



ENCYCLOPÉDIE SCIENTIFIQUE

DES

AIDE-MÉMOIRE

PUBLIÉE

SOUS LA DIRECTION DE M. LÉAUTÉ, MEMBRE DE L'INSTITUT

*Ce volume est une publication de l'Encyclopédie
scientifique des Aide-Mémoire ; F. Lafargue, ancien
élève de l'École Polytechnique, Secrétaire général,
46, rue Jœuffroy (boulevard Malesherbes), Paris.*

42705
131.

ENCYCLOPÉDIE SCIENTIFIQUE DES AIDE-MÉMOIRE

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION

DE M. LÉAUTÉ, MEMBRE DE L'INSTITUT.

LES

MACHINES THERMIQUES

(A VAPEUR, A AIR CHAUD ET A GAZ TONNANTS)

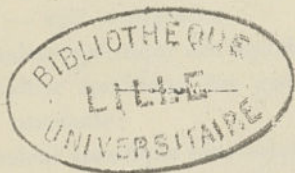
PAR

AIMÉ WITZ

Docteur ès Sciences

Ingénieur des Arts et Manufactures

Professeur à la Faculté libre des Sciences de Lille



PARIS

GAUTHIER-VILLARS ET FILS,

IMPRIMEURS-ÉDITEURS

G. MASSON, ÉDITEUR,


LIBRAIRE DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

Quai des Grands-Augustins, 55 | Boulevard Saint-Germain, 120

(Tous droits réservés)

**Du même auteur
et dans la même collection :**

*THERMODYNAMIQUE
A L'USAGE DES INGÉNIEURS*



NOTATIONS

ADOPTÉES DANS CET OUVRAGE

- τ , travail exprimé en kilogrammètres ;
- Q , chaleur exprimée en calories ;
- J , équivalent mécanique de la chaleur ;
- A , équivalent calorifique du travail ;
- R , constante des gaz ;
- p , pression exprimée en kilogrammes par mètre carré ;
- v , volume exprimé en mètres cubes ;
- T , température absolue comptée à partir de — 273° centigrades ;
- c , chaleur spécifique des liquides ;
- C , chaleur spécifique des gaz sous pression constante ;
- C' , chaleur spécifique sous volume constant ;
- γ , rapport des chaleurs spécifiques sous pression et volume constant ;
- λ , chaleur totale d'échauffement et de vaporisation des liquides ;
- r , chaleur latente de vaporisation ;

u , excès de volume spécifique d'une vapeur saturée sur son liquide ;

x , proportion de vapeur contenue dans un mélange ;

ρ , rendement du cycle de Carnot ;

ρ' , rendement théorique calculé d'un cycle ;

$\rho_1 = \frac{\rho'}{\rho}$, rendement générique de ce cycle ;

ρ'' , rendement pratique observé d'un cycle ;

$\rho_2 = \frac{\rho''}{\rho}$; rapport des rendements pratiques et du rendement de Carnot ;

ε , rendement organique ;

$\tau = \int_0^r \frac{dQ}{T}$, dQ étant la chaleur élémentaire du liquide.

FORMULES APPLIQUÉES DANS CET OUVRAGE

Les numéros correspondent à ceux de notre *Thermodynamique à l'usage des Ingénieurs* publiée précédemment dans la même collection.

$$(1) \quad \tau = JQ \quad \text{et} \quad Q = A\tau$$

$$(9) \quad C = C' + Ap \frac{dv}{dt}$$

$$(13) \quad \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

$$(14) \quad \int \frac{dQ}{T} - \int \frac{dQ'}{T'} = 0$$

$$(17) \quad pv = RT$$

$$(18) \quad C - C' = AR$$

$$(24) \quad pv^\gamma = p_0 v_0^\gamma = \text{const.}$$

$$(25) \quad \frac{T}{T_0} = \left(\frac{v_0}{v}\right)^{\gamma-1}$$

$$(26) \quad \frac{T}{T_0} = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$(27) \quad \varepsilon = RT \text{ Log} \left(\frac{v}{v_0}\right) = RT \text{ Log} \left(\frac{p_0}{p}\right)$$

$$(28) \quad \varepsilon = \frac{RT}{\gamma-1} \left(1 - \left(\frac{v_0}{v}\right)^{\gamma-1}\right)$$

$$(29) \quad \varepsilon = \frac{RT}{\gamma-1} \left(1 - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right)$$

$$(36) \quad \lambda = Q + r$$

$$(41) \quad \int_0^T \frac{CdT}{T} + \frac{rx}{T} - \frac{r_0 x_0}{T_0} = 0$$

$$(43) \quad \tau + \frac{rx}{T} = T_0 + \frac{r_0 x_0}{T_0} = 0$$

$$(44) \quad \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon = J [c(T_0 - T_1) + (r_0 - Ap_0 u_0) x_0 - \\ \quad - (r_1 - Ap_1 u_1) x_1] \end{array} \right.$$

$$(51) \quad \rho = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

ERRATA

De la Thermodynamique à l'usage des Ingénieurs.

Page 55. ligne 17 ; au lieu de

$$R = \frac{p_0 v_0}{T} \text{ lisez } R = \frac{p_0 v_0}{T_0}$$

Page 64, dernière ligne, au lieu de

$$\frac{l}{T^2} \frac{1}{T} \frac{dC'}{dv} \text{ lisez } \frac{l}{T_2} = \frac{1}{T} \frac{dC'}{dv}$$

Page 85, ligne 16, au lieu de

$$RT \text{ lisez } AR$$

Page 126, au lieu de

$$\log \text{ lisez } \text{Log}$$

Page 143, ligne 5, au lieu de

$$\frac{r}{T_2} dt \text{ lisez } \frac{xr}{T_2} dt$$

PRÉFACE

L'objet de ce livre est d'établir un parallèle entre les diverses machines thermiques et de les rapprocher dans un tableau d'ensemble, de manière à faire mieux ressortir le caractère spécial de leurs cycles respectifs. En comparant leurs rendements théoriques, génériques et réels, on se rend compte de leur valeur relative et de la perfection que ces machines peuvent atteindre : cette étude permet de les classer, non seulement par les services qu'elles rendent à l'heure présente, mais encore d'après les espérances qu'on est en droit de fonder sur elles pour l'avenir.

INTRODUCTION

Il y a longtemps que l'homme a senti la nécessité de chercher des auxiliaires pour se débarrasser sur eux des travaux corporels qui s'imposaient à lui : il commença d'abord par utiliser la force des animaux, puis celle des vents et enfin celle des chutes d'eau ; moulins à vent et roues hydrauliques sont de vieux serviteurs de l'humanité. Mais l'accroissement de la population et la multiplication de ses besoins les rendirent bientôt insuffisants et il fallut s'ingénier à découvrir des moteurs plus puissants et surtout plus indépendants de l'air et du sol.

Le xvii^e siècle fut le premier à se préoccuper de trouver le moyen d'élever les eaux par des machines : les mineurs du Cornwall, du Northumberland, de l'Auvergne, de la Westphalie étaient obligés d'épuiser les nappes qui envahissaient

leurs galeries et menaçaient d'arrêter leurs travaux ; à bras d'homme, cette opération était impossible ; les manèges de chevaux auraient eux-mêmes occupé des milliers d'animaux. Un gentilhomme du Middlesex appliqua le feu à cette opération : on pouvait de la sorte, en proportionnant la dépense de chaleur au travail à développer, élever n'importe quelle quantité d'eau. L'importance du fait était capitale, et il est juste que cette découverte fasse époque.

Il est vrai que la puissance motrice du feu était déjà connue ; Aristote l'avait indiquée et Héron d'Alexandrie l'avait appliquée à la construction d'instruments de physique amusante, qui, pour être des jouets, n'en constituaient pas moins des mécanismes de transformation du calorique en travail. Cet ingénieux physicien construisit des automates qui se présentaient sur la scène et rentraient d'eux-mêmes dans les coulisses, des divinités qui versaient à boire, un merle qui sifflait, et surtout une sphère tournante, dite éolipyle, dont on trouve la description dans tous les livres sans que nul puisse dire l'usage qu'on fit de cet appareil : c'eût été la première machine à vapeur, si Héron avait trouvé à en faire une application sérieuse et utile. Personne n'eut cette idée si simple d'asservir la

force motrice de la vapeur et il fallut attendre de longs siècles avant de tirer profit de la puissance du feu. Léonard de Vinci essaya à la fin du quinzième siècle un canon à vapeur, appelé l'architonnerre, qui lançait, dit-on, au loin de gros boulets. Jérôme Cardan, Giovanni Battista della Porta, Salomon de Caus se proposèrent aussi d'utiliser la tension de la vapeur ; l'abbé Hautefeuille chercha, d'autre part, à dompter la poudre et il prépara la machine de Huyghens, que celui-ci fit voir à Colbert : mais il ne parait pas que l'on montra autre chose au grand ministre que le spectacle risible de quelques laquais suspendus à une corde passée sur une poulie et soulevés brutalement par la descente d'un piston. Dans un ouvrage célèbre : *Nova Methodus ad vires motrices validissimas levi pretio comparandas*, Papin indiqua un autre procédé pour faire travailler la poudre pacifiquement et utilement. Mais la machine motrice transformant l'énergie du feu et marchant continuellement n'existait pas avant que le gentilhomme anglais dont nous parlions plus haut eût réalisé sa machine à faire monter les eaux, *water commanding Engine*.

Il s'appelait Edouard Somerset, marquis de Worcester. La machine qu'il construisit élevait

en une minute quatre grands seaux d'eau à une hauteur de 40 pieds, par un tuyau de 8 pouces de diamètre; elle fonctionnait aussi longtemps que fonctionnait son foyer; c'est en vérité la première machine à feu. Elle fut brevetée en 1663, par un acte du Parlement; il y était stipulé qu'un modèle de la machine devrait être conservé à l'Échiquier; Worcester était autorisé à jouir pendant 97 ans des privilèges et profits de cet engin, sauf à en prélever le dixième en faveur du roi.

Mais, à cette époque, l'Angleterre était encore trop troublée pour accorder à la *water commanding Engine* l'attention qu'elle méritait; du reste, la machine était encore bien imparfaite. Elle fut perfectionnée par Papin, Savery, Désaguliers et Smeaton. La première machine élévatoire de ce dernier, construite en 1774, consommait encore 38^{kg}, 100 de charbon pour élever 726 327 kilogrammes d'eau à 1 mètre de hauteur; elle donnait donc 19 114 kilogrammètres par kilog. de charbon. C'était un rendement d'environ 1 0/0 : mais Smeaton obtint plus tard 5 0/0.

Newcomen sut tirer les machines à vapeur modernes des machines élévatoires que nous venons de décrire en séparant la pompe du moteur : un piston se mouvait dans un cylindre alésé et com-

mandait par l'intermédiaire d'un balancier la maitresse-tige de l'appareil d'exhaure. Un enfant était chargé d'ouvrir et de fermer les robinets qui produisaient les mouvements alternatifs du piston : cet enfant, qui s'appelait Humphry Potter, trouva le moyen de satisfaire sa paresse en inventant un jeu de ficelles qui remplissait automatiquement sa tâche, et duquel on a déduit plus tard l'excentrique. Newcomen a été le véritable précurseur de Watt ; il a élevé le rendement de la machine à vapeur à 10 %, et il a permis de généraliser son emploi et de l'appliquer à actionner toute espèce de mécanisme de l'industrie. Watt dut encore trouver le moyen de marcher à double effet ; il eut à créer le condenseur séparé, le régulateur et à perfectionner les organes de distribution : la machine à vapeur était dès lors constituée. C'était en 1776.

Remarquons comment il est arrivé que la machine à feu soit devenue une machine à vapeur ; on a abandonné la poudre aussi bien que l'air dilaté et Papin a accordé la préférence à la vapeur d'eau parce que, dit-il, elle fait ressort comme l'air et se condense ensuite par le froid, si bien qu'il ne reste plus aucune apparence de cette force de ressort. Ce peu de mots dit excellemment les facilités d'emploi que présente la

vapeur d'eau et il explique pourquoi c'est la machine à vapeur qui s'est développée la première.

Le génie de Watt avait marqué la machine à vapeur de sa profonde empreinte et ses contemporains et successeurs Hornblower, Farey, Woolf, etc., eurent peu de peine à modifier et à perfectionner les détails d'une machine complète dans son idée et parfaite dans son concept. En augmentant les pressions, en allongeant les détenteuses, en accélérant les vitesses du piston, en asséchant la vapeur, on parvint graduellement à améliorer le rendement de la machine à vapeur. Un kilogramme de charbon donnait alors aisément 250 000 kilogrammètres; c'était un beau progrès, mais le rendement restait malgré tout bien médiocre, puisque la thermodynamique montrait que le kilogramme de charbon à 8 080 calories renfermait à l'état potentiel 3 434 000 kilogrammètres d'énergie. On commença à moins admirer le chef-d'œuvre de Watt et l'on se prit à chercher d'un autre côté une meilleure solution.

C'est sous cette inspiration que l'on accorda tant d'attention à la machine à air chaud du révérend Stirling et à celle du capitaine Ericsson (1);

(1) Le pyrobéliier de Montgolfier avait devancé d'un demi-siècle l'invention de Stirling.

théoriquement ces machines réalisaient sur la machine à vapeur un grand progrès, parce que la chute de température y était plus grande, et que de plus il ne devait pas y avoir de chaleurs inutilisées, attendu qu'elles étaient reprises par les régénérateurs, dont on attendait merveille. Enfin, on se faisait l'illusion de pouvoir réaliser aisément le cycle théorique de ces machines qui devaient bientôt remplacer la machine à vapeur.

Ces illusions ne durèrent pas longtemps et la machine à vapeur conserva le monopole de l'usine, des chemins de fer et des mers. Le moteur à gaz Lenoir, breveté en 1860, parut bien encore une fois vouloir faire concurrence à la vapeur, mais il consommait tant de gaz et tant d'huile, ce gaz et cette huile étaient d'ailleurs à un prix si élevé, que les applications du moteur Lenoir furent extrêmement limitées.

Du reste, la machine à vapeur ne cessait de progresser aussi. La variabilité de la détente par l'action du régulateur est due à Thomas, à Cavé et à Farcot; grâce à des mécanismes spéciaux, le régulateur distribue à chaque coup de piston la quantité de vapeur strictement nécessaire pour maintenir la vitesse de régime de la machine. L'américain Corliss a été plus ingénieux encore; un déclat produit des ouvertures instantanées

des lumières du cylindre ; de plus, ces lumières sont multipliées et disposées au nombre de quatre, à l'avant et à l'arrière, au haut et au bas du cylindre. Corliss a eu de nombreux imitateurs, et les machines Ingliss, Sulzer, Bède, Farcot, Frikart, Dujardin, etc., se sont répandues partout. Enfin les travaux de Benjamin Normant, de John Elder et de Dupuy de Lôme ont vulgarisé les dispositifs Compound, dans lesquels on emploie deux, trois et même quatre cylindres en cascade, pour pratiquer une expansion multiple qui permet de détendre la vapeur complètement et dans les conditions les meilleures.

Le résultat de ces innovations est remarquable. Il y a soixante ans, le poids moyen des machines à vapeur était de 1 200 kilog. par cheval ; en 1850, ce poids n'était que plus de 700 kilog. et aujourd'hui on construit pour la marine des machines pesant moins de 100 kilog. par cheval. Le prix des machines a suivi la même progression décroissante ; pour 75 chevaux, on payait 70 000 francs en 1860, machine, chaudière, tuyaux, accessoires et tous frais compris ; on dépense moitié moins en 1894.

Mais c'est surtout dans la réduction des consommations que se révèle la marche progressive de la machine à vapeur. Watt brûlait 4 kilog.

de charbon par cheval-heure effectif ; aujourd'hui, la plupart des machines de l'industrie donnent le cheval-heure par un kilogramme de charbon et il en est qui ne consomment même que 700 grammes. C'est, il est vrai, le meilleur résultat obtenu, et nous doutons que de quelque temps on obtienne mieux.

Or, les moteurs à air chaud et les moteurs à gaz tonnant, qui ne diffèrent pas essentiellement les uns des autres, ont fait, eux aussi, des pas de géants depuis Stirling et Lenoir ; les moteurs à gaz surtout, développés par Otto, ont pris des qualités industrielles de résistance et de régularité qui leur permettent de lutter avantageusement avec la machine à vapeur ; au point de vue de la consommation, ces moteurs ont même dépassé leur concurrent. Ainsi, en alimentant un moteur à gaz de gaz pauvres, fournis par un gazogène Dowson, ou un autre du même genre, on arrive, et nous en avons fait la constatation officielle sur un moteur Simplex, à ne plus dépenser que 550 grammes d'anthracite par cheval-heure effectif et une cinquantaine de grammes de coke. Il est vrai que c'est de l'anthracite Llanelly qui donne ce beau rendement, mais tout charbon maigre à longue flamme conviendrait aussi bien à l'entretien d'un gazogène, et l'é-

conomie réalisée par cette différence de consommation reste énorme. Du reste, la conduite de ces machines, dont la puissance atteint déjà 200 chevaux par cylindre est très facile ; l'emplacement couvert par un moteur avec son gazogène n'est pas plus grand que celui qu'il faut pour installer une machine à vapeur, sa chaudière et sa cheminée, et le prix du moteur à gaz complet ne dépasse pas celui de la machine à vapeur complète. Bref, le moteur à gaz dispute déjà à la machine à vapeur le domaine industriel que le génie de Watt semblait lui avoir conquis pour des siècles ⁽¹⁾.

Est-ce à dire que la machine à vapeur sera nécessairement et rapidement vaincue dans ce duel ? Nous ne le prétendons pas, car aucune théorie ne permet positivement d'assigner un terme défini aux progrès successifs et constants réalisés par l'idée de Watt depuis 1776 ; elle peut encore se développer beaucoup et l'on aurait tort de croire qu'elle soit doré et déjà arrivée à sa toute dernière expression.

D'autre part, nous sommes convaincus que,

(1) Toutes ces considérations sont développées longuement dans notre *Traité théorique et pratique des Moteurs à gaz tonnants*, 3^e édition, 1891, Paris, E. Bernard et C^{ie}.

quels que soient les mérites du moteur à gaz, il aura bien de la peine à se substituer à la machine à vapeur dans ses deux plus grandes applications, qui sont l'industrie des transports par terre et par eau. Les défenseurs passionnés de la machine à vapeur ont donc raison de déclarer aux admirateurs enthousiastes du moteur à gaz que, sur ce terrain, ils ne redoutent pas la lutte : il faut au moins laisser au moteur à gaz le temps d'avoir son Fulton et son Stephenson.

Ces réserves faites, il nous sera permis d'exprimer notre admiration pour le moteur à gaz et les espérances que nous fondons sur lui.

Les considérations historiques qui précèdent étaient l'introduction obligée de notre étude parallèle et comparative des divers moteurs thermiques.

The first part of the paper is devoted to a general discussion of the problem of the existence of solutions of the system of equations (1) in the case of a linear operator. It is shown that the system (1) has a solution if and only if the operator A is invertible. The second part of the paper is devoted to a study of the properties of the solutions of the system (1) in the case of a linear operator. It is shown that the solutions of the system (1) are unique and depend continuously on the data of the problem. The third part of the paper is devoted to a study of the properties of the solutions of the system (1) in the case of a nonlinear operator. It is shown that the solutions of the system (1) are unique and depend continuously on the data of the problem. The fourth part of the paper is devoted to a study of the properties of the solutions of the system (1) in the case of a nonlinear operator. It is shown that the solutions of the system (1) are unique and depend continuously on the data of the problem. The fifth part of the paper is devoted to a study of the properties of the solutions of the system (1) in the case of a nonlinear operator. It is shown that the solutions of the system (1) are unique and depend continuously on the data of the problem. The sixth part of the paper is devoted to a study of the properties of the solutions of the system (1) in the case of a nonlinear operator. It is shown that the solutions of the system (1) are unique and depend continuously on the data of the problem. The seventh part of the paper is devoted to a study of the properties of the solutions of the system (1) in the case of a nonlinear operator. It is shown that the solutions of the system (1) are unique and depend continuously on the data of the problem. The eighth part of the paper is devoted to a study of the properties of the solutions of the system (1) in the case of a nonlinear operator. It is shown that the solutions of the system (1) are unique and depend continuously on the data of the problem. The ninth part of the paper is devoted to a study of the properties of the solutions of the system (1) in the case of a nonlinear operator. It is shown that the solutions of the system (1) are unique and depend continuously on the data of the problem. The tenth part of the paper is devoted to a study of the properties of the solutions of the system (1) in the case of a nonlinear operator. It is shown that the solutions of the system (1) are unique and depend continuously on the data of the problem.

CHAPITRE PREMIER

LES MACHINES THERMIQUES

1. Objet des machines thermiques. — Les machines thermiques, ou machines à feu, sont définies par leur objet, qui est de transformer la chaleur en travail.

On pourrait dire que toutes les machines motrices employées dans l'industrie sont des machines thermiques, attendu que toutes elles tirent leur puissance de la chaleur; les moteurs hydrauliques ou électriques, aussi bien que les moteurs animés, sont compris dans cette loi générale; mais nous ne nous occuperons, dans cet ouvrage, que des machines thermiques proprement dites, dans lesquelles le véhicule du calorique est constitué par une vapeur, un gaz ou un mélange tonnant.

2. Type général. — Toutes les machines thermiques répondent à un type commun. On brûle un combustible; la chaleur, qui résulte de cette réaction chimique, dilate la vapeur ou les gaz mis en œuvre et leur fait acquérir une tension déterminée, laquelle s'exerce sur un piston mobile dans un cylindre et le pousse en avant. C'est la *course-avant* du piston : comme cette course est forcément limitée, il est nécessaire, pour entretenir un mouvement continu, de faire succéder à cette première course une *course-arrière*. Ce résultat s'obtient en diminuant la tension du fluide par une soustraction de calorique. On produit donc une évolution complète en échauffant alternativement le fluide employé au contact d'une source de chaleur appelée *foyer* et en le refroidissant au contact d'un *réfrigérant*. Une machine thermique est, par suite, constituée essentiellement par un foyer placé, pour ainsi dire, en amont du cylindre travailleur et un réfrigérant disposé en aval.

L'action du réfrigérant ramène le fluide à son volume initial; le piston revient, par suite, à sa position première. Les deux coups de piston donnent, par transformation du mouvement alternatif en un mouvement circulaire, un tour de l'arbre moteur : l'ensemble des opéra-

tions subies par le fluide s'achève avec la révolution.

Un nouveau tour recommence par l'action du foyer sur le fluide, et par une nouvelle course en avant.

3. Cycle idéal des machines thermiques.

— L'ensemble des opérations correspondantes à une révolution forme un *cycle* fermé, puisque le fluide repasse périodiquement par le même état initial. Ce cycle pourrait être le cycle de Carnot ou bien tout autre cycle analogue. Admettons provisoirement que le cycle de Carnot soit strictement réalisable et effectivement réalisé : le fluide sera donc chauffé d'abord au contact du foyer, considéré comme une source indéfinie, à une température constante T_1 , puis il sera séparé de cette source et détendu adiabatiquement, jusqu'à ce qu'il ait pris la température T_2 du réfrigérant, considéré aussi comme une source indéfinie. On pourra donc opérer une compression isothermique au contact de cette source ; mais aussitôt que le fluide en sera séparé, cette compression deviendra adiabatique et c'est ainsi que le fluide sera ramené au volume initial et à la température du foyer.

Le travail produit dans le cycle est donné, à

une échelle déterminée, par l'aire du diagramme représentatif de la série des opérations effectuées, ce diagramme étant rapporté aux axes des volumes et des pressions.

Quelle est l'origine et quel est l'équivalent de ce travail ?

4. Rendement d'un cycle de Carnot. — Sadi Carnot croyait que la chaleur reprise par le réfrigérant était mathématiquement égale à celle qui avait été fournie par le foyer : il se trompait. Les thermodynamistes ont démontré, en effet, qu'il se produit dans le cycle une transformation du calorique : il disparaît une quantité de chaleur qui est évidemment l'équivalent du travail effectué τ .

Soient Q_1 , la chaleur cédée par le foyer et Q_2 , la chaleur soustraite par le réfrigérant.

$$Q_1 - Q_2 > 0$$

$$J(Q_1 - Q_2) = \tau.$$

$Q_1 - Q_2$ est la quantité de chaleur transformée en travail, alors que l'on disposait d'une quantité de chaleur Q_1 ; $\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$ est donc le rapport du calorique utilisé au calorique disponible; c'est ce que Verdet avait appelé le coeffi-

cient économique du cycle. Pour nous, c'est le *rendement théorique* de la machine thermique : nous l'écrirons ρ .

Mais nous savons que

$$(13) \quad \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Nous aurons donc :

$$\rho = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Le rendement d'une machine, évoluant suivant le cycle de Carnot, serait donc égal au rapport de la chute de température à la température initiale. Il est sans doute inutile de rappeler qu'il s'agit ici de températures absolues.

On voit que, pour des températures données du réfrigérant ou du foyer, la fraction utilisée est d'autant plus grande que l'évolution se fait entre des limites de température plus étendues ; c'est un fait capital pour l'appréciation de la valeur relative des diverses machines thermiques.

Voici un autre fait non moins important : en vertu du théorème de Carnot, le rendement ne dépend nullement de la nature du fluide mis en œuvre, vapeur d'eau, vapeur d'un autre liquide, hydrogène, air ou gaz quelconque. Cette affir-

mation de la thermodynamique étonnait et déroutait les anciens ingénieurs : mais elle était formelle et elle s'imposait d'autorité ; il a fallu s'incliner et renoncer à de chères illusions. Nous n'en parlons que pour mémoire.

La connaissance exacte de la valeur du rendement a aussi contribué à dissiper une autre erreur, relative à la perfection plus ou moins grande des moteurs thermiques en général. On comparait le travail fourni par les machines à feu au produit qu'on obtiendrait en multipliant Q_1 , le calorique disponible, par J , l'équivalent mécanique de la chaleur, et l'on faisait ressortir avec dédain la différence énorme qui existait entre ces deux chiffres. Ainsi, on rapprochait les 270 000 kilogrammètres ⁽¹⁾ que produit un kilog. de charbon donnant 8 080 calories des $8\ 080 \times 425 = 3\ 434\ 000$ kilogrammètres que le principe de Mayer semblait promettre et l'utilisation était estimée dérisoire ! Elle le serait, en effet, si l'on pouvait admettre que tout le calorique fourni par la combustion du charbon soit transformable en travail : il n'en est malheureusement pas ainsi. Mais il n'y a pas lieu de s'en

(1) C'est le travail du cheval-heure :

$$75 \times 60 \times 60 = 270\ 000.$$

étonner : pouvons-nous davantage utiliser et actualiser toute l'énergie de position possédée par l'eau débitée au bief d'amont d'une chute ? Nous n'en recueillons qu'une fort minime partie par nos appareils hydrauliques : pour tout recueillir, il faudrait que cette eau tombât jusqu'au centre de la terre, vers lequel la gravitation la sollicite et que l'on pût installer en ce point les roues d'eau et les turbines motrices. Cette comparaison s'applique parfaitement au cas des machines thermiques. En effet, pour transformer en kilogrammètres les 8 080 calories d'un kilogramme de charbon, il faudrait que ρ fût égal à l'unité, c'est-à-dire que T_2 devint égal à zéro : le réfrigérant devrait donc être maintenu à la température du zéro absolu, lequel n'est pas plus facile à atteindre que le centre du globe. En réalité, on ne peut retirer de la chaleur disponible Q_1 que $Q_1 J \rho$ kilogrammètres, et il faut savoir s'en contenter.

Du reste, c'est le maximum de travail utilisable, attendu que le cycle de Carnot a le coefficient économique maximum.

Pour une machine fonctionnant entre 150 et 100° centigrades, soit entre 423 et 373° absolus, on trouve que ρ est égal à 0,118 ; la calorie ne donnera donc pas 425 kilogrammètres, mais seu-

lement $425 \times 0,118 = 50$ kilogrammètres; si les limites étaient, comme cela devrait être dans les moteurs à gaz tonnant, 1803 et 323° , on aurait $\rho = 0,82$ et la calorie développerait 348 kilogrammètres.

Ce dernier chiffre pourrait faire naître des espérances exagérées, si nous laissions oublier au lecteur que le cycle de Carnot, auquel correspond cette valeur de ρ , n'est pas réalisable. Et d'abord, ce cycle, composé de deux paires d'isothermiques et d'adiabatiques, exigerait de l'enceinte dans lequel il serait effectué un concours que la matière ne peut donner; la variation de volume à température constante suppose en effet une paroi d'une conductibilité parfaite, tandis que la détente adiabatique ne peut se faire qu'au contact d'une paroi absolument dénuée de conductibilité. Ces conditions sont évidemment contradictoires. Mais elles sont de plus entièrement fictives, car l'absolu n'existe pas dans le domaine de la conductibilité. Du reste, j'ai démontré expérimentalement il y a quelques années ⁽¹⁾ qu'il est impossible d'observer un changement d'état, sans perte ni gain de chaleur,

(1) A. WITZ. — *Essai sur l'effet thermique des parois d'une enceinte sur les gaz qu'elle renferme*. Thèse inaugurale, Paris, Gauthier-Villars, 1878.

attendu que l'action de paroi est encore considérable sur un gaz dont la détente s'effectue en $\frac{1}{500}$ de seconde. Il est plus facile de réaliser une isothermique : ainsi, dans les machines à vapeur bien établies, la vapeur reste à température constante durant toute l'admission ; toutefois, dans les gaz, la formule $pv = \text{const.}$ n'est presque jamais la loi exacte du phénomène. En somme, la réalisation du cycle formé d'isothermiques et d'adiabatiques est impossible à tous égards.

5. Cycles types des machines thermiques. — Le cycle théorique des machines thermiques n'est donc point celui de Carnot : le génie des inventeurs ne pouvait s'arrêter à une fiction. Mais le cycle de Carnot, qui est parfait, a servi de type à tous les autres ; quelle que soit la variété de leurs formes, on y retrouve toujours l'idée-mère d'une détente consécutive à un échauffement à température constante, et d'une compression faite après le refroidissement par le réfrigérant ; cette compression ferme généralement le cycle.

6. Rendement théorique et rendement générique. — Nous décrirons plus loin les cycles des principales machines thermiques.

Pour le moment, nous nous contenterons de faire remarquer que ces cycles sont moins parfaits que celui de Carnot, car on n'arrive jamais à fournir tout le calorique du foyer, ni à reprendre tout le calorique par le réfrigérant à température constante.

Le rendement calculé ρ' de ces cycles théoriques est donc en réalité moindre que ρ le rendement du cycle de Carnot, entre les mêmes limites de température.

La comparaison de ρ' à ρ permet d'apprécier de combien le cycle du moteur est inférieur au cycle-type de Carnot : le quotient de ρ' par ρ exprime donc, par une fraction, la valeur relative des deux cycles ; il caractérise l'espèce de la machine : en somme, c'est sa note.

C'est ce que Hirn a appelé, avec beaucoup de bonheur, le rendement *générique* du moteur : son symbole est ρ_1 .

$$\rho_1 = \frac{\rho'}{\rho}.$$

7. Rendement pratique. — Mais revenons au rendement ρ' : c'est un coefficient calculé que l'on évalue d'après la forme du cycle et la nature des opérations qui le composent. On détermine d'abord la quantité de chaleur cédée par le foyer,

on évalue de même le calorique repris par le réfrigérant, on en fait la différence $Q_1 - Q_2$ et on la divise par Q_1 . C'est ainsi que procède un inventeur pour se rendre compte à l'avance de ce que donnera le cycle nouveau qu'il veut réaliser : ses calculs le portent à dire qu'il consommera Q calories par cheval-heure, attendu qu'il connaît, d'une part, la chaleur mise en œuvre dans le cycle et qu'il déduit, d'autre part, de ses formules le travail qui sera développé sur le piston. Malheureusement tout ce travail ne pourra être recueilli : par suite de toutes les imperfections du cycle, des pertes de calorique, des pertes de pression, des échanges de calorique avec les parois, etc., il se perdra une fraction plus ou moins grande du travail fourni par la transformation de la chaleur. L'optimisme des inventeurs subit à cet égard de sérieux mécomptes. La machine construite, on détermine, d'une part, les calories qu'elle absorbe en pesant le combustible brûlé et, d'autre part, le travail produit sur le piston, à l'aide de l'indicateur de Watt; on espérait que le cheval-heure indiqué coûterait tant de calories et il se trouve qu'il en faut dépenser davantage. L'ingénieur établit sur ces données le rendement pratique du moteur qu'on soumet à son appréciation : c'est

pour lui un coefficient indiscutable. Nous le désignerons par la lettre ρ'' .

Le quotient de ρ'' par ρ' donne la mesure du succès obtenu et constitue un nouveau coefficient, qui n'a pas reçu de nom, car il faut se garder d'abuser des dénominations superflues, mais qu'il n'est cependant pas inutile de considérer, car il caractérise le rendement générique réel. Nous écrirons

$$\frac{\rho''}{\rho'} = \rho_2.$$

8. Rendement organique. — Le coefficient ρ'' renferme et confond tous les déchets et toutes les imperfections du cycle : il satisfait l'ingénieur, parce qu'il lui permet d'apprécier le type du moteur, mais il ne suffit encore pas à la légitime curiosité de l'industriel qui demande un renseignement plus catégorique et plus net. Que lui importe de savoir qu'un travail déterminé est indiqué sur le piston ? Il y a loin du piston à l'arbre moteur et il se perd beaucoup d'énergie de l'un à l'autre. Or, le rendement ρ'' ne tient pas compte des pertes dues au frottement, à l'inertie, etc. ; il ne s'occupe pas du travail des pompes et des appareils accessoires. Il reste donc à mesurer au frein le travail réellement disponible sur l'arbre moteur.

En comparant le travail disponible sur le piston à celui qui est disponible sur l'arbre, on détermine le rendement mécanique ou organique du moteur. Ce nouveau coefficient, que nous représenterons par ε , a un caractère purement mécanique. C'est le quotient du travail indiqué, disponible sur le piston, mesuré à l'indicateur de Watt, par le travail effectif, immédiatement utilisable, mesuré par le frein de Prony, appliqué sur l'arbre moteur. Ce rendement organique frappe très vivement les praticiens, parce que sa notion, facilement accessible, est vraiment industrielle. En réalité, ce rendement ne dépend que de la construction plus ou moins parfaite et de l'agencement plus ou moins heureux des organes. Il n'est point caractéristique d'un type de machines thermiques : il varie d'une machine à l'autre, suivant les conditions particulières de construction du moteur spécialement considéré : ce n'est donc pas un coefficient d'espèce, c'est un coefficient individuel.

Toutefois il est des classes de moteurs pour lesquels le rendement organique est nécessairement faible, par suite de leur constitution et de leur complication : à cet égard, c'est un coefficient important en maintes circonstances.

9. Consommation de charbon par cheval-heure effectif. — Connaissant le rendement ρ'' et le rendement organique ε , on détermine sans peine le prix en calories du cheval-heure effectif. C'est la dernière donnée caractéristique d'une machine thermique : nous l'appellerons la consommation par cheval-heure effectif et nous l'exprimerons en charbon donnant 8000 calories par kilogramme.

En rapportant finalement à ce dernier terme la dépense des machines thermiques, nous pourrions les classer au point de vue de leur fonctionnement industriel. C'est le but de ce petit ouvrage.

CHAPITRE II

LES MACHINES A VAPEUR

1. Cycle de la machine à vapeur. — La machine à vapeur d'eau est la première des machines à feu par son ancienneté, par la perfection relative de son agencement et par les services qu'elle rend à l'industrie : mais elle cesse de tenir le premier rang si l'on ne vient à considérer que la perfection du cycle et son rendement théorique.

Ce cycle n'a pas été conçu par un théoricien ; il est le résultat de laborieux tâtonnements qui ont illustré Worcester, Papin, Savery et Newcomen et qui n'ont abouti qu'en 1776, alors que James Watt eût complété l'œuvre de ses devanciers en la marquant au coin de son génie.

Toutefois la notion du cycle d'opérations paraît avoir échappé à ce puissant esprit ; c'est l'étude pratique des machines en fonctionnement qui a amené Sadi Carnot à découvrir, en 1834, l'origine de la puissance motrice du feu et à formuler les lois de la transformation de la chaleur en travail par une série fermée d'opérations.

Le cycle théorique de la machine à vapeur reproduit assez bien les principales phases du cycle que Carnot a proposé comme type : voici la description et la suite des opérations effectuées dans une machine à détente avec condensation.

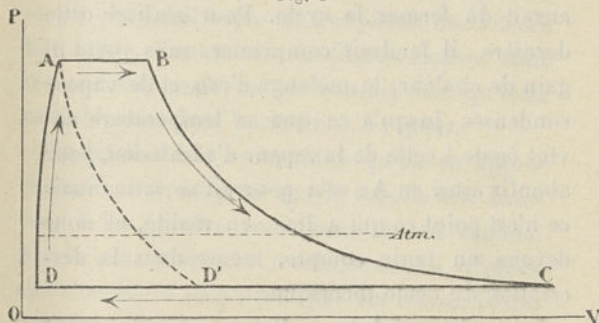
1° L'eau est vaporisée dans une chaudière, à une température T_1 , et sa vapeur est introduite dans le cylindre, derrière le piston qu'elle pousse en avant : c'est la période d'admission. La vapeur, restant en communication avec le foyer, garde une température constante et par suite aussi une pression constante : le point figuratif de l'état du fluide se déplace donc de A en B et cette ligne AB est une droite parallèle à l'axe des volumes (*fig. 1*).

2° La détente commence en B, dès que la communication est interceptée entre la chaudière et le cylindre ; admettons que cette détente soit adiabatique : cette supposition est gra-

tuite, mais on peut l'accepter dans la description du cycle théorique, qui est un cycle fictif. La ligne BC est la ligne de détente: la seconde phase s'achève en C, alors que la température du mélange d'eau et de vapeur s'est abaissée jusqu'à la température T_2 du condenseur.

3° Le condenseur joue le rôle d'un réfrigérant, à température constante. Le mélange est

Fig. 1



refoulé au condenseur dans la marche rétrograde du piston, suivant la ligne CD, parallèle à l'axe des volumes, attendu que la pression et la température restent constantes. L'opération s'arrête, quand tout le mélange est ramené à l'état liquide en D.

4° Cette eau est échauffée dans la chaudière de la température T_2 à la température T_1 , et elle

subit ainsi une légère augmentation de volume, rendue sensible par l'inclinaison de la ligne DA, par laquelle se ferme le cycle.

Ce cycle est donc limité d'une part entre deux isothermiques AB et CD, et c'est en quoi il ressemble entièrement au cycle de Carnot. Mais il en diffère, d'autre part, en ce que la ligne BC seule est une adiabatique, la ligne DA étant absolument distincte de l'adiabatique D'A, qui aurait dû fermer le cycle. Pour réaliser cette dernière, il faudrait comprimer, sans perte ni gain de chaleur, le mélange d'eau et de vapeur condensée jusqu'à ce que sa température devint égale à celle de la vapeur d'admission, pour aboutir ainsi en A : cela pourrait se faire, mais ce n'est point ce qui a lieu, en réalité, et nous devons en tenir compte, même dans la description du cycle théorique.

Le rendement de ce cycle ne peut évidemment pas être égal au rendement maximum du cycle de Carnot ; car le calorique fourni par le foyer n'est pas introduit réellement dans le cycle à température constante, comme cela devait être pour que tout le calorique tombât du niveau T_1 au niveau T_2 .

On ne saurait prétendre non plus que ce cycle soit formé d'adiabatiques, puisque les pa-

rois de l'enceinte sont conductrices de la chaleur et qu'il s'opère entre elles et le fluide d'incessants échanges.

Ce cycle n'est point réversible non plus, car il faudrait pour cela que la température de la vapeur ne différât jamais qu'infiniment peu de celle du foyer qui l'alimente de chaleur et que sa pression ne différât aussi que d'une quantité négligeable de la résistance opposée au piston, ce qui obligerait à donner à ce piston une vitesse très faible. Toutes ces conditions fictives sont recherchées, mais on ne saurait dire qu'elles sont obtenues dans la machine à vapeur.

Toutefois il faut reconnaître qu'on en approche suffisamment pour que la théorie soit autorisée à les prendre pour bases de ses calculs. Ainsi l'eau, puisée au condenseur, est refoulée aux chaudières en passant par les réchauffeurs, qui sont à une température moindre, étant logés à l'extrémité des carneaux : l'élévation de température de l'eau est donc progressive et la différence de température avec celle du foyer est minimum. Les courbes de détente réelles ne sont pas fort éloignées des adiabatiques théoriques ce sont des lignes hyperboliques de même espèce.

En somme, l'hypothèse de la réversibilité peut être acceptée comme un cas limite, constituant

la perfection théorique en cette espèce de cycles.

C'était le premier point à établir.

Calculons maintenant le rendement $\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$ de ce cycle.

2. Rendement de ce cycle. — Et d'abord, supposons que la série des opérations s'effectue sur 1 kilogramme d'eau liquide, prise à la température T_2 du condenseur et élevée à la température T_1 du foyer, suivant DA : il faut pour cela dépenser premièrement $C(T_1 - T_2)$ calories. La chaudière vaporise ensuite cette eau ; soit x_1 la quantité de vapeur formée : le mélange d'eau et de vapeur existant en B a donc reçu dans les deux opérations susdites un nombre de calories donné par l'équation :

$$Q_1 = C(T_1 - T_2) + x_1 r_1.$$

De B en C, la vapeur se détend suivant une adiabatique, avec condensation partielle : à la fin de la détente, sa température est descendue à T_2 , mais une certaine quantité de vapeur s'est liquéfiée et il n'existe plus qu'une quantité x_2 de vapeur dans le mélange : $x_2 < x_1$.

A partir de C, dans la course de retour du piston, vapeur et eau sont refoulées dans le condenseur ; la vapeur s'y condense en restituant $x_2 r_2$ calories : c'est Q_2 .

Nous avons donc :

$$\rho = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{C(T_1 - T_2) + x_1 r_1 - x_2 r_2}{C(T_1 - T_2) + x_1 r_1}.$$

Cette expression doit être transformée par élimination de x_2 , que nous ne connaissons pas.

Or, l'équation fondamentale de la détente adiabatique nous donne une relation entre x_1 et x_2 ; nous avons en effet :

$$(41) \quad \int_{T_2}^{T_1} \frac{CdT}{T} + \frac{x_1 r_1}{T_1} - \frac{x_2 r_2}{T_2} = 0$$

$$x_1 r_1 \frac{T_2}{T_1} - x_2 r_2 + T_2 \int_{T_2}^{T_1} \frac{CdT}{T} = 0$$

ou encore :

$$x_1 r_1 - x_2 r_2 = x_1 r_1 \left(\frac{T_1 - T_2}{T_1} \right) - T_2 \int_{T_2}^{T_1} \frac{CdT}{T}.$$

Transportons cette valeur au numérateur de ρ et x_2 se trouvera éliminé : par suite, tout sera connu dans la formule qui donne le rendement.

Il vient :

$$\rho' = \frac{C(T_1 - T_2) + x_1 r_1 \left(\frac{T_1 - T_2}{T_1} \right) - T_2 \int_{T_2}^{T_1} \frac{CdT}{T}}{C(T_1 - T_2) + x_1 r_1}$$

ou bien, en mettant en évidence le facteur $\frac{T_1 - T_2}{T_1}$,

$$\rho' = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \left[\frac{CT_1 + x_1 r_1 - T_2 \frac{T_1}{T_1 - T_2} C \text{Log} \frac{T_1}{T_2}}{C(T_1 - T_2) + x_1 r_1} \right].$$

Pour connaître la valeur de la fraction comprise entre parenthèses, développons en série le logarithme népérien, nous aurons :

$$\begin{aligned} \text{Log} \frac{T_1}{T_2} &= \text{Log} \left(1 - \frac{T_1 - T_2}{T_2} \right) = \\ &= \frac{T_1 - T_2}{T_2} - \frac{1}{2} \left(\frac{T_1 - T_2}{T_2} \right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{T_1 - T_2}{T_2} \right)^3 - \dots \end{aligned}$$

Après réductions, il vient pour ρ' :

$$\left\{ \begin{aligned} \rho' &= \frac{T_1 - T_2}{T_2} \left[\frac{CT_1 + x_1 r_1 - \frac{T_2}{T_1 - T_2}}{C(T_1 - T_2) + x_1 r_1} \times \right. \\ &\quad \left. CT_1 \left(\frac{T_1 - T_2}{T_2} - \frac{1}{2} \left(\frac{T_1 - T_2}{T_2} \right)^2 + \dots \right) \right] = \\ &= \frac{T_1 - T_2}{T_1} \left[\frac{CT_1 \left(\frac{1}{2} \left(\frac{T_1 - T_2}{T_2} \right) - \dots \right) + x_1 r_1}{c(T_1 - T_2) + x_1 r_1} \right]. \end{aligned} \right.$$

Le numérateur étant manifestement plus petit

que le dénominateur, nous voyons que ρ' est plus petit que $\rho = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$, qui est le rendement théorique d'un cycle de Carnot évoluant entre les mêmes températures extrêmes T_1 et T_2 ; c'est ce que nous avons annoncé.

Le rendement générique ρ_1 est précisément égal au facteur compris entre parenthèses, nous avons donc :

$$\rho_1 = \frac{\rho'}{\rho} = \frac{CT_1 - T_2 \frac{T_1}{T_1 - T_2} C \text{Log} \frac{T_1}{T_2} + x_1 r_1}{C(T_1 - T_2) + x_1 r_1}$$

Nous donnerons une forme plus concrète à ces résultats en faisant des applications numériques de nos formules.

Considérons une machine à détente et à condensation, alimentée de vapeur à 164° centigrades, renfermant 5 % d'eau entraînée des chaudières ou condensée dans les canalisations : supposons que la température du condenseur soit de 30° centigrades. Prenons pour C la valeur de Claudius égale à 1,013.

Nous aurons :

$$T_1 = 164 + 273 = 437$$

$$T_2 = 30 + 273 = 303$$

$$x_1 = 0,95$$

$$r_1 = 490,66.$$

Tous calculs faits, nous trouvons :

$$\rho = \frac{437 - 303}{437} = \frac{134}{437} = 0,305$$

$$\text{Log } \frac{T_1}{T_2} = \log \frac{437}{303} \cdot 2,3026 = 0,3662055$$

$$\rho' = 0,277$$

$$\rho_1 = 0,909.$$

Une machine identique, mais sans condensation, eût donné un rendement inférieur ; faisons, en effet, les corrections des données :

$$T_2 = 100 + 273 = 373.$$

L'air, dans lequel la vapeur s'échappe, joue le rôle d'un condenseur à 100° centigrades ou 373° absolu.

Nous trouvons :

$$\rho = \frac{437 - 373}{437} = \frac{64}{437} = 0,146$$

$$\text{Log } \frac{T_1}{T_2} = \log \frac{437}{373} \cdot 2,3026 = 0,1583498$$

$$\rho' = 0,138.$$

Ces chiffres font bien ressortir l'avantage qu'il y a, dans une machine à vapeur, à produire la plus grande chute de température entre les

sources supérieure et inférieure : à condensation la chute était de 120° , mais elle n'est plus que de 60° quand on marche sans condensation ; aussi les rendements ρ et ρ' sont-ils environ moitié moindres tous deux dans ce dernier cas.

Ces rendements sont théoriques l'un et l'autre, car nous en avons obtenu la valeur en nous basant sur des fictions ; non-seulement le cycle de Carnot n'est pas réalisé, mais le cycle lui-même, que nous venons de décrire ci-dessus, n'est point exactement celui que suit la vapeur. Aussi trouvons-nous des valeurs trop belles pour le rendement générique ρ_1 de ce cycle.

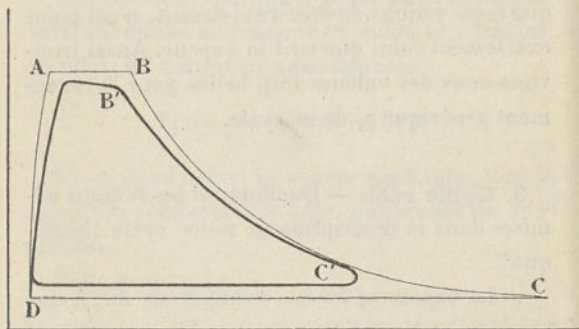
3. Cycle réel. — Quelles sont les fictions admises dans la description de notre cycle théorique ?

1^o La vapeur se forme, avons-nous dit, à une pression et à une température rigoureusement constante. Il n'en est pas réellement ainsi ; la ligne AB se rapproche toujours un peu de l'axe des volumes et d'ailleurs la pression au cylindre est moindre qu'elle ne l'est aux chaudières : AB est donc remplacé par la ligne AB' de la *fig. 2*.

C'est une première cause de dégradation du cycle, de laquelle résulte forcément un déchet dans le rendement.

2° La détente BC a été supposée adiabatique, c'est-à-dire effectuée sans perte ni gain de chaleur. C'est une hypothèse toute gratuite, car les parois sont loin d'être imperméables au calorique, et il se produit entre elles et les fluides qu'elles renferment des échanges incessants, qui constituent pour ces fluides des pertes souvent considérables, qu'on réduit par les enveloppes

Fig. 2



et la surchauffe, mais qu'on ne supprime pas ⁽¹⁾.

(1) La théorie expérimentale, que nous exposerons dans un autre volume de cette Encyclopédie, nous permettra d'évaluer exactement ces pertes; nous renvoyons à ce volume les considérations et les procédés qui reposent sur l'emploi des diagrammes entropiques de Belpaire.

3° La compression CD avait lieu, dans notre hypothèse, à température et pression constantes ; en vérité, CD n'est cependant point parallèle à l'axe des volumes.

4° Nous avons considéré une détente complète ; elle ne l'est presque jamais.

5° Pour admettre la réversibilité du cycle, il a fallu supposer que l'échauffement de l'eau à partir de la température du condenseur jusqu'à celle de la chaudière se faisait progressivement, et qu'il n'y avait jamais qu'une différence de température négligeable entre l'eau et le foyer : il n'y a pas à insister sur le caractère fictif de cette hypothèse.

En somme, le diagramme du cycle n'est pas ABCD, mais bien AB'C'D et, entre les mêmes limites extrêmes de température que ci-dessus, le travail développé est moindre ; le rendement est par suite réduit.

4. Rendement pratique et générique du cycle réel. — Pour évaluer le rendement pratique du cycle réellement parcouru par la vapeur, nous emploierons un procédé indirect. Il consiste à évaluer $Q_1 - Q_2$, qui est la chaleur utilisée dans le cycle, par le travail ε_i indiqué sur le diagramme fourni par une bonne ma-

chine en marche. En multipliant ce travail $\bar{\epsilon}_i$ par A, l'équivalent calorifique du travail, nous déterminerons la valeur de $Q_1 - Q_2$, et nous calculerons la valeur du rendement pratique ρ'' par la formule :

$$\rho'' = \frac{A\bar{\epsilon}_i}{Q_1}.$$

Prenons, pour exemple, la machine Dujardin essayée par nous en novembre 1892 ⁽¹⁾ qui, dans les meilleures conditions de sa marche, a, par cheval-heure indiqué, consommé dans son cylindre et dans ses enveloppes 6^{kg},181 de vapeur, renfermant 95,4 % de vapeur sèche, à la température de 164°, celle du condenseur étant de 30°,5. La chaleur Q_1 était dès lors égale à 3918,443 calories pour une valeur $\bar{\epsilon}_i$ de 270 000 kilogrammètres : il vient par suite ⁽²⁾ :

$$\rho'' = \frac{270\,000}{425 \times 3918,443} = 0,162.$$

(1) *Bulletin de la Société Industrielle du Nord*, décembre. 1892.

(2) Cette valeur de ρ'' est relative à la machine à vapeur seule, sans tenir compte des pertes subies pour la production de la vapeur dans les chaudières.

Le cycle a, ainsi que nous l'avons vu ci-dessus, un rendement calculé

$$\rho' = 0,277;$$

le rendement générique réel prend donc la valeur de

$$\rho_2 = \frac{\rho''}{\rho'} = \frac{0,162}{0,277} = 0,584.$$

Ainsi donc le rendement pratique n'est plus que de 0,162 au lieu de 0,251 et le rendement générique tombe de 0,905 à 0,534. Et pourtant il existe fort peu de machines donnant un rendement comparable à celui que nous avons relevé dans nos essais.

5. Rendement organique. — Jusqu'ici nous n'avons considéré que le travail indiqué sur le piston de la machine; le travail, mesurable au frein sur l'arbre, et qui est donc nettement disponible, est moindre, et nous avons à chercher quel est le rapport ε de ce second travail au premier. C'est le rendement organique de la machine.

La valeur de ce rendement organique varie avec les dimensions de la machine et avec sa construction.

Nous en référant aux recherches de plusieurs savants ingénieurs, notamment de M. Delafond, et à notre expérience personnelle, nous croyons être dans le vrai en attribuant les valeurs suivantes à ε .

RENDEMENT ORGANIQUE

Types de machines	10 chevaux	100 chevaux	500 chevaux
Machine mono cylindrique, détente au $\frac{1}{6}$, à condensation	0,80	0,85	0,90
Machine mono cylindrique, détente au $\frac{1}{5}$, sans condensation	0,84	0,88	0,92
Machine Compound, détente au $\frac{1}{12}$, à condensation	"	0,82	0,88

Le rendement pratique, rapporté au travail effectif, s'abaisse donc encore, car il faut multiplier ρ'' par ε . Ainsi, pour la machine de MM. Dujardin et C^{ie} considérée ci-dessus, d'une puissance effective d'environ 500 chevaux, le rendement pratique aurait eu pour valeur

$$0,162 \times 0,88 = 0,143.$$

Ce n'est que 14 $\frac{0}{0}$.

6. Consommation de charbon par cheval-heure effectif. — La consommation de charbon par cheval-heure effectif constitue enfin la base de comparaison la plus sûre, si l'on se place au point de vue exclusivement pratique de l'industriel qui achète une machine et paie ses services.

Cette consommation varie considérablement avec la puissance de la machine : il y a donc lieu de distinguer entre les résultats obtenus dans les divers essais qui ont été faits.

Partons du bas de l'échelle : une machine à vapeur de 4 chevaux consomme *pour le moins* 4 kilog. de charbon par cheval-heure mesuré au frein. Cette dépense diminue rapidement à mesure que les dimensions de la machine croissent, mais nous ne croyons pas qu'elle tombe en dessous de 780 grammes dans la meilleure machine compound à condensation, à grande détente, parfaitement chemisée, et desservie par d'excellentes chaudières ; dans les mêmes conditions, une machine à triple ou quadruple expansion de très grande puissance donnera peut-être le cheval-heure effectif au prix de 700 grammes. Il paraît donc qu'on peut dresser le tableau suivant des consommations :

CONSOMMATION DE CHARBON PAR CHEVAL-HEURE
EFFECTIF

Puissance en chevaux	Types	Consommation en kilog.
4	monocylindrique, sans enveloppes . . .	4
20	monocylindrique, sans enveloppes . .	2
100	monocylindrique, à enveloppes	1
500	compound	0,780
1000	à triple expansion	0,700

7. Perfectionnements probables de la machine à vapeur. — Cette consommation de 700 grammes de charbon, qui correspond avec de bonnes chaudières à une dépense de 6 kilog. de vapeur à 6 kilog. de pression, est à peu près l'idéal vers lequel puisse tendre aujourd'hui un constructeur ambitieux de bien faire.

Les progrès réalisés par les moteurs, qui aspirent à se substituer à la machine à vapeur ont incité les ingénieurs à faire mieux encore.

Il fallait pour cela persévérer d'abord dans les voies qui ont conduit depuis vingt ans à de si beaux résultats : agrandir les lumières d'admission et de décharge, accélérer la vitesse du piston, réduire au minimum le volume des es-

paces nuisibles, faire de la compression, compléter la détente en employant au besoin plusieurs cylindres étagés, entourer le cylindre d'enveloppes plus complètes et plus efficaces, assécher la vapeur avant son entrée au cylindre, réduire les condensations intérieures, etc. ; enfin perfectionner la construction de plus en plus, afin d'augmenter le rendement organique et de diminuer autant que faire se peut les pertes par défaut d'étanchéité. En agissant de la sorte, les constructeurs sont sûrs d'améliorer le rendement pratique de leurs machines, mais ils ne se feront pas l'illusion de perfectionner le cycle de leurs machines.

On ne perfectionne pas non plus le cycle en écartant les limites entre lesquelles évolue la vapeur, mais on élève ainsi considérablement la valeur du rendement théorique ; c'est un résultat qu'il ne faut pas négliger. Malheureusement la nature même de la vapeur d'eau se prête difficilement à ce qu'on opère sur de la vapeur possédant une haute température, car, à l'état de saturation, la pression monte fort vite avec la température. A 180° , la tension atteint déjà 10 kilog. par centimètre carré ; à 190° , on a 13 kilog. et à 200° , 16 kilog. environ : c'est un maximum qu'il est pour ainsi dire impossible

de dépasser. Les locomotives Compound de la C^{ie} P.-L.-M., sont timbrées à 15, les chaudières de torpilleurs à 12, les chaudières de l'industrie à 10 au plus. Il est facile de voir que la valeur du rendement ρ croît rapidement avec la valeur de T_1 , pour une même valeur de T_2 .

Mais il faudrait pouvoir dépasser 200 degrés centigrades.

On y arrive en *surchauffant* la vapeur ; on surchauffe la vapeur en la soumettant à l'action d'un foyer après qu'elle a été séparée de son liquide générateur. Il est possible de la sorte d'amener la vapeur à une température de 250, 300, voire même 350° sans augmenter sa pression. Mais on se trouve arrêté bientôt par des difficultés pratiques, car la vapeur très surchauffée brûle les lubrifiants et fait gripper les surfaces frottantes. Quand on se borne à une surchauffe modérée, il arrive qu'elle se perd presque entièrement dans le trajet du surchauffeur au cylindre et, dans ces conditions, on ne gagne presque rien sur la valeur de T_1 et, par suite, sur la valeur de ρ . Le bénéfice réalisé est alors d'un ordre tout différent que nous discuterons en exposant la théorie expérimentale de la machine à vapeur.

Quelques théoriciens ont pris pour objectif de

leurs études de découvrir un perfectionnement du cycle : ils ont cherché à rapprocher le cycle de la machine à vapeur de celui de Carnot. Or, nous avons vu ci-dessus qu'il y avait un maigre bénéfice à réaliser de la sorte, parce que, d'une part, le rendement générique ρ , est déjà fort voisin de l'unité et que, d'autre part, il ne sera jamais possible d'obtenir les isothermiques et les adiabatiques dont se compose le cycle de Carnot. Un perfectionnement direct du cycle de la machine à vapeur ne paraît donc pas devoir donner d'amélioration sensible et il est d'ailleurs encore à découvrir.

En somme, la voie la plus féconde est celle dans laquelle s'est engagé Hirn : nous la ferons apprécier en temps et lieu, mais il est bien entendu qu'elle ne conduit pas à un perfectionnement du cycle théorique ; elle réduit seulement le déchet.

8. Machines à vapeurs combinées. — Du Tremblay avait essayé d'améliorer le rendement théorique en adjoignant à la machine à vapeur d'eau une seconde machine à vapeur d'éther ou de tout autre liquide volatil.

L'idée était ingénieuse et, au premier examen, elle paraissait devoir être féconde.

En effet, employons comme liquide réfrigérant et condensant, non pas de l'eau, mais un fluide très volatil, qui puisse se vaporiser par le calorique enlevé à la vapeur condensée. La vapeur ainsi formée pourra être envoyée à un second cylindre et utilisée à faire mouvoir une seconde machine, de telle sorte que le calorique abandonné, en pure perte, par la première machine puisse être transformé en travail. Le travail ainsi obtenu est entièrement gagné, puisque le calorique utilisé par la seconde machine allait être jeté au ruisseau et entièrement perdu par la première machine. Ce travail ne coûte rien pour ainsi dire, car le liquide volatil de la seconde machine peut être condensé et recueilli par un condenseur à surface et remis indéfiniment en circulation dans le cycle.

Rien de plus séduisant et de plus spécieux que le projet de du Tremblay : il employa comme liquide volatil l'éther ou le sulfure de carbone ; depuis lors, des inventeurs de second ordre, reprenant à leur profit l'idée du maître, ont essayé de la rajeunir en essayant l'ammoniaque liquéfié, voire même l'acide carbonique. En somme, ils n'ont pas mieux réussi que lui. On observe en effet toujours que l'adjonction de la seconde machine peut rendre économique une machine

mal conditionnée qui ne l'était pas, mais qu'elle ne serait pas à conseiller quand la première machine est construite suivant les principes rationnels d'une bonne utilisation. En d'autres termes, une machine à vapeurs combinées n'a pas un meilleur rendement thermique qu'une *bonne* machine à vapeur d'eau.

Cela se comprend. Quel serait en effet l'avantage à retirer de la seconde machine, si ce n'est d'abaisser T_2 , en condensant la seconde vapeur à une température inférieure à celle du condenseur de la première? Or, quand le premier condenseur est déjà lui-même à la plus basse température possible, il n'y a plus rien à faire dans ce sens.

La pratique a entièrement confirmé ces vues théoriques et l'on a renoncé à l'emploi des vapeurs combinées: quelques esprits rétrogrades se sont attardés, il est vrai, dans cette vaine recherche, que Rankine avait appréciée à sa juste valeur il y a plus de quarante ans, mais ils ont trouvé peu d'écho, malgré l'alléchante annonce de leur programme, *du travail pour rien!*

Ajoutons, du reste, que l'emploi de ces liquides volatils est sujet à de graves objections en raison des difficultés de leur manutention, voire même des dangers de leur emploi.

9. Machine à vapeur de pétrole. — Nous avons vu que la relation qui existe entre la température de la vapeur d'eau saturée et sa pression ne permettait ni d'élever T_1 au delà d'une certaine limite, ni d'abaisser T_2 : il en résulte que le rendement thermique ρ reste nécessairement faible. Nous avons eu $\rho = 0,30$.

S'il existait un liquide pour lequel on pût écarter les limites du fonctionnement et, par suite, augmenter la hauteur de chute, si ce liquide était stable de sa nature, sans action corrosive sur le métal, et à bas prix, la machine à vapeur de ce liquide serait le plus parfait moteur thermique qui pût exister, car on la ferait fonctionner entre 300 et 0 degrés centigrades (573 et 273 degrés absolus), et l'on aurait pour ρ une valeur égale à 0,52, ce qui permettrait pour ρ'' une valeur inespérée, vu les facilités de réalisation des cycles parcourus par les vapeurs.

Ce liquide est à trouver.

On le cherche.

MM. de Susini et Digeon sont revenus, non sans succès, à l'emploi d'un éther.

Peut-être certaines huiles lourdes de pétrole réaliseraient-elles mieux les conditions du programme que nous venons de tracer.

MM. Yarrow, de Londres, ont créé un moteur

de canot, qu'ils alimentent par la vapeur d'un hydrocarbure, ayant une densité égale à 0,73, et avec lequel ils ont déjà obtenu des résultats intéressants. Des expériences ont été faites pour comparer le travail effectif développé par ce moteur alimenté tour à tour de vapeur d'eau ou de cet hydrocarbure : or, à égalité de charbon brûlé, l'hydrocarbure a fourni plus du double de travail.

MM. Escher et Wyss, de Zurich, ont employé de même une certaine huile de naphte, qui a permis également de doubler le rendement de la machine à vapeur.

Ces premiers essais nous préparent peut-être la machine à vapeur de l'avenir.

CHAPITRE III

LES MOTEURS A AIR CHAUD

1. Cycle type des machines à air chaud avec régénérateurs. — La machine à air chaud a été inventée dès 1816 par le révérend D^r Stirling, perfectionnée ensuite par James Stirling, puis réellement introduite dans la pratique industrielle par le capitaine Ericsson, par Siemens, Lemoine, Franchot, Belou, van Rennes, Bénier, Genty, etc. (1).

Le cycle idéal de ces machines serait celui de Carnot, mais il n'est pas plus réalisable avec

(1) Ces machines sont à foyer extérieur ou à foyer intérieur : cette distinction n'a pas à intervenir dans l'étude des cycles qui fait seule l'objet de la théorie générale que nous entreprenons d'exposer.

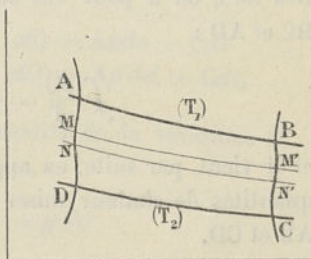
l'air qu'il ne l'est avec la vapeur d'eau, car les isothermiques et les adiabatiques, qui devraient composer ce cycle, ne peuvent pas mieux être obtenus par un gaz évoluant dans un cylindre de fonte que par une vapeur quelconque. D'ailleurs, les cycles réalisés ne sont pas davantage réversibles, attendu que l'on ne saurait s'astreindre à donner au piston une vitesse assez faible pour que la pression du fluide restât égale à la résistance qu'il doit surmonter. Du reste, le principe de Carnot

est formel, et il n'y a aucun avantage à substituer un agent à l'autre : on peut donc dire d'une façon générale qu'*a priori* les machines à air chaud n'ont au-

cune prééminence intrinsèque sur la machine à vapeur, quoi qu'on en ait dit autrefois.

Toutefois signalons dès maintenant le fait, sur lequel nous reviendrons plus loin, que les gaz permettent d'écartier singulièrement les limites de température supérieure et inférieure entre lesquelles se trouve renfermé le cycle. Cet

Fig. 3



avantage sera mieux apprécié quand nous aurons décrit le cycle type des moteurs à air chaud.

La difficulté de réaliser des transformations adiabatiques a suggéré l'idée de créer un cycle sans détente ni compression adiabatiques : on peut le faire en remplaçant les adiabatiques par les lignes BC et AD (*fig. 3*) telles que la quantité de chaleur cédée par le fluide sur le chemin BC aux enceintes qui le renferment soit égale à celle qui est cédée au fluide sur le chemin AD. Dès lors, on a pour ces deux transformations BC et AD :

$$\int \frac{dQ}{T} = 0,$$

et il vient, par suite, en appelant Q_1 et Q_2 les quantités de chaleur mises en œuvre suivant AB et CD,

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2},$$

d'où

$$\rho = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

comme pour le cycle de Carnot.

Le rendement du cycle constitué par deux iso-

thermiques et deux isodiabatiques ⁽¹⁾ est donc maximum.

On peut évidemment prendre BC arbitrairement et l'autre ligne se trouve déterminée par la condition de l'égalité des échanges ; cette condition sera réalisée si les quantités de chaleur absorbées et cédées par les deux transformations élémentaires correspondantes, MN et M'N' prises entre les mêmes isothermiques MN' et NN', sont égales.

On aura

$$\begin{array}{ll} \text{pour MN} & dQ = Apdv + Cdt \\ \text{pour M'N'} & dQ' = Ap'dv' + Cdt, \end{array}$$

d'où, par suite de l'égalité de la variation dt dans les deux opérations,

$$pdv = p'dv'$$

et

$$\frac{dv}{v} = \frac{dv'}{v'}$$

ou

$$\frac{v' + dv'}{v + dv} = \frac{v'}{v} = \text{const.} = K.$$

(1) La considération des lignes isodiabatiques est due à Rankine ; l'étymologie du mot dit la nature de ces lignes : d'égalé transmission.

Donc

$$v' = Kv \quad \text{et} \quad p' = \frac{1}{K} p.$$

Si donc BC a pour équation

$$f(pv) = 0,$$

l'équation de AD sera

$$f\left(\frac{p}{K}, Kv\right) = 0.$$

Le problème comporte évidemment une infinité de solutions. Le cycle type des moteurs à air chaud est donc défini par ce fait qu'il est limité par deux isothermiques et par deux isodiatiques : ce cycle jouit de la propriété de posséder le maximum de rendement, comme le cycle de Carnot.

2. Cycle de Stirling. — Supposons que la ligne BC soit une droite parallèle à l'axe des pressions, elle aurait pour équation $v = \text{const.}$ et l'équation de DA serait par suite $Kv = \text{const.}$; DA serait donc aussi une droite parallèle à l'axe des pressions.

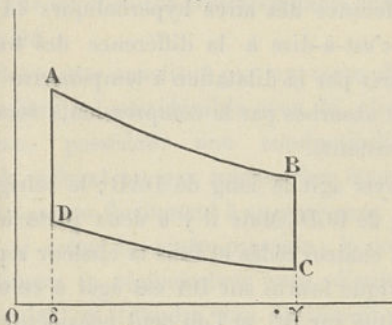
C'est ainsi qu'est constitué le cycle de Stirling; il est limité par deux hyperboles isothermiques

AB et CD (*fig. 4*) et par deux lignes isodiabatiques BC et DA parallèles à l'axe des y .

La série des opérations que subit l'air est facile à définir.

Prenons le point D comme représentatif de

Fig. 4



l'état initial de l'air, sous le volume $o\delta$, à la pression $D\delta$ et à la température T_2 .

1° On chauffe cette masse d'air à volume constant, jusqu'à la température T_1 .

2° On la détend, à température constante, du volume $o\delta$ au volume $o\gamma$.

3° On la refroidit à volume constant, de façon à lui faire reprendre sa température initiale T_2 .

4° On ferme le cycle par une compression, à température constante, de manière à réduire le volume de l'air à son volume primitif $o\delta$.

En somme, les deux transformations qui font passer le gaz d'une isothermique à l'autre s'effectuent en le chauffant et en le refroidissant à volume constant : il ne se produit aucun travail durant ces phases d'échauffement et de refroidissement. Le travail extérieur développé est égal à la différence des aires hyperboliques $\delta AB\gamma$ et $\delta DC\gamma$, c'est-à-dire à la différence des travaux engendrés par la dilatation à température constante et absorbés par la compression à température constante.

Le foyer agit le long de DAB ; le réfrigérant le long de BCD. Mais il y a deux parts à faire dans la chaleur cédée et dans la chaleur reprise : le calorique fourni sur DA est égal à celui qui est restitué sur BC, et l'on peut considérer qu'il voyage simplement d'une isothermique à l'autre ; au contraire, le calorique cédé sur AB est transformé en travail et le reste est porté au réfrigérant par CD sans pouvoir être recouvré. Une partie du calorique fourni peut donc être utilisée indéfiniment, puisqu'elle ne fait que passer d'un corps à l'autre.

L'appareil destiné à restituer à l'air sur DA la chaleur qui lui a été soustraite sur BC s'appelle un *régénérateur*.

3. Régénérateur. — Un régénérateur est un appareil permettant d'emmagasiner d'abord, puis de restituer la chaleur ; il emmagasiner la calorique en le prenant au gaz chaud qui le traverse, et il le restituera en l'abandonnant à un gaz froid le traversant à son tour. Il sera donc placé sur les chemins correspondants aux phases BC et DA.

Il devra être constitué par un corps de capacité calorique considérable sous le plus faible volume, possédant une conductibilité très grande, offrant au gaz une surface étendue, livrant passage facilement à ce gaz, sans l'étrangler, ni créer de contre-pression ; le corps qui constituera le régénérateur sera, d'autre part, réfractaire, et il faudra non seulement qu'il ne fonde pas, mais encore qu'il ne s'oxyde, ni ne s'effrite, ni ne se brise.

Tel est le problème.

On en cherche la solution depuis longtemps, sans que nul ne puisse se flatter d'avoir réussi. Les toiles métalliques ont donné les meilleurs résultats, mais il faudrait employer des fils de maillechort, de nickel ou de platine, ce qui entraînerait le constructeur à de grands frais, car il faut superposer un grand nombre de toiles pour obtenir la capacité voulue ; de plus, les mailles

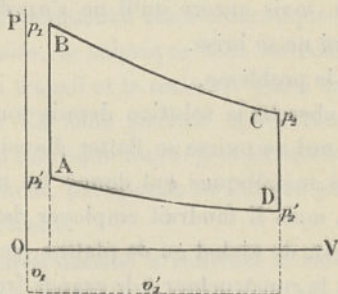
doivent être assez larges (5^{mm} de côté au moins), sinon elles s'encrasseraient et s'engorgeraient. Les matériaux non métalliques ont été essayés, mais les alternatives de chaud et de froid les fendent et du reste leurs pores s'obstruent rapidement, au préjudice de leur efficacité. Bref, le problème est posé, on en attend la solution.

Supposons-la trouvée.

4. Rendement théorique du cycle de Stirling. — Une machine de Stirling, pourvue d'un régénérateur parfait, aurait, nous l'avons démontré ci-dessus, un rendement théorique égal à celui de Carnot ⁽¹⁾.

(1) Les lignes isodiabatiques étant des lignes d'égalé

Fig. 5



transmission tour à tour positives et négatives, il n'y a pas à en tenir compte dans le calcul.

Les températures élevées que l'on peut accepter dans ces machines donnent au rendement une valeur très grande : faisons, en effet, les hypothèses suivantes, correspondantes au fonctionnement de la machine de Stirling, qui marcha quelques années à la fonderie de Dundee.

$$T_1 = 616^\circ$$

$$T_2 = 338^\circ$$

$$\rho = \frac{616 - 338}{338} = 0,82.$$

En théorie, le rendement de la machine de Stirling atteindrait donc 0,82 et son rendement générique égalerait l'unité, puisque le rendement du cycle est maximum comme celui du cycle de Carnot.

Or, on a :

$$Q_1 = \int_{v_1}^{v'_1} p dv = p_1 v_1 \text{Log} \frac{v'_1}{v_1} = RT_1 \text{Log} \frac{v'_1}{v_1}$$

et

$$Q_2 = RT_2 \text{Log} \frac{v'_1}{v_1},$$

d'où

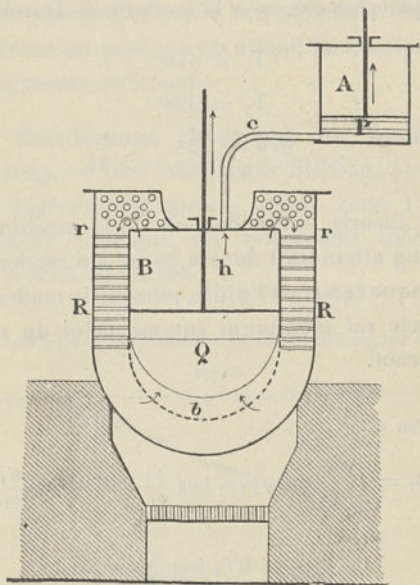
$$\rho = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Quelques auteurs, considérant à tort BC et AD comme des adiabatiques, trouvent une expression un peu différente du rendement du cycle de Stirling.

C'est trop beau pour être autre chose qu'une fiction théorique.

5. Cycle réel de Stirling. — Voyons com-

Fig. 6



ment Stirling a cherché à réaliser le cycle décrit ci-dessus.

Sa machine (*fig. 6*) se compose d'un double cylindre : A est le cylindre moteur, tandis que B

est le cylindre thermique, dans lequel l'air est chauffé à la température T_1 , puis refroidi à la température T_2 . Etudions tour à tour ces deux organes.

Le cylindre A ne présente rien de spécial : le piston P qui s'y meut actionne la manivelle de l'arbre moteur. L'action est à simple effet : A communique avec B par le tuyau *c*.

Le cylindre B est plus compliqué. C'est un appareil à double enceinte ; le régénérateur R est renfermé dans l'intervalle compris entre les deux parois. Un piston plongeur creux Q, bourré de matières peu conductrices, entraîné par le volant de la machine, s'élève et s'abaisse alternativement dans le cylindre central, dont la partie supérieure *h* communique avec la partie inférieure *b* par l'intermédiaire du régénérateur R : l'ascension du piston oblige l'air contenu dans le cylindre à passer de *h* en *b*, tandis que la descente refoule le même air de *b* en *h*, toujours à travers R. Or, l'appareil est placé sur le feu, et sa partie basse *b* est maintenue à la température T_1 , tandis que sa partie supérieure est traversée par un faisceau de tubes de cuivre *r* dans lesquels circule un courant continu d'eau froide réfrigérante : quand le piston Q est au haut de sa course, la masse d'air est à

cette température T_1 ; quand il s'abaisse, l'air s'échappe par les trous pratiqués dans le fond hémisphérique du cylindre central, pénètre dans le régénérateur, traverse le réfrigérant et remplit le vide laissé par le piston au-dessus de lui ; cet air, refroidi de la sorte, arrive en h à une température T_2 , moindre que T_1 . Ainsi donc la fonction de l'appareil B consiste à chauffer alternativement à T_1 et à refroidir à T_2 une masse d'air déterminée : comme cet échauffement et ce refroidissement se font à volume constant, il en résulte des variations de pression de l'air qui se transmettent, par le tuyau c , sur le piston moteur P.

En somme, A est le moteur et B joue la double fonction de foyer et de réfrigérant. Les manivelles sont calées de telle façon que le piston Q monte en même temps que commence la course ascendante de P. Il faut qu'il en soit ainsi, car la montée du plongeur Q détermine l'échauffement de l'air, son augmentation de pression et par conséquent le refoulement du piston P de bas en haut.

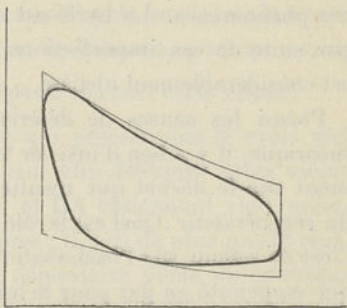
Le régénérateur est constitué par des tiges de métal et de verre très serrées, ne laissant entre elles que d'étroits passages dans lesquels l'air subit le contact d'une surface très étendue qui

le dépouille de son calorique ou lui en restitue fort rapidement. Au bout d'un certain temps, les températures T_1 et T_2 s'approchent d'un état stationnaire et la chute atteint aisément 300 à 350 degrés.

Il est facile de démontrer que le jeu de cette machine tend à réaliser le cycle théorique décrit ci-dessus. En

effet, l'échauffement et le refroidissement se font à volume constant, tandis que la détente et la compression, ayant lieu au contact continu du foyer

Fig. 7



et du réfrigérant, s'opèrent à température constante, suivant des isothermiques.

Et pourtant le diagramme réel de la machine de Stirling ne rappelle que d'assez loin la forme de celui de la *fig. 4*, ainsi qu'en témoigne la *fig. 7*, dans laquelle nous avons mis en évidence la déformation du cycle.

Cela tient à ce que l'échauffement et le refroidissement de l'air n'ont pas lieu rigoureuse-

ment à volume constant, ni la détente ou la compression à température constante. De plus, il y a des fuites inévitables ; enfin, il faut observer que tout l'air renfermé dans le tuyau c et le cylindre A ne traverse pas le régénérateur et ne participe pas au jeu de la machine ; cet air remplit le rôle d'un coussin et il en résulte évidemment une certaine perturbation dans la suite des phénomènes. Le cycle est donc déformé et, par suite de ces imperfections, son rendement est considérablement abaissé.

Parmi les causes de détérioration du cycle théorique, il y a lieu d'insister tout particulièrement sur le déchet qui résulte de l'inefficacité du régénérateur. Quel est le rôle de cet appareil ? C'est de retenir sur l'isodiabatique BC le calorique emprunté au gaz pour le lui rendre sur l'isodiabatique DA et par suite diminuer d'autant l'apport du foyer. Cet effet doit être complet : c'est dans cette hypothèse que nous n'avons nullement tenu compte, dans le calcul de ρ , des chaleurs mises en œuvre sur les chemins BC et DA . Or, supposons qu'il passe une quantité q de cette chaleur au réfrigérant ; il faudra augmenter de q la quantité de calorique prise au foyer. Dès lors le foyer donnera $Q_1 + q$ et le réfrigérant recevra $Q_2 + q$; par consé-

quent le rendement théorique du cycle sera

$$\rho' = \frac{Q_1 + q - (Q_2 + q)}{Q_1 + q} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1 + q}.$$

Il est clair que cette valeur du rendement est moindre que celle qui correspondrait au cycle théorique. En faisant des hypothèses sur la valeur de q , on voit sans peine que l'influence du régénérateur est considérable sur le rendement : d'après les travaux de Siemens, q est au moins égal à $\frac{Q_1}{20}$ et il dépasse souvent cette valeur.

Il résulte de ce qui précède que le cycle réel d'une machine peut être détérioré alors même que les lignes BC et DA resteraient rigoureusement isodiabatiques : il faut de plus que le régénérateur soit un dépositaire fidèle du calorique qui lui est momentanément confié, et qu'il rende exactement ce qu'il a reçu ; c'est une qualité bien difficile à réaliser.

6. Rendement pratique de la machine Stirling. — Les résultats des essais de Dundee, publiés par M. James Stirling en 1845 (1), nous

(1) *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1878, et *Manuel de la Machine à vapeur* par Rankine, traduction Richard. Paris, Dunod, 1865, p. 388.

permettent de calculer les divers rendements pratiques de cette machine,

$T_1 = 616^\circ$	$T_2 = 338^\circ$	$\rho = 0,451$
Diamètre du cylindre moteur . . .	406 millimètres	
Course	1 ^m ,220	
Vitesse	28 révolutions	
Pression moyenne sur le piston . .	2 ^{kg} ,700	
Consommation de charbon par heure	37 ^{kg} ,900	
Rendement	0,44	

Le travail indiqué doit être calculé d'abord : nous avons

$$\mathcal{E}_i = \frac{2,7 \times 1295 \times 1,22 \times 28}{60 \times 75} = 26,5 \text{ chevaux}$$

Par suite, la consommation de charbon par cheval-heure indiqué était de

$$\frac{37,9}{26,5} = 1^{\text{kg}},430.$$

Le charbon était médiocre et son pouvoir peut être estimé à 7 200 calories : il fallait donc $1,430 \times 7\,200 = 10\,296$ calories par cheval-heure indiqué.

Le rendement du foyer étant de 0,44, il en arrivait $10\,296 \times 0,44 = 4\,530,24$ à la machine ; écrivons donc :

$$Q_1 = 4\,530,24.$$

Nous aurons :

$$\rho'' = \frac{270\,000}{425 \times 4530,24} = 0,140.$$

Le rendement générique réel prend la valeur de

$$\rho_2 = \frac{\rho''}{\rho'} = \frac{0,140}{0,820} = 0,171.$$

Qu'on rapproche ces chiffres de ceux relevés ci-dessus sur une machine à vapeur moderne et l'on constatera que, si les rendements pratiques ρ'' sont assez bien comparables, les rendements génériques sont extrêmement inférieurs dans la machine de Stirling. Les conditions de la théorie sont donc bien loin d'être réalisées : nous reviendrons plus loin sur ces considérations.

Le rendement organique du moteur de Dundee a été déterminé en mesurant le travail dépensé en frottements et en résistances passives, quand la machine marchait à vide ; bien que ce procédé conduise généralement à estimer trop haut le rendement organique, nous accepterons cette donnée comme exacte ; la perte étant de $\frac{1}{3}$ du travail utile, il en ressort pour ε une valeur de 0,90.

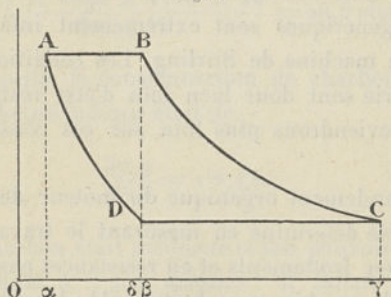
La quantité de charbon médiocre consommée

par cheval-heure effectif est, par suite, égale à $1^{\text{kg}},589$. En 1845, aucune machine à vapeur ne donnait un aussi beau résultat ⁽¹⁾. Aujourd'hui les moteurs à air du genre Stirling sont par contre fort améliorés.

7. Machine d'Ericsson. — Le capitaine américain Ericsson avait imaginé un cycle différent du précédent pour transformer la chaleur en travail par l'intermédiaire de l'air,

Ce cycle était limité par deux lignes isother-

Fig. 8



miques et par deux isodiabatiques parallèles

⁽¹⁾ Le moteur Woodbury, qui se rapproche assez du type Stirling, donne d'excellents résultats, quand la pression initiale est élevée; sa consommation par cheval-heure indiqué ne dépasse pas en effet 700 grammes de charbon.

à l'axe des volumes, ainsi que cela est représenté sur la *fig. 8* ; ces deux lignes répondaient aux équations $p = \text{const.}$, et $kp = \text{const.}$ Le foyer fournit donc de la chaleur utile le long de BC et le réfrigérant en absorbe le long de DA : la régénération du calorique a lieu sous pression constante, tandis qu'elle s'effectuait à volume constant dans la machine de Stirling, et il y a compensation entre les deux quantités reçues et restituées par le régénérateur.

La série des opérations que subit l'air est facile à définir : prenons en effet le point A comme représentatif de l'état initial sous le volume $o\alpha$, à la pression $A\alpha$ et à la température T_2 .

1° On chauffe cette masse d'air à pression constante, jusqu'à la température T_1 : le volume devient $o\beta$.

2° On le détend, à température constante, du volume $o\beta$ au volume $o\gamma$.

3° On refroidit l'air, à pression constante, de manière à faire tomber sa température de T_1 à T_2 , ce qui entraîne une contraction du volume.

4° Le cycle se ferme par une compression isothermique, reproduisant le volume primitif $o\alpha$.

Nous ne nous attarderons pas à décrire la machine de bateau qui permit à Ericsson de réali-

ser théoriquement le cycle que nous venons de décrire, lequel ne le cédait en rien à celui de Stirling, mais qu'il fut aussi difficile de reproduire pratiquement. Disons seulement que le cylindre moteur était placé directement sur le foyer, ce qui créait une difficulté pratique sérieuse. Le piston était différentiel, moteur par son plus grand diamètre, compresseur par l'autre : un régénérateur était annexé à la machine. Cet appareil était constitué par une caisse, au fond de laquelle étaient disposés des paquets de toiles métalliques superposées par couches horizontales.

Ces toiles étaient à mailles carrées, formées de fils de fer de 1 millimètre de diamètre, écartés de 5 millimètres ; on superposait 120 toiles, sur une hauteur de 200 millimètres.

La machine Ericsson, essayée en 1854 au Havre par M. Lissignol ⁽¹⁾, fonctionnait entre les températures centigrades de 280 et 15 degrés : son rendement théorique aurait par suite dû être :

$$\rho = \frac{553 - 228}{553} = 0,479.$$

(1) LISSIGNOL. — *Description de la machine Ericsson*. Le Havre, 1854.

Le rendement pratique fut trouvé égal à

$$\rho'' = 0,30$$

ce qui correspond à un rendement générique

$$\rho_2 = \frac{0,30}{0,479} = 0,62.$$

Malheureusement les agencements mécaniques de ce moteur étaient si compliqués que le rendement organique ne dépassait pas 0,30.

Malgré cela, la consommation de charbon par cheval-heure effectif ne fut que de 2^{kg},5 dans une petite machine, développant 3 chevaux effectifs au maximum.

C'était un excellent résultat, qui eût encouragé les ingénieurs à persévérer dans cette voie, si la machine d'Ericsson n'avait été extrêmement encombrante : ce moteur de 3 chevaux effectifs occupait un emplacement de 25 mètres cubes !

Cet inconvénient a été heureusement corrigé dans les moteurs Ericsson qu'on construit actuellement en Amérique (1) : une machine d'un cheval pèse une tonne et occupe 1^m,07 sur 1^m,32 et 1^m,80 : le fonctionnement du moteur est un peu moins économique qu'autrefois, mais l'ensemble

(1) Un dernier brevet a été pris en 1880.

en est beaucoup plus satisfaisant et la marche est meilleure et plus sûre.

8. Moteurs sans régénérateur. — Les moteurs que nous venons de décrire avaient leur régénérateur, et cet appareil constituait un de leurs organes les plus essentiels : nous avons défini son rôle et fait comprendre son importance, tout en laissant entrevoir les difficultés pratiques de son emploi. Ces difficultés n'ont malheureusement encore pu être surmontées : M. Hirsch, dont les recherches sont classiques, avait remis la question à l'ordre du jour en prenant en 1874 un brevet pour un moteur, pourvu d'un régénérateur à lames ou aiguilles réfractaires, sur lequel on avait le droit de fonder les plus grandes espérances ; les résultats n'ont pas répondu entièrement à l'attente des ingénieurs, et l'on se résigne à constituer aujourd'hui des machines à air chaud sans régénérateur.

Ce sont ces moteurs qu'il nous reste à décrire : nous prendrons pour type le moteur proposé par Joule, en 1851 ⁽¹⁾.

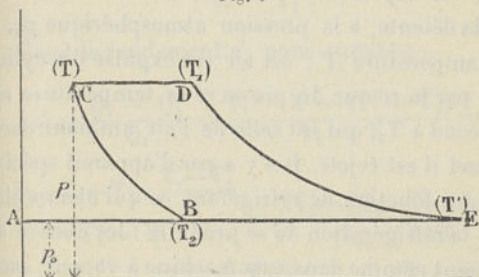
9. Cycle de Joule. — L'idée de Joule était de supprimer le régénérateur ainsi que le réfrigérant.

⁽¹⁾ *Philosophical Transactions.*

A cet effet, il procédait de la façon qui suit.

Une pompe de compression puisait l'air dans l'atmosphère et le refoulait dans un réservoir de chauffe, placé sur le foyer : l'air s'y échauffait à pression constante et augmentait de volume. Admis dans le cylindre moteur, il agissait sur le piston, à pleine pression d'abord, puis en se détendant, après quoi il était rejeté dans l'atmosphère. La décharge s'opérait à une pression

Fig. 9



légèrement supérieure à celle de l'atmosphère, et à une température qu'on cherchait à rapprocher le plus possible de la température extérieure, en faisant une longue détente. On le voit : il n'y avait plus ni régénérateur, ni réfrigérant.

Le diagramme de la *fig. 9* représente ce cycle :

1° AB représente le volume du kilog. d'air

puisé dans l'atmosphère, à la pression p_0 ; on le comprime suivant l'adiabatique BC, jusqu'à ce qu'il atteigne une pression p , un volume v et une température T.

2° De C en D, l'air comprimé s'élève de la température T à T_1 , sous l'action du foyer, sous pression constante.

3° Suivant DE a lieu une détente adiabatique faisant tomber la température à T' .

4° AE représente le volume de l'air sur la fin de la détente, à la pression atmosphérique p_0 , à la température T' ; cet air est expulsé du cylindre par le retour du piston et sa température redescend à T_2 , qui est celle de l'air ambiant dans lequel il est rejeté. Il n'y a pas d'appareil spécial faisant fonction de réfrigérant, ce qui n'empêche pas la réfrigération de se produire : les choses se passent comme dans une machine à vapeur sans condensation.

Ce cycle est fermé et réversible, en théorie du moins : calculons son rendement.

Sur CD, le gaz reçoit une quantité de chaleur Q_1 du foyer :

$$Q_1 = C(T_1 - T).$$

Le long de EB, il y a reprise de Q_2 :

$$Q_2 = C(T' - T_2).$$

Or, par suite de la réversibilité, nous pouvons écrire :

$$(14) \quad \int_T^{T_1} \frac{CdT}{T} - \int_{T_2}^{T'} \frac{CdT}{T} = 0$$

ou

$$\text{Log} \frac{T_1}{T} = \text{Log} \frac{T'}{T_2}$$

ou enfin

$$\frac{T_1}{T} = \frac{T'}{T_2}.$$

Pour le rendement ρ' , nous aurons :

$$\begin{aligned} \rho' &= \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T - (T' - T_2)}{T_1 - T} = \\ &= \frac{T_1 + T_2 - T - \frac{T_1 - T_2}{T}}{T_1 - T} = \frac{TT_1 + TT_2 - T^2 - T_1T_2}{(T_1 - T)T} = \\ &= 1 - \frac{(T_1 - T)T_2}{(T_1 - T)T} = 1 - \frac{T_2}{T}. \end{aligned}$$

Observons que T est une température dont nous disposons à volonté, attendu qu'elle dépend du degré de compression préalable : les limites entre lesquelles évolue le cycle sont T_1 et T_2 ; T est toujours inférieur à T_1 . Or, le rendement maximum ρ serait égal à $1 - \frac{T_2}{T_1}$. Entre les mêmes limites, le rendement calculé ρ' du cycle

de Joule est donc moindre que le rendement ρ du cycle de Carnot.

Mais nous avons dit que nous disposons de T . Si donc nous faisons tendre T vers T_p , nous améliorerions le rendement. Il est vrai que si T devenait égal à T_p , nous supprimerions *ipso facto* la compression et, par suite, le travail effectué par la machine tomberait à zéro. Le cycle de Joule jouit donc de la propriété intéressante, qu'on retrouve dans d'autres moteurs, que le rendement augmente à mesure que le travail diminue et qu'il se rapproche de l'unité en même temps que le travail tend vers zéro.

Ce résultat a une grande portée théorique, mais il séduit moins les praticiens, qui cherchent à tirer d'une machine le plus de travail possible, quand elle fonctionne entre des limites déterminées de température.

Ils nous demandent donc de disposer de T en vue de rendre le travail maximum ; il faut, pour lors, que $Q_1 - Q_2$ devienne maximum ou bien que $T + \frac{T_1 T_2}{T}$ devienne minimum, puisque nous avons trouvé ci-dessus que

$$Q_1 - Q_2 = C \left(T_1 + T_2 - T - \frac{T_1 T_2}{T} \right).$$

Or, le produit $T \times \frac{T_1 T_2}{T}$ est constant pour

des valeurs données de T_1 et de T_2 ; le minimum correspond donc à l'égalité des deux facteurs.

D'où

$$T = \frac{T_1 T_2}{T}$$

et

$$T = \sqrt{T_1 T_2}.$$

Le travail est donc maximum lorsque T est une moyenne proportionnelle entre T_1 et T_2 .

On voit que cette conclusion est vraie aussi pour la valeur de

$$T' = \frac{T_1 T_2}{T} = \sqrt{T_1 T_2}.$$

Le rendement devient alors égal à

$$\rho' = 1 - \sqrt{\frac{T_2}{T_1}}$$

et le rendement générique est

$$\rho_1 = \frac{1 - \sqrt{\frac{T_2}{T_1}}}{1 - \frac{T_2}{T_1}} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{T_2}{T_1}}}.$$

Pour $T_2 = 288^\circ$ et $T_1 = 573^\circ$,
on trouverait

$$\rho = 0,497 \quad \text{et} \quad \rho' = 0,291$$

$$\rho_1 = 0,59.$$

10. Applications de l'idée de Joule. — Joule n'a point réalisé son idée, mais elle a été reprise, avec plus ou moins de modifications, par un grand nombre d'inventeurs dont les brevets et les descriptions encombrant plus les livres que les ateliers.

Parmi les applications heureuses qui ont été faites de l'idée de Joule, nous citerons les machines thermiques de Shaw, de Buckett et de Bénier.

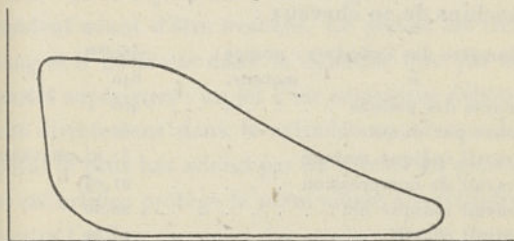
La première a été exposée à Paris en 1867, et elle y a été fort remarquée⁽¹⁾ : un piston moteur différentiel comprimait l'air par sa face supérieure et recevait sur sa face inférieure l'action de l'air dilaté. Ce piston constituait l'organe essentiel de la machine : sa partie supérieure à manchon était seule munie d'une garniture étanche ; un boisseau plongeur formait la partie inférieure en contact avec les gaz chauds. Le haut du cylindre dans lequel se mouvait la garniture étanche était refroidi par une enveloppe d'air à circulation : comme d'ailleurs le cylindre de compression était annulaire, il se trouvait refroidi par le centre et par la périphérie. L'air

(1) Le brevet français a été pris en 1867, mais la machine Shaw s'était perfectionnée d'abord en Amérique avant de franchir les mers.

comprimé, recueilli dans un réservoir, se dilatait en traversant le combustible d'un foyer clos et il venait agir sur la partie inférieure du piston. Un jeu de soupapes fort ingénieux opérait la distribution et faisait varier l'admission et la détente, sous la dépendance d'un régulateur sensible ; après avoir agi, les gaz étaient expulsés en dehors.

La machine Buckett est aussi à foyer intérieur⁽¹⁾ : l'air comprimé par une pompe est re-

Fig. 10



foulé à travers une valve régulatrice, qui le distribue partie au-dessous du foyer, partie au-dessus, à travers une ouverture que le régulateur ouvre à mesure que la vitesse augmente.

(1) Revue Technique de l'Exposition Universelle de 1889 ; *Des Moteurs secondaires*, par G. Richard ; 6^e partie, t. II, p. 277.

La pression des gaz arrivant au moteur est celle de la compression, mais leur température est très élevée et elle peut atteindre 700° . Le diagramme de cette machine est reproduit par la *fig. 10*; on voit qu'il ne diffère pas beaucoup de celui de la *fig. 9*, qui représente le cycle exact de Joule; sa ressemblance avec le cycle d'une machine à vapeur est de plus fort remarquable. La détente est complète.

Voici, d'après M. Jenkin, les données principales de construction et de fonctionnement d'une machine de 20 chevaux :

Diamètre des cylindres : pompe	460 ^{mm}
" moteur.	610
Course des pistons	405
Tours par minute	61
Travail indiqué moteur	41,24 chevaux
Travail de compression	21,04
Travail indiqué net	20,20
Travail effectif.	14,39
Rendement organique	0,71
<i>Dépense de coke par cheval-heure</i> <i>effectif.</i>	1 ^{kg} ,150 (1)
<i>Dépense de coke par cheval-heure</i> <i>indiqué</i>	0, 816

(1) On déduirait de ces chiffres :

$$\rho^{\circ} = 0,100 \text{ et } \rho^1 = 0,343$$

Mais les pertes du foyer n'ont pu être déduites du calcul.

Le moteur Bénier, qui a été présenté au public dans plusieurs Expositions et dont il a été fait un certain nombre d'applications, présente des analogies avec les moteurs précédents. Le foyer est placé dans l'intérieur même du cylindre : l'air froid, pris à l'atmosphère et refoulé par une pompe spéciale, traverse ce foyer et entretient la combustion du coke chargé sur une grille par un distributeur mécanique spécial. Les gaz chauds, très dilatés par la haute température de ce foyer, soulèvent le piston et se détendent avant d'être évacués. Le piston est très long et il ne frotte dans le cylindre que par sa partie supérieure : un jet d'air comprimé débouche directement dans le cylindre au niveau du point le plus bas atteint par les cercles du piston et cet artifice protège la paroi alésée du cylindre contre l'action corrosive des cendres et des poussières du foyer, qui la rayeraient infailliblement en s'interposant entre les parties frottantes. Un courant d'eau circule autour du cylindre pour éviter le suréchauffement des parois.

Il résulte d'essais sérieux que la consommation de coke ne dépasse pas, par cheval-heure effectif, 1 500 grammes pour un moteur de 4 chevaux, 1 350 pour un moteur de 6, 1 100 pour un moteur de 9 et 900 grammes pour le type supé-

rieur de 20 chevaux. Ces chiffres sont dignes d'être notés (1).

Pour les apprécier à leur juste valeur, il faut les comparer aux résultats fournis par les machines à vapeur d'égale puissance ; or, une machine de 4 chevaux consomme 4 kilog. de coke par cheval-heure *effectif* et cette consommation est encore de 2 kilog. dans les machines de 20 chevaux. Le moteur à air chaud consomme donc moitié moins qu'une bonne machine à vapeur.

Pourquoi néanmoins le moteur à air chaud paraît-il délaissé ? Pourquoi ne construit-on plus que de petits moteurs ? A l'Exposition de 1889, c'est à peine si l'on pouvait voir l'un ou l'autre spécimen de ces machines, qui avaient autrefois provoqué tant d'espérances.

Nous croyons que cet abandon des machines à air chaud est regrettable, car il est bien des circonstances dans lesquelles ce genre de machines

(1) Nous aurions encore à citer le moteur Genty, exposé à Tours, en 1892 et acheté par l'Etat pour l'éclairage du phare d'Antifer : sa consommation par cheval-heure effectif a été trouvée égale au moins à 1 400 grammes de coke, mais il y a lieu de croire qu'elle sera considérablement abaissée par les perfectionnements que suggérera à l'inventeur la marche industrielle de son ingénieux moteur.

pourrait rendre plus de services que les machines à vapeur, voire même que certains moteurs à gaz, quand il s'agit de travaux de campagne ou d'installations provisoires ou bien encore quand on manque d'eau.

Le moteur à air chaud de grande puissance présenterait lui-même encore de sérieux avantages pratiques sur la machine à vapeur, alors même qu'il n'aurait pas de régénérateur (nous l'avons vu ci-dessus), si l'on voulait aborder résolument les hautes pressions initiales, qui rendraient ce moteur extrêmement compact, moins encombrant même que la machine à vapeur et bien souvent plus économique. On sait en effet que l'on double la pression d'un gaz, quelle que soit sa valeur initiale, 1 ou 10 kilog. par centimètre carré, en élevant sa température de 273 degrés centigrades ; on sait, d'autre part, qu'il ne faut pas davantage de combustible pour élever ainsi de 273° la température d'un volume d'air, que sa pression soit de 10 ou de 1 kilog. ⁽¹⁾. Dès lors, il y a tout avantage à alimenter la machine d'air froid comprimé à 10 kilog. ; cet air aura 10 kilog. dans les chambres froides, 20 ki-

(1) Voir notre *Thermodynamique à l'usage des Ingénieurs*, p. 95.

log. dans les chambres chaudes, d'où résultera sur le piston moteur une pression effective de 10 kilog. Comme la puissance de la machine est proportionnelle à cette pression effective, on pourra réduire au minimum le volume du moteur et l'amener à des dimensions très petites. Comme, d'autre part, la consommation de combustible reste la même, on pourra aussi rendre le fonctionnement de la machine très économique. En somme, toute la question se résume à travailler avec une tension initiale considérable : on n'est limité dans cette voie que par des difficultés de construction relatives à l'étanchéité des joints, mais on arriverait à les surmonter aisément, et l'on obtiendrait, croyons-nous, des résultats inespérés.

Ces résultats sont d'ailleurs atteints par les moteurs à gaz tonnants, qui sont de véritables moteurs à air chaud, à foyer intérieur, chauffés par un combustible gazeux extrêmement riche, ne laissant ni cendres, ni résidus, et se prêtant merveilleusement, à toutes les applications. Leur étude fera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE IV

LES MOTEURS A GAZ TONNANTS

1. Concept fondamental du moteur à gaz. — Quelle que soit la part qui revienne à l'abbé Hautefeuille, à Papin, à Lebon, à Barnett, etc., dans la création du moteur à gaz, on doit reconnaître qu'il n'a pu être utilisé industriellement avant 1860, époque à laquelle M. Lenoir construisit son célèbre *moteur à air dilaté par la combustion du gaz* : c'était un moteur à explosion, sans compression préalable, qui dépensait de 2 500 à 3 000 litres de gaz par cheval-heure effectif. En 1867, la maison Langen et Otto de Deutz, près Cologne, exposait à Paris un moteur atmosphérique, peu régulier et fort

bruyant, qui ne consommait que 900 litres ; l'économie du fonctionnement rachetait les autres défauts de la machine, et le succès fut grand. Mais les ingénieurs de Deutz ne s'en contentèrent pas et, reprenant une idée originale émise autrefois par Beau de Rochas ; ils établirent un type nouveau, dit à quatre temps, à explosion avec compression préalable. Vers le même temps, Simon, de Nottingham, construisait un moteur à combustion avec compression préalable. La fortune de ces deux machines fut inégale ; alors qu'on abandonnait bientôt l'idée de Simon, Otto vendait des milliers de machines, cédait des licences dans le monde entier et posait franchement le moteur à gaz en concurrence avec la machine à vapeur : avant même que ses brevets ne fussent expirés, on les copiait partout sous le couvert de Beau de Rochas, et la concurrence perfectionnait si bien les dispositifs du moteur qu'aujourd'hui les Simplex, (Delamare-Deboutteville et Malandin) les Crossley, les Charon, les Niel, les Stockport, les Griffin, et tant d'autres sont garantis pour des consommations de 600 litres par cheval-heure effectif et tiennent souvent mieux encore.

Cette évolution s'est opérée en trente ans : nous venons de le voir, on est parti du moteur

sans compression avec explosion (Lenoir), le succès est venu à la machine atmosphérique (Langen et Otto), la lutte s'est établie entre le moteur à explosion (Otto) et le moteur à combustion (Simon) et, grâce à l'adoption universelle des quatre temps, c'est le genre Otto qui a triomphé. Tel est l'ordre chronologique de la marche progressive du moteur à gaz.

Tel n'est pas, il est vrai, l'ordre rationnel de ces progrès : on aurait pu suivre un chemin plus droit et arriver plus vite au terme. En effet, dès l'année 1851, Joule proposait une machine à air sans réfrigérant, ni régénérateur, composée d'un compresseur, d'un réchauffeur et d'un cylindre moteur ; dans le projet de Joule, le foyer était extérieur et il en résultait une perte que Pascal et Belou atténuèrent beaucoup en plaçant plus tard le foyer dans le cylindre moteur lui-même. Si à ce moment un ingénieur était venu dire aux constructeurs qu'ils feraient bien mieux de brûler dans le cylindre un gaz combustible plutôt que d'employer un solide combustible ⁽¹⁾, ils eussent été conduits directement au moteur à gaz à compression préa-

(1) Les travaux de Siemens avaient préparé depuis longtemps cette application.

lable, à explosion ou bien à combustion, et l'on évitait tous les tâtonnements dont nous venons de résumer l'histoire !

Voilà, en effet, le vrai concept fondamental du moteur à gaz : c'est une machine alimentée par un mélange de gaz tonnants, comprimé et introduit à froid, dont l'échauffement ne se produit qu'après son admission, alors qu'il est introduit au cœur du cylindre, avec le minimum de perte. Le moteur à gaz dérive donc du moteur à air chaud, dont il a toutes les qualités, et qu'il surpasse parce que la chaleur est portée tout entière et directement dans le cylindre ; l'échauffement se fait à volonté à volume constant, par explosion instantanée, ou bien à pression constante, par combustion graduelle ; la nature du combustible écarte la préoccupation des cendres dont la production dans le cylindre est une cause rapide de détérioration des surfaces frottantes ; bref, le moteur à gaz a une supériorité incontestable sur le moteur à air chaud et par suite sur toutes les machines thermiques.

Il n'a pas plus besoin de régénérateur et de réfrigérant que n'en avait besoin le moteur de Joule ; il faut seulement que la chaleur du foyer intérieure soit bien utilisée par la détente et qu'il s'en perde le moins possible par la paroi.

C'est la thèse que soutient depuis dix ans celui qui écrit ces lignes.

2. Cycle des moteurs à compression avec explosion. — Une étude complète des moteurs à gaz exigerait que nous passions en revue les quatre classes de moteurs ; mais nous renverrons à notre *Traité des Moteurs à gaz* ⁽¹⁾, les lecteurs désireux d'approfondir ces questions et nous nous contenterons ici d'examiner les moteurs à compression avec explosion, ou avec combustion, parce qu'il ne s'en construit plus guère d'autres.

Commençons par les premiers.

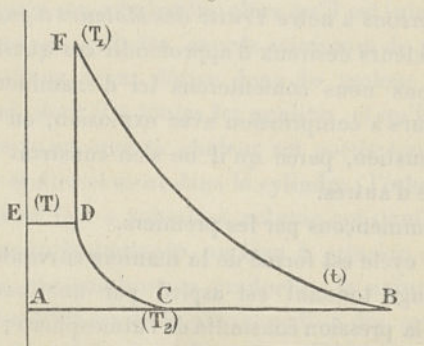
Le cycle est formé de la manière suivante : le mélange tonnant est aspiré par une pompe, sous la pression constante de l'atmosphère ; puis il est comprimé, suivant une adiabatique, dans un réservoir intermédiaire ou dans le cylindre même. L'inflammation ayant eu lieu, le gaz s'échauffe instantanément, nous l'admettrons, sous volume constant, et la pression atteint son

(1) A. WITZ. — *Etudes sur les moteurs à gaz tonnants* : Paris, Gauthier-Villars, 1883. — *Traité théorique et pratique des Moteurs à gaz*, 3^e édition, revue et considérablement augmentée. Paris, Bernard et C^{ie}, t. I, 1891, et t. II, 1894.

maximum P : le piston est refoulé en produisant du travail, et, après détente complète, les gaz sont refroidis et expulsés sous pression constante.

Le chemin parcouru est le suivant (*fig. 11*) : ACDE — EDFBA : ACDE est le diagramme de compression, EDFBA, le diagramme moteur ; le

Fig. 11



double chemin DE est supprimé quand la compression s'effectue dans le cylindre même de travail.

Voici le détail et la série des opérations :

AC, aspiration dans le gazomètre et l'atmosphère des éléments du mélange tonnant ;

CD, compression adiabatique ;

ED, transvasement, s'il y a lieu ;

DF, échauffement à volume constant ;

FB, détente adiabatique ;
 BA, expulsion des gaz brûlés.

3. Rendement calculé de ce cycle et rendement générique. — Le mélange est pris à la pression atmosphérique H et à la température extérieure T_2 ; il est comprimé à la pression π , et, comme cette opération est adiabatique, il prend une température $T > T_2$. L'explosion fait monter la température à une valeur T_1 ; la pression devient P . Les gaz brûlés se détendent ensuite sans perte, ni gain de chaleur, en fournissant eux-mêmes toute la chaleur transformée en travail le long de l'adiabatique de détente : leur température passe de T_1 à t . Puis ils sont refroidis de t à T_2 , au contact du réfrigérant constitué par l'atmosphère dans laquelle on les déverse.

Les quantités de chaleur mises en œuvre sont aisément calculables et cela nous donne le rendement théorique de ce cycle.

Nous avons d'abord :

$$\begin{aligned} Q_1 &= C' (T_1 - T) \\ Q_2 &= C (t - T_2) \\ \rho' &= \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{C' (T_1 - T) - C (t - T_2)}{C' (T_1 - T)} = \\ &= 1 - \gamma \frac{t - T_2}{T_1 - T}. \end{aligned}$$

Mais les valeurs de t et Q sont à déterminer en fonction des données de la question.

Nous avons d'abord (1) :

$$(26) \quad \frac{T}{T_2} = \left(\frac{\pi}{H}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

et

$$\frac{T_1}{T} = \frac{P}{\pi};$$

de plus,

$$\frac{t}{T_1} = \left(\frac{H}{P}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}.$$

Nous en déduisons :

$$\frac{t}{T_2} \cdot \frac{T}{T_1} = \left(\frac{\pi}{P}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{T}{T_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}};$$

d'où

$$\frac{t}{T_2} = \left(\frac{T}{T_2}\right)^{-\frac{1}{\gamma}} = \left(\frac{T_1}{T}\right)^{\frac{1}{\gamma}}$$

et

$$\frac{t - T_2}{T_2} = \left(\frac{T_1 - T}{T}\right)^{\frac{1}{\gamma}}.$$

(1) Nous prenons pour le mélange tonnant la valeur moyenne $\gamma = 1,30$; nous avons donc :

$$\frac{1}{\gamma} = 0,77 \quad \frac{\gamma-1}{\gamma} = 0,23 \quad \text{et} \quad \frac{1}{\gamma-1} = 3,33,$$

En somme, il n'y a qu'à fixer la valeur de la compression π pour que toutes les autres données en découlent.

Posons $\pi = 3$ atmosphères.

Il vient :

$$(1) \quad T = T_2 \left(\frac{\pi}{H} \right)^{0,23}$$

Pour $T_2 = 288^\circ$ (15° centigrades),

$$T = 371^\circ$$

C'est un accroissement de 83°.

La détonation se produisant immédiatement après la compression, la température explosive T_1 est augmentée du nombre de degrés acquis dans cette compression ; or, par le seul fait de l'explosion, en supposant un mélange de 1 volume de gaz à 5 250 calories avec 10 volumes d'air, la température atteindrait 1802° (1) ; T_1 est donc égal à 1802 + 83 = 1885°.

Or,

$$t = T_2 \left(\frac{T_1}{T} \right)^\gamma = 1007^\circ ;$$

(1) Voir pour ces calculs notre *Traité théorique et pratique*, 3^e édition, t. I, p. 95 et suivantes.

La valeur de ρ' est donc égale à

$$\rho' = 1 - 1,30 \frac{1007 - 288}{1885 - 371} = 0,38.$$

Or, le rendement théorique du cycle de Carnot, entre les limites 1885° et 288° eût été

$$\rho = \frac{1885 - 288}{1885} = 0,85;$$

le rendement générique ρ' est donc égal à

$$\rho_1 = \frac{0,38}{0,85} = 0,45.$$

4. Rendement pratique. — Nous venons de décrire le cycle de ces moteurs tel qu'il devrait être : il nous reste à dire ce qu'il est en réalité.

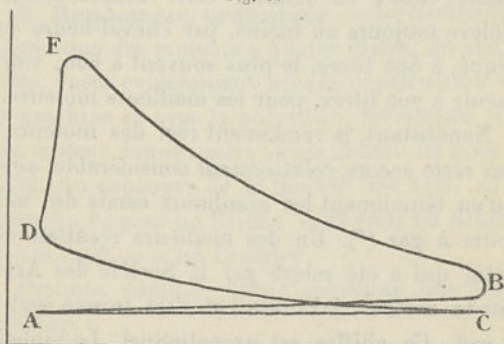
Nous avons fait les hypothèses suivantes :

- 1° La détonation est instantanée et l'échauffement des produits de la combustion s'opère rigoureusement à volume constant ;
- 2° La combustion des produits est complète ;
- 3° Il n'y a aucune déperdition extérieure de calorique ;
- 4° La détente s'effectue suivant une adiabatique ;
- 5° Elle est complète ;

6° La contre-pression à l'échappement est nulle.

Ces conditions sont loin d'être réalisées dans la pratique, ainsi qu'il ressort de la comparaison des diagrammes théoriques et réels, relevés sur une machine Otto ou sur une machine similaire : comparons, en effet, les éléments DF d'explosion (*fig. 12*), FB de détente, BA d'échappement et nous nous ferons une idée exacte des

Fig. 12



imperfections du cycle parcouru par les gaz dans les machines de l'industrie. La température maximum T_1 est inférieure de 250° pour le moins à sa valeur calculée et l'on perd presque 3 kilogrammes de pression. Il se perd beaucoup de calories par la paroi : l'eau de circulation employée à réfrigérer le cylindre, emporte quel-

quefois jusqu'à 40 % du calorique. La détente n'est jamais assez complète et les gaz de la décharge entraînent une perte qui peut atteindre 50 %, ainsi que c'était le cas pour le moteur Atkinson, excellent d'ailleurs, essayé au concours célèbre de la Société des Arts.

En somme, la consommation théorique ne devrait pas dépasser 280 litres d'un gaz possédant un pouvoir moyen de 5 250 calories par mètre cube ; en réalité, cette consommation s'élève toujours au moins, par cheval-heure indiqué, à 500 litres, le plus souvent à 600, voire même à 700 litres, pour les meilleurs moteurs.

Nonobstant, le rendement réel des moteurs à gaz reste encore *relativement* considérable, ainsi qu'en témoignent les nombreux essais des moteurs à gaz (1). Un des meilleurs résultats est celui qui a été relevé par la Société des Arts, sur le moteur Atkinson ; ρ'' s'est trouvé égal à 0,228. Ce chiffre est exceptionnel. Le moteur Crossley nous a donné, pour une consommation de 609 litres de gaz à 5 011 calories.

$$\rho'' = \frac{75 \times 2600}{0,609 \times 5011 \times 425} = 0,216$$

(1) Voir sur ce sujet notre *Traité des Moteurs à gaz* 3^e édition, t. I, p. 183.

Le moteur Simplex essayé par nous en 1885 donnait $\rho'' = 0,209$.

Prenons seulement

$$\rho'' = 0,20.$$

Le rendement générique correspondant tombe à

$$\rho_2 = \frac{0,20}{0,28} = 0,526.$$

5. Rendement organique. — Le rendement organique des moteurs à quatre temps, du genre Otto, varie évidemment avec la construction de la machine et avec la puissance développée par un moteur donné : nous avons obtenu de 0,69 à 0,88. Au concours de la Société des Arts, on a trouvé 0,81 pour un Griffin, 0,86 pour un Atkinson et 0,86 pour un Crossley.

Prenons comme valeur moyenne des bons moteurs :

$$\varepsilon = 0,85$$

La consommation du gaz par cheval-heure effectif dépend évidemment dans une certaine mesure de cette valeur de ε .

Estimons cette consommation à 600 litres.

6. Consommation de charbon par cheval-heure effectif. — On trouve dès lors, en admettant que 1 kilogramme de charbon produise 300 litres de gaz, qu'un bon moteur à gaz consomme au plus 2 kilogrammes de charbon par cheval-heure effectif; mais il y a lieu de tenir compte des sous-produits utilisables de la fabrication du gaz. On peut considérer en effet que le coke et les goudrons qu'on retrouve par 100 kilogrammes de charbon valent 60 kilogrammes de ce charbon; la dépense nette par cheval-heure effectif descend par suite à 800 grammes.

C'est un fort remarquable rendement.

Mais on peut obtenir des résultats bien meilleurs encore.

En effet, au lieu d'employer un gaz riche tel que le gaz d'éclairage, donnant en moyenne 5 250 calories par mètre cube (à 0° et 760 millimètres) et quelquefois beaucoup plus (certains gaz donnent 6000 calories), on peut introduire dans le cylindre un gaz de gazogène, moins combustible, il est vrai, mais dont l'allumage se fait encore bien quand le mélange tonnant est suffisamment comprimé. Tel est le gaz produit dans les gazogènes Siemens, dans les gazogènes Dowson, Taylor, Gardie, Buire-Lencachez, ou autres; ce gaz a générale-

ment un pouvoir de 1 200 à 1 400 calories par mètre cube. Il renferme de 30 à 37 % de gaz combustible (H , CO , C^2H^4 et C^4H^4) et le reste d'azote, acide carbonique et oxygène libre. L'expérience répétée a fait voir que ce gaz, appelé gaz pauvre, convient fort bien à l'alimentation des moteurs à gaz.

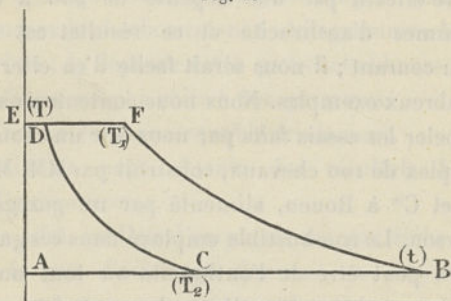
On est arrivé de la sorte à faire le cheval-heure effectif par une dépense de 550 à 600 grammes d'anthracite et ce résultat est devenu courant ; il nous serait facile d'en citer de nombreux exemples. Nous nous contenterons de rappeler les essais faits par nous sur un moteur Simplex de 100 chevaux, construit par MM. Matter et C^{ie} à Rouen, alimenté par un gazogène Dowson. Le combustible employé dans ces gazogènes peut être de l'anthracite ou tout autre charbon maigre non collant, donnant naissance à un coke pulvérulent et non aggloméré, de manière à ce que la charge ne forme pas voûte et descende au fur et à mesure de la combustion.

Le cheval-heure effectif par 550 grammes de charbon, voilà donc le résultat qu'il faut retenir, quand on veut comparer le moteur à gaz de grande puissance aux autres machines thermiques.

7. Cycle des moteurs à compression avec combustion et rendement de ce cycle. —

Le cycle des moteurs à compression préalable avec combustion, diffère notablement de celui que nous venons d'étudier : au lieu d'échauffer le mélange à volume constant, on opère à pression constante. Le mélange passe sur un brûleur à incandescence (fil de platine, cylindre de

Fig. 13



terre réfractaire, disque métallique) au contact duquel il s'enflamme progressivement, à mesure qu'il entre dans le cylindre : à une explosion vive et brutale se trouve donc substituée une combustion graduelle et continue. Le cycle se complète comme dans les moteurs à explosion : son diagramme, représenté par la *fig.* 13, est ACDE — EDFBA ; DF est parallèle à l'axe des volumes. Nous ne répéterons pas ce qui a

été dit ci-dessus relativement à la portion ED, décrite simultanément ou successivement par les deux pistons compresseur et travailleur.

Les opérations se succèdent comme il suit :

- 1° Aspiration AC dans le gazomètre et l'atmosphère ;
- 2° Compression adiabatique CD ;
- 3° Transvasement ED, s'il y a lieu ;
- 4° Echauffement DF à pression constante ;
- 5° Détente adiabatique FB ;
- 6° Décharge BA.

Les notations symboliques que nous emploierons dans le calcul du rendement ρ' sont les mêmes que ci-dessus.

Nous aurons :

$$Q_1 = C (T_1 - T)$$

$$Q_2 = C (t - T_2)$$

$$\rho' = \frac{C (T_1 - T) - C (t - T_2)}{C (T_1 - \theta)} = 1 - \frac{t - T_2}{T_1 - T}$$

Les températures et les pressions sont reliées entre elles par les formules suivantes :

$$\frac{T}{T_2} = \left(\frac{\pi}{H} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

et

$$\frac{t}{T_0} = \left(\frac{H}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

Il en résulte que, vu l'égalité de P et de π ,

$$\frac{T}{T_2} = \frac{T_1}{t},$$

d'où

$$\frac{t - T_2}{T_2} = \frac{T_1 - T}{T}.$$

Par suite,

$$\rho' = 1 - \frac{T^2}{T_1}.$$

Ce rendement est indépendant de T_1 , mais il croît à mesure que T augmente, et il pourrait devenir égal au rendement théorique maximum si T devenait égal à T_1 . Mais si T venait à égaler T_1 , le travail serait nul. C'est exactement le résultat obtenu par le cycle de Joule, dont le rendement est d'ailleurs le même : nous invitons, par conséquent, le lecteur à se reporter à ce qui a été dit ci-dessus du cycle de Joule dans les moteurs à air chaud.

Le cycle des moteurs à combustion étant celui de Joule, nous retrouvons donc les avantages spéciaux de cette classe des moteurs : il y avait là de quoi séduire les inventeurs, mais nous croyons que ces considérations ont échappé à la plupart d'entre eux.

Du reste, il faut reconnaître que le moteur à

combustion est théoriquement inférieur au moteur à explosion, bien que les valeurs de ρ' semblent de prime abord conduire à une conclusion inverse : mais il faut se garder de juger d'après les apparences, et il faut remonter aux valeurs exactes de t et de T . C'est ce qui nous reste à faire, pour compléter cette étude.

Prenons encore le même mélange au $\frac{1}{10}$, auquel s'appliquaient nos calculs précédents et conservons la même pression initiale ; T aura donc la même valeur que ci-dessus, mais le calcul donne pour T_1 une valeur plus faible ;

$$T_1 = 1485.$$

Cette différence tient à ce que la combustion ne se fait plus dans les mêmes conditions.

Il nous reste à calculer t .

Or,

$$t = \frac{T_2 T_1}{T} = 1152^\circ.$$

Par suite,

$$\rho' = 1 - \frac{1152 - 288}{1485 - 371} = 0,23.$$

Or, le rendement théorique du cycle de Carnot entre les limites de 1485 et 288° eût été de

$$\rho = \frac{1485 - 288}{1485} = 0,80 ;$$

le rendement générique est, par suite, égal à

$$\rho_1 = \frac{0,23}{0,80} = 0,30.$$

On le voit donc : les rendements des moteurs à combustion sont inférieurs à ceux des moteurs à explosion, toutes choses égales d'ailleurs.

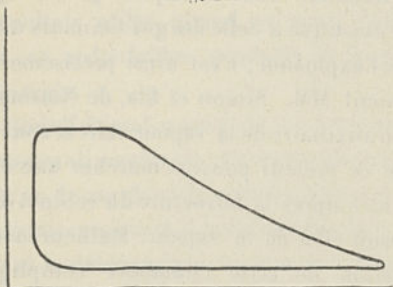
Cette démonstration, que nous avons déjà donnée en 1884, justifie un peu l'abandon dans lequel on a laissé tomber les moteurs à combustion Siemens ; Brayton et Simon avaient commencé d'en construire, puis ils y ont renoncé. Nous ne connaissons aujourd'hui que le moteur Gardie qui réponde à ce type. M. Vermand en étudie un autre.

On y reviendra.

En effet, remarquons qu'il serait facile de relever les rendements des moteurs à combustion ; il suffirait pour cela d'augmenter la compression préalable. A 5 kilog., ρ' deviendrait égal à 0,31 et ρ_1 à 0,39 ; ces valeurs sont encore moindres que celles qu'on obtient pour les moteurs à explosion, mais les facilités d'application que présente la combustion permettraient de combler sans peine cette différence. Le succès des moteurs Shaw, Buckett et Bénier devrait encourager les constructeurs ; en substituant le

combustible gazeux au combustible solide, on réalise des améliorations pratiques indiscutables. D'autre part, en opérant par combustion graduelle au lieu de faire exploser le mélange tonnant derrière le piston, on écarte toutes les difficultés contre lesquelles les inventeurs ont si longtemps échoué, quand ils ont abordé la construction des moteurs de grande puissance ; le dia-

Fig. 14



gramme ci-contre (*fig. 14*) relevé par nous sur une machine Gardie de 100 chevaux nominaux, montre avec quelle facilité se font l'admission variable et la détente et avec quelle précision le cycle réel reproduit les conditions essentielles du cycle théorique. Le jour où l'on voudra faire des moteurs à gaz de 500 chevaux, on reviendra aux moteurs à combustion, momentanément éclipsés par les moteurs à explosion.

8. Types divers de moteurs. — En dehors des deux types principaux de moteurs à gaz tonnants que nous venons d'étudier, il peut en exister d'autres.

Ainsi on a cherché divers moyens de tirer parti du calorique emporté généralement par les gaz d'échappement : le procédé le plus simple consiste à diriger ces gaz dans les carneaux d'une petite chaudière dont la vapeur pourra ajouter sa force élastique à celle des gaz tonnants au moment de l'explosion ; c'est ainsi précisément que procédaient MM. Simon et fils, de Nottingham. L'action auxiliaire de la vapeur était si considérable que ce moteur pouvait marcher une dizaine de minutes après la fermeture du robinet de gaz, par le seul effet de la vapeur. Malheureusement l'adjonction de cette chaudière complique le moteur et, sauf quelques cas spéciaux, la complication compense l'avantage qu'elle procure par ailleurs.

Quelques inventeurs ont émis l'idée d'utiliser non seulement la pression, mais encore la force vive des gaz tonnants en les faisant agir sur des turbines analogues au turbo-moteur Parson. D'autres, préoccupés surtout de la propulsion des navires, ont hardiment proposé de supprimer le piston et la machine et de faire agir di-

rectement la pression du gaz à l'arrière du bateau sur le liquide qui le porte. Les explosifs les plus variés peuvent être employés à cet effet et l'on a été jusqu'à mettre en œuvre des corps nitrés, dont la puissance est colossale. Jusqu'ici ces expériences n'ont guère produit que de terribles accidents. Mais ce retour aux premières machines à poudre devait être signalé, car il est possible que l'on aboutisse quelque jour à des résultats utiles, quand on aura réussi à asservir ces redoutables produits et à dompter leur énergie.

M. Rudolf Diesel a proposé un nouveau genre de moteurs alimentés de charbon pulvérulent, de pétrole ou de gaz, dont la caractéristique est d'opérer la compression et la combustion dans un cylindre et la détente dans un second cylindre. Les ingénieurs allemands ont fait le plus brillant accueil à cette idée qu'il est difficile d'apprécier, avant que le projet de M. Diesel ait été réalisé.

9. Moteurs à pétrole. — Le mélange d'hydrocarbures divers qui constitue les multiples variétés de pétrole a été utilisé directement pour produire un gaz tonnant, qui convient parfaitement à l'alimentation des moteurs à gaz.

On s'est servi d'abord des pétroles légers

(éthers de pétrole, essences, kérosolènes, gazolines, etc., de densité égale à 0,65); en saturant l'air, à la température ordinaire, des vapeurs de ces hydrocarbures, on obtient un gaz combustible qui présente les propriétés du gaz d'éclairage. Le mode de carburation varie beaucoup, mais il ne change presque rien aux qualités du gaz obtenu. Aucune modification ne s'impose pour les moteurs quand on emploie cet air carburé : tout au plus rencontre-t-on quelquefois des difficultés produites par l'accumulation de résidus moins volatils. Un bon moteur consomme 400 à 480 grammes de gazoline par cheval-heure effectif.

Mais il y avait un problème plus intéressant à résoudre, présentant du reste un intérêt pratique beaucoup plus considérable : c'était d'obtenir de la force motrice au moyen de l'huile de pétrole ordinaire, dite huile lampante, qui ne s'enflamme pas au-dessus de 35° centigrades et qui se trouve partout à bas prix.

Dès 1873, Brayton avait réalisé un moteur au pétrole lampant, dont les excellents résultats ont attiré l'attention sur ce nouveau genre de moteurs. De nombreux inventeurs ont pris à tâche d'améliorer cette machine et le succès vient de répondre à leurs efforts.

En général, on emploie des pulvérisateurs qui dispersent le pétrole en fines gouttelettes dans la masse de l'air : l'huile, refoulée par une pompe, vient perler goutte à goutte à l'extrémité d'un ajutage capillaire débouchant au centre d'un fort courant d'air allant au cylindre. On facilite la gazéification du pétrole en faisant intervenir la chaleur pour vaporiser les huiles plus lourdes qui se pulvérisent moins bien. Ce vaporisateur, qui peut être chauffé par une lampe avant de mettre la machine en train, facilite beaucoup la mise en route.

On comprend aisément que ces procédés peuvent varier à l'infini : le but à atteindre est de vaporiser complètement l'huile de pétrole de manière à ce que sa combustion soit parfaite dans le cylindre, sans formation de cambouis et de produits solides, qui compromettraient la marche du moteur, en encrassant des organes essentiels. Ce résultat est obtenu d'une manière assez satisfaisante pour qu'on puisse dire que le problème est dès maintenant résolu.

Parmi les moteurs à pétrole nous citerons les moteurs Priestman, Crossley, Otto, Grob, Hornsby, Niel, etc.

Pour faire apprécier les avantages que l'industrie peut retirer des moteurs à pétrole, citons

les chiffres publiés par M. Unwin à la suite d'expériences faites sur un moteur Priestman. Ce moteur, d'une puissance nominale de 5 chevaux, faisant 4, 5 chevaux au frein, par 180 tours, a consommé 0,56 litre d'huile lampante par cheval-heure effectif. Au prix français de 20 centimes le litre, cela met le cheval-heure effectif au taux de 11 centimes : au prix anglais et belge de 10 centimes, le cheval-heure effectif ne coûterait même pas 6 centimes.

Il n'y a pas lieu d'insister sur l'avenir qui paraît réservé aux moteurs à pétrole.

CHAPITRE V

PARALLÈLE ENTRE LES MACHINES A VAPEUR, A AIR CHAUD ET A GAZ TONNANTS

1. Situation présente de la machine à vapeur. — Le parallèle, que nous cherchons à établir, semble de prime abord fort audacieux, car il met sur le même rang des moteurs dont la fortune et la situation sont extrêmement différentes. Alors qu'il ne se construit presque plus de moteurs à air chaud et que le moteur à gaz commence seulement à entrer dans la grande industrie, la machine à vapeur continue de grandir et de se répandre partout. « Ses applications, dit M. Thurston ⁽¹⁾, sont grandioses.

⁽¹⁾ *Bulletin de la Société des Ingénieurs civils*, (avril 1891), traduction de M. Mallet.

On la voit transporter des masses de mille tonnes à travers l'Océan, par les tempêtes les plus terribles, indifférente aux vagues, au vent, aux courants, à une vitesse de 20 nœuds (1) soutenue pendant une semaine entière, en réalisant d'une manière continue un travail de 20 000 chevaux, travail qui, s'il était possible de l'accomplir au moyen d'animaux, exigerait la réunion de 80 000 chevaux vivants dont le poids seul serait triple de celui du navire et de sa cargaison, et qu'on ne pourrait loger que dans une cinquantaine de navires semblables. La machine à vapeur produit un travail de ce genre avec une dépense de 700 grammes de combustible par cheval et par heure réalisée. Elle pèse, dans ces conditions, 100 kilog. par cheval, poids qui descend presque au quart dans certains navires, tels que les torpilleurs, mais aux dépens de l'économie du fonctionnement. Sur terre, la machine à vapeur traîne des milliers de tonnes de marchandises à des prix pouvant descendre à 2 centimes par tonne et par kilomètre : elle

(2) Le nœud est de $\frac{1}{120}$ de mille, soit de 13^m,436; chaque nœud du loch parcouru dans les 30 secondes du sablier correspond à un mille, donc à une vitesse de 1852 mètres par heure.

traverse le continent américain de l'Atlantique au Pacifique, en quatre jours ; elle transporte le voyageur en un seul jour de New-York à Chicago, sur une distance de 1 700 kilomètres ; elle fait encore la tâche pour laquelle elle avait été créée à l'origine, au cours du siècle dernier, en épuisant les mines qui nous fournissent le charbon, les minerais, les pierres précieuses ; elle actionne les métiers pour la filature et le tissage ; en un mot, elle accomplit le travail mécanique du monde entier. »

On ne saurait tracer avec plus d'éloquence et de vérité le tableau du rôle immense joué par la machine à vapeur dans notre civilisation moderne. Or, les services rendus par le chef-d'œuvre de Watt sont obtenus à un prix extrêmement réduit, et, depuis un siècle, on voit la dépense de combustible diminuer progressivement et s'abaisser à un taux inespéré. Voici ce que dit encore à ce sujet M. Thurston :

« Les machines de Watt, qui constituaient déjà de grands perfectionnements, dépensaient 28 litres d'eau et 4^{kg},5 de combustible par cheval-heure. Celles de la génération suivante, fonctionnant à des pressions de plus en plus supérieures à la pression atmosphérique, réduisirent ces consommations à 18 kilog. d'eau et

2^{kg},5 de charbon. L'introduction des distributions perfectionnées à déclic et autres diminuèrent encore ces chiffres à 12 kilog. d'eau et 1^{kg},5 de charbon ; enfin, les meilleures machines de l'époque actuelle peuvent réaliser un cheval-vapeur avec une consommation par heure de 6,5 à 7 kilog. de vapeur et 700 à 800 grammes de combustible. »

C'est à dessein que nous empruntons à la plume si autorisée du savant ingénieur et professeur américain l'exposé de la situation présente de la machine à vapeur. Nous ajouterons avec lui que ces chiffres si réduits sont encore doubles de ceux qu'on devrait dépenser, mais que la connaissance que nous avons acquise aujourd'hui de la cause de ces pertes nous permet d'espérer des améliorations capitales, qui élèveront considérablement le rendement de la machine à vapeur. Tout cela est absolument logique et irréfutable.

2. Situation du moteur à gaz. — Par contre, nous ne nous rallions pas à l'opinion que M. Thurston émet relativement à la situation présente et à l'avenir des autres machines thermiques ; nous estimons qu'il méconnaît les services rendus par elles présentement et qu'il est

dans l'erreur quand il affirme que l'avenir appartient, comme le passé, à la machine à vapeur seule, qui ne pourra jamais être détrônée. C'est la reine des machines thermiques, dit-il, et elle le restera : mais, dirons-nous, en empruntant son langage, n'a-t-on pas vu des reines descendre de leur trône et des dynasties s'effondrer à la suite de révolutions ? Or, une révolution se fait sous nos yeux : nous voyons le moteur à gaz, si fort apprécié d'abord par la petite industrie, s'élever peu à peu des puissances de 1, 2, 4 et 8 chevaux à 25, 50, 100, voire même 200 chevaux ; un moteur Simplex de cette puissance actionne en effet, par un seul cylindre (1), les moulins de M. Abel Leblanc à Pantin, où il a pris la place d'une machine à vapeur. Un moteur Stockport de 400 chevaux à deux cylindres, alimenté au gaz Dowson, vient d'être mis en route à Godalming (Angleterre). J'avoue que le nombre de chevaux développés par les moteurs à gaz est encore une infime partie de l'énergie énorme développée en tous les points du globe, sur terre et sur eau, par les machines à vapeur de

(1) C'est un moteur Simplex, système E. Delamare-Deboutteville et Malandin, construit par M. Matter, à Rouen : il est alimenté aux gaz pauvres par un gazogène Buire-Lencauchez.

tous systèmes ; mais les plus grandes choses ont eu de modestes débuts. Le moteur à gaz était un jouet avant 1860 ; Lenoir et Otto en ont fait une machine industrielle et il a suffi de 37 ans d'efforts et de progrès pour l'amener au point où il est parvenu aujourd'hui. Quand de longues années d'études auront passé sur le moteur à gaz, ne sortira-t-il pas triomphant de la lutte dans laquelle il est engagé contre une machine qui a près d'un siècle d'avance sur lui ?

Cette question d'avenir ne peut être traitée que par des considérations théoriques approfondies. Mais les chapitres précédents nous en fournissent les éléments : nous allons les rapprocher et les discuter avec soin.

A cet effet, nous dresserons d'abord un tableau synoptique (p. 129) des divers rendements des machines à vapeur, à air chaud et à gaz tonnant.

4. Discussion des rendements. — La première conclusion qui ressort de l'examen de ce tableau comparatif est tout à l'avantage des machines à air chaud et à gaz tonnantes ; leur rendement *théorique* est de beaucoup supérieur à celui de la machine à vapeur. D'où provient cette supériorité ? Serait-ce à dire que les gaz qui ser-

RENDEMENTS COMPARÉS DES MACHINES THERMIQUES

Machines	Limites de température		Rendement théorique $\rho = 1 - \frac{T_2}{T_1}$	Rendement calculé $\rho' = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$	Rendement générique $\rho_1 = \frac{\rho'}{\rho}$	Rendement réel ρ''	$\rho_2 = \frac{\rho''}{\rho}$
	supérieure T_1	inférieure T_2					
A vapeur (à condensation)	437°	288°	0,341	0,277	0,812	0,162	0,584
Stirling (avec ré-générateur)	616	288	0,532	0,532	1	0,140	0,171
Ericsson (avec ré-générateur)	553	288	0,479	0,479	1	0,300	0,620
Joule (Bucket)	573	288	0,497	0,291	0,590	0,100	0,343
A explosion	1885	288	0,850	0,380	0,450	0,200	0,526
A combustion	1485	288	0,800	0,230	0,300	(pertes du foyer com- prises)	(pertes du foyer com- prises)

vent d'agents à la transformation du calorique en travail possèdent des propriétés qui permettent de convertir plus de chaleur en travail? Nullement. Le principe de Carnot est formel à cet égard : le maximum de travail que l'on peut obtenir par une calorie, entre des limites déterminées de température, est indépendant de la nature du corps transformateur. A quoi est donc due cette supériorité théorique des moteurs à gaz? Elle n'a pas d'autre cause que le grand écart des températures entre lesquelles les gaz évoluent dans le cycle : ρ ne dépend que de cela. Avec des gaz, on peut obtenir une chute théorique de température $T_1 - T_2$ égale à 1597° alors que cette chute ne dépasse pas 149° dans la machine à vapeur d'eau. Les grandes valeurs de ρ n'expriment pas autre chose *a priori*. En d'autres termes, ρ est élevé dans les moteurs à gaz, parce qu'on peut chauffer les gaz à 1885 degrés absolus sans que leur pression croisse démesurément, tandis que la vapeur d'eau saturée possède déjà 7 kilog. de tension à 337° absolus, 10 kilog. à 452° et 16 kilog. à 473° absolus. Cette pression énorme serait soutenue facilement par le cylindre moteur, mais on n'ose point y exposer les générateurs ou chaudières qui produisent la vapeur. Pour cette cause, et pour cette cause seulement,

le rendement ρ des machines à vapeur est moindre. Il est vrai que l'importance du fait est considérable, attendu que ρ est la mesure du rendement le plus grand qui puisse être obtenu : voilà pourquoi le coefficient ρ arrête notre attention. Ses valeurs élevées montrent donc que la machine à vapeur est essentiellement condamnée à ne jamais avoir le rendement des moteurs à gaz. Le rendement de la machine à vapeur augmenterait, si l'on pouvait substituer à l'eau un liquide permettant d'élever T_1 ou d'abaisser T_2 : on réussit à réaliser cette dernière condition en faisant des machines à vapeur à deux liquides (¹) ; on peut aussi élever T_1 en employant de la vapeur surchauffée. Néanmoins la chute de température reste encore faible et les moteurs à gaz conservent leur avance.

Cette première conclusion est indiscutable.

(¹) Dans ces machines, appelées *machines à vapeurs combinées*, du Tremblay avait eu l'idée de réutiliser le calorique versé au condenseur à chauffer un liquide très volatil et à le vaporiser, de manière à faire actionner par cette vapeur une seconde machine motrice. T_2 était évidemment abaissé et de fait le rendement s'améliorait ; mais d'insurmontables difficultés pratiques ont jusqu'ici empêché de réaliser avec succès dans l'industrie l'idée si ingénieuse de du Tremblay : nous en avons déjà parlé ci-dessus, à la p. 57.

Toutefois, il ne suffit pas de démontrer que les moteurs à gaz *peuvent* avoir un rendement meilleur que les machines à vapeur, quand le cycle des opérations est celui de Carnot ; mais il faut encore se préoccuper de savoir si elles gardent cette prééminence dans les cycles réellement parcourus dans les machines. Nous avons dit plus haut que le cycle de Carnot n'est qu'une fiction ; que reste-t-il dès lors de l'avantage reconnu aux gaz dans le calcul de ρ ?

Pour répondre à cette question, il faut calculer le rendement ρ' appartenant aux cycles types des machines : ce calcul se fait en divisant $Q_1 - Q_2$ par Q_1 ; les valeurs de ρ' sont le résultat de ce calcul. Sauf pour les moteurs de Stirling et d'Ericsson, supposés pourvus d'un régénérateur parfait, on trouve pour ρ' des valeurs moindres que pour ρ : la différence est faible pour la machine à vapeur, plus grande dans les moteurs à gaz tonnants. Le rendement générique ρ_1 , égal au rapport de ρ' à ρ , est l'expression de la perfection plus ou moins grande du cycle type des moteurs. On voit que la machine à vapeur a un cycle qui ne le cède guère à celui de Carnot, puisque $\rho_1 = 0,812$; au contraire, le cycle des moteurs Joule et des moteurs à gaz tonnants est loin de ce concept idéal, attendu que $\rho_1 = 0,590$.

Voilà donc que la machine à vapeur compense en partie son infériorité essentielle.

Mais elle ne la regagne pas complètement, car la valeur de ρ' est encore plus faible que dans les machines concurrentes.

Il est vrai qu'il y a loin de la coupe aux lèvres : nous allons trouver la preuve du fait dans les machines thermiques. En effet, les cycles types sont encore eux-mêmes fictifs ; il faut pousser notre étude plus avant et voir quel est le rendement des cycles réalisés dans les moteurs : de nombreuses imperfections dégradent les cycles et abaissent les rendements réels, ρ'' . Cette dégradation n'est pas la même pour les différentes machines, pour des causes multiples, parmi lesquelles dominent les actions de parois ; ces actions sont d'autant plus considérables que les températures limites sont plus écartées, on le comprend sans peine. En somme, la machine à vapeur conquiert encore du terrain, et elle dépasse même la plupart des machines à air chaud et n'est plus inférieure qu'aux seuls moteurs à gaz tonnants à explosion, genre Otto. Ce fait est rendu évident par l'examen de la colonne des valeurs de ρ'' . Les valeurs de ρ_2 confirment ces résultats, et la machine à vapeur tient maintenant la tête, à ne considérer que ρ_2 .

5. Conclusions. — Voici dès lors ce qu'il faut conclure : les machines à air chaud et à gaz tonnants sont plus parfaites *in genere* que la machine à vapeur ; mais celle-ci réalise bien mieux les conditions types de son cycle. Les premières répondent à un concept supérieur et elles justifient toutes les espérances ; la seconde doit au génie de Watt et aux efforts d'un siècle laborieux entre tous d'avoir réalisé presque tout ce que son concept promettait. Les premières ont encore énormément de chemin à faire ; la seconde est presque arrivée. Alors donc que le moteur à gaz tonnant, qui est déjà un perfectionnement de la machine à air chaud, à foyer intérieur, est encore très largement perfectible, nous constatons, d'autre part, que la machine à vapeur a presque atteint toute la perfection dont elle est susceptible et qu'elle ne fera plus que de lents et insensibles progrès, à moins de se transformer complètement.

Dans ces conditions quel est le moteur de l'avenir ?

C'est incontestablement le moteur à gaz.

Mais il est loin d'avoir achevé sa carrière, et nous allons nous en rendre mieux compte en envisageant la question à un point de vue plus pratique encore.

Comparons les consommations de charbon par cheval-heure effectif : voici le tableau récapitulatif des résultats relevés dans les chapitres précédents :

Machines	Puissance	Consommation de charbon par cheval-heure effectif	
	4 chevaux	4kg,000 houille	
A vapeur à condensation	100 //	1, 000	
	500 //	0, 780	
	1000 //	0, 700	
A air chaud {	Stirling	26 //	1, 589
	Ericsson	3 //	2, 500
	Bucket	15 //	1, 150 cōke
A gaz tonnants (avec gazogène Dowson ou Buire-Lencachez) .	100 //	0, 612 coke et anthracite	
	60 //	0, 550 id.	

Nous sommes arrivés ici au dernier terme de notre parallèle ; ces chiffres ont leur éloquence, mais ils demandent encore néanmoins à être commentés. C'est qu'en effet la consommation n'est pas tout dans une machine, et l'industriel se préoccupe tout autant de la facilité d'emploi et de la sécurité de la marche : or, pour le moment, les gazogènes et les moteurs à gaz n'offrent pas encore toutes les garanties que donnent la chau-

dière et la machine à vapeur ; le gazogène est plus capricieux et il demande un combustible spécial, souvent plus cher ; le moteur à gaz est plus délicat, et il exige plus de soins ; de plus, on n'oserait pas encore aborder pour les moteurs à gaz et les gazogènes les puissances de 500 et de 1000 chevaux devenues tout à fait courantes en machines à vapeur. Aussi continue-t-on et continuera-t-on longtemps encore à construire des chaudières et des machines à vapeur pour les grands ateliers, les navires et les locomotives.

D'ailleurs, la machine à vapeur, quoi qu'arrivée presque au terme de ses progrès, peut encore être modifiée absolument dans son cycle et trouver par là même une nouvelle voie, qui la conduirait à des destinées inespérées aujourd'hui : c'est la pensée de M. Thurston, et nous nous inclinons devant l'autorité d'un tel maître.

Nous gardant donc de toute exagération, nous nous contenterons de dire que, vu les conditions présentes des diverses machines thermiques, la machine à vapeur a trouvé un concurrent redoutable dans le moteur à gaz alimenté de gaz de gazogène : il n'est plus une quantité négligeable.

Voilà plus de douze ans que nous avons si-

gnalé l'éventualité possible du remplacement des chaudières à vapeur par des gazogènes.

On a d'abord souri de notre pronostic et l'on s'en est peu inquiété.

Mais le moteur à gaz et le gazogène ont grandi : il y a 33 ans que Lenoir prenait son premier brevet ; les brevets Otto ont 18 ans ; il y a 13 ans que MM. Crossley ont monté un premier gazogène Dowson à Manchester.

Que de progrès depuis lors !

Aujourd'hui les constructeurs bien avisés se préoccupent du nouvel ordre de choses qui se prépare et nous savons des maisons célèbres par la construction des machines à vapeur dans lesquelles on étudie des projets de moteurs à gaz.

Nous encourageons tous ceux qui nous consultent à imiter ce prudent exemple.

CHAPITRE VI

LES MACHINES ATMOSPHÉRIQUES

1. Type général. — Dans les machines atmosphériques, c'est la pression de l'atmosphère qui s'exerce sur le piston et détermine son mouvement ; cette pression ne peut être efficace que s'il existe un vide relatif sous le piston. La pression effective est égale à la différence des pressions sur les deux faces : sa valeur maximum ne saurait donc dépasser $1^{\text{kg}},033$ par centimètre carré.

Pour faire fonctionner une machine atmosphérique, on peut disposer les choses de la manière suivante : un fluide, agissant d'abord par sa pression sur la face inférieure d'un piston, le soulève jusqu'à l'extrémité de sa course ; puis,

ce fluide étant condensé ou raréfié d'une manière quelconque, le vide se fait et l'atmosphère, qui pèse sur la face libre supérieure, ramène le piston en arrière jusqu'à sa position première. On obtient ainsi un mouvement alternatif qui peut être utilisé.

Une semblable machine sera d'une réalisation aisée, si l'on met en œuvre un fluide facilement condensable, tel que la vapeur d'eau : aussi la première machine à vapeur industrielle, celle de Newcomen, fut-elle une machine atmosphérique. Mais la lenteur de la condensation ne permettait qu'un petit nombre de coups de piston par minute ; d'autre part, la pression effective était faible, et, en fin de compte, cette machine était peu puissante et fort encombrante. Watt la perfectionna en abandonnant le principe de l'action atmosphérique et en créant le double effet : ce serait revenir en arrière que de vouloir de nouveau demander un travail moteur à l'atmosphère dans une machine à vapeur.

Un gaz chaud perd sa pression par le refroidissement : on pourrait donc alimenter une machine atmosphérique d'air chaud au lieu de vapeur ; mais une semblable machine serait encore inférieure à celle de Newcomen.

Au contraire, l'emploi d'un gaz tonnant per-

met de constituer une machine atmosphérique dans d'excellentes conditions : telle est la machine atmosphérique de Langen et Otto (1).

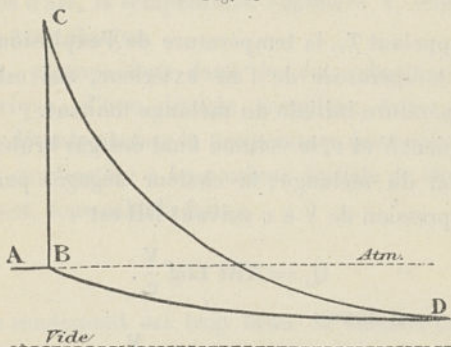
2. Machine Langen et Otto. — Dans cette machine, le mélange tonnant est introduit dans le cylindre, sous le piston, à la pression de l'atmosphère : puis, il est enflammé. L'explosion a lieu, en développant instantanément une température et, par suite, une pression considérable. Le piston, qui est libre, est vivement refoulé, et, en vertu de sa vitesse acquise, il détend les produits de la combustion jusqu'à une pression moindre que la pression initiale. Leur force élastique diminue encore par refroidissement à volume constant ; de plus, il se produit dans la combustion, on le sait, une certaine contraction par la production de vapeur d'eau et d'acide carbonique ; la vapeur d'eau formée se condense elle-même. Il se fait donc un vide relatif sous le piston : la pression atmosphérique ramènera par conséquent celui-ci en arrière, en développant

(1) MM. Barsanti et Matteucci avaient fait breveter déjà, en 1858, une machine utilisant la force explosive et le vide résultant de la combinaison de l'hydrogène pur, ou des différents gaz de l'éclairage ; cette machine n'avait pas donné de résultats industriels.

un travail utilisable et en comprimant les gaz jusqu'à la pression extérieure, sous laquelle ils sont expulsés. Libre dans la première période du cycle, le piston est rendu solidaire de l'arbre de couche moteur dans sa marche rétrograde, par l'intermédiaire d'un mécanisme particulier.

Cette série d'opérations est représentée par le diagramme ABCDBA de la *fig.* 15 ci-contre, dans

Fig. 15



laquelle CD représente la détente adiabatique des gaz produits par l'explosion ; cette détente a pour effet de faire tomber ces gaz à une température t qui pourrait être égale à celle de l'air ambiant. Le retour du piston sur lui-même comprime ces gaz et les ramène à leur état initial, suivant le chemin DB, à température constante.

Le cycle est donc limité par une adiabatique, une isothermique et une parallèle à l'axe des pressions.

3. Rendement du cycle de cette machine.

— Voici comment on peut calculer le rendement de ce cycle.

Nous avons d'abord

$$Q_1 = C' (T_1 - t).$$

en appelant T_1 , la température de l'explosion et t la température de l'air extérieur, qui est la température initiale du mélange tonnant.

Soient V et v , le volume final des gaz brûlés et initial du mélange; la chaleur dégagée par la compression de V à v suivant DB est :

$$Q_2 = ARt \operatorname{Log} \frac{V}{v}.$$

Il vient donc :

$$\rho = 1 - \frac{ARt \operatorname{Log} \frac{V}{v}}{C' (T_1 - t)}.$$

Or,

$$\frac{T_1}{t} = \left(\frac{V}{v} \right)^{\gamma-1},$$

d'où

$$\frac{V}{v} = \left(\frac{T_1}{t} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}}$$

Nous aurons par conséquent :

$$\rho = 1 - \frac{ARt \operatorname{Log} \left(\frac{T_1}{t} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}}}{C(T_1 - t)} .$$

Supposons que la température initiale t soit égale à 15° centigrades ou 288° absolus ; pour un mélange de 1 volume de gaz avec 9,4 volumes d'air, la température explosive T_1 atteindra 1888° absolus.

Or, plaçons-nous dans le cas, absolument théorique, d'une détente complète, telle que cette détente abaisse la température des produits de la combustion à leur valeur initiale de 288° ; il vient, tous calculs faits :

$$\rho = 0,70.$$

Ce rendement est trop beau et surtout trop fictif pour que nous en acceptions la possibilité. Mais supposons même que t ne devint égal qu'à 1224° absolus, et nous trouverions encore :

$$\rho = 0,39.$$

Le rendement générique serait alors :

$$\rho = 0,46.$$

Il est encore supérieur à celui de tous les autres moteurs à gaz.

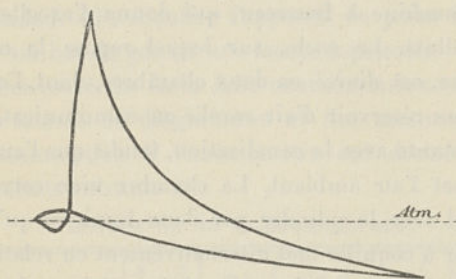
Je ne crois pas qu'il soit possible de faire mieux ressortir l'excellence générique des machines atmosphériques et d'expliquer d'une façon plus satisfaisante l'étonnant succès des moteurs Langen et Otto en 1867.

La pratique confirma en effet entièrement les conclusions des calculs qui précèdent, attendu que la consommation par cheval-heure effectif ne dépassait pas 800 litres, à une époque où l'on était heureux de n'en dépenser que 1 500 ou 2 000 par les autres moteurs. Le moteur atmosphérique Langen et Otto est un des plus remarquables moteurs thermiques que l'on ait réalisés et pourtant il faut bien reconnaître qu'au point de vue purement mécanique, ou plutôt cinématique, c'était une machine fort médiocre, laide de formes, assez encombrante, à la marche bruyante, à la réaction brutale. Le piston, libre d'abord, était lancé violemment en l'air comme un projectile, puis, son mouvement s'étant interverti, il était brusquement embrayé avec l'arbre de couche : cela ne pouvait se faire sans bruit ni ferraillement. Le travail développé par coup était faible, attendu que la partie inférieure du diagramme de la *fig.* 16, correspon-

dante aux pressions moindres que l'atmosphère, est seule motrice : le vide maximum développé sous le piston n'était du reste que d'une demi-atmosphère.

Le moteur Langen et Otto ne se construit pour ainsi dire plus aujourd'hui. Gilles et Hallelwell ont cherché à corriger les défauts du mo-

Fig. 16



teur atmosphérique tout en conservant son principe, dont nous venons de faire ressortir les avantages; mais le succès ne paraît pas avoir répondu à leur attente, car on ne parle plus de ces moteurs.

4. Moteur Petit et Boudenoot. — Les moteurs atmosphériques ont été remis en vogue par MM. Petit et Boudenoot, qui ont eu l'idée d'établir des canalisations d'air raréfié pour dis-

tribuer l'énergie à distance. En branchant un moteur atmosphérique sur un tuyau au vide, on se donne le moyen d'utiliser la pression de l'air extérieur sur une face d'un piston dont l'autre face communique avec la canalisation. Le vide n'est plus produit par le moteur, il est seulement utilisé par lui.

MM. Petit et Boudenoot ont adopté un type de machine à fourreau, qui donne d'excellents résultats. Le socle, sur lequel repose la machine, est divisé en deux chambres, dont l'une est un réservoir d'air raréfié en communication constante avec la canalisation, tandis que l'autre admet l'air ambiant. La chambre vide correspond avec le cylindre par deux lumières qu'un tiroir à coquille met alternativement en relation avec chacune des faces du piston ; l'air ambiant de la seconde chambre passe à une cavité du même tiroir et vient presser alternativement sur les faces opposées du piston. L'échappement, si ce nom peut être employé dans l'espèce, correspond donc à une introduction d'air dans la canalisation.

Le tiroir est construit de manière à utiliser la pression de l'air ambiant pour assurer le contact parfait de sa glace sur la table du cylindre.

Pour rendre la détente de l'air admis aussi

isothermique que possible, le cylindre est muni à sa périphérie d'ailettes conductrices, qui se réchauffent au contact de l'air atmosphérique et atténuent l'abaissement de température que tend à produire la détente. Le piston à fourreau, qui offre de larges surfaces rayonnantes, contribue du reste au même résultat. On peut d'ailleurs en hiver, pendant la période des grands froids, chauffer l'appareil de prise d'air par un bec de gaz ou une lampe à pétrole.

Des essais au frein faits concurremment avec des relevés de diagrammes et des mesures de consommation à l'anémomètre ont donné les résultats suivants :

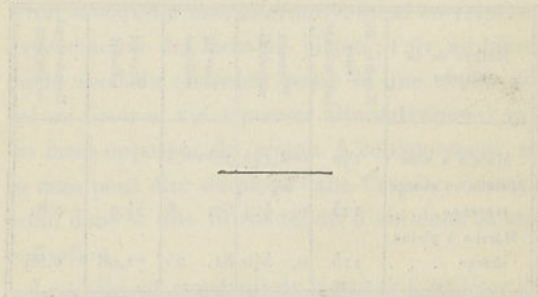
MOTEUR DE 50 KILOGRAMMÈTRES

Nature de la marche	Nombre de tours par minute	Pression moyenne	Travail indiqué	Travail effectif	Rendement organique
Marche à vide	140	0 ^{kg} , 144	26 ^{kgm} , 3		
Marche en charge moyenne. . .	125	0, 414	67, 6	54,9	0,81
Marche à pleine charge . . .	115	0, 540	81, 25	72,06	0,88

MM. Petit et Boudenoot distribuent l'énergie à 150 moteurs de 40 à 100 kilogrammes répartis dans un rayon de 800 à 1 000 mètres de leur

usine centrale : la distribution est commandée par trois machines à vapeur de 100 chevaux. Cette entreprise a rendu les plus grands services à la petite industrie, à laquelle elle fournit la force motrice dans des conditions réellement économiques.

5. Considérations générales. — L'étude qui précède permet d'apprécier les qualités spéciales des machines atmosphériques, qui peuvent, dans certaines conditions, devenir réellement économiques, mais qu'il serait difficile de rendre puissantes, vu la faible pression moyenne que l'atmosphère peut exercer sur le piston moteur.



CHAPITRE VII

LES MACHINES A AIR COMPRIMÉ

1. Les machines à air comprimé sont des machines thermiques. — Les machines à air comprimé se composent essentiellement d'un piston mobile sur lequel l'air agit par sa pression et qu'il fait progresser dans un cylindre ; un appareil de distribution quelconque admet l'air pendant la marche-avant et l'évacue dans l'atmosphère à la marche-arrière. On pourrait se demander pourquoi ce genre de moteurs rentre dans la catégorie des machines thermiques, car on ne voit pas *a priori* qu'il y ait d'aucune manière transformation de chaleur en travail.

Il ne saurait pourtant y avoir de bonne ma-

chine à air comprimé sans apport de calorique dans le cycle. Remarquons en effet que l'air, dont on alimente ces machines, doit être comprimé préalablement; cette opération a pour résultat d'échauffer l'air; or, le calorique développé de la sorte se perd nécessairement, soit qu'il soit abandonné par le fluide dans les conduites qu'il traverse, soit plutôt que le compresseur soit muni d'un réfrigérant, dans le but de réduire le travail de compression. Or, quand on détend dans le moteur cet air comprimé et ramené à la température ordinaire, il se produit fatalement un abaissement de température, qui fait tomber rapidement la pression et qui peut provoquer, d'autre part, la congélation de l'eau contenue dans l'air en plus ou moins grande quantité. Pour retrouver la majeure partie du travail de compression et pour obvier aux inconvénients de cette congélation, on est donc conduit à fournir par le dehors du calorique au gaz qui se détend. Ce calorique maintient la pression du fluide et il se transforme par conséquent en travail : la machine à air comprimé est donc bien une machine thermique.

La quantité de chaleur à fournir est considérable; ainsi, pour maintenir un kilogramme

d'air détendu à une température finale supérieure à 0° centigrades, il faut ⁽¹⁾ :

13 ^{cal} ,28	pour de l'air pris à 2 atmosphères	
21, 03	''	3 ''
26, 55	''	4 ''
30, 83	''	5 ''
34, 33	''	6 ''

L'augmentation de travail obtenue par l'échauffement de l'air est notable, ainsi qu'il ressort du tableau suivant dans lequel nous rapprochons les pressions finales obtenues par diverses détente adiabatiques ou isothermiques ⁽²⁾ :

Détente	Pression finale en atmosphères	
	Détente adiabatique	Détente isothermique
$\frac{1}{2}$	0,376	0,500
$\frac{1}{3}$	0,213	0,333
$\frac{1}{4}$	0,142	0,250
$\frac{1}{5}$	0,105	0,200
$\frac{1}{6}$	0,080	0,166

(1) Ces chiffres ont été calculés par M. Pernolet en prenant pour A la valeur de $\frac{1}{432}$.

(2) Voir notre *Thermodynamique à l'usage des Ingénieurs*, p. 87.

Il est vrai qu'on ne saurait réussir à faire de détente réellement isothermique, mais la comparaison de ces chiffres est très suggestive au point de vue que nous traitons.

L'échauffement de l'air s'impose donc à tous égards. Cet échauffement s'opère de façon diverse : les uns chauffent l'air avant qu'il n'entre au cylindre, en lui faisant traverser une sorte de calorifère à ailettes de fonte, chauffé au coke ; Siemens avait proposé, au contraire, d'injecter dans le cylindre moteur une certaine quantité d'eau chaude pulvérisée ou en vapeur, et c'est le mode qui prévaut aujourd'hui. M. Mékarski, dont les locomotives ont eu du succès, a pu utiliser de l'air comprimé à 25 kilogrammes, qu'il faisait barboter dans l'eau d'une petite chaudière renfermant de l'eau surchauffée à 180°. Dans les installations parisiennes de M. Popp, l'air comprimé est d'abord saturé d'eau, puis il traverse un poêle en fonte maintenu à une haute température. MM. Sturgeon et Hanssen complètent ce dispositif en entourant le cylindre moteur d'une enveloppe à circulation d'eau chaude ; ils ont aussi essayé, à l'exemple de M. Bryan Donkin, de chauffer le cylindre par des rampes de gaz.

Ces procédés peuvent évidemment varier à

l'infini : plus ils seront efficaces, plus aussi pourra être élevée la tension de l'air utilisé.

2. Rendement thermique. — Pour évaluer le rendement d'une machine à air comprimé, on compare généralement le travail réellement indiqué sur le piston par un kilogramme d'air à celui qu'il aurait pu indiquer s'il avait subi une détente complète rigoureusement adiabatique, sans perte d'aucune sorte, c'est-à-dire s'il avait actualisé toute son énergie. Cette manière d'envisager le rendement est très rationnelle⁽¹⁾, mais elle ne rentre pas dans l'ordre des idées de notre étude, qui a pour unique objet la transformation du calorique en travail.

Nous ne voulons pas sortir de notre programme et nous nous contenterons donc de faire ressortir l'efficacité du calorique fourni à l'air avant sa détente ou versé dans le cycle durant sa détente ; comparons, par suite, le travail maximum que peut produire l'air par sa détente

(1) Cette question a été traitée dans un remarquable aide-mémoire de cette Encyclopédie et nous jugeons inutile d'y rien ajouter ; nous inviterons donc le lecteur à se reporter à l'ouvrage de M. Gouilly, intitulé : *Transmission de la force motrice par l'air comprimé ou raréfié.*

adiabatique entre diverses limites de température.

Nous avons démontré rigoureusement, dans notre *Thermodynamique à l'usage des Ingénieurs* (p. 97), que ce travail est proportionnel à la chute de température subie par le gaz dans sa détente. Or, prenons de l'air à 20° centigrades et admettons que son expansion s'arrête au moment où sa température soit devenue égale à zéro : imposons-nous la même condition en prenant de l'air échauffé à 40° centigrades. La détente pourra, dans ce cas, devenir beaucoup plus longue et le travail fourni par elle aura doublé, puisque la chute de température a doublé. Ce n'est pas à dire que le rendement soit doublé aussi, car il faut tenir compte du travail fourni à pleine pression et l'on ne peut négliger le travail subtractif de la contre-pression ; mais on voit clairement quelle est l'importance capitale du rôle dévolu au calorique fourni à l'air dans les machines à air comprimé.

La pratique confirme entièrement ces vues théoriques.

En effet, nous possédons de remarquables expériences faites, en 1890, par M. Kennedy sur les appareils de la Société parisienne de l'air comprimé : nous n'extrayons des rapports publiés

par ce savant que les éléments relatifs à la question toute spéciale que nous traitons ici.

Le moteur essayé était une machine de Davy-Paxman, destinée à recevoir de la vapeur, mais qu'on alimentait d'air comprimé à 4,5 atmosphères. On opéra tour à tour sans réchauffement de l'air et avec réchauffement.

Or, dans le premier cas, le moteur dépensait 25 200 litres par cheval-heure indiqué ; l'air entrant à 29° centigrades et il sortait du cylindre à une température voisine de zéro.

Dans la seconde série d'expériences, l'air traversait un serpentin maintenu à 160° ; la dépense d'air diminuait aussitôt et s'abaissait à 18 800 litres par cheval-heure indiqué, c'est-à-dire qu'elle était réduite de 25 %₀. Le réchauffage procurait donc une économie de 6 400 litres par cheval.

Il est curieux de rechercher de quelle manière le calorique se transformait en travail. Le surchauffage coûtait 180 grammes de coke par cheval-heure indiqué au moteur ; il procurait une puissance supplémentaire indiquée de 0,3 cheval. Le cheval-heure, obtenu par la transformation des calories en kilogrammètres, entraînait donc une consommation de 600 grammes de coke. C'est un rendement thermique excellent.

3. Conclusions générales. — Ainsi donc en comprimant de l'air à 4,5 atmosphères, et en le surchauffant, on réalise un moteur dans lequel il suffit de 600 grammes de coke pour augmenter sa puissance d'un cheval. La constatation de ce fait est de la plus haute importance dans l'espèce et nous devons y insister, car il y a là une donnée précieuse pour le parallèle que nous avons voulu établir entre les différents moteurs thermiques. Remarquons, en effet, que les moteurs à air chaud, genre Joule, et les moteurs à gaz tonnants à combustion, genre Siemens, Simon, Brayton et Gardie, ne sont pas autre chose, à vrai dire, que des moteurs à air comprimé, dans le cycle desquels on a réussi à introduire le plus de chaleur possible, par des moyens spéciaux. Du chef de cette introduction de calorique, le rendement thermique atteint donc une valeur élevée, d'autant plus grande (nous venons de le rappeler), que la chute de température est plus considérable. Ce peu de mots suffit pour justifier ce que nous avons dit de ces moteurs et pour légitimer les espérances que nous avons fondées sur ces cycles. Avec une forte compression initiale et une longue détente, ces moteurs fourniront des rendements magnifiques, étant donné que la température ini-

tiale du gaz peut atteindre 1 400 à 1 600° centigrades.

Toute la chaleur communiquée au gaz est utilisée dans la détente et elle se transforme presque entièrement en travail. Voilà le vrai point de vue auquel il faut se placer pour apprécier les moteurs à air chaud, à foyer intérieur, et les moteurs à gaz tonnant ; l'introduction du calorique dans le cycle s'opérant dans des conditions bien meilleures à celles de l'expérience de M. Kennedy, on est autorisé aussi à en attendre une utilisation bien meilleure. C'était bien de faire le cheval-heure par 600 grammes de coke, mais on obtiendra beaucoup mieux en plaçant le foyer dans le cylindre lui-même.

C'est l'avantage que nous avons fait ressortir précédemment à l'actif de certaines machines à air chaud et des moteurs à gaz, en général.

CHAPITRE VIII

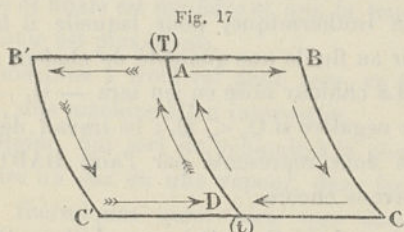
LES MACHINES FRIGORIFIQUES

1. Fonction de la machine frigorifique.

— Les machines frigorifiques sont comprises dans le domaine de la Thermodynamique, parce que ce sont des machines thermiques dont la fonction a été intervertie : en effet, tandis que la machine thermique transforme des calories en travail et qu'elle produit des kilogrammètres en dépensant des calories, la machine frigorifique transforme le travail en calories négatives et elle soutire du calorique aux corps en dépensant des kilogrammètres. La machine thermique est motrice, alors que la machine frigorifique est mue : les cycles des deux machines sont d'ailleurs identiques, sauf qu'ils sont parcourus

dans des sens différents ; commençons par faire ressortir cette première considération qui est fondamentale.

Prenons le cycle de Carnot comme base de notre démonstration : pour produire du travail par la chaleur, nous partons (*fig. 17*) de l'état initial A, et nous y revenons après avoir parcouru le chemin ABCDA, dans le sens des flèches ; le foyer



a fourni Q_1 calories sur AB, le réfrigérant en a repris Q_2 sur CD, et BC et DA sont des adiabatiques, le long desquelles il n'y a ni perte, ni gain de chaleur. Les températures limites sont T_1 et T_2 . Le travail ε produit, représenté par l'aire ABCD, est l'équivalent de la chaleur consommée $Q_1 - Q_2$ et nous avons

$$(1) \quad \varepsilon = J (Q_1 - Q_2)$$

Le rendement de cette série d'opérations est

$$(51) \quad \rho = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = \frac{A\varepsilon}{Q_1}.$$

Or, imaginons que nous réalisons un autre cycle de Carnot DAB'C'D, entre les mêmes limites T_1 et T_2 , en suivant les flèches pennées, à partir de D ; DA sera une première compression adiabatique suivie d'une compression isothermique AB', pendant laquelle il faudra soustraire au fluide une quantité de chaleur égale à $-Q_1$; puis viendra l'adiabatique B'C', suivie d'une détente isothermique, pour laquelle il faudra fournir au fluide une quantité de chaleur égale à Q_2 . La chaleur mise en jeu sera $-Q_1 + Q_2$, valeur négative si $Q_2 < Q_1$; le travail dépensé ε sera donc représenté par l'aire DAB'C'D et nous avons encore

$$-\varepsilon = J(-Q_1 + Q_2) = -J(Q_1 - Q_2).$$

Le rendement de cette série d'opérations est facile à déterminer, en imaginant que l'on se soit proposé de soustraire du calorique au fluide, comme cela se passe en réalité dans les machines à froid : cette soustraction a lieu sur C'D, si le fluide prend sur lui-même la quantité de chaleur nécessaire pour effectuer la détente isothermique C'D, et elle porte sur Q_2 . On soustrait donc Q_2 en consommant $-(Q_1 - Q_2)$ ce qui nous donne

$$\rho = \frac{-Q_2}{-(Q_1 - Q_2)} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = \frac{Q_2}{A\varepsilon}.$$

Dans la machine thermique, le rendement était d'autant plus grand que l'écart des températures extrêmes était plus considérable et il augmentait quand la température T_1 croissait, T_2 restant constant. Au contraire, dans la machine frigorifique, le rendement est d'autant plus grand que l'écart entre les températures initiale et finale est moindre et que la température finale est plus élevée.

La machine à froid est donc bien, en toutes choses, une machine à feu intervertie.

Le fluide, qui sert de véhicule à la chaleur, peut être un gaz ou une vapeur, dans les machines thermiques aussi bien que dans les machines frigorifiques : la théorie générale est indépendante de la nature de ce corps intermédiaire. Néanmoins, nous allons examiner tour à tour les trois genres de machines à froid créés par MM. Giffard, Pictet et Carré, à air, à gaz liquéfié ou à gaz dissous.

2. Machines à air. — Une machine frigorifique à air se compose d'un cylindre compresseur et d'un cylindre détenteur, entre lesquels est placé un condenseur, refroidi par un courant d'eau froide. L'air, pris dans l'atmosphère, est comprimé dans le premier cylindre et re-

foulé dans le condenseur, dans lequel il perd la chaleur produite par sa compression ; ce condenseur alimente le second cylindre ; l'air s'y détend jusqu'à la pression de l'atmosphère, en produisant un travail moteur qui vient en décompte du travail de compression. C'est durant cette détente que l'air se refroidit et qu'il refroidit les corps qui l'entourent ; c'est donc à vrai dire le cylindre détenteur qui constitue l'organe essentiel de la machine frigorifique.

Nous allons calculer l'abaissement de température produit et le travail dépensé à cet effet, en faisant les suppositions suivantes : nous admettrons que la compression et la détente aient lieu sans perte ni gain de chaleur, suivant des adiabatiques, et que le refroidissement de l'air, opéré dans le condenseur, ne s'effectue qu'après que ce gaz y a été complètement refoulé, c'est-à-dire à volume constant.

Soient P_0 , V_0 et T_0 , la pression, le volume et la température de l'air puisé dans l'atmosphère, P_1 , V_1 et T_1 , les pression, volume et température de l'air comprimé : nous aurons

$$(24) \quad P_0 V_0^\gamma = P_1 V_1^\gamma$$

$$(25) \quad \frac{T_0}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_0} \right)^{\gamma-1}$$

Soit π , le poids d'air mis en jeu : le travail de compression $\bar{\epsilon}_c$ est donné par l'équation

$$\begin{aligned}
 (28) \quad \bar{\epsilon}_c &= \frac{\pi R T_1}{\gamma - 1} \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_0} \right)^{\gamma - 1} \right) = \\
 &= \frac{\pi R T_1}{\gamma - 1} \left(1 - \frac{T_0}{T_1} \right) = \\
 &= \frac{\pi R}{\gamma - 1} (T_1 - T_0)
 \end{aligned}$$

et, comme

$$\begin{aligned}
 (18) \quad \gamma - 1 &= \frac{AR}{C'} \\
 \bar{\epsilon}_c &= \pi \frac{C'}{A} (T_1 - T_0).
 \end{aligned}$$

Voilà le travail dépensé pour comprimer le poids π d'air ; son volume est devenu V_1 et sa température T_1 et il se trouve soumis à l'action des parois du condenseur, qui abaissent sa température de T_1 à T'_1 par la soustraction d'un nombre de calories égal à Q , Q étant donné par l'équation

$$Q = C' (T_1 - T'_1)$$

L'air arrive donc à la température T'_1 au détenteur ; T'_1 est voisin de T_0 : la détente adiabatique fait tomber cette température à la va-

leur T_2 , très inférieure à T_0 ; la réfrigération de l'air se produit ainsi.

Le travail développé dans cette détente est

$$\varepsilon_d = \frac{\pi R}{\gamma - 1} (T'_1 - T_2) = \frac{\pi C'}{A} (T'_1 - T_2)$$

Le travail net à fournir est

$$\varepsilon = \varepsilon_c - \varepsilon_d = \pi \frac{C'}{A} ((T_1 - T_0) - (T'_1 - T'_2))$$

La pression finale est P'_2 : on cherche à la rendre aussi voisine que possible de celle de l'atmosphère, et l'on dispose dans ce but les volumes relatifs des cylindres. Le volume V_1 d'air refoulé au condenseur y reste le même, mais la pression passe de P_1 à P'_1 et l'on a

$$\frac{P'_1}{P_1} = \frac{T'_1}{T_1}.$$

Enfin le volume d'air devient V_2 à la fin de la détente : on a donc

$$P'_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma.$$

Les volumes V_0 , V_1 et V_2 sont, par suite, déterminés par cette relation.

Il est aisé de calculer le rendement d'une machine à air en fonction de ces données. La

chaleur soustraite dans l'opération est celle qui correspond à l'abaissement de température d'un poids π d'air de T_0 à T_2 , à volume constant, puisque l'air pris à l'atmosphère lui est rendu sous le même volume. Nous avons donc

$$q = \pi C' (T_0 - T_2)$$

Il vient par conséquent :

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{q}{A\epsilon} = \frac{\pi C' (T_0 - T_2)}{A\pi \frac{C'}{A} ((T_1 - T_0) - (T'_1 - T_2))} = \\ &= \frac{T_0 - T_2}{T_1 - T_0 - T'_1 + T_2} = \\ &= \frac{T_0 - T_2}{T_1 - T'_1 - (T_0 - T_2)} = \frac{1}{\frac{T_1 - T'_1}{T_0 - T_2} - 1}. \end{aligned}$$

Or, les deux adiabatiques nous donnent

$$\frac{T_1}{T_0} = \left(\frac{V_0}{V_1}\right)^{\gamma - 1} = \frac{T'_1}{T_2} = \frac{T_1 - T'_1}{T_0 - T_2}.$$

D'où

$$\rho = \frac{T_0}{T_1 - T_0} \text{ ou encore } = \frac{T_2}{T'_1 - T_2}.$$

Nous retrouvons la valeur du rendement déduite précédemment de la comparaison des machines frigorifiques avec les machines ther-

miques : mais nous voyons de plus que cette valeur peut aussi être exprimée en fonction de la température finale après détente.

On constate que le maximum de rendement est obtenu quand T_1 diffère le moins possible de T_0 , c'est-à-dire quand la compression est faible : cela revient à dire qu'alors la pression sera faible dans le réservoir. Mais T_1 étant voisin de T_0 , il en résulte que, dans ce cas de maximum de rendement, l'abaissement final de température est faible, puisque T_2 diffère peu de T_0 . Le maximum de rendement correspond donc à une production nulle d'effet frigorifique. Nous avons déjà été conduit à une conclusion analogue pour d'autres machines thermiques.

Si nous faisons $T_0 = 273 + 10$ et que nous comprimions l'air à 1 atmosphère, nous obtenons :

$$T_1 = T_0 \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} = 283 \times 2^{0,29} = 345$$

$$\rho = 4,56$$

$$q = A\epsilon\rho = 0,0107.$$

On développera donc 0,0107 calories négatives par kilogrammètre, soit 2889 calories par cheval-heure.

Pour une pression de 4 atmosphères, on aurait

$$T_1 = 425$$

$$\rho = 2$$

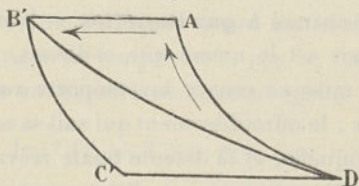
$$q = 0,0047.$$

Par cheval-heure = 1269 cal. nég.

C'est à cette pression que l'on marche habituellement.

Le cycle que nous avons décrit est celui de Carnot. Or, ce cycle, qui donne le rendement

Fig. 18



maximum dans les machines thermiques, ne jouit plus de cette propriété quand il s'agit de la production mécanique du froid : il est facile de le démontrer, en modifiant légèrement la phase de compression. Imaginons, en effet, qu'au lieu de comprimer d'abord l'air suivant l'adiabatique DA et l'isothermique AB (fig. 18), nous faisons directement l'opération suivant le chemin DB', en refroidissant l'air au fur et à mesure de sa com-

pression. Le résultat final du cycle ne sera nullement modifié, mais le travail dépensé $DB'C'$ est évidemment moindre que précédemment ; le rendement est donc amélioré. C'est ainsi qu'on opère en pratique : aussi ne faut-il point s'étonner qu'une machine à air froid donne environ 1 200 calories négatives par cheval-heure, c'est-à-dire la quantité théorique calculée ci-dessus. Le perfectionnement du cycle compense les pertes résultant des résistances passives des organes, des espaces nuisibles, etc.

3. Machines à gaz liquéfiés. — L'ordre des opérations est le même que ci-dessus, mais la vapeur mise en œuvre se comporte autrement que l'air ; le refroidissement qui suit sa compression la liquéfie, et la détente finale réévapore ce liquide. Un changement d'état vient donc se greffer sur l'ensemble du cycle.

Pour établir les équations de rendement, nous considérerons une vapeur saturée dans laquelle les changements de volume sous pression constante s'effectuent à température constante ; toute modification thermique a pour résultat d'y provoquer une augmentation ou une diminution de la quantité de liquide mêlée à la vapeur.

Le mélange saturé, introduit dans le compres-

seur à la température T_0 , renferme d'abord une proportion x_0 de vapeur et $(1 - x_0)$ de liquide; la compression est poursuivie jusqu'à ce que tout le liquide soit vaporisé. La compression élève d'ailleurs la vapeur formée à la température T_1 . On calcule le travail dépensé, en fonction de la chaleur interne initiale et finale, et l'on a

$$(44) \quad \left\{ \begin{aligned} \varepsilon_c = J\pi & \left((CT_1 - T_0) + (r_1 - Ap_1u_1)x_1 - \right. \\ & \left. - (r_0 - Ap_0u_0)x_0 \right) \end{aligned} \right.$$

Mais comme la vapeur passe au condenseur sans changer de température, $p_1u_1 x_1 = p_0u_0x_0$ et il reste un travail sensiblement égal à

$$J\pi (C(T_1 - T_0) + r_1x_1 - r_0x_0)$$

et comme

$$x_1 = 1,$$

$$\varepsilon_c = J\pi (C(T_1 - T_0) + r_1 - r_0x_0).$$

On peut, du reste, calculer x_0 par la formule (42) :

$$C \operatorname{Log} \frac{T_1}{T_0} + \frac{r_1}{T_1} - \frac{r_0x_0}{T_0} = 0.$$

Le condenseur reçoit donc un poids π de vapeur saturée, à la température T_1 , qui s'y liquéfie, par la soustraction d'un nombre Q de calories, égal à πr_1 ; cette opération se fait à la même température T_1 .

Le détendeur reçoit par conséquent du liquide, qui reconstitue par détente un mélange de vapeur et de liquide à une température T_2 , en fournissant un travail

$$\varepsilon_d = J\pi (C (T_1 - T_2) - r_2 x_2).$$

Comme ci-dessus, on a

$$C \text{ Log } \frac{T_1}{T_2} - \frac{r_2 x_2}{T_2} = 0.$$

Cette détente est faite de telle sorte que T_2 devienne égal à T_0 . Mais, pour revenir à l'état initial, il faut une quantité de chaleur Q_0 qui reproduise la proportion x_0 de vapeur dans le mélange : donc, comme $r_2 = r_0$, nous avons à fournir, au détriment des corps ambiants qui pourvoient au phénomène, une quantité de chaleur

$$Q_0 = \pi (x_0 - x_2) r_0.$$

Le travail total dépensé $\varepsilon_c - \varepsilon_d = \varepsilon$ est, en

tenant compte de ce que $T_1 - T_0 = T_1 - T_2$

$$\begin{aligned}\varepsilon &= J\pi (r_1 - (x_0 - x_2)r_0) = \\ &= J(Q_1 - Q_0) = \frac{1}{\Lambda} (Q_1 - Q_0).\end{aligned}$$

Nous pouvons maintenant calculer le rendement de ce cycle frigorifique :

$$\rho = \frac{Q_0}{\Lambda \varepsilon} = \frac{Q_0}{Q_1 - Q_0}.$$

Mais les deux valeurs de Q_0 et Q_1 sont reliées entre elles par les équations de Clausius, car on a

$$\frac{r_1}{T_1} - \frac{r_0 x_0}{T_0} = \frac{r_2 x_2}{T_2}$$

ou

$$\frac{r_1}{T_1} = \frac{r_0 (x_0 - x_2)}{T_0}$$

d'où

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_0}{T_0}$$

et, par suite,

$$\rho = \frac{\frac{T_0}{T_1} Q_1}{Q_1 - \frac{T_0}{T_1} Q_1} = \frac{T_0}{T_1 - T_0} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}.$$

Le rendement des machines frigorifiques à gaz liquéfiables est donc exprimé par la même formule que celui des machines à air.

Si $T_2 = -12^\circ\text{C} = 261^\circ$ absolus
et

$$T_1 = 20^\circ\text{C} = 293^\circ \text{ absolus,}$$

$$\rho = 8,16 ;$$

on réalise facilement ces conditions de fonctionnement avec l'acide carbonique ou l'ammoniaque.

Dans la pratique, on supprime le cylindre de détente et on le remplace par un simple robinet de fuite : le liquide s'évapore et la chaleur négative produite est le prix du changement d'état obtenu ainsi. On perd le travail de détente, au préjudice du rendement, mais on simplifie l'appareil.

Ces machines ont un rendement pratique supérieur à celui des machines à air et elles sont plus actives : cela est dû à ce que, à réduction de volume égal, le travail de compression est moindre avec un gaz liquéfiable qu'avec un gaz permanent ; de plus, la chaleur de vaporisation d'un gaz liquéfié est plus grande que la chaleur de détente de l'air.

En théorie, le kilogrammètre produit 0,019 ca-

lorie négative, mais on ne recueille guère que 0,010 en réalité, soit 2 700 calories négatives par cheval-heure : les machines à air donnaient beaucoup moins.

4. Machines à affinité. — On appelle ainsi les machines dans lesquelles on met en œuvre une dissolution concentrée d'ammoniaque dans l'eau.

Ces appareils n'exigent plus l'intervention d'un moteur ; la solution ammoniacale est chauffée dans une chaudière, et elle perd son gaz, lequel va se liquéfier au condenseur. Ce gaz liquide est conduit au réfrigérant, où il s'évapore en enlevant de la chaleur aux corps ambiants. Au fur et à mesure de leur production, les vapeurs sont absorbées par l'eau et réintroduites dans la chaudière. Le fonctionnement de ces appareils est donc calqué sur celui des machines précédentes ; le cylindre aspirateur et compresseur est remplacé par la chaudière : l'affinité du gaz pour l'eau appelle le gaz, et la chaleur remet ce gaz en liberté en suspendant momentanément cette affinité.

La théorie des appareils à affinité ne diffère pas sensiblement de celle des machines à gaz liquéfiés.

Les appareils à affinité ont l'avantage de fournir des températures plus basses que les machines à compression, dont l'effet utile diminue très rapidement, dès que l'on descend au-dessous de -12° au réfrigérant. De plus, comme la chaleur y est consommée en nature et non pas sous la forme de travail, il devrait en ressortir un rendement meilleur, car une machine motrice quelconque ne donne pas un travail équivalent strictement à la chaleur qu'elle consomme; on supprime un intermédiaire et l'on doit gagner, par suite, le prix de ses services. Il est vrai que des phénomènes accessoires, et notamment les entraînements d'eau et les pertes de chaleur compensent largement ces avantages, plus fictifs que réels. En définitive, le rendement des appareils à affinité est inférieur à celui des machines à compression : en effet, on obtient au maximum 1 800 calories négatives par kilogr. de charbon, alors qu'une bonne machine Linde, à compression d'ammoniaque, fournit 2 700 calories par cheval-heure, c'est-à-dire par kilogramme de charbon.

BIBLIOGRAPHIE

1824

CARNOT (SADI). — *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance.* Paris.

1834

CLAPEYRON. — *Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur.* Journal de l'Ecole Polytechnique, XIV.

1844

PAMBOUR (DE). — *Théorie analytique des machines vapeur.* Paris

1845

ERICSSON. — *Caloric Engine.* Mechanical Magazine.
STIRLING (JAMES). — *Air Engines.* Proceedings of the Institution of Civil Engineers.

1850

THOMSON (W.) — *On a remarkable property of steam connected with the Theory of air engines.* Philosophical Magazine.

1851

- JOULE. — *On air Engine*. Philosophical Magazine.
 GOLDING. — *An examination of steam Engines and the power of Steam*. Copenhagen.
 RANKINE. — *On the power and economy of single acting expansive steam engine*. Edinburgh Transactions.
 REECH. — *Note sur les effets dynamiques de la chaleur*. Comptes-Rendus.

1852

- ERICSSON. — *Substitution de l'air chaud à la vapeur*. Cosmos.

1853

- COMBES. — *Rapport sur la machine à air chaud envoyée au Havre par M. Ericsson*. Annales des Mines.
 GALY-CALAZAT. — *Note sur le régénérateur d'Ericsson*. Annales de Chimie et de Physique.
 LIAIS. — *Emploi de l'air chauffé comme force motrice*. Comptes-Rendus.
 REDTENBACHER. — *Die Luft-Expansions Maschine*. Mannheim.
 REECH. — *Note sur les machines à vapeur et à air chaud*. Comptes-Rendus.

1854

- FRANCHOT. — *Machines à air chaud*. Comptes-Rendus.
 MAHISTRE. — *Note sur la théorie des machines à vapeur*. Comptes-Rendus.
 SIEMENS (W.) — *Machines à vapeur régénérée*. Cosmos.

1856

CLAUSIUS. — *Ueber die Anwendung der Mechanischen Waerme Theorie auf der Dampfmaschine*. Annales de Poggendorff.

ERICSSON. — *New air Engine*. Mechanical Magazine.

PASCAL. — *Mixed vapour Engines*. Mechanical Magazine.

HIRN. — *Mémoire sur l'utilité des enveloppes de vapeur*. Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse.

1859

RANKINE. — *A Manual of steam Engine*. Londres.

1860

LENOIR. — *Moteur de gaz d'éclairage*. Cosmos.

HIRN. — *Théorie approximative de la machine à air dilaté de M. Lenoir*. Cosmos.

ZEUNER. — *Grundzüge der Mechanischen Waerme Theorie*. Freiberg.

1861

BELOU. — *Aéromoteur*. Cosmos.

SCHMIDT. — *Theorie der Dampfmaschinen*. Freiberg.

TRESCA. — *Procès-verbaux des expériences faites sur la machine d'Ericsson et sur le moteur Lenoir*. Annales des Mines.

1862

HIRN. — *Exposition analytique et expérimentale de la Théorie mécanique de la chaleur*. Paris et Colmar.

1864

BURDIN. — *De la vapeur et de l'air chaud comparés sous le rapport du combustible brûlé.* Comptes-Rendus.

1865

BOURGET et BURDIN. — *Machine à air chaud à maximum de travail.* Comptes-Rendus.

CAZIN. — *Théorie élémentaire des machines à air chaud.* Versailles.

TELLIER. — *Sur une nouvelle application du gaz ammoniac à la mécanique.* Mémoires Scientifiques.

MALLARD. — *Etude théorique sur les machines à air comprimé.* Paris.

1869

COMBES. — *Etudes sur la machine à vapeur.* Paris.

CLAUSIUS. — *Théorie Mécanique de la chaleur.* Traduction Folie, Paris.

REECH. — *Théorie des Machines motrices.* Paris.

ZEUNER. — *Théorie Mécanique de la chaleur avec ses applications aux machines.* Traduction Arnthal et Cazin, Paris.

1870

VERDEIL. — *Sur la faiblesse du rendement des machines à vapeur.* Comptes-Rendus.

1872

MOUTIER. — *Eléments de Thermodynamique.* Paris.

BOURGET. — *Théorie mathématique des machines à air chaud.* Paris.

1873

TRASENSTER. — *Note sur le travail de l'air comprimé.*
Revue Universelle des Mines.

1874

LEDoux. — *Théorie des machines à air froid.* Annales des Mines.

POCHET. -- *Nouvelle Mécanique industrielle.* Paris.

1876

COURTIN. — *La chaleur et ses applications.* Mons.

PERNOLET. — *L'air comprimé et ses applications.*
Paris.

1878

MUSIL, — *Die Motoren für das Kleingewerbe.* Braunschweig.

COTTERILL. — *The steam engine.* Londres.

1879

BRAUER et SLABY. — *Versuche über Leistung und Material Verbrauch für Kleinmotoren.* Berlin.

1880

DWELSHAUWERS-DERY. — *Exposé succinct de la théorie pratique des machines à vapeur.* Liège.

1881

DEVILLEZ. — *Traité élémentaire de la chaleur.* Mons.

1882

SCHETTNER. — *Die Gasmachine*. Leipzig.DUGALD CLERK, — *On the theory of the gas-engine*.
Londres.THURSTON. — *On the several efficiencys of the steam
Engine*. New-York.

1883

WITZ. — *Etude sur les moteurs à gaz tonnant*. Paris.COLEMANN. — *Refrigerating Machinery*. Inst. of civil
Engineers.

1884

RICHARD. — *Les moteurs à gaz*. Paris.

1886

RUSPOLI. — *I motori domestici*. Naples.

1886

WITZ. — *Traité théorique et pratique des moteurs à
gaz*. Paris, 1^{re} édition.

1887

DOWSON. — *Gas power compared with Steam Power*.
Proceedings of the Institution of civil Engineers.

1889

SINIGAGLIA. — *Le macchina a vapore*. Rome.MADAMET. — *La Thermodynamique et ses applications*.

1890

- SLABY. — *Calorimetrische Untersuchungen über den Kreis process der Gasmachine*. Berlin.
- WITZ. — *Théorie des machines thermiques*. Revue Générale des Sciences.
- ROBINSON. — *Gas and petroleum Engines*. Londres.
- PEABODY. — *Thermodynamics of the steam Engines and other heat Engines*. New-York.
- RICHARD. — *Les machines frigorifiques et leurs applications*. Paris.

1891

- THURSTON. — *A manual of the steam-Engine*. New-York.
- HATON DE LA GOUPILLIÈRE. — *Cours de machines*. Paris.
- WITZ. — *Les moteurs à gaz de grande puissance*. Bulletin de la Société d'Encouragement.
- RICHARD. — *Les moteurs secondaires à l'Exposition de 1889*. Paris.
- WITZ. — *Traité théorique et pratique des moteurs à gaz*, 3^e édition, t. I.

1892

- RICHARD. — *Les nouveaux moteurs à gaz*. Paris.

1893

- VERMAND. — *Les moteurs à gaz et à pétrole*. Encyclopédie des Aide-Mémoire.

- GOUILLY. — *Transmission de la force motrice par l'air comprimé ou raréfié*. Encyclopédie des Aide-Mémoire.
- RICHARD. — *Les moteurs à gaz et à pétrole en 1892*. Paris.
- WITZ. — *Les moteurs à pétrole*. Revue Générale des Sciences pures et appliquées.
- THURSTON. — *Traité de la machine à vapeur*. Traduction Demoulin, Paris.
- BOULVIN. — *Cours de Mécanique appliquée aux machines*. Gand. 2^e fascicule : Moteurs animés, récepteurs hydrauliques, récepteurs pneumatiques ; 3^e fascicule, théorie des machines thermiques.
- DIESEL. — *Theorie und Construction eines rationellen Waermemotors (Berlin)*.
- WITZ. — *Traité théorique et pratique des moteurs à gaz*, 3^e édition, t. II, Paris.
- DE MARCHENA. — *Machines frigorifiques à air*, Encyclopédie des Aide-Mémoire.
- BRYAN DONKIN. — *A Text-Book on gas, oil and air Engines*, Londres.
- DE MARCHENA. — *Machines frigorifiques à gaz liquéfiés*. Encyclopédie des Aide-Mémoire.
-

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
Notations adoptées	5
Formules appliquées dans l'ouvrage	7
Préface	9
Introduction	11

CHAPITRE PREMIER

Les Machines Thermiques

Objet des machines thermiques.	23
Type général	24
Cycle idéal des machines thermiques	25
Rendement du cycle de Carnot.	26
Cycles types des machines thermiques	31
Rendement théorique et rendement générique	31
Rendement pratique.	33
Rendement organique	34
Consommation de charbon par cheval-heure ef- fectif	36

CHAPITRE II

Les machines à vapeur

	Pages
Cycle de la machine à vapeur	37
Rendement théorique de ce cycle	42
Cycle réel	47
Rendement pratique et générique du cycle réel.	49
Rendement organique	51
Consommation de charbon par cheval-heure effectif	53
Perfectionnements probables	54
Machine à vapeurs combinées	57
Machine à vapeur de pétrole.	60

CHAPITRE III

Les moteurs à air chaud

Cycle type des machines à air chaud avec régénérateurs	62
Cycle de Stirling	66
Régénérateur	69
Rendement théorique du cycle de Stirling	70
Cycle réel de Stirling	72
Rendement pratique de la machine de Stirling	77
Machine d'Ericsson	80

	Pages
Moteurs sans régénérateur	84
Cycle de Joule.	84
Applications de l'idée de Joule (Shaw, Buckett et Bénier	90

CHAPITRE IV

Les moteurs à gaz tonnants

Concept fondamental du moteur à gaz	97
Cycle des moteurs à compression avec explo- sion.	101
Rendement calculé et rendement générique de ce cycle	103
Rendement pratique.	106
Rendement organique	109
Consommation de charbon par cheval-heure ef- fectif	110
Cycle et rendement des moteurs à compression avec combustion	112
Types divers de moteurs	118
Moteurs à pétrole.	119

CHAPITRE V

*Parallèle entre les machines à vapeur, à air chaud
et à gaz tonnants*

Situation présente de la machine à vapeur , .	123
Situation du moteur à gaz.	126
Discussion des rendements	128
Rendements comparés des machines thermiques.	129
Conclusions.	134

CHAPITRE VI

Les machines atmosphériques

Type général	138
Machine Langen et Otto	140
Rendement du cycle de cette machine	142
Moteur Petit et Boudenoot	145
Considérations générales	148

CHAPITRE VII

Les machines à air comprimé

Les machines à air comprimé sont des machines thermiques	149
Rendements	153
Conclusions générales	156

CHAPITRE VIII

Les machines frigorifiques

Fonction de la machine frigorifique	158
Machines à air	161
// à gaz liquéfiés	167
// à affinité	173
BIBLIOGRAPHIE	175

ST-AMAND (CHER). IMPRIMERIE DESTENAY, BUSSIÈRE FRÈRES



