comme ailleurs, ont su apporter dans ce système des améliorations utiles, ou se sont fait remarquer par une parfaite exécution. Mais il eût fallu augmenter de beaucoup l'importance de ce Traité, déjà volumineux, et nous aurions craint de fatiguer nos lecteurs par des descriptions qui seraient devenues à peu près semblables. Il reste, en effet, après les types que l'on vient de voir, et qui réunissent toutes les conditions désirables, peu de différences à signaler, peu de particularités que nous n'ayons eu le soin de reconnaître.

Nous sommes convaincu, du reste, que les divers exemples qu'il nous a été permis de choisir, dans cette catégorie de machines, pourront largement suffire aux jeunes gens qui sont appelés à les construire ou à les monter, comme à ceux qui doivent les employer ou les conduire, pour en bien connaître toutes les parties, quelle que soit d'ailleurs leur origine, quelles que soient les modifications qu'elles aient subies.

Comme nous l'avons dit, le système de machine à cylindre horizontal a pris une extension considérable, non-seulement en France, mais encore dans toutes les contrées industrielles. Les avantages qu'il présente, et que nous avons énumérés en quelques mots au commencement de ce chapitre, sont assez nombreux pour motiver cette sorte d'engouement général qui n'a fait que s'accroître depuis l'Exposition universelle.

Il nous paraît utile de rappeler ces divers avantages dans le résumé qui suit :

D'une exécution simple et peu dispendieuse, la machine horizontale peut se placer partout où l'on dispose d'un emplacement convenable;

Toutes les pièces du mécanisme étant préalablement ajustées et rendues solidaires sur un seul

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

et même bâti. le montage sur place peut toujours se faire rapidement, et le plus souvent, lorsque la machine n'est pas d'une trop grande puissance, elle est envoyée toute montée à l'usine;

Comme elle prend peu de hauteur, elle reste constamment à la portée du mécanicien ou de l'ouvrier chargé de la conduire; aussi la surveillance en est facile, et si quelque partie se dérange, il n'a pas de peine à la reconnaître pour y porter remède aussitôt;

Occupant, pour une force donnée, une grande superficie comparativement à son élévation, elle est bien solidement assise, sans exiger d'ailleurs de fondations profondes, dispendieuses et incommodes;

On peut, lorsqu'elle est bien proportionnée, la faire marcher à de grandes vitesses, sans qu'elle soit susceptible d'éprouver des vibrations sensibles: il n'est pas rare, en effet, de voir aujourd'hui des machines horizontales dont les pistons à vapeur fonctionnent avec des vitesses moyennes de 2 à 3 mètres par seconde;

L'arbre de couche de commande étant dans le même plan que l'axe du cylindre, et par suite à peu de distance au-dessus du sol, se trouve le plus généralement dans une position convenable pour transmettre le mouvement aux outils ou appareils à faire mouvoir;

La machine horizontale s'approprie aisément à la plupart des industries dans lesquelles on a besoin d'une force motrice, soit à cause de son bon marché relatif, soit pour la facilité de son installation, soit encore parce qu'elle permet de varier les vitesses sans inconvénient, et de s'accoupler ou de se joindre à d'autres moteurs, quand il est nécessaire;

Elle se prête, enfin, à un grand nombre d'applications diverses sans aucune transmission de mouvement intermédiaire, comme, par exemple, pour actionner directement des pompes à élever l'eau, des soufflerles à cylindres, des appareils à fouler les gaz, etc.

On comprend sans peine que, réunissant autant d'avantages, les machines horizontales aient dû faire de notables progrès en peu de temps, et que, dans un grand nombre de cas, elles aient été jugées souvent préférables à d'autres systèmes. Il est vrai de dire que, dans l'origine, elles étaient seulement à haute pression, sans condensation, et même assez souvent sans détente variable, ce qui les rendait d'une simplicité très-grande, et devait engager à les adopter. Mais aussi, comme on sait que l'absence de détente et de condensation est un motif d'augmentation de dépense et de combustible, on a dû chercher à les doter de ces perfectionnements importants dont jouissaient déjà les autres systèmes, et les fabricants, qui veulent avant tout des machines économiques, ont demandé avec raison aux constructeurs d'y ajouter la condensation, malgré les difficultés pratiques que l'on éprouvait alors à rendre le condenseur solidaire avec le bâti, et à imprimer le mouvement au piston de la pompe à air.

Actuellement les machines horizontales à condensation sont très-répandues et font une concurrence très-grande aux machines verticales. On ne craint même pas de construire de ces machines à deux cylindres, comme nous en montrerons des exemples, après avoir décrit les systèmes à balancier par lesquels nous commençons le second volume.

FIN DU CHAPITRE SIXIÈME DE LA QUATRIÈME SECTION.

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

# TABLE DES MATIERES

CONTENUES DANS LE PREMIER VOLUME

PRÉFACE..... v

## PREMIÈRE SECTION

NOTIONS PRÉLIMINAIRES DE PHYSIQUE ET DE MÉCANIQUE, APPLIQUÉES A L'ÉTUDE DE LA VAPEUR D'EAU

### CHAPITRE PREMIER

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DE LA VAPEUR D'EAU

Pages.

Définition de la vapeur..... 2
Principes de la formation de la vapeur.... 3
Formation de la vapeur d'eau dans le vide.. 4
Influence de la température sur la formation de la vapeur..... 5
Maximum de force élastique de la vapeur.... 6
Relation entre la force élastique de la vapeur et sa température..... 8
Table des forces élastiques maximum de la vapeur pour les températures de 0° à 100 degrés centigrades..... 13
Tables des températures de la vapeur d'eau pour des tensions de 1 à 1000 atmosphères. 14
Densité de la vapeur d'eau..... 16
Première condition..... 17
Deuxième condition..... 17
Conséquences..... 17

Pages.

Table des densités et volumes de la vapeur d'eau au maximum de force élastique de 0 à 100 degrés..... 18
Tables des densités et volumes de la vapeur d'eau de 1 à 1000 atmosphères..... 19
Ébullition de l'eau..... 20
Fixité de la température au point d'ébullition..... 21
Marmite de Papin..... 22
Influence des substances en dissolution sur la température du point d'ébullition. 25
Mode de vaporisation d'un liquide qui contient des substances étrangères..... 25
Condensation de la vapeur..... 26
Absorption..... 27
Action calorifique dans la formation de la vapeur d'eau..... 28

### CHAPITRE II

CAPACITÉ CALORIFIQUE DES CORPS

Unité de chaleur..... 30
Calorique spécifique..... 31
Table des capacités des gaz déterminées par MM. Delaroche et Bérard..... 33
Table des capacités calorifiques de diverses substances..... 34
Application des coefficients de capacité calorifique..... 35
Quantité de chaleur qui correspond à une variation donnée de température..... 35

Température d'un mélange..... 36
Combinaison d'un mélange..... 39
Chaleurs latentes ou calorique de changement d'état..... 40
Calorique de fusion..... 41
Calorique latent de vaporisation..... 43
Table des quantités de calorique latent de vaporisation..... 44
Applications du calorique latent de vaporisation..... 45



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## CHAPITRE III

### SOURCES DE CHALEUR


Pages.

QUANTITÉS DE CHALEUR FOURNIES PAR LES COMBUSTIBLES..... 48
TABLE des puissances calorifiques des combustibles industriels. ..... 50
APPLICATION DES PUISSANCES CALORIFIQUES..... 51
Recherche de la dépense de combustible pour produire une élévation donnée de température..... 51
Puissance vaporisatoire d'un poids donné de combustible..... 52


## CHAPITRE IV

### PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DE LA VAPEUR


CONDITIONS DE L'ÉCOULEMENT ET DE LA DÉPENSE DE LA VAPEUR..... 54
Écoulement de la vapeur par un orifice percé en mince paroi..... 54
Vitesse d'écoulement d'un gaz par un orifice en mince paroi..... 55
Problèmes sur l'écoulement de la vapeur par orifices en mince paroi..... 58
TABLE ET TRACÉ GRAPHIQUE relatifs à l'écoulement de la vapeur..... 60
TABLE des vitesses de la vapeur s'échappant dans l'atmosphère à diverses pressions..... 61
TABLE. des vitesses de la vapeur s'échappant dans des milieux à des pressions différentes. 61
Tracé graphique..... 62
Vitesse d'écoulement d'un gaz par un conduit. 63
Problèmes sur l'écoulement d'un gaz par un conduit..... 66
Volumes de vapeur écoulés par des orifices simples et par des conduits..... 67
Coefficients de contraction..... 68
Note relative à la recherche du diamètre d'une conduite..... 68
PUISSANCE MÉCANIQUE DE LA VAPEUR D'EAU.... 71
Travail développé à pleine pression..... 71
Travail développé avec détente..... 75
Loi de Mariotte..... 76
Calcul du travail total dû à la détente de la vapeur..... 77
TABLE des quantités totales de travail développées par 1 mètre cube de vapeur sous différentes détentes et sous la pression de 1 atmosphère..... 81
CONCLUSION DES NOTIONS PRÉLIMINAIRES..... 82


# DEUXIÈME SECTION

### APERÇU HISTORIQUE DE L'INVENTION DES MACHINES A VAPEUR


OBSERVATEURS ANCIENS DE LA PUISSANCE DE LA VAPEUR D'EAU..... 84
Héron d'Alexandrie (120 ans avant J.-C.). 84
Blasco de Garay (1543)..... 85
Flurance Rivault (1605)..... 85
Salomon de Caus (1615)..... 86
Branca (1629)..... 89
Le marquis de Worcester (1663)..... 89
Sir Samuel Moreland (1683)..... 90
PREMIERS INVENTEURS DE LA MACHINE A VAPEUR..... 90
Denis Papin (1690 et 1695)..... 90
Le capitaine Savery (1698)..... 95
Newcomen, Cowley et Savery (1705).... 97
Leupold (1720)..... 101
James Watt (1769)..... 104


# TROISIÈME SECTION

### PRODUCTION INDUSTRIELLE DE LA VAPEUR D'EAU

## CHAPITRE PREMIER

### ANCIENS GÉNÉRATEURS A VAPEUR


DISPOSITION PRIMITIVE DES GÉNÉRATEURS..... 108
CHAUDIÈRES A BASSE PRESSION DE WATT..... 109
Proportions des chaudières de Watt..... 111
*Surface de chauffe*..... 111
*Surface de la grille*..... 113
*Volume de la chaudière*..... 114


Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## CHAPITRE II

### CHAUDIÈRES CYLINDRIQUES A FOYERS EXTÉRIEURS

(PLANCHES 1 A 3)


Pages.

DISPOSITION GÉNÉRALE D'UN GÉNÉRATEUR A BOUILLEURS (pl. 1)..... 115
Ensemble des fonctions du générateur..... 116
Service des appareils de sûreté et d'observation. 118
Manomètre..... 119
Niveau d'eau..... 120
Flotteur à sifflet..... 121
Soupapes de sûreté..... 122
Détail de la construction de la chaudière.... 123
Assemblages et trous d'hommes..... 123
Disposition des feuilles de tôle..... 123
Réservoir de vapeur..... 124
Communications ou cuissards..... 124
Construction du fourneau..... 125
Construction de la cheminée (pl. 3)..... 127
Tracé de la cheminée..... 128
Grande cheminée des forges de Rachecourt (pl. 3)..... 130
Redressement des cheminées..... 131
Montage de la chaudière dans le fourneau.... 131
Foyer..... 132
PROPORTIONS D'UN GÉNÉRATEUR A CORPS CYLINDRIQUES..... 135
Surfaces de chauffe..... 136
Dimensions des corps cylindriques..... 136

Pages.

TABLE des dimensions principales des chaudières cylindriques sans bouilleur et avec un bouilleur..... 142
TABLE des dimensions principales des chaudières cylindriques à deux bouilleurs..... 143
Remarque sur les volumes d'eau..... 144
Dimensions des grilles..... 146
Section de la cheminée et des carneaux..... 149
Cheminée..... 149
Carneaux..... 153
Récapitulation de toutes les règles précédentes..... 155
Surface de chauffe..... 155
Surface de la grille..... 155
Section de la cheminée..... 156
Carneaux..... 156
Résumé des conditions de marche du générateur représenté pl. 1..... 156
Surface de chauffe..... 156
Grille et carneaux..... 157
Volume de l'eau..... 157
Volume de la vapeur..... 157
Hypothèses sur les capacités..... 158
Puissance de vaporisation comparée à la puissance dynamique..... 159


## CHAPITRE III

### DISPOSITIONS DIVERSES DE GÉNÉRATEURS A CORPS CYLINDRIQUES ET A FOYERS EXTÉRIEURS

(PLANCHE 2)


GÉNÉRATEUR COMPOSÉ D'UNE CHAUDIÈRE ET D'UN BOUILLEUR A FLAMME MONTANTE (fig. 1 à 3). 164
Ensemble de la chaudière et du fourneau..... 165
Détails de construction de la chaudière.. 165
Conditions de marche du générateur (fig. 1 à 3). 167
DISPOSITION PARTICULIÈRE D'UN GÉNÉRATEUR A DEUX BOUILLEURS (fig. 4)..... 168
GÉNÉRATEUR A CORPS CYLINDRIQUE, A BOUILLEURS LATÉRAUX ET SUPERPOSÉS, A FLAMME DESCENDANTE. — Système de M. Farcot (fig. 5 à 7). 171
Détails de la construction..... 172
Chaudière principale..... 172
Bouilleurs..... 172
GÉNÉRATEUR A CORPS CYLINDRIQUE ET A FLAMME DESCENDANTE. — Système de MM. Cail et Cᵉ (fig. 8 et 9)..... 173
GÉNÉRATEUR A UN SEUL CORPS, A FLAMME MONTANTE AVEC UN BOUILLEUR RÉCHAUFFEUR (fig. 10). 175
GÉNÉRATEUR DIT A SIPHON, par M. Strecker... 176


## CHAPITRE IV

### GÉNÉRATEURS CHAUFFÉS PAR LES CHALEURS PERDUES DES HAUTS-FOURNEAUX ET DES FOURS

(PLANCHE 3)


CHAUDIÈRES A VAPEUR HORIZONTALES UTILISANT LES CHALEURS PERDUES..... 179
Distinction des deux classes différentes... 180
CHAUDIÈRE VERTICALE APPLIQUÉE A UN FOUR A RÉVERBÈRE A RÉCHAUFFER (fig. 5 à 9)..... 181
Ensemble de la construction..... 182
Appareils de service..... 183
Conditions de marche de la chaudière verticale..... 184
Résultats d'expériences..... 185


Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## CHAPITRE V

### GÉNÉRATEURS TUBULAIRES ET A FOYERS INTERIEURS

(PLANCHES 4 ET 5)


Pages.

ORIGINE DES GÉNÉRATEURS TUBULAIRES..... 187
GÉNÉRATEURS TUBULAIRES A FOYERS INTÉRIEURS DES MACHINES DU CHEMIN DE FER ATMOSPHÉRIQUE DE SAINT-GERMAIN (fig. 1 à 6, pl. 4).. 190
Disposition d'ensemble d'un appareil complet. 191
Détails de la construction des générateurs.... 192
Corps du foyer..... 192
Corps tubulaire..... 192
Réservoirs de vapeur..... 194
Alimentation et vidange..... 195
Appareils de sûreté..... 195
Conditions de marche des générateurs de Saint-Germain..... 196
Surfaces de chauffe..... 197
Surfaces de grilles..... 198
Considérations sur le système tubulaire..... 198
GÉNÉRATEURS A FOYER INTÉRIEUR. — Système dit de Cornwall (fig. 7 à 9, pl. 4)..... 200
Ensemble de la disposition..... 201

Pages.

Conditions de marche..... 203
GÉNÉRATEUR TUBULAIRE A VENT FORCÉ, par MM. Molinos et Pronnier..... 205
Principes fondamentaux du système..... 205
Description du générateur tubulaire à vent forcé (fig. 1 à 5, pl. 5)..... 208
Disposition d'ensemble..... 208
Marche de l'appareil..... 211
Dimensions principales..... 212
Application du même principe de foyer à une chaudière cylindrique ordinaire (fig. 6, pl. 5). 213
Résultats des expériences faites sur le générateur de MM. Molinos et Pronnier..... 214
Générateur de l'Exposition..... 214
Générateur des ateliers d'Oullins..... 215
Générateur de la manufacture des tabacs. 216
GÉNÉRATEUR A FOYER INTÉRIEUR A CIRCULATION RATIONNELLE, par M. E. Bourdon..... 218
GÉNÉRATEUR TUBULAIRE VERTICAL, par M. Beslay. 220


## CHAPITRE VI

### GÉNÉRATEURS A PRODUCTION INSTANTANÉE


GÉNÉRATEUR A PRODUCTION INSTANTANÉE, par M. Boutigny (d'Évreux)..... 224
État sphéroïdal des liquides..... 224
GÉNÉRATEUR EN SERPENTIN, par M. Isoard.... 228


## CHAPITRE VII

### FOYERS FUMIVORES

(PLANCHE 6)


PRINCIPES GÉNÉRAUX DES FOYERS FUMIVORES.... 231
APPAREILS FUMIVORES A DISTRIBUTEURS MÉCANIQUES..... 233
Grille tournante de Brunton..... 234
Distributeur Collier..... 235
Distributeur de M. Payen..... 235
Appareil fumivore à distributeur et grille tournante, par M. Moulfarine (fig. 4)..... 236
Disposition de la grille..... 236
Distributeur..... 237
Résumé du fonctionnement..... 237
Foyer fumivore à grille mobile par translation, par M. Tailfer (système de Juckes)... 238
Ensemble de la disposition..... 238
Fonctionnement de l'appareil..... 239
Notes sur les résultats d'expériences..... 239
Foyer fumivore à alimentation inférieure, par M. Duméry (fig. 1 à 3)..... 24
Disposition d'ensemble du foyer Duméry. 241
Détails id..... 242
Foyer fumivore à alimentation inférieure, par M. George..... 244
TRANSFORMATION DES COMBUSTIBLES EN GAZ ET FOYERS COMBINÉS..... 246
Appareil fumivore, par M. Beaufumé..... 246
Foyer fumivore à combustion mixte, par M. Corbin-Desboissières (fig. 6 à 8)..... 247
Modification de la disposition précédente. 249
DIVERSES DISPOSITIONS FUMIVORES..... 250
Foyer fumivore par introduction additionnelle d'air, par M. Combes..... 250
Application de jets de vapeur..... 251
Grille en gradins..... 252
CONCLUSION SUR LES APPAREILS FUMIVORES..... 253


Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## CHAPITRE VIII

### APPAREILS D'OBSERVATION ET DE SURETÉ

(PLANCHES 7 ET 8)


Pages.

MANOMÈTRES..... 255
Manomètres à mercure..... 256
Manomètre à flotteur à basse pression.... 256
Manomètre à flotteur à haute pression... 258
Manomètres à air libre à tubes de cristal. 260
Manomètre à air libre de M. Galy-Cazalat..... 262
Manomètre à air libre de M. Richard.... 262
Manomètre à air comprimé..... 263
Manomètres métalliques..... 264
Manomètres métalliques à tube par M. E. Bourdon (fig. 1 à 3, pl. 7)..... 265
Manomètre étalon (fig. 4 et 5, pl. 7).... 267
Indicateur de vide (fig. 12 et 13, pl. 7)... 268
Manomètres à lame métallique, par M. Desbordes (fig. 6 à 9, pl. 7)..... 269
Manomètre à diaphragme (fig. 10 et 11, pl. 7)..... 270
Pyromètre (fig. 14, pl. 7)..... 271
NIVEAUX D'EAU ET FLOTTEURS A SIFFLET..... 272
Niveau d'eau à tube de cristal (fig. 1 et 2, pl. 8). 273
Flotteurs à sifflet (fig. 3 à 10, 12 et 13, pl. 8). 275
Disposition d'un flotteur à sifflet (fig. 3 et 4)..... 275
*Détails de construction du sifflet*..... 276
*Suspension du flotteur*..... 276
*Conditions d'équilibre du flotteur*..... 277

Pages.

Groupe d'appareils de sûreté, par M. Desbordes (fig. 5 et 6)..... 277
Flotteur extérieur à action directe (fig. 7). 278
Flotteur à sifflet, par M. E. Bourdon (fig. 8 et 9)..... 279
Sifflet d'alarme simple à flotteur..... 280
Groupe d'appareils, par M. Bréval (fig. 10). 282
Garniture de tige de flotteur, par M. Ch. Faivre..... 283
Flotteur à indicateur magnétique, par M. Lethuillier-Pinel (fig. 14 et 15)... 283
*Modification apportée à l'appareil précédent*..... 286
Niveau d'eau métallique à flotteur, par M. Herdevin..... 286
*Robinets d'épreuve*..... 288
SOUPAPES DE SURETÉ..... 288
Diamètre des soupapes de sûreté..... 289
Exemple de l'emploi de la formule..... 289
TABLE des diamètres des soupapes de sûreté. 292
Conditions d'équilibre d'une soupape de sûreté. 294
Construction id..... 293
Soupape des appareils de Saint-Germain. 296
Remarques sur les fonctions des soupapes de sûreté..... 296
CONCLUSION SUR LES APPAREILS D'OBSERVATION ET DE SURETÉ..... 297


## CHAPITRE IX

### INCRUSTATIONS DES GÉNÉRATEURS A VAPEUR. — MOYENS DE LES ÉVITER


NATURE DES DÉPOTS INCRUSTANTS..... 298
PROCÉDÉS POUR ÉVITER LES INCONVÉNIENTS DUS AUX DÉPOTS CALCAIRES..... 301
Extractions..... 301
Substances empêchant l'adhérence des dépôts. 302
Procédés chimiques..... 304
Épuration préalable de l'eau d'alimentation.. 305
CONCLUSIONS SUR LES GÉNÉRATEURS FIXES..... 307


# QUATRIÈME SECTION

### APPLICATION DE LA PUISSANCE DE LA VAPEUR D'EAU AUX MACHINES FIXES

## CHAPITRE PREMIER

### PRINCIPES GÉNÉRAUX DE LA DISPOSITION DES MOTEURS A VAPEUR

(PLANCHE 9)


ENSEMBLE DU FONCTIONNEMENT ET DE LA CONSTRUCTION D'UN MOTEUR A VAPEUR..... 312
Disposition générale..... 313
Détails de construction..... 318
Commande du tiroir..... 318
Cylindre à vapeur..... 321
Piston..... 322
Traverse et glissière..... 322
Bielle, manivelle et arbre moteur..... 323
Bâti ou plaque de fondation..... 324
Régulateur de vitesse..... 324
Appareils de service..... ... 325


Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Pages.
Résumé de la description d'ensemble.... 325
EXPOSÉ DU CALCUL GÉNÉRAL DES EFFETS MÉCANIQUES PRODUITS PAR UN MOTEUR A VAPEUR.. 326
Travail développé à pleine vapeur..... 326
Calcul de la puissance en fonction de la vitesse du piston..... 329
Travail développé avec détente..... 330
Récapitulation des règles précédentes..... 333
Remarque sur la dépense de combustible par les deux modes d'emploi de la vapeur avec et sans détente..... 334
Résumé des propriétés mécaniques..... 335
TRACÉ GÉOMÉTRIQUE ET CONDITIONS STATIQUES DES ORGANES DE LA TRANSMISSION..... 336
Mécanisme des machines à mouvement direct (fig. 5, pl. 9)..... 336
Pages.
Tracé géométrique de la machine type. 338
Positions et vitesses relatives du piston, de la bielle et de la manivelle..... 340
Égalité du travail développé et du travail transmis..... 341
Décomposition des efforts par l'obliquité de la bielle..... 346
Mécanisme des machines à balancier..... 349
Mécanisme des machines conjuguées..... 352
*Premier cas. — Cylindres parallèles*..... 352
*Deuxième cas. — Cylindres inclinés*..... 355
*Troisième cas. — Cylindres bout à bout*.. 357
Mécanisme des machines oscillantes..... 357
Premier système..... 357
Deuxième système..... 358
RÉSUMÉ DES PRINCIPES GÉNÉRAUX..... 360

## CHAPITRE II

### MÉCANISMES DE DISTRIBUTION

(PLANCHES 10, 11 ET 12)

DISTRIBUTIONS SANS DÉTENTE..... 362
Tiroir simple commandé par un excentrique circulaire (fig. 1, 2 et 3, pl. 10)..... 362
Conditions de marche et dimensions du tiroir..... 362
Avance absolue à l'introduction..... 365
Expression générale de la course du tiroir. 367
Tracé géométrique de la marche du tiroir. 368
Simplification du tracé géométrique précédent (fig. 3)..... 370
Suppression de l'ellipse..... 372
Principe du changement de marche..... 372
Tiroir simple commandé par une camme dite curviligne équilatérale (fig. 4 et 5, pl. 10). 374
Tracé géométrique de la distribution par la camme fig. 5..... 375
Comparaison entre les effets de l'excentrique circulaire et de la camme curviligne..... 377
Distributeurs divers fonctionnant comme le tiroir simple..... 378
Tiroir de Watt..... 378
Robinet distributeur de Maudslay..... 380
Disques circulaires distributeurs..... 381
DISTRIBUTIONS AVEC DÉTENTE..... 382
Détente fixe dite opérée par recouvrement (fig. 6 à 8, pl. 10)..... 382
Tracé géométrique de la détente par recouvrement..... 384
TABLE des dimensions relatives d'un tiroir, de sa course et l'angle de calage, pour opérer, à divers degrés, une détente par recouvrement. 388
Application des données précédentes (fig. 6, 7 et 8)..... 388
Détente fixe par une glissière (fig. 1 et 2, pl. 11). 390
Conditions de marche de la glissière de détente (fig. 1, pl. 11)..... 392
Tracé géométrique de la détente fixe (fig. 2, pl. 11)..... 394
Détente fixe par une glissière mobile percée de lumières (fig. 3 et 4, pl. 11)..... 397
Tracé géométrique de la distribution à détente par une glissière à lumières... 397
Détente par un excentrique à bosses..... 399
Détente variable, dite détente d'Edwards..... 401
Détente variable, dite détente de Farcot (fig. 5 à 9, pl. 11)..... 404
Ensemble du mécanisme..... 405
Détails de la construction..... 408
Étude géométrique (fig. 7 et 8, pl. 11).. 409
Tracé de la camme de détente..... 412
Détente variable par la largeur des orifices, par M. George (fig. 1 et 2, pl. 12)..... 414
Détente variable, dite détente Meyer (fig. 3, pl. 12)..... 417
Détente variable, dite détente Trézel (fig. 4 à 7, pl. 12)..... 419
Description de la distribution à détente Trézel..... 419
Détente variable par un manchon à bosses, exécutée par MM. Stehelin et Cᵉ (fig. 8 et 8 *bis*, pl. 12)..... 421
EMPLOI DES SOUPAPES ÉQUILIBRÉES COMME ORGANES DISTRIBUTEURS..... 424
Construction d'une soupape dite équilibrée (fig. 11, pl. 12)..... 425
Ensemble d'une distribution à soupapes, par M. J.-F. Révollier (fig. 9 et 10, pl. 12).... 427
Jeu des soupapes..... 428
Mécanisme de la commande des soupapes. 429
Moyen d'opérer la détente..... 429

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## CHAPITRE III

### APPAREILS D'ALIMENTATION DES GÉNÉRATEURS A VAPEUR

(PLANCHE 13)


Pages.

POMPES ALIMENTAIRES..... 432
Pompe foulante simple (fig. 1 à 3)..... 432
Disposition générale..... 432
Détails de construction..... 433
Commande des pompes alimentaires.... 434
Conduite des pompes alimentaires..... 435
Pompes alimentaires de diverses dispositions (fig. 4 à 7)..... 436
Pompe dite d'Edwards (fig. 4)..... 436
Pompe avec boîtes rapportées et clapets à charnières, par M. E. Bourdon (fig. 5 à 7). 437
ALIMENTATEURS AUTOMOTEURS..... 439
Alimentateur à colonne appliqué aux générateurs à basse pression (fig. 8)..... 440
Pompe alimentaire élévatoire (fig. 9).... 441
Alimentateurs à haute pression..... 442
Retour d'eau ou bouteille d'alimentation.. 442
Régulateur d'alimentation fonctionnant avec une pompe..... 443
Alimentateur à cataracte (fig. 10)..... 444
Injecteur alimentaire automoteur, par M. Giffard (fig. 11)..... 447
Construction et fonctionnement de l'injecteur (fig. 11)..... 448
Aperçu sur la théorie de l'injecteur Giffard..... 450
Régulateur automoteur d'alimentation, par M. Gargan..... 454


## CHAPITRE IV

### APPAREILS DE CONDENSATION

(PLANCHE 14)


DENSATION..... 458
ONSTRUCTIONS
..... 460
ue du
. 460
(fig. 6 à 10)..... 465
Construction des clapets en caoutchouc (fig. 6, 9 et 10)..... 467
Robinets à soupapes pour échappement variable (fig. 8)..... 468
Condenseur agissant par surfaces réfrigérantes (fig. 11)..... 469
PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES APPAREILS DE CONON..... 471
appareil de condensation... 471
tés d'eau à injecter.... 473


Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

## CHAPITRE VI

### MACHINES A VAPEUR HORIZONTALES

(PLANCHES 18 A 25)


Pages.

MACHINE HORIZONTALE, de Ph. Taylor..... 500
MACHINE HORIZONTALE A DÉTENTE VARIABLE ET SANS CONDENSATION, par MM. Cail et Ce (pl. 18 et 19)..... 502
Ensemble de la construction ..... 502
Détails de construction..... 504
Cylindre à vapeur..... 504
Boîte à distribution..... 505
Distribution et détente..... 505
Mécanisme de variation de la détente.... 506
Glissières du piston..... 507
Pompe alimentaire..... 508
Volant..... 508
Dimensions et conditions de marche..... 508
MACHINE A DISTRIBUTION DITE RATIONNELLE, par M. E. Maldant..... 509
MACHINE HORIZONTALE A DÉTENTE VARIABLE ET A CONDENSATION, par M. E. Bourdon (pl. 20 et 21)..... 511
Ensemble de la construction..... 512
Détails de construction..... 514
Cylindre à vapeur..... 514
Piston moteur..... 515
Distribution..... 516
Appareil de condensation..... 517
Pompe alimentaire..... 518
Volant..... 519
Dimensions et conditions de marche..... 519
MODE SPÉCIAL D'APPLICATION DU CONDENSEUR A UNE MACHINE HORIZONTALE..... 374
MACHINES HORIZONTALES A DÉTENTE [illegible]ion par A CONDENSATION, par MM ..... 375
[illegible]s de l'excentrique
[illegible]amme curviligne..... 377
[illegible]vers fonctionnant comme le ti-[illegible]pie..... 378
Tiroir de Watt..... 378
Robinet distributeur de Maudslay..... 380
Disques circulaires distributeurs..... 381
DISTRIBUTIONS AVEC DÉTENTE..... 382
Détente fixe dite opérée par recouvrement (fig. 6 à 8, pl. 10)..... 382
Tracé géométrique de la détente par recouvrement..... 384
TABLE des dimensions relatives d'un tiroir, de sa course et l'angle de calage, pour opérer, à divers degrés, une détente par recouvrement. 388
Application des données précédentes (fig. 6, 7 et 8)..... 388
Détente fixe par une glissière (fig. 1 et 2, pl. 11). 390
Conditions de marche de la glissière de

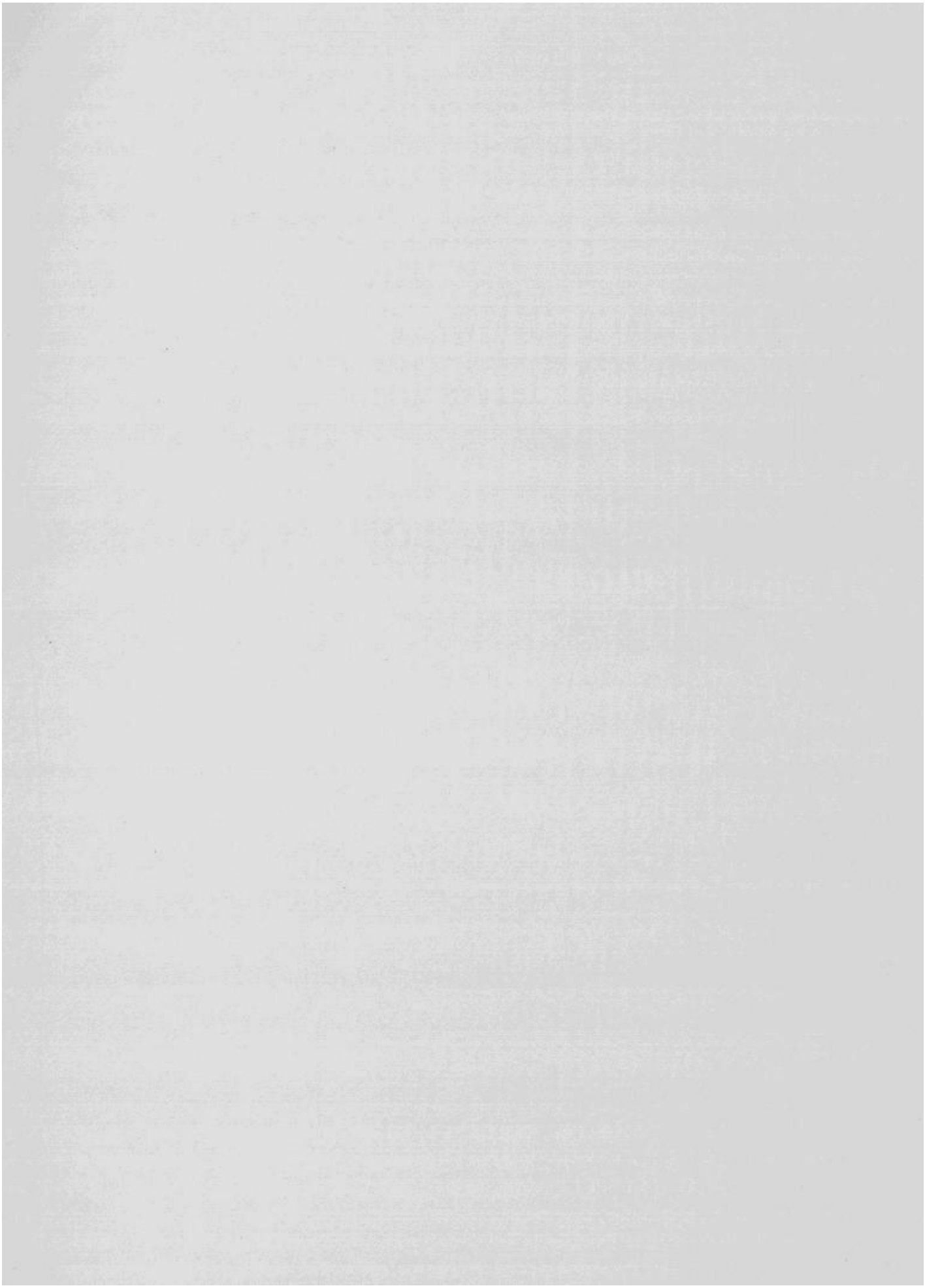
Pages.

et 23)..... 522
Ensemble de la construction des machines du système Farcot..... 523
Détails de construction..... 525
Cylindre et distribution..... 525
Mécanisme du régulateur..... 526
Appareil de condensation..... 529
Palier principal..... 531
Dimensions et conditions de marche des deux machines représentées pl. 22 et 23..... 532
Premier modèle..... 532
Deuxième modèle..... 533
MACHINE HORIZONTALE A DÉTENTE VARIABLE ET A CONDENSATION, par M. Bréval (pl. 24)... 534
Ensemble de la construction.....
Détails de construction.....
Distribution..... 392
Régulateur..... [illegible]ae (fig. 2,
Étude du mode particuli[illegible]..... 394
Dimensions et conditions d[illegible]mobile percée de
MACHINE HORIZONTALE A [illegible]11)..... 397
CONDENSATION, par [illegible]de la distribution à
Ensemble de la co[illegible]ne glissière à lumières... 397
Details de con[illegible]excentrique à bosses..... 399
Cylind[illegible]ue, dite détente d'Edwards..... 401
Di[illegible]ariable, dite détente de Farcot (fig. 5 [illegible]pl. 11)..... 404
Ensemble du mécanisme..... 405
Détails de la construction..... 408
Étude géométrique (fig. 7 et 8, pl. 11).. 409
Tracé de la camme de détente..... 412
Détente variable par la largeur des orifices, par M. George (fig. 1 et 2, pl. 12)..... 414
Détente variable, dite détente Meyer (fig. 3, pl. 12)..... 417
Détente variable, dite détente Trézel (fig. 4 à 7, pl. 12)..... 419
Description de la distribution à détente Trézel..... 419
Détente variable par un manchon à bosses, exécutée par MM. Stehelin et Ce (fig. 8 et 8 *bis*, pl. 12)..... 421
EMPLOI DES SOUPAPES ÉQUILIBRÉES COMME ORGANES DISTRIBUTEURS..... 424
Construction d'une soupape dite équilibrée (fig. 11, pl. 12)..... 425
Ensemble d'une distribution à soupapes, par M. J.-F. Révollier (fig. 9 et 10, pl. 12).... 427
Jeu des soupapes..... 428
Mécanisme de la commande des soupapes. 429
Moyen d'opérer la détente..... 429

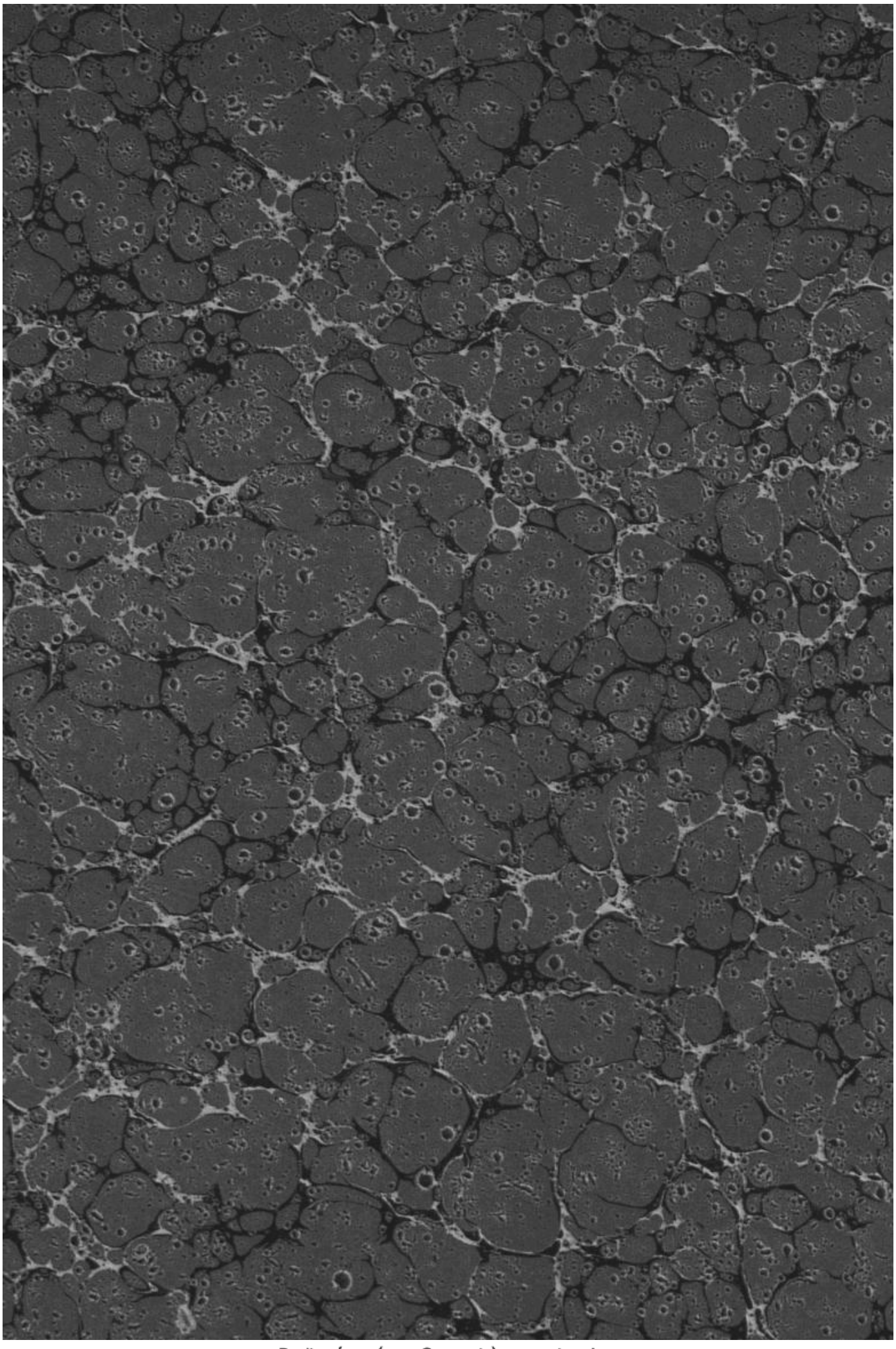

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

Droits réservés au Cnam et à ses partenaires

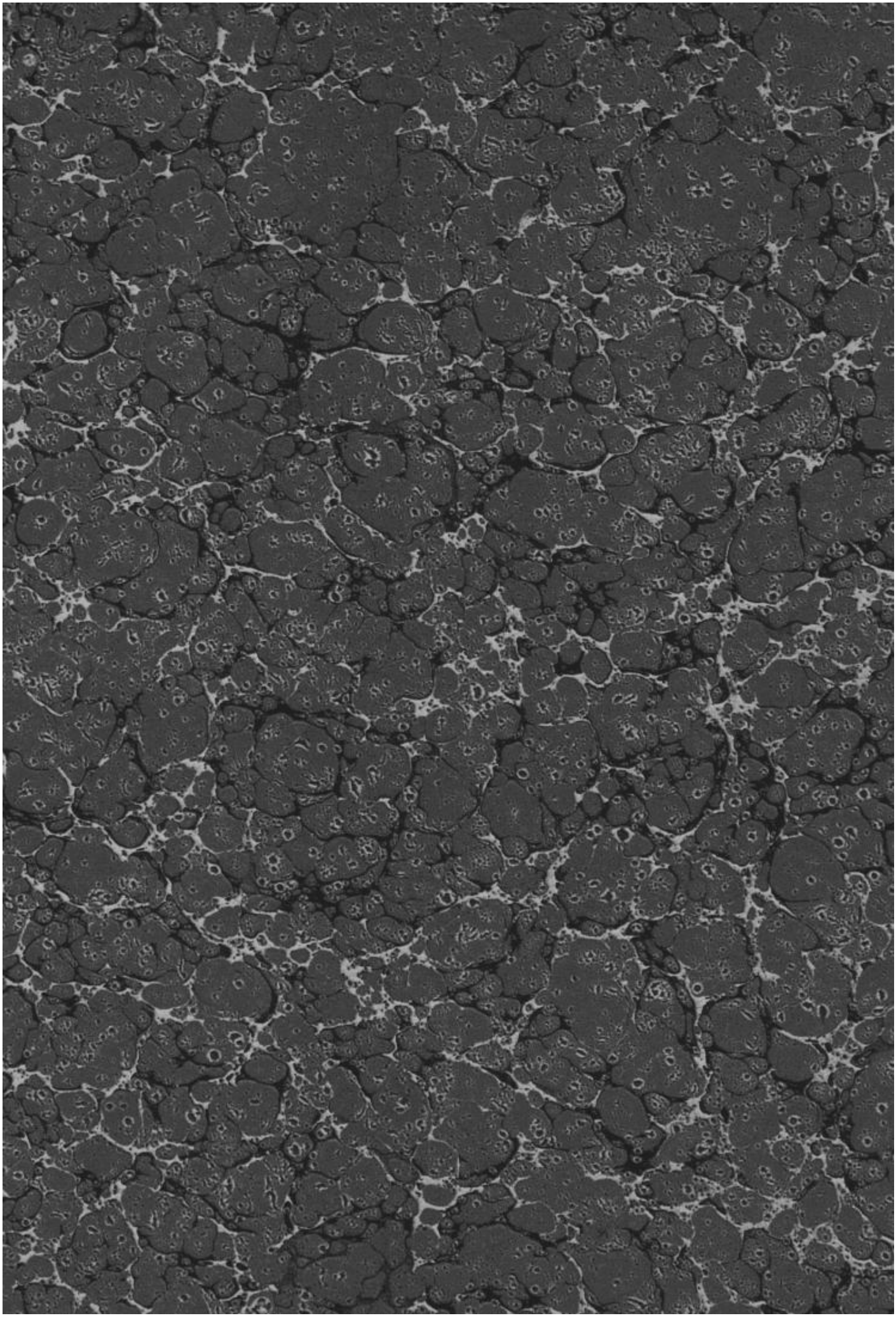
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



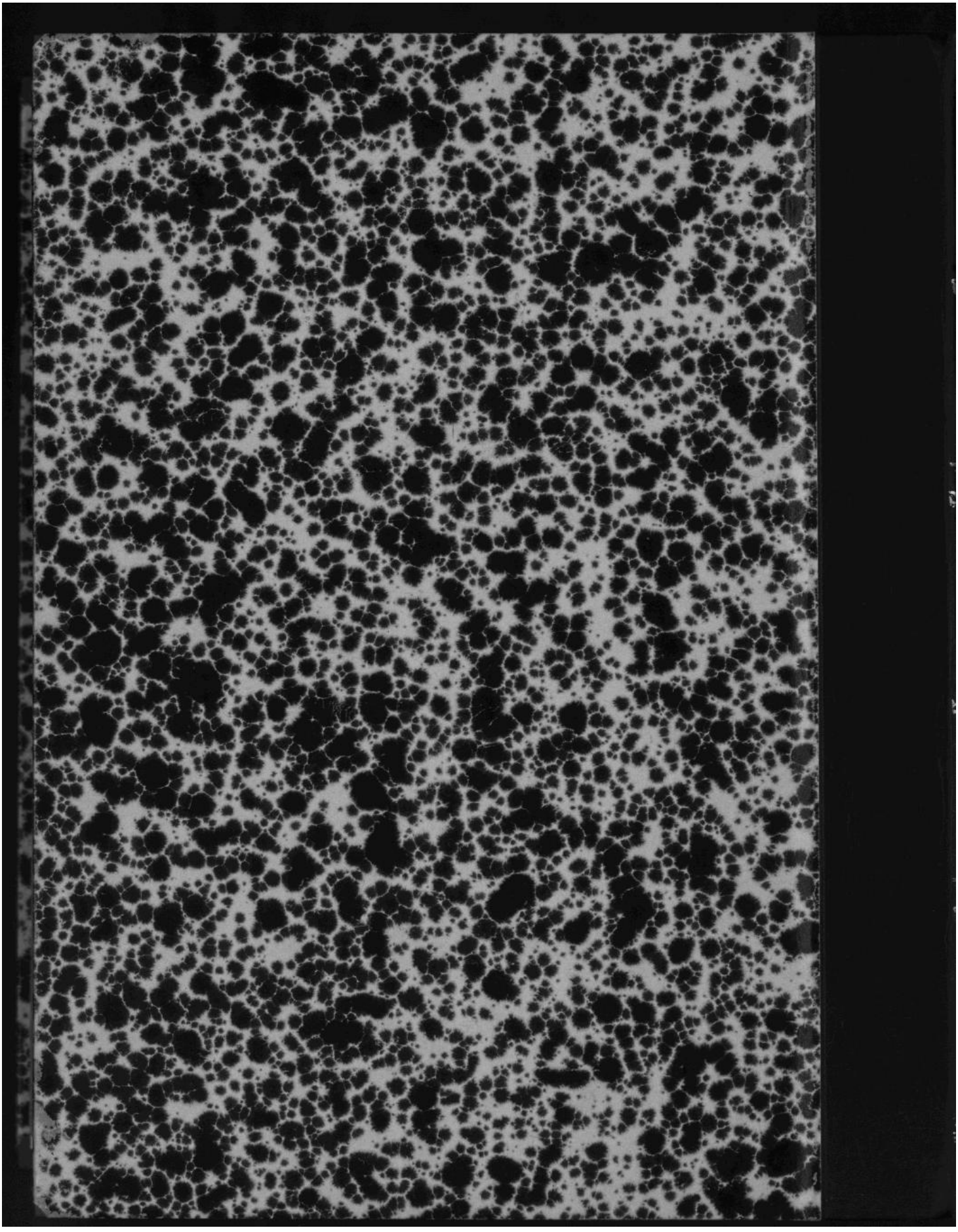
Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires



Droits réservés au Cnam et à ses partenaires