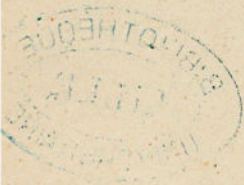


TRAITÉ THÉORIQUE ET PRATIQUE
DES
MOTEURS A GAZ
ET A PÉTROLE

88728

COURBEVOIE
IMPRIMERIE E. BERNARD
14, RUE DE LA STATION
BUREAUX A PARIS : 29, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS



Q12786-1

TRAITÉ THÉORIQUE ET PRATIQUE
DES
MOTEURS A GAZ
ET A PÉTROLE

PAR

AIMÉ WITZ

INGÉNIEUR DES ARTS ET MANUFACTURES, DOCTEUR ÈS SCIENCES
PROFESSEUR A LA FACULTÉ LIBRE DES SCIENCES DE LILLE
LAURÉAT DE L'INSTITUT (PRIX MONTYON DE MÉCANIQUE)
ET DE LA SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS CIVILS DE FRANCE (PRIX SCHNEIDER)

4^e Édition, Refondue et entièrement remaniée.

TOME I

Histoire et classification des moteurs, Étude des gaz de ville, de l'air carburé.
Gaz pauvres, gaz de hauts fourneaux, acétylène, pétrole, gazoline et alcool

GAZOGÈNES

Théorie générale et expérimentale des moteurs
Mesure et calcul de la puissance.
Résultats d'essais.



Exclu du prêt

BIBLIOTHÈQUE DE L'USTL	
Cote	6214
Niv.	3

PARIS

BERNARD, IMPRIMEUR-ÉDITEUR

29, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, 29

1903

PRÉFACE

DE LA

QUATRIÈME ÉDITION

Ce livre a paru, en 1886, sous la forme d'un petit in-12 de 288 pages ; un second tirage, effectué en 1889, avait reçu un supplément d'une quarantaine de pages. En troisième édition, l'ouvrage comprenait trois volumes in-8, de plus de 500 pages chacun, parus successivement et se complétant l'un l'autre.

L'accueil fait à notre traité nous permettait de croire que nous avions peu de chose à en retrancher ; mais les progrès des moteurs à gaz et le développement extraordinaire qu'ils ont pris nous obligeaient à y ajouter bien des choses.

Dans ces conditions, une refonte de l'ouvrage s'imposait à nous : nous l'avons donc remanié entièrement, de manière à faire tenir cette copieuse et intéressante matière dans deux forts volumes, grand in-8°.

Le premier volume est consacré à l'histoire et à la classification des moteurs et à l'examen des divers combustibles dont ils s'alimentent : une part très considérable a été faite aux gaz pauvres et aux gazogènes.

Nous exposons ensuite une théorie générique et expérimentale, très simple, que nous soumettons au contrôle de l'expérience et des faits : nous essayons d'en dégager les règles que la construction doit suivre pour obtenir le meilleur rendement technique, c'est-à-dire pour tirer le plus de kilogrammètres d'une calorie.

Un dernier et fort important chapitre traite de l'essai des moteurs, de la mesure du travail indiqué et du travail effectif et de l'établissement des bilans de fonctionnement ; de nombreux résultats d'essais ont été rapprochés et comparés, et leur ensemble constitue une intéressante contribution à l'histoire et à la théorie des moteurs. Nous donnons enfin les formules nécessaires pour la détermination et le calcul des dimensions de ces machines en vue d'une puissance donnée.

Le second volume donnera la monographie des principaux moteurs à gaz et à pétrole avec une description détaillée des organes qui les caractérisent. Une étude complète de leurs applications générales et spéciales fera ressortir la situation éminente prise déjà dans l'industrie par les moteurs et l'avenir plus brillant encore qui leur est réservé.

Lille, Juin 1903.

PRINCIPALES PUBLICATIONS

DE L'AUTEUR

SUR LA QUESTION DES MOTEURS A GAZ

1878. De l'effet thermique des parois d'une enceinte sur les gaz qu'elle renferme ; *Annales de chimie et de physique*, 5^e série, tome XV.
1879. Du pouvoir refroidissant de l'air aux pressions élevées ; *Annales de chimie et de physique*, 5^e série, tome XVIII.
1881. Du pouvoir refroidissant des gaz et des vapeurs ; *Annales de chimie et de physique* ; 5^e série, tome XVIII.
1883. Histoire des moteurs à gaz ; *Revue des questions scientifiques*, janvier 1883.
1883. Etudes sur les moteurs à gaz tonnant ; *Annales de chimie et de physique*, 5^e série, tome XXX.
Tiré à part en brochure de 70 pages, avec figures et planches. Paris, Gauthier-Villars.
1883. De l'action de paroi dans les moteurs à gaz tonnant ; *Société industrielle du Nord*, tome XI.
1884. De la combustion des mélanges tonnants en divers états de dilution ; *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, tome XCIX, 2 juillet 1884.
1885. Du pouvoir calorifique du gaz d'éclairage en divers états de dilution ; *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, tome C, 40 avril 1885.
1885. Du régime de combustion des mélanges tonnants formés avec le gaz d'éclairage ; *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, tome C, 27 avril 1885.
1885. Chaleur et température de combustion du gaz d'éclairage ; *Bulletin de la Société industrielle du Nord*, tome XIII.
1885. Du régime de détonation dans les mélanges tonnants ; *Journal de physique*, 2^e série, tome IV.
1885. Pouvoir calorifique du gaz d'éclairage ; *Annales de physique et de chimie*, 6^e série, tome V, septembre 1885.
1886. Réponse à quelques objections contre l'action de paroi dans les moteurs à gaz ; *Bulletin de la Société industrielle du nord de la France*, tome XIV.
1886. Der Einfluss der Wandungen in den Gasmotoren ; *Zeitschrift des Vereins der deutschen Ingenieure*, tome XXX, page 69.
1886. Traité théorique et pratique des moteurs à gaz ; in-12, E. Bernard et C^{ie}, Paris, 1^{re} édition.
1888. Graissage des moteurs à gaz ; *Bulletin de la Société industrielle du Nord de la France*, tome XVI.
1889. Les Moteurs à gaz ; *Revue technique de l'Exposition universelle de 1889* ; Paris.
1889. Traité théorique et pratique des moteurs à gaz ; E. Bernard et C^{ie}, Paris ; 2^e tirage avec supplément.
1890. Théorie des moteurs thermiques ; *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 15 janvier tome I.
1891. Les moteurs à gaz de grande puissance ; *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*.
1891. Rendement photogénique des foyers de lumière (application du moteur à gaz à l'éclairage électrique) ; *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 29 juin 1891.
Le mémoire complet sur ce sujet a paru dans la *Revue générale des sciences pures et appliquées*, tome III, 30 octobre.

1891. **Traité théorique et pratique des moteurs à gaz**; 3^e édition, tome I; in-8^o; E. Bernard, et C^{ie}, Paris.
1891. **Parallèle entre les machines à vapeur et les moteurs à gaz de même puissance**; avec planches; Courtier, Paris.
1892. **Thermodynamique à l'usage des ingénieurs**; Gauthier-Villars et fils, Paris.
1893. **Les moteurs à pétrole**; *Revue générale des Sciences pures et appliquées*, tome IV, 30 août.
1894. **Des machines thermiques à vapeur, à air chaud et à gaz**; Gauthier-Villars et fils, Paris.
1894. **Traité théorique et pratique des moteurs à gaz et à pétrole**; tome II, 3^e édition; E. Bernard et C^{ie}, Paris.
1896. **Les Moteurs à gaz à l'Exposition de Rouen**; *l'Energie électrique*, août.
1897. **L'état actuel et les besoins de l'industrie des Moteurs à gaz et à pétrole en France**; *Revue générale des Sciences pures et appliquées*, tome VIII, 15 juin.
1898. **Moteurs à combustion et haute compression**; *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, tome CXXVI, 28 mars.
1898. **Le moteur Diesel et le perfectionnement des Moteurs thermiques**; *Revue générale des Sciences pures et appliquées*, tome IX, 13 juin.
1898. **Les Automobiles dans le passé, le présent et l'avenir**; *Locomotion automobile*, 7 numéros.
1898. **Traité théorique et pratique des moteurs à gaz et à pétrole et des voitures automobiles**; tome III, 3^e édition; E. Bernard et C^{ie}, Paris.
1898. **Expériences sur l'emploi des gaz de hauts fourneaux dans les machines motrices**; *Revue universelle des Mines*, tome XLIII.
1898. **Report on experiments made with a Simplex Motor using Blast-furnace gas**; Iron and Steel Institute; août.
1899. **Thermodynamique à l'usage des ingénieurs**; 2^e édition; Gauthier-Villars, Paris.
1899. **Les stations centrales de hauts fourneaux pour moteurs à gaz**. *L'Eclairage électrique*.
1900. **Le cycle théorique des moteurs à gaz à explosion**; *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, 23 avril 1900.
1900. **Les moteurs à gaz de grande puissance en métallurgie**, Congrès de mécanique appliquée de 1900.
1900. **Les progrès de la théorie des machines thermiques**; *Congrès de physique*. Paris.
1900. **Les moteurs à gaz et leurs sources d'alimentation**; *Congrès de l'industrie du gaz*. Paris.
1901. **Les moteurs à gaz et à pétrole et les gazogènes à l'Exposition de 1900**; *Revue technique de l'Exposition universelle*, Bernard et C^{ie}, Paris.
1902. **Rendement comparé des machines à vapeur et des moteurs à gaz**; *L'Eclairage électrique*, 4 et 11 janvier, Paris.
1902. **Du fonctionnement comparé des machines à vapeur et des moteurs à gaz**; *L'Eclairage électrique*, 24 et 31 mai, Paris.
1902. **Discussion sur le rendement thermique des moteurs**; *Société des Ingénieurs civils de France*. Bulletin de juillet.

AUTRES OUVRAGES DE L'AUTEUR

L'École pratique de physique; cours de manipulations de physique, en deux volumes, 2^e édition, 1897; Exercices de physique et applications, 1889; Problèmes et calculs pratiques d'électricité, 1893 (Paris, Gauthier-Villars).

Thermodynamique à l'usage des ingénieurs, 2^e édition, 1899; *Théorie des machines thermiques*, 1894 (Encyclopédie des Aide-Mémoire Léauté).

La Machine à vapeur, 2^e édition, 1902 (Paris, J.-B. Baillière et fils).

L'Éloquence scientifique, 1886 (Lille, Desclée, de Brouwer et C^{ie}).

TRAITÉ
THÉORIQUE ET PRATIQUE
DES
MOTEURS A GAZ ET A PÉTROLE

CHAPITRE PREMIER

HISTOIRE DES MOTEURS A GAZ

C'est à l'abbé Jean Hautefeuille, fils d'un boulanger d'Orléans, protégé du cardinal de Sourdis, que revient l'honneur de l'invention des moteurs dont j'entreprends d'écrire l'histoire.

De prime abord, il peut sembler paradoxal d'attribuer la paternité de ces machines à un savant du xvii^e siècle, mort plus de cent ans avant que Lebon n'eût extrait le gaz de la houille ; cependant il faut reconnaître que les moteurs à gaz sont presque tous des appareils à explosion, qui procèdent en ligne directe des machines à poudre ; l'idée d'emprunter la force motrice à un gaz tonnant, était en germe dans ces engins de toute espèce qui utilisaient l'énorme puissance explosive d'un grain de poudre à canon.

Il est vrai que l'idée sommeilla longtemps, mais il ne faut point s'en étonner, car les grandes inventions ne jaillissent pas tout d'une pièce du cerveau des hommes. Il n'est aucune machine de l'industrie moderne à laquelle plusieurs générations n'aient collaboré successivement, et c'est par une série de transformations que nos puissants outils sont devenus ce qu'ils sont. La période d'application a toujours succédé à une période de tâtonnement et d'invention, quelquefois extrêmement longue et fort laborieuse. L'étude critique de ces premiers essais présente une grande utilité, car on retrouve à chaque instant, dans l'histoire du passé, des enseignements dont on peut tirer profit ; il faut connaître les insuccès du début pour éviter les causes qui les ont

produits ; un inventeur doit savoir ce qui a été essayé déjà, sinon il ne bénéficierait pas de l'expérience de ses prédécesseurs et ne pourrait perfectionner leur œuvre.

Nous retracerons donc avec soin les diverses phases de l'évolution des moteurs à gaz, avant d'entreprendre leur étude théorique et pratique ; l'exposé de leurs progrès successifs nous donnera l'explication de l'admirable développement qu'ils ont pris en ces dernières années et justifiera les espérances plus grandes encore que nous avons fondées sur eux.

I

Période d'invention.

Les machines à poudre de l'abbé Hautefeuille nous sont connues par les deux mémoires suivants :

Pendule perpétuelle, avec la manière d'élever l'eau par le moyen de la poudre à canon, 1678.

Réflexions sur quelques machines à élever les eaux, 1682.

S'il n'est pas absolument prouvé que l'ingénieur inventeur ait jamais construit les machines qu'il avait imaginées, du moins possédons-nous tous les éléments nécessaires pour les discuter et les juger. Hautefeuille proposait d'introduire la poudre dans une boîte rectangulaire, communiquant avec un tuyau dont l'extrémité inférieure plongeait dans le réservoir qu'il s'agissait d'épuiser : la force d'expansion produite par l'explosion n'était donc pas mise en œuvre directement, mais on utilisait le vide partiel qui résulte du refroidissement des gaz restés dans le cylindre, et l'eau était élevée par l'effet de la pression atmosphérique.

Dans une lettre adressée à sa bienfaitrice, la duchesse de Bouillon, l'abbé Hautefeuille décrit plus tard une autre machine, qui ne présente pas moins d'intérêt : c'est la machine pulmonaire, ressuscitée dans ces derniers temps. Il voulait, disait-il, appliquer le principe même de la circulation du sang, produite « par la dilatation et la contraction successives du cœur. » Nous aurions de la peine à donner de ce moteur une description qui satisfait les mécaniciens, car nous ne connaissons que les grandes lignes du projet. Constatons toutefois avec Tresca (1) que la constitution d'une semblable machine, actionnée par la poudre, eût dû être bien puissante pour résister aux pulsations de cet agent.

Quoi qu'il en soit, il ressort de ses écrits et des témoignages contemporains que l'abbé français proposa le premier un appareil méritant le nom de machine, dans toute l'acception moderne du nom, et nous devons reconnaître qu'il a eu la priorité

1. De l'invention et de l'avenir des machines à gaz combustibles, par Tresca, *Annales du Conservatoire impérial des Arts et Métiers*, tome II, page 121, 1862. J'ai fait de précieux emprunts à cette étude pour ce qui est de la période d'invention des moteurs à gaz.

de l'invention. Huyghens, à qui l'on attribue quelquefois la première machine à explosion, ne vint qu'après lui, car son mémoire sur *une nouvelle force mouvante par le moyen de la poudre à canon et de l'air* ne parut qu'en 1680, parmi les « Divers ouvrages de mathématiques et de physique, par messieurs de l'Académie des sciences. »

La machine de Huyghens se composait d'un cylindre, fermé par un piston, et pourvu de deux tuyaux de dégagement en cuir formant soupapes : on enflammait la poudre dans une petite boîte vissée sur le fond de ce cylindre.

« On y met, dit l'inventeur, un peu de poudre à canon, et on serre bien cette boîte par le moyen de sa vis. La poudre, venant un instant après à s'allumer, remplit le cylindre de flamme et en chasse l'air par les tuyaux de cuir qui s'étendent (se dilatent) et sont aussitôt refermés par l'air du dehors, de sorte que le cylindre demeure vide d'air ou du moins pour la plus grande partie. Ensuite le piston est forcé, par la pression de l'air qui pèse dessus, à descendre (1). »

C'est la machine *atmosphérique* employée de nos jours. Huyghens fit voir sa machine à Colbert, mais il ne paraît pas qu'elle ait servi à autre chose qu'à soulever sept ou huit laquais, suspendus à une corde passée sur une poulie et que le piston entraînait dans sa descente. Les soupapes de cet appareil étaient d'ailleurs fort défectueuses ; il ne serait jamais devenu applicable aux épuisements, si Denis Papin n'avait imaginé les soupapes à joint hydraulique, dont nous trouvons la description dans les Actes de l'Académie de Leipzig, parmi les *Excerpta ex viri clarissimi Dionysii Papini, mathematicum in Academia Marburgensi professoris publici: De novo pulveris pyrii usu*. Dans un autre travail très célèbre, publié sous le titre de *Nova methodus ad vires motrices validissimas levi pretio comparandas*, notre immortel compatriote décrit de nouveau sa machine à poudre, et il nous fait part des difficultés qu'il a rencontrées.

« Nonobstant toutes les précautions observées, dit-il, il est toujours demeuré dans le tuyau (le cylindre) la cinquième partie de l'air qu'il contient d'ordinaire, ce qui cause deux différents inconvénients : l'un est que l'on perd près de la moitié de la force qu'on devrait avoir ; l'autre inconvénient est qu'à mesure que le piston descend, la force qui le pousse en bas diminue de plus en plus (2). »

Les insuccès de ces premières machines amenèrent Papin à employer la vapeur d'eau, laquelle « 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. » Dès lors la poudre fut condamnée, et tous les efforts du xvii^e siècle se portèrent sur la machine à vapeur, que Savery, Newcomen, Smeaton et tant d'autres illustres ingénieurs amenèrent rapidement à un haut degré de perfection.

Pendant une longue période d'années, les machines à explosion paraissent avoir été totalement oubliées, et Watt ne s'en est nullement occupé : le vaste génie de cet homme eût cependant pu tirer un parti merveilleux de l'idée de l'abbé Hautefeuille.

1. Tresea, loc. cit.

2. Thurston, *Histoire de la Machine à vapeur*, traduction Hirsch, tome I, page 53.

Ce n'est qu'en 1791 qu'un ingénieur anglais, John Barber, songea de nouveau à utiliser la force motrice de l'air dilaté ; nous avons donc un siècle d'arrêt à enregistrer dans l'histoire de nos moteurs. Est-ce à dire qu'ils aient subi de ce chef un siècle de retard dans leur développement ? Nullement. En effet, de même que la machine à vapeur avait bénéficié des premiers essais dont les machines à poudre avaient été l'objet, de même les moteurs à explosion devaient profiter des perfectionnements considérables réalisés par l'art de la construction dans les ateliers de Soho. Watt avait rencontré les plus grandes difficultés pour trouver des ouvriers capables d'ajuster les pièces d'un mécanisme et de les monter convenablement, et il s'estimait heureux d'avoir formé des tourneurs capables d'aléser un cylindre dont la section ne présentât qu'un ovale de trois huitièmes de pouce. Dans ces conditions, il est très probable que la machine à vapeur n'eût pu être réalisée, alors même que Héron d'Alexandrie en aurait conçu le plan deux siècles avant Jésus-Christ : c'est l'opinion de M. Thurston, et je la partage.

En 1791, ces difficultés pratiques étaient vaincues, et John Barber n'avait d'autre problème à résoudre que celui de substituer l'air dilaté à la vapeur dans des engins parfaitement combinés et construits. Il échoua cependant, sans qu'il nous soit possible de découvrir la cause de cet insuccès, attendu que la spécification de sa patente, datée du 31 octobre, est singulièrement laconique ; nous savons seulement qu'il mélangeait deux jets d'air et de gaz carburés, et qu'il les enflammait à l'entrée d'un vaisseau à explosion (*exploder*). Il semble qu'il ait eu l'idée première des machines à combustion continue.

Robert Street fit faire à la question un nouveau pas. Son brevet est du 7 mai 1794 ; il est relatif à la « production d'une force de vapeur inflammable par le moyen de liquide, d'air, de feu et de flamme, pour mettre en mouvement les machines et les pompes. »

Il n'emploie pas les gaz tout formés, dit Tresca, mais il fait tomber sur le fond d'un cylindre de l'huile de pétrole, de la térébenthine ou d'autres matières analogues pouvant se réduire en vapeur ; un piston est soulevé et, dans sa course, il fait entrer de l'air dans le cylindre ; ce piston se soulève encore, et une longue tige, à laquelle il est articulé, entraîne en même temps le piston d'une pompe. L'action est alternative.

Pour le coup, voilà une machine complète, d'une réalisation peut-être difficile et d'un fonctionnement irrégulier ; mais du moins le moteur est-il créé. Vienne maintenant l'inventeur de génie qui extraira de la houille un gaz combustible, capable de former avec l'air un mélange détonant, et nous alimenterons ces machines en les reliant à la canalisation de l'éclairage public. L'industrie disposera d'un moteur commode, présentant de merveilleuses facilités d'emploi, ne dépensant que lorsqu'il produit, et n'exigeant aucune installation coûteuse de foyer ni de chaudière.

C'est le 6 vendémiaire, an VIII (28 septembre 1799), que Philippe Lebon d'Humbersin prit son premier brevet. Il lui fut délivré pour de nouveaux moyens d'employer les combustibles plus utilement, soit pour la chaleur, soit pour la lumière, et d'en recueillir les différents produits.

Constatons que les applications à l'éclairage ne viennent qu'en seconde ligne dans les projets de Lebon. Voici quelques extraits de son mémoire, qui témoignent de la largeur des vues du savant ingénieur. « Je ne parlerai pas, dit-il, des effets que l'on pourrait obtenir en appliquant encore la chaleur produite aux chaudières de nos machines à feu, ni des applications sans nombre de la force qui se déploie dans ces nouvelles machines. Tout ce qui est susceptible de se faire mécaniquement est l'objet de mon appareil, et, la simultanéité de tant d'effets précieux rendant la dépense proportionnellement très petite, le nombre possible d'applications économiques devient infini. Dans les foyers, on néglige et l'on perd tout le gaz inflammable, qui offre des effets de chaleur et de mouvement si précieux pour ces établissements. La quantité de combustible que l'on y consume est si énorme, que je suis persuadé qu'en le diminuant considérablement, on pourrait, en suivant les vues que j'indique, non seulement obtenir les mêmes effets de chaleur, mais même donner surabondamment la force que l'on emprunte aux cours d'eau, souvent éloignés des forêts et des mines, et dont la privation donne lieu, dans les sécheresses, à des chômages d'autant plus nuisibles qu'ils laissent sans travail une classe nombreuse d'ouvriers. En général, tous les établissements qui ont besoin de mouvement, de chaleur ou de lumière doivent retirer quelque avantage de cette méthode d'employer le combustible à ces effets (1). »

Un vaste horizon s'ouvrait devant les yeux de l'inventeur du *thermolampe*, et ce n'était pas seulement l'industrie de l'éclairage qui devait être transformée, mais *tout ce qui est susceptible de se faire mécaniquement*. Lebon pouvait, mieux que tout autre, tirer parti de sa découverte et en développer les conséquences : ingénieur au corps des ponts et chaussées, il avait obtenu, en 1792, une récompense nationale de deux mille livres, pour des expériences qui avaient pour objet d'améliorer les machines à feu ; ces premiers essais n'étaient pas sortis de sa mémoire. En 1801, dans une addition à son premier brevet, il exposait un projet de moteur à gaz en ces termes : « Je vais indiquer les moyens de recueillir cette force expansive (du gaz), d'en modérer l'énergie et de ne la déployer qu'à mesure et en proportion des besoins et de la solidité des machines qu'on pourra employer... Dans le cylindre *a* s'opère la combustion du gaz inflammable qui est introduit par le tuyau *b*, tandis que l'air atmosphérique nécessaire pour la combustion y est refoulé par le tuyau *c*. Le cylindre *a* reçoit les vapeurs produites par cette combustion ; son piston intercepte toute communication entre les parties *e* et *f* (2)... La tige du piston se partage en dehors du cylindre en trois autres tiges ; l'une d'elles fait mouvoir le piston d'une pompe à air atmosphérique à double effet, une autre fait mouvoir le piston d'une semblable pompe à gaz inflammable ; la troisième enfin est destinée à s'appliquer aux résistances que l'on se propose de vaincre... Quant à l'inflammation, on pourrait disposer une machine élec-

1. Figuier. *L'Art de l'Eclairage*, page 90.

2. Cette description peut être suivie facilement sans figure ; les deux parties *e* et *f*, dont il est question dans le texte, sont les parties antérieure et postérieure du cylindre *a*.

trique, qui serait mue par celle du gaz, de manière à répéter les détonations dans des instants dont l'intermittence pourrait être réglée et déterminée. »

Ce document établit d'une façon indiscutable les titres de Lebon à l'invention des moteurs à gaz. Nous trouvons même dans les lignes qui précèdent l'idée du perfectionnement le plus notable qu'ait subi dans la suite la construction de ces machines, je veux dire l'idée de comprimer le mélange d'air et de gaz avant l'explosion. Si le malheureux ingénieur n'avait été assassiné le 22 décembre 1804, dans les Champs-Élysées, il est probable que l'industrie aurait été dotée, dès le commencement du siècle, de ces machines qui n'ont pu entrer dans le domaine de la pratique avant 1860. Constatons et enregistrons ce fait à l'honneur de la France et du génie français : nous pouvons revendiquer avec fierté pour Hautefeuille et Lebon l'invention d'un moteur qui détrônera peut être le chef-d'œuvre de Watt.

Lebon eut de nombreux imitateurs ; mais chose étrange, le gaz d'éclairage qui devait faire la fortune du nouveau moteur, ne l'alimentait pas toujours. Les uns lui préférèrent encore les poudres explosibles, et les frères Niepce font breveter en 1806 un *pyroélophore*, dans lequel ils lancent du lycopode à l'aide d'un soufflet ; d'autres saturent l'air de certains hydrocarbures : c'est ainsi que procède Herskine Hazard. Enfin Galy-Cazalat et Dubain emploient l'hydrogène produit par la réaction de l'acide sulfurique sur le zinc, ignorant sans doute que le gaz d'éclairage donne, à volume égal, plus de chaleur que l'hydrogène.

En 1807, de Rivaz propose d'enflammer le mélange tonnant par une bulle d'hydrogène phosphoré ; on est revenu à cette idée dans ces derniers temps. Cependant le procédé en usage est infiniment préférable à tous égards, car on ne saurait faire mieux et plus simplement que de loger un brûleur dans le distributeur. Cette disposition ingénieuse n'est pas née d'hier ; elle fut imaginée par Samuel Brown, en 1824.

De 1830 à 1860, nous voyons éclore les types les plus divers ; tous furent protégés par des brevets, mais aucun ne fit la fortune de son créateur. Il faut reconnaître cependant quelques innovations très heureuses.

Wellmann Wright, James Johnston et William Barnett se distinguent entre tous.

Le premier a employé le régulateur de vitesse à modifier la teneur du mélange explosif suivant la quantité de travail à produire ; la richesse en gaz combustible diminuera pour peu que la marche de la machine s'accélère, et le travail moteur sera réduit toutes les fois qu'il tendra à devenir prépondérant et à accélérer la vitesse du mécanisme. Cette idée de proportionner à tout instant la force produite par l'explosion au travail qu'on demande nous paraît simple, aujourd'hui que nous sommes familiarisés avec les détentes variables dans les machines à vapeur ; mais en 1833, alors que Wright prenait sa patente, il fallait une grande puissance d'invention pour concevoir un semblable dispositif et le réaliser. Deux petites pompes, gouvernées par le régulateur à boules de Watt, alimentaient le cylindre d'air et de gaz combustible, hydrogène ou carbure ; on ne saurait faire mieux aujourd'hui. La machine à gaz de Wellmann Wright était du reste parfaitement entendue et fort bien construite : elle était verticale, à double effet, sans balancier, à action directe ; l'inflammation était

produite par la flamme d'un bec de gaz. Il serait difficile de dire pourquoi ce moteur ne réussit pas ; peut-être ne faut-il chercher la cause de cet insuccès que dans l'indifférence des industriels contemporains pour tout moteur autre que la machine à vapeur.

Johnston ne fut pas moins ingénieux que Wright ; il imagina une machine à gaz à condensation. Écoutons la description qu'il nous en a laissée lui-même.

« Ma machine fonctionne de la manière suivante. Supposons que le piston soit au bas du cylindre ; de l'oxygène et de l'hydrogène sont introduits sous le piston ; la soupape d'admission des gaz est alors fermée, et ceux-ci sont enflammés par l'un des moyens ordinaires. Aussitôt que l'explosion a lieu, le piston est chassé jusqu'au sommet du cylindre ; mais, quand l'explosion a cessé, il s'est produit un vide au-dessous du piston, attendu que les deux gaz se sont combinés pour former de l'eau. Tout l'espace compris au-dessous du piston est donc vide, à l'exception de la petite quantité d'eau qu'il renferme. Ainsi le piston est chassé jusqu'au sommet du cylindre, par l'explosion des gaz, et un vide s'est formé au-dessous de lui par la condensation de ces mêmes gaz. Le piston est ensuite chassé en sens inverse par les gaz qui sont introduits et enflammés au-dessus de lui : un vide se fait au-dessus, et de cette manière la machine continue à fonctionner tant que les gaz sont introduits et enflammés alternativement, chaque explosion faisant rétrograder le piston dans le vide formé par elle... Je me réserve d'utiliser la condensation dans les machines qui emploient l'explosion du gaz hydrogène. »

Le jour où les gaz hydrogène et oxygène seront fournis par une canalisation et à bas prix, le moteur Johnston sera peut-être apprécié à sa juste valeur ; d'ici là, nous ne le considérons que comme une curiosité, mais nous rendrons hommage au génie inventif de cet homme, qui méritait une mention spéciale dans l'histoire des moteurs à gaz.

William Barnett revint à l'idée de Lebon et il décrivit dans son brevet du 18 avril 1838, un moteur à double effet et à compression ; deux pompes spéciales comprimaient séparément l'une de l'air, l'autre du gaz, et alimentaient le cylindre moteur, dans lequel le mélange était enflammé par un inflammateur fort ingénieux.

Barnett réalisait la mise de feu à l'aide d'un boisseau de robinet creux, animé d'un mouvement de rotation continu et renfermant un bec de gaz ; ce bec s'allumait à une veilleuse extérieure quand l'ouverture du boisseau était tournée au dehors, et il portait sa flamme dans le mélange, quand le boisseau avait fait un demi-tour et qu'il communiquait avec le cylindre. C'est l'idée du transport de flamme sous pression, qui a été appliquée plus tard par le plus grand nombre des constructeurs.

Bien nombreux encore furent les essais d'amélioration de la machine à gaz de 1850 à 1860 ; les ingénieurs avaient évidemment reconnu les avantages considérables qu'on pouvait retirer de l'emploi du gaz et, en neuf ans, seize brevets furent pris en Angleterre et en France. Aucun d'eux ne put être exploité : cependant il en est dont on a reconnu plus tard la valeur et que nous ne saurions passer sous silence, sans

injustice : je veux parler surtout des brevets de Barsanti et Matteucci et de Hugon.

Le premier date du 13 mai 1854 ; il porte le titre suivant :

Mode of applying the explosion of the gases as a motive power.

Le second fut inscrit à Paris le 11 septembre 1858, sous la mention : *Machine utilisant la force explosible et le vide résultant de la combinaison de l'hydrogène pur ou des différents gaz de l'éclairage.*

Ces deux moteurs pouvaient être excellents, la suite le prouva bien ; mais de fait ils ne donnèrent aucun résultat avant 1860.

Rendons justice aussi à Degrand, qui, dès 1858, faisait la compression du mélange gazeux, par le piston, dans le cylindre même de travail : l'idée ne lui appartenait pas, mais elle était tout aussi peu la propriété des heureux constructeurs qu'elle a enrichis depuis lors ; il est vrai que Degrand ne put obtenir la compression préalable qu'en faisant une machine monstrueuse.

Sir Williams Siemens construisit enfin, en 1860, un moteur dont il a produit les dessins à la réunion du 4 avril 1882 des ingénieurs civils de Londres (1) ; mais le savant ingénieur n'avait pas trouvé le temps nécessaire pour compléter son œuvre, et il fut devancé.

En somme, on peut affirmer en toute vérité qu'avant 1860 aucune machine à gaz n'a pu être utilisée industriellement.

Le moteur était inventé ; mais il s'agissait de le faire marcher.

Ce fut le mérite de Lenoir.

II

Période d'application.

Le brevet de Lenoir porte la date du 24 janvier 1860 ; il était spécifié *Moteur à air dilaté par la combustion du gaz.*

Le dispositif de cette machine ne différait pas sensiblement du type des machines à vapeur horizontales à bielles articulées ; ce modèle simple, compact et peu encombrant avait, en 1860, toutes les préférences des constructeurs, et on put l'appliquer facilement et sans grandes modifications à la production de la force motrice par l'explosion d'un gaz tonnant.

1. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, vol. LXIX. Voici en quels termes s'est exprimé sir W. Siemens au sujet de son moteur : The engine promised to give very good results, but about the same time he began to give his attention to the production of intense heat furnaces, and having to make his choice between the two subjects, he selected the furnace and the metallurgic process leading out of it ; and that was why the engine had remained where it was for so long a time. — Nous renonçons à donner la description de ce moteur ; il n'est pas indigne du savant qui en a conçu l'idée et dessiné les plans. Nous retrouverons, du reste, dans la suite, une nouvelle expression du projet de sir William Siemens et nous nous y arrêterons plus longuement.

Le premier moteur Lenoir est le prototype des moteurs à explosion sans compression préalable.

La figure 1 reproduit le modèle original breveté, tel qu'il fut donné dans la *Publication industrielle* d'Armengaud.

A est le cylindre moteur; il est fondu avec son enveloppe et porte sur ses faces latérales des bossages destinés à recevoir les appareils de distribution G et de décharge C; il est boulonné sur un bâti de fonte à grande surface, lequel soutient tout l'ensemble des organes de transmission et de modification de mouvement. Ceux-ci sont établis comme dans les machines à vapeur : un arbre coudé est attaqué par une bielle à fourche, reliée à la crosse de la tige du piston; le mouvement rectiligne alternatif de cette ligne est assuré par un guidage B.

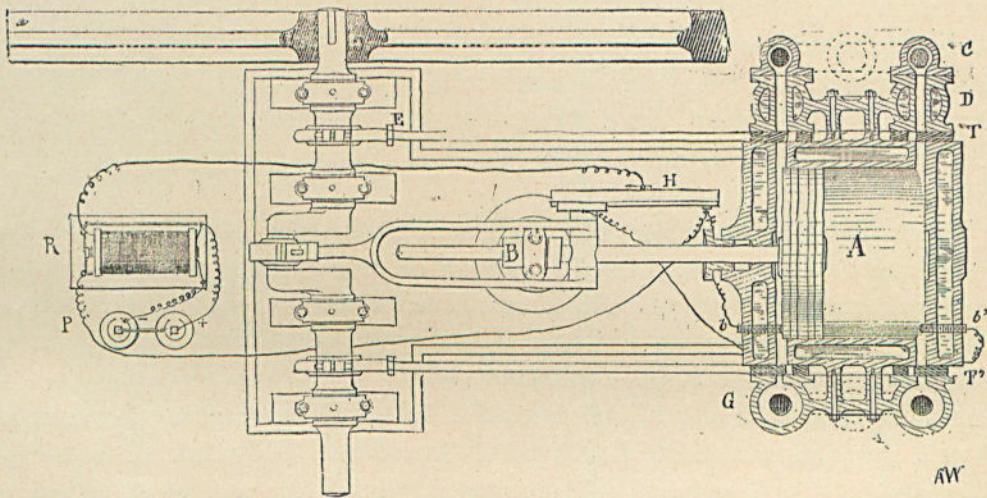


Fig. 1. — Moteur Lenoir primitif.

De chaque côté de l'arbre de couche sont calés les excentriques qui commandent les tiroirs T et T'.

Le piston à garnitures métalliques, ne présente aucune particularité à signaler, si ce n'est toutefois qu'on a ménagé sur ses deux faces un évidement destiné à laisser pénétrer dans son épaisseur l'extrémité des inflammateurs *b* et *b'*, qui font saillie sur les fonds, afin de diriger l'étincelle dans l'axe des canaux d'admission du mélange tonnant.

La machine est à double effet et sans compression.

Le gaz arrive par un tuyau à deux branches dans deux chappelles G, de forme cylindrique, munies d'un orifice rectangulaire du côté du tiroir; ce tiroir glisse entre deux surfaces dressées.

Le tiroir, qui est un des organes les plus délicats du moteur, est en bronze; il présente sur toute sa hauteur des évidements rectangulaires qui livrent passage à l'air; les évidements sont formés de tubes cylindriques de 2 millimètres de diamètre alter-

nant avec des trous de 6 millimètres. Le gaz de la chapelle entre par les tubes, tandis que l'air appelé du dehors par le piston pénètre à travers les trous; de cette manière les veines du comburant et du combustible se mêlent intimement et forment un mélange tonnant, allumé par l'étincelle de la bobine de Ruhmkorf B, qui jaillit en *b* et *b'*.

* C'est à mi-course du piston que le tiroir T se ferme et que l'explosion a lieu : sous cette impulsion, le piston achève sa course; puis le tiroir de décharge T, placé en face, laisse échapper les gaz plus ou moins détendus. La pratique avait indiqué qu'il convenait de produire l'inflammation avant fermeture complète du tiroir d'admission; quant au tiroir de décharge, il devait avoir une légère avance.

La même série de phénomènes, se déroulant derrière la face opposée du piston, détermine son mouvement alternatif : l'action à double effet du moteur résulte des deux jeux de tiroirs, disposés aux deux extrémités du cylindre. Un même excentrique commande chaque paire de tiroirs.

Les chapelles d'échappement sont symétriques des chapelles d'admission : elles conduisent les gaz brûlés dans un collecteur qui s'élève verticalement, de manière à faire office de cheminée d'appel, ce qui diminue la contrepression. Inutile de dire que le tiroir de décharge, identique d'ailleurs au tiroir d'admission, ne présente pas le dispositif des tubes mélangeurs.

Une circulation d'eau rafraîchit les parois du cylindre et les chapelles de décharge. L'eau entre d'abord dans ces chapelles et passe de l'une à l'autre par un tuyau horizontal de communication : puis elle parcourt l'enveloppe du cylindre et les fonds, et elle se déverse enfin dans un vaste réservoir disposé spécialement pour opérer son refroidissement. La même eau sert toujours.

Les inflammateurs *b* et *b'* se composent d'un boulon de cuivre taraudé, traversé par un petit crayon de porcelaine, dans lequel est engagé le fil conducteur. Ce fil est négatif, tandis que toute la masse métallique est positive; la figure permet de suivre les fils qui relient le distributeur H et les inflammateurs *b* et *b'* aux pôles de la bobine.

Pour mettre le moteur en train, il suffisait d'actionner le volant, afin de faire avancer le piston, qui aspirait le mélange tonnant derrière lui : l'étincelle jaillissait alors et l'explosion achevait de pousser le piston à fond de course. Le volant triomphait du point mort par son inertie, et ramenait le piston en arrière : dès lors, la marche du moteur était assurée.

Tel était le chef d'œuvre de Lenoir.

Rien de particulier, en somme, ni de bien original dans les dispositions adoptées par l'inventeur; cependant, ce moteur différait absolument de tous ceux que nous avons signalés dans la période d'invention, en ce qu'il *marchait* et fournissait un travail régulier et continu.

A quoi fallait-il attribuer ce résultat si nouveau ?

A un ensemble de perfectionnements sérieux dans les détails et surtout à une construction parfaite. Lenoir eut en effet la bonne fortune d'avoir pour constructeur Marioni, auquel revient assurément une part du succès.

L'émotion fut grande dans le monde industriel : on possédait enfin un moteur n'exi-

geant ni foyer, ni chaudière, ni chauffeur, ni approvisionnement de combustible; ne donnant point de fumée, pouvant être mis en train instantanément par la manœuvre d'un robinet et ne consommant rien pendant ses périodes d'inaction. La distribution de la force était donc résolue ! Le moteur à gaz pouvait être installé dans les plus petits ateliers, à cause de son faible poids et de ses petites dimensions. Toutes les revues techniques exaltèrent à l'envi ces précieuses qualités et, la réclame aidant, la nouvelle machine conquit la vogue et se répandit très rapidement partout.

Quelques-uns crurent que les dernières heures de la machine à vapeur avaient déjà sonné, et l'étoile de Watt pâlit devant celle de Lenoir.

La *Publication Industrielle* d'Armengaud établissait ⁽¹⁾ de la manière suivante le bilan comparatif d'une machine à vapeur et d'un moteur à gaz : au prix de 0 fr. 30 le mètre cube de gaz, le cheval annuel coûtait, amortissement et frais compris, 1.450 francs, tandis qu'il revenait à 1.900 francs par une machine à vapeur de la force d'un cheval. Pour des forces plus considérables le gaz perdait ses avantages, il est vrai ; ainsi la dépense annuelle de deux machines de 10 chevaux était évaluée à 10.700 francs pour le gaz et à 8.200 francs pour la vapeur : mais les frais de premier établissement étaient bien moins considérables pour un moteur Lenoir que pour une machine à vapeur. Le tableau ci-dessous en faisait foi.

PUISSANCE EN CHEVAUX	PRIX	PRIX
	D'UN MOTEUR LENOIR LIVRÉ ET POSÉ A PARIS	D'UNE MACHINE A VAPEUR
1/2	900 francs.	1,300 francs.
1	1,350 —	1,600 —
2	1,910 —	2,500 —
4	3,000 —	4,500 —
10	6,540 —	10,500 —

L'enthousiasme était au comble : il conduisit à une exagération manifeste. Marinoni estimait la consommation du moteur à environ 900 litres par cheval et par heure : il en dévorait 3.000, sinon plus, et coûtait trois fois plus cher d'entretien qu'une machine à vapeur de même force. On économisait, il fallait en convenir, le salaire d'un chauffeur ; mais la conduite de la machine était délicate, et l'on ne pouvait se passer d'un surveillant qui, armé d'une burette, y versât des torrents d'huile, car le mouvement se ralentissait, si l'on négligeait de graisser abondamment tous les quarts d'heure ; de ce chef, la dépense était d'au moins 10 centimes par heure. Enfin, la consommation d'eau était quatre fois plus considérable que pour une machine à vapeur sans condensation. Bref, il fallait en rabattre beaucoup des pompeuses réclames de la première heure.

D'un engouement irréfléchi on passa bientôt au dénigrement le plus injuste. Un

1. Tome XIII, page 247, 4864.

certain nombre de moteurs furent transformés en machines à vapeur; d'autres furent vendus au prix du fer. Plusieurs revues industrielles ouvrirent une campagne contre l'idole de la veille; et un certain Monsieur von Schwartz ne craignit pas d'intituler un article *Ein Humbug*, ce que je traduis par le mot de *fiasco* (1).

• C'était une nouvelle exagération.

En réalité, le moteur Lenoir était un précieux auxiliaire de la petite industrie, dont on ne pouvait méconnaître les qualités.

Tresca le soumit à une série d'essais, le 6 janvier 1861. Une machine de 180 millimètres de diamètre sur 100 de course fournit un travail de 0,57 cheval au prix de 3.166 litres de gaz par cheval et par heure. La durée de l'épreuve fut de trois heures et demie, durant lesquelles on n'observa que deux arrêts par défaut d'inflammation; la dépense d'huile fut d'environ 50 grammes par heure (2).

Le savant sous-directeur du Conservatoire rendit le témoignage le plus impartial aux mérites de l'œuvre de Lenoir; l'avenir de ces moteurs reposait d'après lui sur leur emploi exclusif aux petites forces motrices.

Quelque temps après, il écrivait ce qui suit, au retour de l'exposition de Londres de 1862 :

« La machine à vapeur ne saurait être menacée par ces ingénieux moteurs qui, en gravitant autour d'elle, et en utilisant une partie des principes qu'elle met en œuvre, ne font que relever ses mérites sans parvenir à les égaler ».

Ce jugement, que la suite a démenti, fut ratifié alors par tous les hommes compétents.

La machine Lenoir rendit de grands services à ceux qui surent l'utiliser; de fait, nous ne possédons pas de moteur à gaz dont le mouvement soit plus doux, ni plus régulier, ni la marche plus sûre. D'après une brochure publiée en 1864 par M. G. Lefebvre, ingénieur, il y avait alors à Paris 127 moteurs Lenoir en fonctionnement, d'une puissance de $\frac{1}{2}$ cheval à 4 chevaux : la dépense de gaz garantie par cheval-heure était de 2.000 litres et cette garantie semblait généralement réalisée. Les jurys des Expositions de Londres en 1862, de Paris en 1867, de Vienne, en 1873, reconnurent le mérite de Lenoir et la Société d'Encouragement lui décerna en 1886, le grand prix de 12.000 francs du marquis d'Argenteuil.

Le premier concurrent que rencontra Lenoir fut Hugon, directeur de la Compagnie parisienne. Nous avons déjà signalé son brevet, qui était antérieur à 1860; mais ce n'est guère qu'en 1862 que le moteur Hugon entra dans le domaine de la pratique (3).

Il différait en deux points du moteur Lenoir : et d'abord, le mélange explosif était enflammé par un brûleur : de plus, le cylindre était refroidi à l'intérieur et lubrifié

1. *Breslauer Gewerbeblatt*, 20 octobre 1860.

2. *Annales du Conservatoire impérial des Arts et Métiers*, tome I, page 849, 1861.

3. Je passe sous silence une machine atmosphérique Hugon, mentionnée dans l'*Année Scientifique* de M. Figuier, tome VIII, page 489 : elle remonte aussi à l'année 1862 et n'aurait consommé, dit-on, que 1,500 litres par cheval-heure ; toutefois il ne semble pas qu'elle ait donné des résultats réellement pratiques.

par une injection d'eau pulvérisée qui, se transformant en vapeur, ajoutait sa force expansive à celle du gaz au moment de l'explosion. Il en résultât une grande économie d'huile et d'eau, et une légère amélioration dans le rendement. On est revenu récemment à cette manière de faire, qui est rationnelle.

D'après Tresca, qui expérimenta le nouveau moteur en 1867, la consommation par heure et par cheval était abaissée à 2.445 litres. Les gaz brûlés s'échappaient du cylindre à une température de 186°, alors que dans le moteur Lenoir ils étaient à une température supérieure à celle de la fusion de la soudure des plombiers, soit à 280° au moins. Cette diminution de température, très favorable à l'entretien du mécanisme, devait être attribuée à l'introduction de l'eau (1).

Deux moteurs anglais vinrent aussi sur le continent disputer la palme aux machines Lenoir : le premier, celui de Kinder et Kinsey, ne repose sur aucune idée nouvelle ; le second, au contraire, inventé par Millon dès 1861, présente un cycle plus parfait qui mérite toute notre attention (2).

Lenoir introduisait dans le cylindre le mélange détonant à la pression atmosphérique, donc sans compression ; l'étincelle venant à jaillir, la pression du gaz augmentait instantanément et le piston était refoulé. Millon eut le bonheur d'appliquer utilement le premier, ou le génie de découvrir à nouveau la *compression préalable* déjà indiquée par Lebon et Barnett. Je ne sais si l'ingénieur anglais obtint un rendement supérieur à celui de Lenoir, mais il est hors de doute qu'il contribua puissamment aux progrès considérables réalisés depuis lors.

Les moteurs Kinder et Kinsey consommaient 2.000 litres par cheval-heure, si nous devons en croire les revues anglaises(3) ; nous ne savons ce que dépensait le moteur Millon.

C'est en 1862, le 7 janvier, que Beau de Rochas a pris ce brevet fameux dont on a tant parlé depuis lors, les uns pour l'exalter outre mesure, les autres pour en diminuer la valeur au point de manquer à la justice. En réalité, de Rochas a écrit un mémoire scientifique remarquable, dans lequel il a fait preuve d'une grande perspicacité ; ce mémoire a été déposé à titre de brevet, mais un excellent mémoire peut devenir une détestable spécification de patente, et, de fait, le texte légal a fourni une ample matière aux discussions des avocats. Le mémoire est intitulé : *Nouvelles recherches sur les conditions pratiques d'emploi de la chaleur* ; il établit fort bien les véritables règles qu'on doit suivre pour faire le meilleur emploi de la force élastique des gaz. Il faut : 1° que le cylindre ait le plus grand volume possible sous la forme du minimum de surface périphérique ; 2° que le piston ait la plus grande vitesse possible de marche ; 3° que les gaz soient détendus, le plus qu'on le peut faire et, 4° qu'ils aient la plus grande pression initiale. Ces principes généraux sont très nettement exposés et parfaitement développés par Beau de Rochas. Pour les réaliser il propose d'opérer de la manière suivante :

1. *Annales du Conservatoire impérial des Arts et Métiers*, tome VIII, page 69, 1867.

2. J'emprunte ce renseignement à M. Dugald Clerk, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, tome LXIX.

3. *The Mechanics Engine*, New Series, tome XIX, page 277, cité par M. Schœttler.

1° Aspiration du mélange tonnant pendant une course entière du piston.

2° Compression de ce mélange pendant la course suivante.

3° Inflammation au point mort et détente pendant la troisième course.

4° Refoulement des gaz brûlés hors du cylindre au quatrième et dernier retour.

* L'ensemble des opérations qui constitue le cycle de Beau de Rochas est par suite à quatre temps; cet ingénieur est donc incontestablement l'inventeur de ce cycle, cela est indéniable. Mais il a plutôt tracé un programme de ce qu'il fallait essayer qu'il n'a indiqué le moyen de le réaliser; il est resté plus théoricien qu'il n'est devenu praticien. En effet, s'il est vrai qu'il déclare nettement qu'on doit opérer dans un cylindre unique et que les soupapes sont préférables aux tiroirs, on ne saurait nier d'autre part qu'aucun dessin n'est annexé au brevet, et que ce document ne renferme que des indications vagues ou impraticables relativement à la distribution, à l'allumage et à l'évacuation. Aucun essai ne fut fait, à notre connaissance du moins, aucun moteur ne fut construit et le défaut de paiement de la seconde annuité fit tomber le brevet dans le domaine public.

Désireuse de reconnaître l'initiative et le génie de l'illustre précurseur d'Otto, la Société d'Encouragement pour l'industrie nationale a décerné, en 1887, à Beau de Rochas, un de ses prix, aux applaudissements de tous ceux qui connaissaient la part considérable qui revenait à cet ingénieur dans les progrès des moteurs à gaz; cet hommage eût été rendu trente ans plus tôt au savoir et au génie de l'inventeur, s'il avait su tirer les conclusions des principes posés par lui. Il eût été plus que le devancier d'Otto: il ne lui aurait rien laissé à faire (!).

Telle était la situation de l'industrie dont nous étudions les développements successifs, lorsque s'ouvrirent les portes de l'exposition de Paris en 1867. Parmi les machines qui captivèrent le plus vivement l'attention des visiteurs se trouva un moteur d'une physionomie étrange, peu coûteux, très économique, exposé par la maison Otto et Langen de Deutz, près Cologne (2). C'était une machine verticale, laide de formes, assez encombrante, à la marche bruyante; au ferraillement des engrenages se mêlaient

1. Beau de Rochas est mort en 1892.

2. Nicolas-Auguste Otto naquit à Holzhausen (Nassau), en 1832; il débuta dans le commerce, mais il avait fait dans sa jeunesse de sérieuses et fortes études mathématiques et physiques, qui le préparèrent au rôle qu'il devait jouer plus tard. Le succès du moteur à air dilaté de Lenoir lui révéla sa vocation d'ingénieur-mécanicien et il abandonna une situation acquise pour se consacrer au développement de ces nouvelles machines, dont il entrevit aussitôt le bel avenir. C'est à Cologne qu'il fut construit, en 1863, son premier moteur: il marcha mal et l'inventeur découragé se serait rebuté s'il n'avait alors associé sa fortune à celle d'Eugène Langen, dont la science et le génie persévérant contribuèrent grandement à la réalisation des idées d'Otto. Leur collaboration date du 30 septembre 1864; leur première œuvre fut la machine atmosphérique, qu'ils exposèrent à Paris, en 1867, et pour laquelle ils obtinrent une médaille d'or. Leur petit atelier de la Servaesgasse à Cologne devint bientôt insuffisant et il fallut songer à l'agrandir: ils le transportèrent à Deutz et se mirent à l'étude dans le but de réaliser un moteur capable de rivaliser avec la machine à vapeur. On peut voir à Deutz la collection des types les plus divers qu'ils essayèrent: le succès ne vint qu'en 1876, date de leur premier brevet, qui fut complété en 1877. Depuis lors le moteur Otto s'est bien modifié; mais l'œuvre primitive était remarquable, il faut le reconnaître hautement. En 1881, l'Association des ingénieurs allemands vint tenir une session à Cologne et elle rendit un solennel hommage au génie de l'inventeur et l'Université de Wurzburg crut s'honorer en lui envoyant un diplôme de docteur *honoris causa*. Le docteur Otto est mort le 26 janvier 1881. M. Slaby lui a consacré une notice biographique de laquelle nous avons extrait les détails qui précèdent.

des détonations d'armes à feu, qui fatiguaient l'oreille et épouvantaient même quelquefois les assistants; bref, c'était un véritable marteau-pilon, mais ce marteau-pilon ne demandait plus que 900 litres par heure en échange du cheval-vapeur !

Cette machine est du type dit *atmosphérique* : le cylindre vertical très long renferme un piston, dont la tige est reliée au volant par un mécanisme de crémaillère et de pignon à embrayage, n'agissant qu'au moment de la descente du piston. Le mélange d'air et de gaz combustible, qui est d'abord introduit par l'orifice d'admission, projette le piston de bas en haut au moment de l'inflammation, et le piston surmonte dans cette première course ascensionnelle la pression atmosphérique; il est lancé en l'air comme un véritable projectile. Mais, la tension des produits de l'explosion diminuant par détente et refroidissement, il retombe et entraîne le mouvement de l'arbre de couche dont il est devenu solidaire. Dans cette seconde phase, la pression atmosphérique est motrice, et c'est la tension du résidu gazeux contenu dans le cylindre qui devient pression résistante.

Le concept théorique de cette machine est, en somme, très simple : mais la réalisation mécanique de l'invention était des plus difficiles et des plus compliquées. Barsanti et Matteuci avaient eu l'idée, mais ils ne surent pas la réaliser; Langen et Otto ont repris l'idée de leurs devanciers, et ils l'ont exécutée; toutefois, la solution qu'ils ont trouvée était elle-même incomplète, et leur ingénieuse machine est aujourd'hui abandonnée; mais son importance est si grande dans l'histoire des moteurs à gaz, que ce serait une erreur de ne point en donner une description (1).

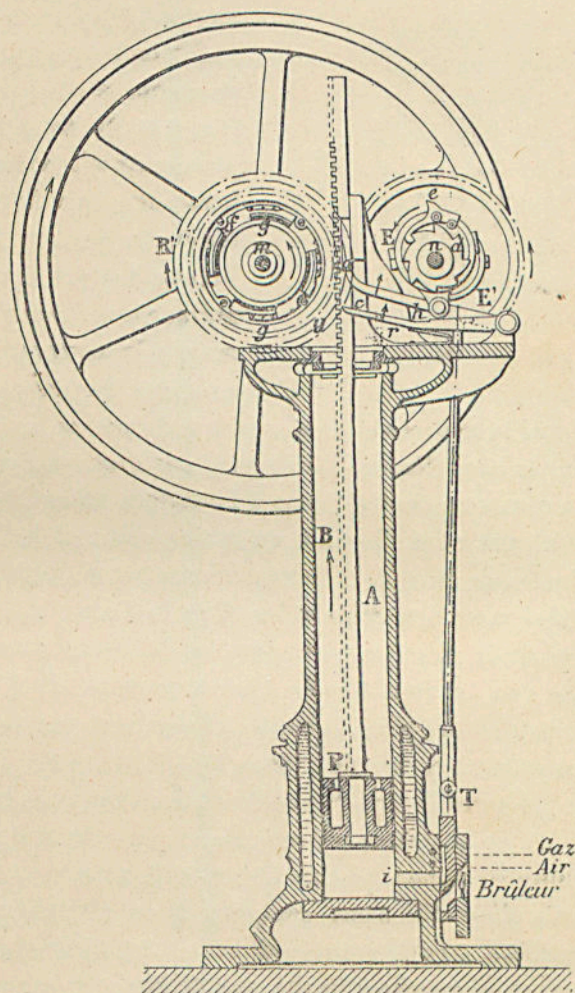


Fig. 2. — Moteur Langen et Otto.

1. *Le Portefeuille économique*, de M. Oppermann, a donné, en 1876, une description complète de ce moteur.

Cette curieuse machine (fig. 2) (1) se compose d'un cylindre très long A, ouvert à son extrémité supérieure et parcouru par un piston P dont la tige B porte une crémaillère, qui règne à peu près sur toute sa longueur et commande un pignon C placé sur l'arbre du volant. Ce pignon est fou sur cet arbre, dans la rotation qui correspond à l'ascension du piston; il entraîne l'arbre au contraire dans sa rotation inverse. Ce résultat était obtenu d'abord par l'emploi d'une roue à rochet, fixée sur le même axe que le pignon; mais on y substitua bientôt un manchon de friction, assez compliqué, il est vrai, mais très ingénieusement conçu, dont je vais essayer d'expliquer en peu de mots le fonctionnement.

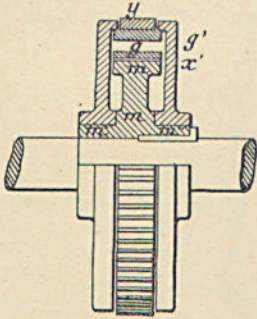


Fig. 3.

Cet embrayage (appelé en allemand *das Schaltwerk*) se compose d'un disque *m*, calé sur l'arbre de couche (fig. 2 et 3) dont le moyeu cylindrique *m'* porte deux plateaux *x* et *x'*, qui tournent librement sur lui et comprennent entre eux la denture *y* du pignon, maintenue par les quatre boulons *f* de la figure 3.

Cette denture est donc folle sur l'arbre de couche, puisque les plateaux *x* et *x'* sont indépendants de l'arbre; mais elle cessera de l'être aussitôt qu'elle deviendra solidaire du disque *m*. Or. dans l'intervalle compris

entre la couronne dentée *y* et le disque *m*, se trouvent quatre coins, qui appuient sur la circonférence du disque, par l'intermédiaire d'une garniture de cuir; de plus, la couronne dentée porte à l'intérieur autant de plans inclinés; enfin, une série de rouleaux sont disposés entre les coins et les plans inclinés. Lorsque la couronne dentée se meut dans le même sens que le disque, les rouleaux se logent dans le vide laissé entre les coins et les plans inclinés: il en est de même lorsque la couronne dentée se meut en sens contraire du disque avec une vitesse moindre; au contraire, dès que la roue dentée tend à prendre de l'avance sur le disque, les rouleaux remontent les plans inclinés et viennent exercer une pression par coincement sur les garnitures de cuir; l'énergique friction développée de la sorte entraîne le disque *m* et par suite l'arbre de couche. Ainsi s'explique la propriété de ce curieux embrayage de n'agir que pour un sens déterminé de rotation et seulement dans le cas où le piston retombe avec une vitesse suffisante.

Ce dispositif étant compris, il est aisé de se rendre compte de la marche de la machine, en observant la direction des flèches marquées sur la figure 2. Le volant tourne de gauche à droite, par dessus; le piston, ayant reçu l'impulsion de la charge explosive, vole en l'air avec une rapidité extrême, en entraînant à contre-sens le pignon C, qui est alors fou sur l'arbre; en vertu de la force vive emmagasinée, les gaz brûlés se détendent jusqu'à une pression bien inférieure à celle de l'atmosphère, et il se fait un vide partiel dans le cylindre. Mais, à un moment donné, la pression

1. Il existe encore quelques moteurs Langen et Otto en Allemagne et leur fonctionnement est assez satisfaisant pour qu'on ne les remplace pas par des machines plus modernes.

contraire de l'atmosphère, jointe au poids de tout l'appareil mobile, détermine un mouvement rétrograde du piston : ce mouvement, rapide au début, provoque le jeu des coins de l'embrayage, et le piston, devenu solidaire de l'arbre moteur, effectue un travail utile. Mais il se développe alors sous le piston une contrepression qui ralentit sa marche ; bien que le pignon continue de tourner dans le même sens que le volant, les coins se dégagent et la roue dentée devient libre ; le piston achève sa course et expulse les gaz brûlés. Il faut qu'il remonte pour aspirer une charge nouvelle de gaz tonnant : ce mouvement est produit par un mécanisme spécial qui est figuré sur la droite de la figure 2. Nous pouvons en aborder maintenant la description.

Parallèlement à l'arbre du volant m se trouve placé un second arbre n , par lequel s'opère la double fonction de relevage du piston et de commande du tiroir de distribution T ; la transmission du mouvement se fait de m et n par les roues dentées R et R' , situées à l'arrière-plan du dessin et représentées par une ligne pointillée. L'excentrique E' commande le tiroir ; l'excentrique E relève le piston. L'action de ces deux excentriques ne devant s'exercer que par intermittence, on a été obligé de les rendre fous sur l'arbre n : ils sont donc entraînés par un rochet d , dont l'action sera suspendue aussitôt que le verrou e aura perdu le contact de ses dents. Le cran h du levier c est chargé de cette mission : c'est à lui qu'incombe la fonction d'immobiliser les excentriques en décrochant le verrou. Il n'agit qu'après que le levier b aura soulevé le piston par l'intermédiaire du taquet a et que le tiroir aura introduit une charge sous le piston et l'aura enflammée ; son action s'exercera du reste aussi longtemps que le levier c , soulevé par le ressort r , maintiendra le verrou ; elle cessera aussitôt que, dans la marche rétrograde, le taquet a aura abaissé ce même levier c .

L'admission du mélange tonnant est dès lors opérée très simplement. Le tiroir T laisse pénétrer l'air et le gaz par deux ouvertures séparées ; l'air est pris directement à l'atmosphère, le gaz arrive par un tuyau muni d'un robinet ; ils sont appelés tous deux par le relevage automatique du piston du levier b . L'allumage lui-même s'effectue par aspiration de la flamme d'un brûleur.

On règle la vitesse du moteur en ouvrant plus ou moins le robinet du gaz. Mais il importe de faire remarquer que l'on possède en outre le moyen de modérer la marche de la machine en réduisant la section de l'orifice d'échappement : dans ce cas, en effet, la descente du piston est ralentie et le nombre des coups de piston diminue par minute. C'est une particularité curieuse du moteur Langen et Otto, que le nombre des coups de piston soit indépendant de la vitesse du volant ; le volant peut être assimilé à une toupie que l'on fait mouvoir par des coups de fouet ; la vitesse de rotation dépend assurément du nombre de coups de fouet, cependant, en diminuant les résistances passives, on peut entretenir une vitesse égale avec un nombre moindre d'impulsions motrices. Il en résulte qu'un même moteur peut fournir un travail variable avec des vitesses fort différentes ; ainsi, dans les essais faits en 1868 par M. Meidinger, le travail a passé de 48 à 26 kilogrammètres, alors que la vitesse diminuait de 106 à 40 tours par minute et le nombre des coups de piston de 43 à 20 ; ces variations sont indépendantes les unes des autres dans une certaine mesure.

Le moteur Langen et Otto que nous venons de décrire, est, sans contredit, un des plus ingénieux qu'on ait réalisés, et je n'hésite pas à déclarer que cette machine était un chef-d'œuvre d'invention et de construction ; c'est pourquoi sa description appartient à l'histoire des moteurs à gaz.

Otto et Langen obtinrent avec ce moteur des résultats inespérés et, en dix ans, ils en construisirent plus de 5.000.

Tresca entreprit encore de déterminer exactement la consommation de ce merveilleux engin ; il opéra sur celui qui marchait au Champ-de-Mars, d'une force d'environ un demi-cheval. La consommation totale par cheval-heure fut de 1.359 litres, en y comprenant le gaz brûlé par le bec d'allumage ; les moteurs Lenoir et Hugon étaient donc fort distancés (1). Ce fut bien mieux encore lorsque, par une suite de perfectionnements heureux, les habiles constructeurs de Deutz eurent corrigé les défauts que la pratique leur signalait. Ils réussirent à abaisser la consommation totale jusqu'à 800 litres.

Dans ces conditions, un moteur Otto et Langen était plus économique qu'une machine à vapeur de mêmes dimensions ; aussi le succès fut-il grand et une puissante Compagnie anonyme (Deutzer Gasmotoren Fabrik) fut créée pour exploiter le brevet des heureux inventeurs ; elle eut peine à suffire aux commandes. Le succès fut moindre en France : MM. Dehaynin et Sarazin, qui entreprirent la construction de cette machine, en vendirent un assez petit nombre.

Mais le gaz n'est à la disposition de l'industrie que dans les villes ; il importait de créer un moteur qui pût fonctionner partout, et J. Hock de Vienne, prit en 1873 une patente pour des moteurs au pétrole. L'idée était ancienne, mais toujours pratique, et bien digne d'exciter de nouvelles recherches. On sait qu'un courant d'air traversant un hydrocarbure léger et suffisamment volatil pour donner des vapeurs abondantes à la température ordinaire, se trouve assez carburé par ce contact pour devenir inflammable ; ce gaz est éminemment propre à la production de la force motrice. Hock combina une machine qui fonctionna très régulièrement ; mais, par suite d'une combustion incomplète, le rendement fut médiocre et la dépense moyenne ne put être abaissée au-dessous de 750 centimètres cubes de pétrole léger par cheval et par heure : c'était beaucoup trop, bien que les carbures de mauvaise qualité qu'on utilisait de la sorte fussent relativement d'un prix minime (2).

Vers le même temps, un ingénieur américain appliquait ses efforts à la résolution du même problème industriel. Sa patente remonte à 1872, mais ce n'est qu'en 1876 que le *Ready-Motor* de Brayton prit sa forme définitive, sous laquelle il est connu. Le mode de carburation de l'air est autre que dans la machine Hock. L'air, comprimé par une pompe, pénètre dans le cylindre à travers une série de disques de bronze perforés entre lesquels se trouve une masse spongieuse, imprégnée d'un hydrocarbure lourd par le jeu continu d'une petite pompe alimentaire. C'est sous forme de rosée que le liquide est entraîné et projeté sur une toile métallique, derrière laquelle

1. Les consommations des machines Lenoir, Hugon et Langen et Otto furent dans le rapport de 10:6:4.

2. Musil, *Die Motoren für das Kleingewerbe*, page 37.

la combustion se maintient sans interruption et sans explosion. Pour mettre le moteur en train, il suffit d'introduire une allumette sur le trajet du gaz combustible : un regard spécial est disposé à cet effet au fond du cylindre régulateur.

Construit dans les ateliers d'Exeter (New Hampshire), le Ready-Motor acquit une certaine réputation : Brayton réussit, dit-on, à ne dépenser que 675 centimètres cubes d'huile lourde de pétrole par cheval-effectif et par heure et ce résultat serait remarquable. Sa machine fut exposée à Philadelphie, en 1876, et elle reparut à Paris, en 1878, où elle fut l'objet d'une grande attention.

Brayton est le créateur des machines à combustion.

Son moteur est, le plus souvent, horizontal et toujours à double effet : il se compose de deux cylindres, l'un qui comprime l'air, l'autre qui produit le travail ; une petite pompe d'injection alimente le carburateur d'huile de pétrole. L'admission de l'air carburé se prolonge jusqu'au tiers de la course du piston : il brûle au fur et à mesure de son introduction dans le cylindre moteur ; une longue détente conduit le piston à fond de course. Les gaz brûlés sont expulsés par la course arrière du piston et la même série d'opérations se reproduit sur ses deux faces.

Les deux cylindres sont superposés : ils ont même diamètre, mais la course du piston compresseur est moins longue que celle du piston moteur ; le premier conduit la manivelle par l'intermédiaire d'une bielle, dont la tête est guidée par un balancier, sur la demi-longueur duquel est articulée une bielle très courte, qui mène le second piston. Ce dispositif est simple, mais il entraîne une forme disgracieuse dans son ensemble, par excès de hauteur du palier dans lequel tourne l'arbre du volant.

La pompe de compression est à double effet, comme le cylindre de travail. L'air comprimé s'accumule dans l'enveloppe du cylindre, faisant office de réservoir, et il passe de là aux carburateurs, dont les deux têtes du cylindre moteur sont munies, à travers l'ouverture A et la soupape s de la figure 4.

Un excentrique est spécialement chargé de mouvoir la petite pompe d'injection de pétrole : pour faciliter la mise en train, cette pompe est mobile à la main. MM. Thomson Sterne et C^o ont en outre eu l'idée d'accumuler de l'air à haute pression dans un tube en tôle de fer très résistant, de telle sorte qu'on soit dispensé de faire tourner le volant à la main, quand on veut mettre la machine en mouvement ; il suffit d'admettre cet air comprimé sur le piston moteur pour obtenir le premier tour du volant. La machine est par conséquent *self starting*.

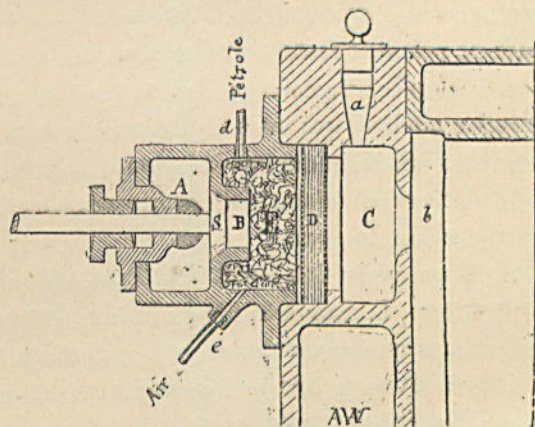


Fig. 4. — Carburateur Brayton.

La *Ready-Motor-Company* de Philadelphie a construit avec succès un grand nombre de moteurs de 1 à 10 chevaux, dont M. Musil a fait le plus bel éloge. L'Amérique a donc le mérite d'avoir vu naître le moteur à pétrole ; ses ingénieurs ont l'honneur de cette création et ses marchands y ont trouvé leur intérêt par surcroît.

Mais revenons en Europe où l'on réalisait encore d'incessants progrès.

Nous voyons apparaître à Cologne, en 1874, la machine Gilles, dans laquelle on s'est proposé surtout de corriger les défauts de l'infernal moteur de Deutz. Il s'agissait de supprimer le ferraillement des roues dentées et ces coups formidables de piston qui le faisaient comparer à un marteau-pilon ; pour atteindre ce but, Gilles eut recours à une combinaison de deux pistons adossés, entre lesquels détonait le mélange explosible : l'un deux (*Arbeits-Kolben*) était moteur, l'autre (*Flug-Kolben*) était libre et devait atténuer les chocs ; le premier agissait sur la manivelle de haut en bas, le second était lancé de bas en haut et se s'arrêtait qu'après que le travail résistant de la pression atmosphérique et celui de son poids avait absorbé sa force vive. Un arrêt ingénieux le maintenait au sommet de sa course jusqu'à ce que le piston moteur eût achevé son mouvement et fût revenu à son point mort de départ, sous l'action de la pression de l'atmosphère ; il redescendait alors et réoccupait sa position initiale.

Il est incontestable que l'idée de Gilles était heureuse et parfaitement applicable ; elle fut réalisée d'une manière convenable par la maison Humboldt, de Kalk, mais ce moteur fut beaucoup plus apprécié en Angleterre qu'en Allemagne ; il resta inconnu chez nous. Sa construction est abandonnée entièrement aujourd'hui.

La Compagnie des moteurs à gaz de Deutz aurait été gravement atteinte dans ses intérêts, si Gilles avait réussi ; elle sentit le péril et fit les plus grands efforts pour améliorer son type ; mais ce fut en vain. Il semblerait que les machines atmosphériques ne puissent rester économiques en devenant moins assourdissantes. Aussi vit-on tout à coup les ingénieurs de Deutz renoncer au bénéfice de l'exploitation de leur premier modèle, qui avait fait leur fortune et leur célébrité, et demander aux moteurs à transmission directe une solution complète du problème.

Ils dotèrent l'industrie d'un nouveau chef-d'œuvre : le moteur Otto a été longtemps la perfection du genre.

Il fit son apparition en 1878 à l'Exposition de Paris, en même temps que les moteurs de Bisschop, L. Simon et fils de Nottingham, et Ravel. Nous allons décrire successivement ces quatre machines ; elles n'ont assurément pas la même valeur pratique, mais présentent toutes des dispositions ingénieuses et nouvelles, qui ont fait époque dans l'histoire des moteurs.

La machine Otto est la réalisation pratique des idées de Beau de Rochas ; elle est à compression préalable et cette fonction importante est remplie par le piston moteur lui-même. Pour cela, le piston laisse derrière lui, à fond de course, un grand espace, dont la capacité est égale aux $\frac{2}{3}$ du volume engendré dans un demi-tour de manivelle ; ce serait dans une machine à vapeur un espace *nuisible*, c'est dans le moteur Otto un espace essentiellement *utile*.

Le cylindre fait double office, de pompe de compression et de moteur ; le cycle n'est fermé qu'après deux révolutions de l'arbre moteur, soit après quatre coups de piston, sur lesquels un seul transmet à l'arbre de couche une impulsion motrice. Le premier coup aspire le mélange explosible, le second le comprime ; dans le troisième, l'explosion a lieu avec détente, et les gaz résiduels sont expulsés en partie au quatrième (1).

Dans l'esprit des inventeurs, cette disposition devait avoir pour objet de diminuer la vitesse explosive, d'atténuer par conséquent les chocs et d'opérer une combustion lente dont la température est moindre. Nous nous réservons de discuter, dans un chapitre spécial la justesse de ces vues ; pour le moment nous voulons n'être qu'historien, et décrire les procédés mis en œuvre. Le mélange explosif est appelé dans la chambre de combustion par aspiration et il se mêle aux résidus de l'opération précédente : c'est une première cause de retard dans la combustion. De plus, le mélange actif est composé d'une manière spéciale. On introduit dans le cylindre, non pas un mélange unique et homogène, mais deux mélanges de composition différente : le premier est formé de dix à douze parties d'air pour une partie de gaz, alors que le second est très riche en gaz. Il en résulte que les parties les plus inflammables sont voisines du point d'allumage, tandis que le mélange le moins explosif suit le piston dans son mouvement de progression : l'inflammabilité et l'activité du mélange divisé en tranches décroissent donc à partir de la lumière. Otto a voulu de la sorte retarder la combustion explosive et amortir le choc sur le piston : il a réussi. Mais y a-t-il lieu d'attribuer à ce seul fait les éminentes qualités de sa machine ? La théorie que nous exposerons plus loin répondra à cette question qui a longtemps passionné les esprits.

Le mélange le plus explosif était logé dans une cavité, ménagée dans la culasse, de telle sorte que la flamme fût projetée comme un dard de chalumeau dans le cylindre et sillonnât le mélange combustible : la forme du tiroir avait été choisie à cet effet avec une rare intelligence. Tous les détails de ce moteur sont remarquables du reste et nous ne saurions trop les louer.

Les résultats pratiques du moteur Otto ont été excellents dès le début, au double point de vue de la régularité de marche et de la consommation : une dépense de 1.000 litres par cheval-heure était tout à fait courante dès 1878 : 35 litres d'eau suffisaient d'autre part pour rafraîchir le cylindre à 75°. En somme, le succès de la maison Otto a été complet et, de l'année 1877 au 1^{er} janvier 1881, on vendit 5.425 moteurs, représentant un total de 16.189 chevaux.

L'expérience démontrait donc que le cycle à quatre temps et le moteur à cylindre unique de compression, d'explosion et de détente était de beaucoup le meilleur à tous égards ; ces machines étaient du reste suffisamment robustes et leur marche était douce et silencieuse. Dès lors, tous les inventeurs empruntèrent à Otto son cycle, qu'on pouvait lui disputer, mais ils prirent soin de ne pas copier servilement les dispositifs qu'il avait créés et ils lui laissèrent les tranches et la combustion lente, dont il était bien

1. C'est le cycle à quatre temps (*vierakt* en allemand, *four cycles* en anglais).

l'inventeur. Pour défendre son bien, Otto se vit obligé de recourir à la justice ; des procès furent intentés aux premiers constructeurs qui osèrent faire cette sélection, et les tribunaux de Londres, de Leipzig, de Munich et de Paris eurent à décider si la marche à quatre temps était oui ou non la propriété des ingénieurs de Deutz. Le mémoire de Beau de Rochas constituait une antériorité sur l'examen de laquelle dût se concentrer toute l'attention des juges : la question était délicate, car il était clair que, si Beau de Rochas avait imaginé le cycle, Otto avait seul pu le rendre pratique ; en réalité, c'était bien Otto qu'on copiait, mais l'on s'en défendait et on ne parlait que de Beau de Rochas. Les divers tribunaux devant lesquels le litige fut porté jugèrent différemment : en Angleterre, Otto triompha, mais il fut battu ailleurs. Les brevets Otto de 1876 et 1877 devant expirer en 1891 et 1892, il en résulta un faible dommage pour la maison allemande. Bientôt, tous les constructeurs employèrent le cycle à quatre temps en rendant bruyamment hommage au génie de Beau de Rochas.

Le second moteur qui se fit remarquer à l'Exposition de 1878, était celui de M. de Bisschop : c'est par excellence le moteur de la petite industrie.

MM. Mignon et Rouart, qui en entreprirent l'exploitation, en construisirent surtout deux modèles de 6 et de 25 kilogrammètres, qui ne dépensaient que 10 ou 25 centimes par heure, au prix du gaz de Paris. On a cité de ces moteurs qui ont marché sans interruption deux ou même trois mois, jour et nuit, sans qu'on y touchât ; aucune machine connue jusque là n'eût pu réaliser cette merveille.

Une expérience de deux ou trois ans en avait déjà démontré les précieuses qualités quand ce moteur parut à l'Exposition. La dépense en gaz était, il est vrai, plus considérable que celle des moteurs Otto, à égalité de travail ; mais la différence était peu sensible pour les faibles puissances.

Le moteur de Bisschop appartient à une classe mixte : il utilise l'explosion à l'ascension du piston et la pression atmosphérique à la descente. Le mélange explosif est cantonné au bas du cylindre et il existe, entre ce mélange et le piston, un coussin d'air qui se chauffe et se comprime pendant l'explosion, pour se refroidir aussitôt après. En apparence, c'est une machine à simple effet, mais en réalité l'effet est double, attendu que le vide est utilisé dans la seconde phase du cycle comme dans les machines atmosphériques. Le refroidissement s'opère par des nervures venues de fonte, dont la surface rayonnante égale cinq fois celle du cylindre qui en est revêtu. Non seulement on n'est pas obligé de le refroidir par un courant d'eau, mais il faut même le chauffer au moment de la mise en train pour empêcher la condensation des eaux produites par la combustion et faciliter les premières détonations.

MM. L. Simon et fils exposaient un moteur qui présentait le plus grand intérêt théorique ; deux traits suffirent à le caractériser : ce n'est plus un moteur à explosion, mais à combustion, comme l'était le moteur Brayton ; il n'est pas à quatre temps, mais à deux temps, et il donne une impulsion par tour.

La compression s'effectue dans un cylindre séparé, d'où le mélange d'air et de gaz passe dans un cylindre de travail, en s'enflammant progressivement au contact du brûleur. A une introduction suivie d'une explosion subite, se trouve donc substituée une

inflammation continue et une dilatation à pression constante, qui pousse le piston en développant un travail moteur. Enfin, en s'échappant, les gaz chauffent une petite chaudière tubulaire alimentée par l'eau qui a circulé autour du cylindre ; la vapeur produite pénètre dans le cylindre avec une certaine tension, se surchauffe au moment de l'explosion et agit sur le piston, comme dans le cylindre d'une machine à vapeur. Cette action auxiliaire était considérable, et les inventeurs se plaisaient à faire remarquer que leur moteur pouvait marcher plusieurs minutes après la fermeture du robinet à gaz, par le seul effet de la vapeur.

La consommation du moteur Simon était, assure-t-on, d'environ 800 litres de gaz et 4 litres d'eau par cheval et par heure ; néanmoins, sa construction a été abandonnée. Mais le type de cette machine, a fait l'objet de nombreuses études dans la suite et nous y reviendrons dans le corps de cet ouvrage.

Il me reste à parler du quatrième moteur exposé en 1878, celui de M. Ravel, appelé par son inventeur à *centre de gravité*.

C'est une machine oscillante dans laquelle la force explosive est employée à élever un piston pesant. Cette masse, ayant atteint la partie supérieure du cylindre, agit alors à son extrémité comme sur un bras de levier et le fait basculer autour des tourillons dont il est muni. Mais, dès que le piston est revenu occuper le point le plus bas, une nouvelle explosion se produit et le chasse à l'autre extrémité du cylindre, devenue un point culminant, d'où il retombe encore et ainsi de suite. Sous cette impulsion périodique, l'arbre de couche qui forme le prolongement des tourillons prend un mouvement continu de rotation.

Ce moteur donnait le cheval-heure, affirmait-on, par une dépense de 600 litres, ce qui était vraiment remarquable à l'époque ; mais les constructeurs ne se soucièrent pas assez du côté pratique et leur moteur ne put même point fonctionner continuellement au Champ-de-Mars. L'idée était ingénieuse, mais sa réalisation était ardue : M. Ravel échoua ; nous aurons encore à citer son nom.

Telle était l'industrie des moteurs à gaz en 1878.

Le moteur était créé. Otto avait montré ce qu'on pouvait attendre de cette machine, dont la marche douce, régulière et silencieuse dépassait toutes les espérances ; il s'agissait de la perfectionner en la rendant plus économique. Pour cela, il fallait chercher à prolonger la détente, à réduire les pertes de calorique, à modifier quelques organes délicats et à diminuer les frais d'entretien. La brillante fortune de la maison de Deutz encouragea les chercheurs et de nombreux moteurs virent le jour : nous renonçons à les signaler tous, mais nous mentionnerons du moins ceux dont le rendement a été satisfaisant en caractérisant brièvement ce qu'ils présentaient d'original.

Un des plus remarquables est assurément celui de M. Dugald-Clerk : il fut exposé pour la première fois à Londres, en 1879, par MM. Thompson, Sterne et C^o. C'est un moteur à deux temps à deux cylindres, l'un de travail, l'autre de compression, celui-ci étant chargé en outre de balayer, par un courant d'air pur, les produits d'une explosion antérieure : à chaque tour de manivelle correspond une impulsion motrice, de telle sorte que la puissance de la machine est double, à égalité des dimensions prin-

cipales et que sa marche est beaucoup plus régulière. Cet objectif, très simplement réalisé, devint alors la pierre philosophale des inventeurs : il en est malheureusement un petit nombre qui aient réussi aussi bien que M. Dugald-Clerk dont nous retrouverons l'idée maintes fois sous des noms nouveaux, mais sous des formes presque identiques.

Les ateliers de Linden, près Hanovre, entreprirent vers le même temps la construction d'un moteur inventé par Wittig et Hees. Il se composait de deux cylindres verticaux renfermés dans un même bain d'eau ; la disposition d'ensemble était satisfaisante au point de vue exclusivement mécanique. Le régulateur seul présentait quelque nouveauté : le cylindre recevait une pleine charge ou bien il marchait à vide, suivant les besoins. C'était l'application du principe du réglage par admission *de tout ou rien*. D'après M. Schœttler, ce moteur le cédait à celui d'Otto pour la régularité aussi bien que pour la consommation ; des essais au frein ont fait évaluer à 1116 litres la dépense par cheval et par heure (1).

MM. Koerting frères, de Hanovre, ont exploité un brevet de M. Lieckfeld : il était assez voisin du précédent, dont il ne différait que par le mode d'allumage et la disposition des organes de réglage de la vitesse.

L'Allemagne a produit simultanément plusieurs autres types, parmi lesquels nous ne citerons que celui de M. Léo Funck, d'Aix-la-Chapelle : dans un cylindre horizontal étaient adossés deux pistons, moteurs tous deux, entre lesquels se produisaient l'explosion. Ce dispositif ingénieux a été reproduit récemment par des inventeurs qui croyaient l'avoir découvert.

Aucun de ces moteurs ne vint solliciter les suffrages des électriciens, lors de l'Exposition internationale d'électricité de Paris, en 1881 ; la Société de Deutz n'eut pas de concurrents parmi ses nationaux. Dans la Section française, on voyait les moteurs de Bisschop, en outre des machines Otto construites par la Compagnie française des moteurs à gaz ; enfin MM. Thomas, Sterne et C^{ie}, de Glasgow, présentaient le moteur Dugald-Clerk dans le compartiment anglais. La force des moteurs exposés dans les différentes sections variait de 6 kilogrammètres à 50 chevaux ; dans ces limites, la machine à vapeur était bien près d'être égalée par ses rivales de la veille.

C'était la première fois que, dans un concours international, le gaz osait se poser ouvertement en concurrent de la vapeur ; plus de 200 chevaux de force étaient empruntés à la canalisation de gaz destinée autrefois à éclairer le Palais des Champs-Élysées. Ce premier succès fut d'autant plus remarqué qu'il était moins attendu, car on avait fait une sorte d'axiôme de l'impossibilité d'appliquer les moteurs à gaz à la production de la lumière électrique : un grand nombre de lampes à arc et à incandescence étaient entretenues par les moteurs (2).

Tout le monde se lança dès lors dans cette voie et constructeurs et inventeurs montèrent à l'assaut des positions occupées par les heureux concurrents dont le travail

1. Schœttler, loc. cit., page 46.

2. M. Ayrton donna au Congrès des Electriciens une remarquable conférence sur le fonctionnement comparé des machines à vapeur et des moteurs à gaz, qu'il n'hésitait pas à mettre en parallèle.

persévérant et la foi aux moteurs allaient enfin être récompensés. Chaque année, la liste des brevets accordés en France s'enrichissait de plus de 30 spécifications de moteurs nouveaux. M. G. Richard a décrit et reproduit, dans son important ouvrage, 19 brevets anglais de 1881, 11 de 1882 et 20 de 1883. En Allemagne, 78 patentes de moteurs avaient été accordées à la date du 31 décembre 1881 : ce nombre paraît considérable, quand on songe que, depuis la création de l'empire allemand, il n'avait pas été inscrit plus de 17,000 brevets.

Il faut renoncer à émettre un jugement sur la valeur des projets qui ont pu surgir de la sorte avec une telle abondance : la plupart de ces brevets n'ont jamais été exécutés et il en est un petit nombre qui ait survécu à une première épreuve industrielle.

Nous ne ferons que signaler les idées les plus rationnelles en même temps que les plus originales, en faisant ressortir les perfectionnements qui peuvent en résulter et qui ont reçu une application immédiate.

Sir William Siemens attendait une grande économie de l'emploi des régénérateurs dans les moteurs à gaz : sa théorie, énoncée dès 1852, ne prit corps qu'en 1883. Elle consistait à refouler les gaz brûlés à travers une masse conductrice de très grande surface, capable de dépouiller ces gaz de leur calorique et de le restituer au mélange tonnant admis au coup suivant. En principe, cette opération ne peut qu'être économique, puisqu'elle fait entrer dans le cycle de la chaleur qui semblait perdue ; mais analysons le jeu d'un moteur pourvu d'un réchauffeur. Que résulte-t-il de ce qu'on transporte sur le mélange admis la chaleur des gaz de la décharge ? Il est manifeste que la température explosive des gaz se trouve augmentée. Théoriquement, c'est un grand avantage ; pratiquement, cet avantage peut devenir nul, car il sera nécessaire de refroidir plus énergiquement la paroi du cylindre, pour empêcher la production de températures élevées, incompatibles avec un bon fonctionnement du moteur. Du reste, au point de vue de la construction, il est fort difficile de réaliser un régénérateur efficace : on le compose le plus souvent d'une série de toiles métalliques superposées ; mais on crée de la sorte une résistance sensible au passage des gaz, ce qui entraîne une contre-pression sur le piston, et l'on est bien loin d'obtenir un système conducteur, également apte à soustraire la chaleur aux gaz chauds et à la restituer instantanément à un gaz froid. L'équilibre de température ne s'établit point aussi rapidement dans une toile métallique. Le régénérateur que je viens de décrire est celui de Stirling : il présente un inconvénient spécialement grave, pour les moteurs, de rougir quelquefois et par suite de produire des explosions intempestives. En somme, l'innovation de sir William Siemens constituait un perfectionnement contestable. Son moteur présentait par lui-même plus d'intérêt ; il reposait sur l'emploi d'un piston différentiel qui comprimait le mélange tonnant par sa face de moindre surface et emmagasinait le travail de l'explosion par l'autre ; les gaz étaient comprimés dans un réservoir intermédiaire. Chaque tour contribuait donc au travail moteur. Enfin, en faisant agir l'étincelle électrique sur un liquide inflammable, débité goutte à goutte, Siemens cherchait à utiliser des gaz moins riches que le gaz d'éclairage.

Nous ne croyons pas que le moteur Siemens ait été construit et l'invention du maître paraît encore attendre sa réalisation.

M. Lenoir n'avait pas à craindre que son nom vint à être oublié, mais son moteur l'était assurément; à peine s'en construisait-il encore un ou deux par an, lorsqu'en 1883 un nouveau brevet rajeunit l'idée du début. L'habile ingénieur a su profiter de tous les progrès réalisés en 23 ans; son moteur était à quatre temps, comme le moteur Otto, mais il était caractérisé par une compression plus forte, que permettait l'emploi d'une soupape d'admission. Cette machine fut construite par MM. Mignon et Rouart et par la Compagnie parisienne du gaz; elle a joui longtemps d'une vogue justifiée.

M. Andrew a pris une patente, sous la date du 20 juin 1883, pour une machine très ingénieusement dessinée, dans laquelle la compression s'opérait dans un cylindre séparé, disposé en face du cylindre moteur, sur le même axe; les deux pistons étaient solidaires l'un de l'autre, et à chaque tour correspondait dès lors un coup actif. L'inventeur avait supprimé toute transformation de mouvement par roue dentée, et la commande de tous les organes se faisait directement, avec une simplicité remarquable. Deux tiroirs plans effectuaient, l'un l'admission du mélange, sous la dépendance du régulateur, l'autre, l'allumage par le brûleur.

Une excellente idée était celle de M. Seraine: il cherchait à prolonger la détente en allongeant la course du piston de manière à utiliser une plus forte proportion de la chaleur disponible et à abaisser la température des gaz à l'échappement; c'est ainsi que le moteur à gaz deviendra le plus parfait et le plus économique des moteurs. Pour réaliser son but, le savant ingénieur paraissait amené fatalement à augmenter outre mesure la compression préalable; il a évité cet écueil, tout en utilisant le piston moteur à la compression du mélange, en réduisant la section de ce piston sur la face qui opère la compression par une large augmentation de la section de la tige de ce côté. Le piston était donc moteur par une face et compresseur par l'autre; le mélange gazeux, pressé par la face supérieure, était envoyé dans une cavité intermédiaire, d'où il passait ensuite dans la chambre d'explosion. Si l'on peut en croire un journal, le moteur Seraine ne consommait que 600 litres par cheval-heure; il serait regrettable en ce cas que cette excellente machine ne se fût pas répandue davantage.

En même temps que ces moteurs cherchaient à conquérir une place au soleil, il en était d'autres qui renonçaient à la lutte et se retiraient de la scène; tel a été le sort du moteur Simon, auquel semblait réservé un meilleur avenir; telle a encore été la destinée du moteur Wittig et Hees.

À côté de ces moteurs élégants, silencieux, économiques, mais coûteux de construction et assez délicats, compliqués par la compression préalable, se développait alors une classe de moteurs moins parfaits, sans compression, recommandables surtout par la simplicité de leur construction, la compacité de leurs formes et leur bas prix; ils ont longtemps répondu à des besoins spéciaux, et sont bien représentés par le moteur de Bisschop, dont nous avons déjà parlé. La clientèle pour laquelle on construisait ces

machines se préoccupait avant tout de trouver des mécanismes robustes, des agencements peu compliqués et des machines peu coûteuses ; la question de la consommation était remise au second plan, et cela se comprend, quand il ne s'agit que de produire quelques kilogrammètres ou une fraction de cheval. De nombreux types ont conquis la vogue ; citons, parmi les plus remarquables, les moteurs Bénier, Forest, Baker et François ; l'Economic Motor, le Crown et le Parker, d'origine américaine, appartenaient au même genre. Nous en décrirons quelques-uns, bien qu'ils aient disparu des ateliers depuis plusieurs années.

C'est en 1883 que parut le moteur Griffin. Nous devons un hommage spécial au génie de cet ingénieur qui est le créateur des moteurs à *six temps*. Ce cycle lui permet de chasser complètement les produits de la combustion ; en effet, après le quatrième temps, il consacre deux temps à une aspiration d'air et à une expulsion de cet air et des gaz brûlés restés dans le cylindre : l'idée dominante est donc le contre-pied de celle d'Otto. Chose étrange : ce moteur est d'une régularité parfaite, ainsi qu'en a témoigné le concours ouvert, en 1888, entre les divers moteurs anglais, par la Société des Arts de Londres ; le moteur Griffin emporta le premier prix de régularité et il reçut une médaille d'or. Sa consommation fut de 784 litres par cheval-heure, gaz d'allumage déduit.

L'Exposition d'Anvers était attendue avec curiosité ; elle devait permettre d'apprécier les derniers progrès réalisés à la date de 1885.

On y retrouva les moteurs Otto, Kœrting et Andrew ; deux machines à peu près nouvelles y firent leur apparition, celle de Warschalowski, exposée par la maison Hœrde et C^o de Vienne, et celle de Benz, présentée par la maison de ce nom de Mannheim.

Warschalowski avait beaucoup emprunté à Otto, mais il avait réalisé un petit moteur vertical très bien conçu, à compression, dont le cylindre occupait la partie supérieure, comme dans les machines à pilon.

Le moteur Benz, qui a été construit d'abord par les ateliers d'Aubrives et dont M. Roger a entrepris depuis lors la construction et l'exploitation, pour la France, a excité à bon droit l'intérêt des ingénieurs compétents. L'inventeur de cette belle machine à deux temps a résolu très simplement le problème de la compression préalable, combinée avec la périodicité d'une impulsion motrice par tour de manivelle. Voici de quelle manière il procède : considérons le cycle à partir du moment où le piston, ayant atteint le point-mort arrière, revient sur lui-même et expulse les produits de la combustion précédente ; la soupape de décharge est alors largement ouverte. Or une seconde soupape livre passage simultanément à un courant d'air forcé, qui vient balayer les gaz brûlés, et active si bien la décharge, qu'au milieu de la course rétrograde du piston, le cylindre ne contient plus que de l'air pur ; une demi-course a donc suffi pour effectuer la décharge. Les deux soupapes se ferment dès lors et la compression de l'air, confiné derrière le piston, commence aussitôt. Pour introduire le gaz nécessaire à la constitution du mélange tonnant, il faut recourir nécessairement à une pompe, qui est commandée directement par la crosse de la tige du piston

moteur et partage son mouvement. Le mélange est achevé quand le piston est à fond de course ; une étincelle venant à jaillir, l'explosion aura lieu et donnera son impulsion motrice à l'arbre de couche. Le nombre de ces impulsions est ainsi très élégamment rendu égal au nombre de tours de la manivelle.

Un moteur manquait à l'Exposition d'Anvers ; cette absence devait être attribuée sans doute à son extrême jeunesse, car il était né en 1884, mais son mérite le plaça rapidement au premier rang : nous voulons parler du Simplex, créé par Edouard Delamare-Deboutteville et Léon Malandin et construit par les ateliers Powell, de Rouen. Ce moteur est du type à compression et du genre Otto ; mais en modifiant l'allumage, le mélange des gaz, le mode de régulation, la distribution et la mise en marche, ses inventeurs ont produit une œuvre personnelle, qui mérite tous les éloges. Poursuivis par la maison Otto pour contrefaçon, ils n'ont eu, pour gagner leur cause, qu'à s'abriter derrière l'antériorité de Beau de Rochas et à montrer aux experts et aux juges les dispositifs particuliers et les perfectionnements importants dont on a officiellement constaté la nouveauté. Nous décrirons longuement ce moteur dans le corps de l'ouvrage ; pour l'instant, nous ne voulons que caractériser la machine, en nous plaçant uniquement au point de vue historique et dans le but de marquer les évolutions successives du moteur à gaz. L'allumage est électrique et il est effectué par une étincelle jaillissant continuellement dans une chambre de combustion, placée à l'arrière du cylindre et communiquant avec lui à temps voulu par un orifice percé dans le tiroir de distribution. Le mélange de l'air avec le gaz combustible s'opère dans un réservoir sphérique fixé contre le chapeau du tiroir. L'admission, opérée d'après le principe du *tout ou rien*, est réglée par un régulateur-pendule d'un ingénieux modèle. Enfin, la mise en route est obtenue élégamment par un *self-starter* fonctionnant bien et permettant à un seul homme de faire tourner un moteur de 100 chevaux. Dès 1885, nous relevons une consommation de 561 litres de gaz à 5.400 calories, à 0° et 760 millimètres, par cheval-heure dans un moteur Simplex de 8 chevaux. Le moteur Otto, dont le tiroir se prêtait mal aux fortes compressions, et dont les promoteurs, imbus de la théorie des tranches, restaient obstinément réfractaires à ce perfectionnement si rationnel du cycle, était alors loin d'atteindre un pareil rendement.

Dans l'intervalle de temps qui sépare les Expositions d'Anvers de 1885 et de Paris de 1889, nous voyons apparaître les moteurs Kœrting-Boulet (disposé verticalement), Durand, Daimler, Tenting, Belmont-Chabout-Diederichs, Gotendorff, Noël, etc..

MM. Durand, Daimler, Tenting, Diederichs avaient pris spécialement pour objectif la marche à l'air carburé par les éthers de pétrole ; il ne faut point pour cela de modifications essentielles au moteur, mais le carburateur doit être étudié avec soin, si l'on veut obtenir une marche bien régulière. Ces moteurs, qui consomment environ un demi-litre de carbure par cheval-heure, sont appelés à rendre des services dans les localités dépourvues d'usine à gaz d'éclairage ; on s'approvisionne, en effet, assez facilement de gazoline de densité 0,650 à 0,700 et les prix n'en sont point élevés. La plupart des moteurs peuvent être alimentés d'air carburé.

Mais l'emploi de l'huile de pétrole serait souvent plus avantageux; nous appelons pétrole l'huile plus dense, pesant de 800 à 850 grammes par litre; c'est l'huile *lampo* de l'économie domestique. Elle présente de sérieux avantages sur les pétroles légers (éthers et gazolines), parce que, d'une part, la manipulation de ces substances volatiles n'est pas sans danger, et, que d'autre part, comme les gazolines ne se vendent pas partout, elles font courir le risque d'un approvisionnement interrompu.

Tous ces inconvénients disparaissent, quand on substitue aux pétroles légers les huiles qu'on trouve dans les moindres villages, et dont les règlements de police garantissent à un certain point la qualité, en fixant sa densité minimum et son inflammabilité, pour la plus grande sécurité du consommateur.

La question était posée depuis plus de vingt ans et elle avait été résolue élégamment par Hock de Vienne, en Autriche, et par l'ingénieur américain Brayton, dont nous avons déjà cité les noms; leurs deux machines donnaient des résultats assez satisfaisants pour qu'on pût les utiliser dans les petites industries. Elles consumaient en marche industrielle moins d'un litre de pétrole par cheval-heure effectif (1); c'était relativement peu, mais cela parut encore trop aux intéressés, car l'invention végéta pendant quinze ans.

Ce n'est pas à dire qu'on l'eût perdue de vue ou qu'on y eût renoncé, car Brayton modifiait sans cesse son premier moteur. Le type primitif de 1872 tenait beaucoup du moteur Simon, attendu qu'il était aussi un moteur à combustion, donnant un coup par tour; en 1882, la *Brayton Engine Company* de Boston améliorait le carburateur sans renoncer à la combustion, et la dépense s'abaissait à 0 lit. 700 de pétrole par cheval-heure effectif, ce qui constituait un progrès; enfin, en 1889, Brayton adopta, comme tout le monde, le cycle à quatre temps, en conservant les plus ingénieuses dispositions de ses précédentes machines.

Entre temps, de nombreux brevets avaient été pris: notons ceux de Capitaine, Priestman, Knight et Grob, qui s'exploitent encore avec succès aujourd'hui et dont les consommations ne dépassent guère un demi-litre.

Mais il nous faut revenir aux moteurs à gaz.

Nous avons dit que la plupart des constructeurs se trainaient dans l'ornière d'Otto: il y a néanmoins de notables exceptions à signaler et nous devons une mention spéciale à MM. Rollason et Atkinson.

Le premier, dont la patente remonte à 1886, a adopté la marche à six temps de Griffin: cet allongement du cycle est utilisé pour expulser complètement les gaz brûlés, ce qui est déjà en opposition avec les principes d'Otto et de son école; de plus, il pratique la mise du feu au point où la charge est la moins riche, car il cherche à former le mélange le plus riche contre le piston et non pas au fond de la culasse. Ces particularités donnent à l'étude de ce moteur un certain intérêt.

M. Atkinson s'était fait depuis longtemps un nom parmi les spécialistes voués à l'étude des moteurs à gaz; en 1879, il prenait une patente pour un moteur à com-

1. C'est le résultat d'un essai fait, en 1878, par M. Dugald Clerk, sur un moteur Brayton, de 4 chevaux.

pression ; en 1881, il se faisait breveter pour un moteur différentiel du premier type, à deux pistons opposés dans un même cylindre ; enfin, le 12 mars 1886, il spécifiait son *cycle-engine* dont nous allons esquisser les grandes lignes.

Le cycle d'Otto dans lequel la course de compression est de même longueur que la course de détente, présente le grave défaut de donner une détente incomplète ; j'avais fait ressortir les inconvénients de cette grave imperfection. Atkinson la corrigea en établissant une liaison particulière entre la tige du piston et l'arbre de couche, de telle sorte que le cycle soit composé de quatre temps inégaux ; la course d'admission n'est que la moitié environ de la course de travail, et le volume admis n'est par suite égal qu'à une demi-cylindrée. Mais ce volume se détend, après explosion, dans le volume total du cylindre. L'idée est heureuse et très rationnelle : elle donnerait de fort bons résultats, si le dispositif cinématique adopté n'abaissait un peu le rendement organique de ce curieux moteur et ne produisait une usure rapide.

Les mérites relatifs de ces divers moteurs ont été mis en lumière par le concours ouvert à Londres, en septembre 1888, sous les auspices de la *Société des Arts* : ce concours a fait époque dans les annales des moteurs à gaz. Une circulaire fut adressée, dès le mois de février 1886, à tous les constructeurs anglais de moteurs, pour les inviter à présenter leurs machines à un jury et les soumettre à des essais comparatifs : treize concurrents se mirent sur les rangs ; mais il n'en resta que trois en lice le jour de l'épreuve définitive : ce furent les moteurs Atkinson, Crossley et Griffin. Le gaz employé fut analysé à chaque épreuve par M. Charles Wilson et l'on tint compte de son pouvoir calorifique : c'était nécessaire, car on ne peut juger un moteur que par le nombre de kilogrammètres fournis par calorie. La machine Atkinson fut placée au premier rang pour sa régularité et l'économie de son fonctionnement : un moteur de 10 chevaux consomma 632 litres par cheval-heure, ignition comprise, 618 litres, sans ignition ; il s'agit du *horse-power* effectif anglais, de 75,9 kilogrammètres par seconde. Les machines Crossley et Griffin furent *ex-æquo* au second rang et ces deux machines reçurent aussi une médaille d'or, celle de Crossley pour son rendement, celle de Griffin pour sa remarquable régularité de marche : la marche à six temps se trouvait réhabilitée par ce succès inattendu.

Nous arrivons à la veille de l'Exposition de Paris de 1889 : c'était une occasion solennelle de montrer au public à quel degré de perfectionnement étaient parvenus les moteurs à gaz ; aussi se mit-on à l'étude de toutes parts et de nombreux constructeurs se préparèrent de longue main à ce tournoi industriel international. Nous avons consacré un article aux moteurs à gaz parus à cette Exposition (1) et nous avons essayé de caractériser le mouvement de progression très marquée, qu'on a pu constater au Champ-de-Mars. M. Wehrlin, a publié sur le même sujet une excellente conférence qu'il avait faite à l'Association des anciens élèves de l'Ecole Centrale ; enfin M. Ebbs, de Magdebourg, a donné à l'Institut des ingénieurs allemands un travail très intéressant intitulé *die Gasmotoren der Pariser Weltaustellung*.

1. A. Witz : *Les Moteurs à gaz*, dans le *Bulletin technique de l'Exposition Universelle de 1889* (E. Bernard et C^e, Paris).

Cette Exposition marqua le triomphe de la compression ; sur 53 machines exposées, il n'y avait que quatre moteurs du premier type sans compression : tous les autres appartenaient au second type à compression, à deux ou à quatre temps.

La Société des moteurs Otto avait un stand superbe et elle se plaisait à mettre le public au courant de ses succès en annonçant qu'elle avait placé 12.800 moteurs en Angleterre, 6.800 en Allemagne, 3.450 en France, 2.900 en Amérique, 900 en Italie, 800 en Belgique et en Hollande, etc. ; la puissance totale des machines vendues dépassait 110 000 chevaux. Les moteurs Crossley, Simplex, Lenoir, de Bisschop, Ravel, Durand, Griffin, Benz, Forest, Bénier, etc., étaient représentés par les modèles les plus élégants et les plus divers.

Parmi les moteurs nouveaux nous citerons ceux de MM. Charon, Niel et Lalbin.

M. Charon n'avait point péché par excès de modestie en s'octroyant le nom d'*incomparable* : c'était prétentieux, quel que fut le mérite incontesté de cette machine. Mais la plupart de ses concurrents auraient eu tort de lui reprocher cet excès d'euphémisme, car à les entendre et à lire leurs prospectus, chacun d'eux avait inventé une merveille. Cette frivolité de la réclame nuit aux intérêts de l'industrie des moteurs à gaz, car elle témoigne d'un charlatanisme dont les constructeurs de machines à vapeur se gardent avec soin. Le moteur à gaz n'a plus besoin de ces éloges hyperboliques, ni de ces coups de grosse caisse, qu'il faut laisser aux fabricants de savon et de chocolat ; il se recommande bien assez de lui-même. Le moteur Charon réalisait jusqu'à un certain point un *desideratum* que nous avons formulé depuis longtemps, nous voulons dire le prolongement de la détente : il doit en résulter une meilleure utilisation de la chaleur, un abaissement de la température toujours trop élevée des gaz de la décharge, et partant une notable amélioration du rendement. M. Charon y a réussi, en gardant le cycle à quatre temps, grâce à un dispositif ingénieux permettant de laisser fuir, par une soupape *ad hoc*, une partie du mélange tonnant comprimé laquelle est remise provisoirement dans un long tuyau ouvert à l'air libre, à travers lequel se fait l'aspiration d'air au coup suivant. J'ai été appelé à faire à Solre-le-Château (Nord) des essais sur un des premiers moteurs Charon, en avril 1889 ; j'ai relevé une dépense de 535 litres à 0° et 760 millimètres par cheval-heure, mais il faut reconnaître que le gaz employé était exceptionnellement riche, attendu que je lui ai trouvé un pouvoir de 5.980 calories par mètre cube. Néanmoins, ce résultat était des plus remarquables, et mon rapport le fit valoir ; j'attirai spécialement l'attention des ingénieurs sur la température relativement très basse des gaz de la décharge, qui suffisait pour expliquer l'amélioration constatée dans le rendement.

M. Niel s'était déjà fait connaître autrefois par un moteur à compression dans un cylindre spécial et par un moteur compound ; mais à l'exemple de tous les premiers inventeurs, il avait abandonné ces divers genres pour adopter le genre Otto à quatre temps. Son nouveau distributeur se composait d'un robinet conique, faisant une révolution pour deux tours de la machine et opérant tour à tour l'introduction des gaz tonnants dans le cylindre, leur détente et leur allumage : un ingénieux dispositif de décollement du boisseau empêchait son grippement. M. Niel avait augmenté la dé-

tente en limitant l'aspiration aux deux tiers de la course du piston : c'était une invention originale dont la portée a été mieux appréciée dans la suite.

M. Lalbin, à l'exemple de M. Daimler, avait pris pour objectif de faire une machine compacte et légère : il y avait réussi, car son moteur de 2,5 chevaux ne pesait que 100 kilogrammes ; on n'avait jamais rien obtenu de pareil. Trois cylindres moteurs étaient groupés radialement autour de l'arbre moteur, comme dans les machines à vapeur du genre Brotherhood ; les trois manivelles se trouvaient donc calées à 120° l'une de l'autre.

En somme, l'exposition de 1889 témoignait de réels progrès dans l'établissement et la construction des moteurs, dont la consommation était réduite maintenant à 600 litres par cheval-heure effectif, avec un gaz de ville possédant un pouvoir moyen de 5.250 calories : c'était le résultat des hautes compressions préconisées par la théorie et pratiquées avec succès par les meilleurs constructeurs. L'apparition au Champ-de-Mars des grands moteurs Otto et Simplex de 100 chevaux a fait époque ; le premier était à quatre cylindres, le second développait au contraire cette puissance par un seul cylindre, et il pouvait être alimenté par un gazogène du système Buire-Lencachez.

A partir de ce moment, le moteur à gaz avec son gazogène se plaçait dans la catégorie des moteurs de la grande industrie.

Il allait dès lors entrer dans une nouvelle phase de son évolution.

Il y a en effet trois périodes distinctes dans l'histoire du moteur à gaz : la première, qui est la période d'invention, s'étend jusqu'en 1860 ; le moteur existait, mais il ne marchait pas. M. Lenoir a eu le mérite d'en tirer un travail régulier et continu et nous saluons en lui le créateur du moteur industriel ; mais c'est à Otto que revient la gloire d'avoir perfectionné l'œuvre de ses prédécesseurs en créant pratiquement le moteur à compression à quatre temps, dont les qualités et le rendement dépassaient tout ce qui avait été réalisé jusque-là. Une pléiade d'inventeurs et de constructeurs avaient développé ce genre de moteurs en y apportant la contribution efficace de leur activité et de leur ingéniosité. C'était la seconde période.

Le moteur à gaz commençait dès ce moment la lutte avec la machine à vapeur et il se répandait partout.

III

Période d'expansion.

À l'Exposition de Paris de 1889, 31 exposants avaient présenté 53 moteurs à gaz de types différents, dont la puissance totale dépassait mille chevaux ; or il n'y avait eu que six moteurs à l'Exposition de 1878. Cette rapide et étonnante progression frappa vivement le public et fit aux nouveaux moteurs une réclame qui contribua à leur vul-

garisation plus que les diplômes d'honneur et les médailles que le jury leur décerna d'ailleurs avec parcimonie.

Il était dès lors difficile de trouver une industrie qui ne les employât pas.

Les ouvriers en chambre de tout genre, les joailliers, les imprimeurs, les serruriers, les couteliers, les menuisiers et les charcutiers n'étaient plus les seuls clients du moteur à gaz, mais on voyait ces machines, devenues plus puissantes, actionner des moulins, des tissages, des filatures, de vastes ateliers de construction, de considérables stations centrales d'électricité ; nos pronostics formulés antérieurement étaient confirmés et se réalisaient au delà de toutes nos espérances : les moteurs de cent chevaux existaient et marchaient.

A quand le moteur de cinq cents et de mille, disait-on.

Cela ne devait pas tarder.

Essayons de caractériser la situation des moteurs en 1890, au lendemain de l'Exposition : nous n'avons qu'à reproduire ce que nous écrivions alors (').

C'est le moteur à quatre temps qui tend à prévaloir sur les autres types : l'expiration des brevets Otto de 1876 et de 1877 a mis dans le domaine public le cycle à quatre périodes, réalisées dans un seul cylindre, d'un seul côté du piston moteur, avec conservation d'une partie notable des produits de la combustion de l'explosion précédente.

On s'occupe beaucoup moins qu'autrefois de la formation de couches hétérogènes, de l'allumage au point mort, etc. : l'ingénieux tiroir Otto, qui permettait d'équilibrer peu à peu les différences de tension dans le cylindre et dans les canaux servant à l'inflammation est presque abandonné et remplacé par des soupapes ; on attache beaucoup moins d'importance à faire pénétrer la flamme d'un mélange explosif plus énergique dans un espace rempli d'un mélange pauvre, parce que les fortes compressions facilitent beaucoup les mises de feu.

Les compressions sont devenues tellement considérables et les vitesses de piston si grandes que l'on se garde bien plus contre les allumages prématurés et intempestifs que contre les ratés d'allumage. En définitive, le type à quatre temps est presque seul employé et il a permis de construire des moteurs robustes, fort condensés, de plus en plus économiques : la concurrence achèvera de les rendre peu coûteux en amenant une baisse notable des prix. Voilà où en est dès ce moment le moteur à gaz.

L'allumage des moteurs s'effectue de préférence par des tubes incandescents : on est bien près d'avoir trouvé le moyen de construire des tubes rougissant facilement, ne s'oxydant pas et durant par suite longtemps, sans coûter trop cher ; en attendant le tube de fer constitue déjà une bonne solution du problème.

Plusieurs constructeurs s'en tiennent de préférence à l'allumage électrique, à l'aide de bobines de Ruhmkorf, alimentées par des piles ou des magnétos ; les piles imposent dans les ateliers une sujétion gênante et l'emploi des magnétos entraîne des complications ; mais l'électricité présente le précieux avantage de permettre un réglage mathématique du moment de l'explosion et de se prêter aisément aux mises en route automatiques.

1. *Bulletin technique de l'Exposition Universelle de 1889* (E. Bernard et C^{ie}, Paris).

Moteurs à gaz et à pétrole. — Wirz

La régularisation du mouvement des moteurs a fait des progrès : le principe du *tout ou rien* prévaut généralement, car il conduit aux consommations les plus réduites, mais il impose des volants plus lourds, pour effacer l'accélération produite par l'impulsion motrice. Quelques constructeurs règlent la vitesse en maintenant l'échappement ouvert, l'admission étant supprimée ; on évite ainsi le refroidissement de la paroi par l'admission d'une cylindrée d'air froid et l'on allège le moteur en supprimant la compression ; dans ce cas, une même masse de gaz subit alternativement la compression et restitue par sa détente le travail emmagasiné.

Pour ce qui est de la distribution, on tend de plus en plus à séparer les diverses fonctions d'admission, de préparation du mélange, d'allumage et de décharge ; la même évolution s'était produite autrefois dans la construction des machines à vapeur et avait fait prévaloir les quatre obturateurs Corliss ou Sulzer.

Très nombreuses sont les formes et les dénominations sous lesquelles se présente le moteur à quatre temps : nous en aurions une centaine à spécifier et à décrire, sans pouvoir signaler le plus souvent un organe spécial qui les caractérise. Ils diffèrent si peu les uns des autres qu'il est difficile quelquefois de trouver, en dehors de l'habileté et de l'honnêteté du constructeur, un argument en faveur de l'un ou de l'autre. Ce sont plutôt des marques de constructeurs que des brevets d'inventeurs qu'il faut prendre en considération pour se décider et faire un choix motivé : le plus souvent, il y aura lieu de tenir compte surtout de quelques accessoires, quand le prix ne constituera pas l'argument décisif.

A la suite de l'Exposition de 1889, le moteur à gaz grandit rapidement : Delamarre Deboutteville aborda résolument le diamètre de 870 millimètres, le plus grand qui ait été fait jusque là en cylindres de moteurs à gaz, et il installa chez M. Abel Leblanc, à Pantin, près de Paris, un moteur monocylindrique de 300 chevaux, qui devint un but de pèlerinage pour les ingénieurs qui voulaient voir de leurs yeux et se rendre compte. C'était aller un peu vite en besogne, on s'en aperçut bientôt, mais le succès relatif obtenu était une révélation. Les constructeurs suivirent le mouvement, toutefois ils avancèrent avec plus de prudence, et résolurent le problème des grandes puissances par les cylindres multiples.

Otto fit un 200 chevaux à quatre cylindres, placés deux à deux en face l'un de l'autre, ce qui forme un groupement compliqué, mais assure une régularité parfaite. A Godalming, en Angleterre, les ateliers Stockport atteignirent 400 chevaux par deux cylindres en tandem de 648 millimètres de diamètre ; il fallait relier par un cadre les deux têtes de piston, ce qui n'est pas une disposition parfaite.

La mise en train des moteurs à gaz, extrêmement aisée au début, alors que la compression préalable était faible et que la puissance des moteurs ne dépassait pas 10 à 12 chevaux, devint de plus en plus difficile à mesure que les fortes compressions se généralisaient et que la puissance des moteurs augmentait. Otto chercha le premier à rendre la mise en route moins laborieuse en supprimant la compression pendant le temps qu'on tournait au volant : pour cela, il remplaçait la came de commande de l'échappement par une autre came, soulevant la soupape de décharge tous les tours.

Ces deux cames étaient généralement d'une pièce qu'il suffisait de faire glisser sur l'arbre pour supprimer la compression. Ce dispositif, excellent et fort simple pour les moteurs à quatre temps. a été copié par tous les inventeurs de second ordre qui ont perfectionné l'œuvre d'Otto, et il a suffi pendant quelques années aux besoins de l'industrie.

Pour les moteurs à deux temps, on disposait un robinet sur le cylindre de compression, de manière à ce qu'une partie du mélange se perdit dans l'atmosphère; cela n'a pas d'inconvénient sérieux et présentait l'avantage de réduire considérablement l'action à exercer sur le volant.

Malgré tous ces dispositifs, la mise en route restait pénible pour des moteurs de plus de 20 chevaux; elle serait impossible pour des machines de 100 chevaux.

L'intervention d'un appareil de secours (*self starting gear*) s'est donc imposée assez vite.

Plusieurs tentatives avaient déjà été faites par Brayton (1878), Dugald Clerk (1883) et Holt-Crossley (1884). Le procédé consistait à emmagasiner un certain volume de gaz dans un réservoir spécial, dont on utilisait la pression pour opérer une première poussée sur le piston moteur. Clerk n'hésitait pas à y comprimer un mélange tonnant: il y parvenait simplement en supprimant l'allumage à la fin du travail et en mettant le réservoir en communication avec le cylindre. Ce réservoir était en fer forgé, parfaitement étanche, à preuve qu'on a pu opérer des mises en route après six semaines d'arrêt: pour mettre en train, il n'y avait qu'à manœuvrer un robinet pour faire communiquer le cylindre avec le réservoir, et une première explosion entraînait le volant. Mais ce réservoir, chargé de gaz tonnants, constituait un dangereux obus, que l'on n'acceptait pas sans appréhension; aussi Holt et Crossley préférèrent-ils comprimer dans ce réservoir des gaz brûlés. Pour la mise en marche, il fallait alors arrêter le piston dans la position correspondante au début de la course motrice (1) et l'on faisait brusquement communiquer le cylindre avec la réserve comprimée; la pression chassait généralement le piston assez vivement pour qu'un cycle complet succédât à cette impulsion.

En 1884, M. Prentice avait pris un brevet pour revenir à l'utilisation d'une charge explosive en supprimant tout danger. En tournant au volant, on arrivait, par le jeu normal des organes, à introduire un mélange tonnant derrière le piston, sans compression, ou du moins sous une faible compression: il fallait alors allumer. A cet effet un petit cylindre auxiliaire était accolé au cylindre moteur; ce petit cylindre renfermait un piston à main, qu'on devait tirer vivement en arrière. Le cylindre moteur communiquait avec ce cylindre, que nous appellerons le cylindre d'allumage; le mouvement en avant du petit piston faisait baisser la pression du mélange actif en dessous de l'atmosphère. Il en résultait une aspiration de flamme, par un orifice d'allumage, et une explosion du mélange; la poussée était assez énergique pour entraîner le volant.

1. Le mieux est de placer la manivelle à 35°.

En 1884, nous relevons encore les brevets anglais de Magee, Norrington et Imray.

En 1885, Atkinson et Bickerton prennent aussi des patentes pour la mise en route automatique ; en 1886, c'est Humes, puis c'est Lea, en 1887. Nous retrouverons ces noms tout à l'heure et ne croyons pas devoir insister sur ces premiers essais.

L'année 1888 fut marquée par une éclosion d'idées plus vive encore : nous relevons dans l'ordre de date suivant, les brevets Imray, Johnson, Rollason, Delamare-Deboutville et Malandin, Piers, Holt et Crossley, Rooks et Anderson.

L'année 1889, nous notons le brevet Paton ; le brevet Lanchester est pris en 1890.

Cet appareil a été appliqué pendant quelque temps aux moteurs Crossley.

Nouveau brevet Lanchester en 1891, suivi des brevets Bickerton, Williams et Fielding.

Atkinson reparait en 1892 avec Pinkney et Schwartz ; en 1893, Crossley perfectionne notablement ses premiers et nombreux brevets et la Compagnie Niel adopte à son tour un self-starter.

Essayons de caractériser le progrès des idées dans ces diverses patentes.

Rollason est revenu à l'idée du moteur auxiliaire, auquel la maison Otto et les ingénieurs allemands sont restés fidèles ; un levier à main permet d'interposer et de serrer un galet entre le volant du moteur et la poulie-volant du moteur de secours. C'est une solution sûre, mais peu élégante et assez coûteuse du problème.

La mise en train est relativement facile avec un moteur désembrayé ; mais les transmissions ne sont pas toujours munies d'un débrayage et M. Paton a cru devoir y suppléer en entraînant le volant de son moteur par un appareil automatique, n'agissant pas avant que la machine ait atteint une vitesse déterminée. Des masses de fonte, pouvant coulisser sur les bras d'un croisillon calé sur l'arbre moteur, à l'intérieur du volant, sont projetées par la force centrifuge contre l'intérieur de la jante de ce volant, lequel est fou sur l'arbre ; la pression des masses détermine une adhérence suffisante entre les masses du croisillon et de la jante pour entraîner celle-ci, quand le moteur est à vitesse ; avant cela, le moteur est libre. L'entraînement du moteur est donc progressif ; une garniture de cuir appliquée sur les masses assure l'adhérence. C'est une invention ingénieuse, assurément, mais inapplicable aux gros moteurs.

Bickerton a repris en 1891 l'idée de Prentice ; il aspire du gaz hors d'une poche en caoutchouc et l'introduit par un tuyau dans la chambre de combustion du moteur ; on ferme alors le robinet de la poche. Un tube cylindrique, renfermant un piston, est disposé contre le fond du cylindre moteur ; en tirant le piston à la main, on aspire une partie de la charge dans le tube ; ce tube étant relié à l'allumage, le mélange s'enflamme, détone et opère la mise de feu dans le cylindre. Le piston part en avant et le moteur tourne. Il n'y a plus qu'à isoler l'allumage du tube de mise en train.

Fielding emploie une réserve d'air comprimé, refoulé dans un récipient par les derniers mouvements du piston moteur, au moment de l'arrêt. Au moment de la remise en marche, on commence par amener le piston au commencement de sa course motrice, et l'on ouvre une prise de gaz, par laquelle on remplit le fond du cylindre ; ce gaz expulse l'air resté dans la chambre et vient s'allumer au bout d'un tuyau de faible

diamètre : il se produit une flamme qu'on laisse brûler un instant. Tout à coup et d'un même mouvement, l'on ferme la prise de gaz et l'on ouvre un clapet reliant le récipient d'air comprimé au cylindre. Il se forme ainsi un mélange tonnant, la flamme reflue au cylindre, l'explosion se produit et entraîne le piston. La mise en train est faite.

Dans l'appareil Williams, nous trouvons une idée neuve. Le tube d'allumage ordinaire porte à sa partie supérieure une soupape *s*, fermée en marche normale, que l'on ouvre quand on veut mettre en route. Comme toujours, le piston moteur est placé dans la position correspondante à l'allumage, au début de la course motrice ; le fond du cylindre est alors rempli d'air. Qu'on ouvre la prise de gaz et la soupape *s* ; le gaz traversant l'air forme un mélange explosif, trop pauvre aux premiers instants, qui donne une flamme au sommet du tube d'allumage, laquelle rétrograde bientôt et détermine l'explosion de mise en train. Or, la soupape *s* est disposée de telle sorte que la pression explosive la colle sur son siège. Une fois que le moteur tourne, on la ferme définitivement en agissant sur une manette.

Schwartz s'est ressouvenu de l'appareil de Kabath ; contre l'extrémité de l'arbre moteur s'appuie un bout d'arbre fixe, portant un barillet dans lequel est logé un vigoureux ressort, que l'on peut bander, soit à la main, soit en profitant des derniers tours du moteur à l'arrêt : l'action d'un cliquet maintient le ressort tendu. Quand on veut utiliser l'énergie emmagasinée dans le ressort, on embraie avec l'arbre moteur un tambour, qui sera mis en mouvement par le ressort, aussitôt que le cliquet aura été soulevé, et qui entraînera le moteur. Cette accumulation mécanique d'énergie peut présenter quelques difficultés, mais le procédé est en somme assez simple pour les petits moteurs.

La mode est revenue ensuite aux réservoirs renfermant un mélange tonnant fortement comprimé, à l'instar de ce que faisait M. Dugald-Clerk dès 1884 ; mais, pour obvier aux inconvénients et aux dangers d'une accumulation préalable dans un récipient qui peut manquer d'étanchéité ou faire explosion, on opère la compression au moment même de la mise en marche, à l'aide d'une petite pompe à main. Le réservoir ne présente plus aucun danger, car sa charge est réduite au volume qu'il faut pour un départ.

La compression faite (il suffit pour cela de 25 à 30 coups de pompe), on allume le mélange par un moyen quelconque et voilà le piston lancé ; il n'y a plus qu'à fermer la communication du réservoir auxiliaire avec le cylindre.

Quelquefois, pour mieux assurer l'effet de la charge introduite dans le cylindre, on immobilisait le volant pour totaliser l'effet total, sauf à lui rendre sa liberté une fois le moteur lancé : c'était le procédé de la Compagnie des moteurs Niel.

Tels sont les procédés généraux de mise en route automatique ; nous décrirons avec plus de détails quelques-uns de ces appareils dans le cours de l'ouvrage.

Complétons cet exposé en disant que, dans les stations centrales d'électricité, on emploie l'énergie accumulée dans les batteries d'accumulateurs pour la mise en route des moteurs. Il suffit de lancer dans la dynamo un courant égal au dixième de son

courant de régime, à l'aide d'un commutateur disposé *ad hoc*, et muni des résistances voulues, pour que le moteur soit entraîné.

Une page importante de l'histoire contemporaine du moteur à gaz, est celle qui a trait à la fabrication du gaz de gazogène pour les moteurs : nous ne saurions trop insister sur ce point qui est d'une importance capitale.

Le moteur à gaz venait à peine de naître à la vie industrielle que déjà l'on se préoccupait de l'alimenter autrement qu'au gaz de ville, dont le prix élevé pouvait compromettre le succès de la nouvelle machine. Le gazogène de M. Trébouillet fut appliqué à ce service dès 1862 (1). Le gaz à l'eau était produit dans des cornues chauffées à haute température, dans lesquelles une couche de charbon de bois incandescent était traversée par un courant de vapeur surchauffée.

M. Arbos, professeur à l'Université de Barcelone, produisait du gaz de gazogène en se servant aussi de charbon de bois, mais sans insuffler d'air dans la cuve. Le moteur aspirait directement sur ce générateur, dont la partie supérieure formait vaporisateur et surchauffeur, ce qui permettait d'utiliser les chaleurs perdues. Cette vapeur débouchait sous le cendrier, et s'y mêlait à l'air, avant de traverser le combustible. Il se produisait donc un gaz mixte, mélangé de gaz de fourneau et de gaz à l'eau.

M. Lencauchez estime que le gaz Arbos, dont nous ne connaissons pas l'analyse exacte, possédait un pouvoir de 1.350 calories au mètre cube, à 0 degré et 760 millimètres de pression. Mais, comme le moteur Lenoir de cette époque consommait 2 à 3 mètres cubes de gaz d'éclairage, fournissant bien près de 5.000 calories par mètre cube, il ne pouvait donner de bons résultats avec un gaz *pauvre* : aussi, dit encore M. Lencauchez, « si j'ai constaté que le moteur tournait régulièrement à vide, je reconnais que la moindre charge l'arrêtait net. »

L'idée d'alimenter les moteurs à gaz de gaz pauvre remonte donc à 1862 ; mais le succès ne répondit pas alors aux espérances des innovateurs.

M. Dowson reprit l'idée en 1878. L'ingénieur anglais ne chercha pas à produire la vapeur avec les chaleurs perdues, mais il se décida à employer une petite chaudière auxiliaire, sous 5 kilogrammes de pression, surchauffant la vapeur fortement, à 300° et même plus, par un serpentín d'acier logé dans le feu. La vapeur passe par une soufflerie en entraînant avec elle un grand volume d'air, qui arrive sous la grille dans le cendrier.

Dès 1879, MM. Crosley essayèrent d'alimenter leurs moteurs au gaz Dowson, et les résultats obtenus furent tels qu'en 1882 toute la force motrice de leurs grands ateliers d'Openshaw était développée par du gaz de gazogène.

Les ingénieurs de Deutz apprécièrent à sa juste valeur cet appareil nouveau, qui leur permettait de se passer des usines à gaz, et promettait de nouveaux débouchés à la construction des machines à gaz ; ils placèrent un grand nombre de gazogènes Dowson et en construisirent eux-mêmes dans la suite.

En France, c'est au moteur Simplex que fut faite la première application du gazo-

1. Communication de M. Lencauchez à la Société des Ingénieurs civils, le 2 octobre 1891.

gène Dowson : les essais du début remontent à 1884, et furent exécutés à Fontaine-le-Bourg (Seine-Inférieure). En novembre 1885, nous avons eu l'honneur d'être invité à essayer une installation de ce genre aux ateliers Powell à Rouen : les résultats furent des plus remarquables. Un moteur Simplex de 20 chevaux fut exposé au Havre en 1887, et alimenté, pendant toute la durée de l'Exposition, aux gaz pauvres. Delamare-Deboutville et Malandin reçurent, conjointement avec M. Dowson, une médaille d'or. Enfin, un moteur Simplex de 100 chevaux parut à l'Exposition de 1889, et il fonctionna, après quelques tâtonnements, sous les yeux des visiteurs de telle manière que la preuve fût faite des avantages que procure l'accouplement des gazogènes aux moteurs à gaz. Nos seconds essais de Rouen, de septembre 1890, ont été effectués sur ce moteur même, alimenté par un appareil Dowson, et ils ont établi que le cheval-heure effectif pouvait alors déjà être développé par la combustion de 612 grammes de combustible, anthracite anglais et coke.

Dans la suite, les moteurs Simplex furent alimentés par des gazogènes d'un modèle un peu différent, étudié et établi aux chantiers de la Buire, à Lyon, sur les indications de M. Lencauchez, et dénommé par ce motif gazogène Buire-Lencauchez. L'injecteur à vapeur, et par conséquent la chaudière à vapeur, étaient supprimés et remplacés par un ventilateur qu'il fallait actionner par le moteur. Les résultats obtenus à Abbeville, à Carignan, à Etrépany, etc., ont témoigné des qualités du gazogène Lencauchez.

En 1885, M. Gardie avait adjoint à l'ingénieur moteur qu'il construisait à Nantes, un gazogène soufflé à haute pression, dont nous avons analysé des produits en janvier 1887 ; le gaz obtenu était d'une grande richesse, car il développait plus de 1.500 calories par mètre cube, à 0° et 760 millimètres, et aucun autre gazogène ne nous avait encore donné un pouvoir aussi élevé. Cela tenait-il à la pression de l'air, à l'allure très chaude de l'appareil et à la quantité d'eau injectée ? Nous le discuterons plus loin. Disons tout de suite que le gazogène Gardie put être adapté au moteur du même nom, en formant avec lui un tout qui présentait des dispositions nouvelles : le gazogène alimentait directement le moteur sans gazomètre, ni scrubber, ni laveur.

M. Bénier est arrivé au même résultat en 1894, par des moyens tout différents, et plus simples encore ; au lieu de marcher à vent forcé sous haute pression, il fonctionne par appel à la façon d'Arbos et évite aussi le gazogène et le scrubber : la chaudière elle-même est supprimée, la vapeur étant produite par utilisation des chaleurs perdues.

MM. Fichet et Heurtey avaient introduit en France le gazogène américain de Taylor, qu'ils ont modifié et perfectionné et qui est devenu, grâce à eux, un des meilleurs que nous possédions encore aujourd'hui. Il en a été fait de nombreuses et très heureuses applications.

Nous arrivons à l'Exposition d'Anvers de 1894.

Elle présenta de l'intérêt pour les visiteurs français, qui y découvrirent (le mot est exact) des moteurs étrangers que nos revues techniques semblaient ignorer : sur soixante-cinq moteurs étrangers, il y avait quinze belges, trente allemands, quinze anglais ; cinq seulement étaient français ; ces derniers n'étaient d'ailleurs exposés que

par les deux maisons Niel et Boulet. Signalons, parmi les nouveautés de cette exposition : les moteurs Ragot (Belgique) ; Dürkopp, Grob, Hille, Kappel, Molitor (Allemagne) ; Fielding, Forward, Acmé, Tangye (Angleterre). En faisant la synthèse des idées qui paraissaient dominer, on constatait que la soupape triomphait définitivement du tiroir ; l'allumage par tube incandescent se généralisait avec ouverture libre pour les petits moteurs, avec ouverture commandée pour les plus grandes puissances ; les régulateurs d'inertie ou pendulaires étaient appliqués sur toutes les petites machines. L'aspect général des moteurs variait avec le pays d'origine : les allemands, formés à l'école de Deutz, conservaient les tiroirs d'allumage et les commandes par engrenages coniques, tandis que les anglais, suivant les indications de Crossley, préféraient les soupapes et les engrenages hélicoïdaux ; les premiers faisaient beaucoup de moteurs verticaux à pilon ; les seconds restaient fidèles au type horizontal ; l'impression générale était, en somme, plus favorable aux derniers, qui avaient créé des modèles plus élégants et mieux compris.

Les expositions suivantes, universelles de nom, régionales de fait, de Lyon, Bordeaux et Rouen, ont présenté assez peu d'intérêt, parce qu'on n'y a vu paraître que les moteurs dont les noms couvrent depuis longtemps nos murs de France et dont les dessins illustrent les dernières pages de toutes nos revues techniques : il n'y avait donc rien de nouveau. Mais les observations faites ci-dessus à l'occasion de l'exposition d'Anvers s'appliquent aussi à celles qui l'ont suivie.

A Bruxelles, en 1897, la présence des constructeurs étrangers a donné un peu plus de variété à l'ensemble, mais l'impression générale était bien encore celle que nous venons d'exprimer. Les moteurs Otto, Fielding, Tangye, Clark-Chapman, Hille, Acmé, Express, National, Robey, etc., répondaient à un concept uniforme, dans lequel il fallait des gens réellement experts pour démêler quelques divergences de détail plus ou moins importantes. Seuls les moteurs Letombe, à double effet et Polke, avec mécanisme distributeur à double vis hélicoïdale, présentaient quelque nouveauté : le premier a été couronné par un grand prix qui a honoré la construction française.

M. Letombe était revenu au double effet ; autrefois Lenoir, Beau de Rochas et beaucoup d'autres avaient déjà essayé d'agir sur les deux faces du piston ; on y gagnait évidemment de la puissance et de l'espace, mais on compliquait le cylindre par un stuffingbox à l'avant, et l'on pouvait redouter cet organe dans des cylindres soumis à des températures élevées, qui brûlent les bourrages et exposent à des grippements dangereux. Grâce à une longue détente, M. Letombe a surmonté cette difficulté et son moteur est remarquablement réduit de dimensions et ramassé dans ses formes. Il devait d'ailleurs réaliser bientôt un perfectionnement que nous signalerons plus loin.

Des concours auraient plus d'intérêt et d'utilité que ces expositions à grand orchestre : c'est la pensée qui avait inspiré, en 1895, à la Société technique de l'Industrie du gaz en France, le projet de préparer à Paris une exhibition toute spéciale de moteurs devant être soumis à l'examen d'une commission d'ingénieurs compétents, qui n'auraient prononcé entre les concurrents qu'après une série d'expériences va-

riées. On m'avait fait l'honneur de me demander d'organiser les travaux de la commission d'essais ; mais un concours aussi sérieux n'était pas de nature à plaire à des gens d'affaires qui veulent tous faire croire au public que leur machine est la meilleure, la plus parfaite et la plus économique de toutes. Le projet échoua donc faute d'adhérents !

L'idée était pourtant fort louable, et elle avait déjà abouti pour les moteurs à pétrole : on avait donc le droit d'espérer un meilleur accueil de la part des intéressés.

Trois concours remarquables avaient précédemment été organisés dans le but de mettre en relief les progrès réalisés par les constructeurs de moteurs à pétrole : ils ont eu lieu tous les trois dans le courant de l'année 1894, à Meaux, à Cambridge et à Berlin. M. Ringelmann, directeur des essais à l'École nationale de Grignon, avait su attirer à Meaux huit moteurs fixes ou locomobiles de MM. Niel, Hornsby, Grob, Griffin, Merlin et de la Société de Winterthur (en Suisse) ; aucun concurrent n'est parti les mains vides, attendu que tous ont obtenu une médaille d'or, de vermeil ou d'argent. M. Ringelmann avait tenu compte dans son classement du rendement thermique, des frais journaliers et de la construction des machines : le moteur Grob a eu le meilleur rendement thermique égal à 17,1 %, et il a encore été classé premier au point de vue des frais journaliers ; le moteur Griffin a eu la meilleure note de construction. M. Merlin a eu l'honneur d'être premier au classement général : MM. Grob, Griffin et Niel l'ont suivi de près.

C'est M. Capper qui a organisé le concours de la Société Royale d'agriculture de Cambridge ; il était assisté de MM. Ewing et Neville Grenville, ce dernier ayant été suppléé sur la fin des essais par M. Denison (1). Les concurrents étaient : la Britannia Co et MM. Campbell, Hornsby, Crossley, Samuelson, Fielding et Platt, capitaine Wells, Weymann et Hitchcock pour les machines fixes et demi-fixes, et MM. Campbell, Crossley, Clark-Chapman et Hornsby pour les locomobiles. Le moteur qui a consommé le moins de pétrole, allumage compris, a été un moteur de 7 chevaux de Crossley, dont la dépense n'a point dépassé 372 grammes par cheval-heure ; la locomobile des mêmes constructeurs a encore été la plus économique avec une consommation de 400 grammes pour un moteur d'une puissance de 10 chevaux. Pour éprouver l'endurance des machines, on les soumettait à la rude épreuve de trois journées de marche continue de dix heures, sans aucun nettoyage ; dans ce cas, la consommation moyenne était évidemment un peu supérieure à celle de l'essai ordinaire : ce sont les moteurs Crossley et Hornsby qui ont détenu le record de ce dernier genre d'essai.

L'Allemagne n'a pas voulu rester en retard, et la *Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft* a confié à MM. Hartmann et Schöttler le soin d'organiser un concours à Berlin : il a commencé le 15 mai, alors que celui de Meaux avait lieu le 19. On essaya douze locomobiles et quinze machines fixes de 12 à 21 chevaux. Nous relevons parmi les firmes engagées dans ce concours les noms de : MM. Altmann (de Berlin), Grob (de Leipzig), Januscheck (de Schweidnitz), Robey (de Breslau), Hütte (de Dresde),

1. *The trials of oil Engines at Cambridge, in The Journal of the Royal Agricultural Society of England*, tome V, 3^e série, 1894.

Langensiepen (de Magdebourg), Swiderski (de Leipzig), Bützke (de Berlin), Kœrting (de Linden) ; les sociétés représentées étaient la *Gasmotoren Fabrik* de Deutz, la *Daimler Motoren Gesellschaft* de Cannstadt (Wurtemberg), la *Motoren Fabrik d'Oberursel* (Seck et C^{ie}), la *Dresdener Gasmotoren Fabrik* (Moritz Hille), la *Bielefelder Maschinenfabrik* (Dürkopp) et la *Berliner Maschinenbau Aktien Gesellschaft* (Schwartzkopf). Cette énumération permet d'apprécier l'importance de ce concours, qui a fait l'objet d'un beau rapport dont nous extrayons ce qui suit ⁽¹⁾. Les épreuves au frein étaient quadruples et comprenaient une demi-heure de marche à vide, une heure à charge normale, une heure à demi-charge et un temps indéterminé au maximum de puissance possible, ce dernier essai devant durer cinq minutes au moins. L'épreuve pratique agricole pouvait atteindre une durée de soixante heures ; en même temps que le moteur actionnait une machine à battre, il devait mouvoir une dynamo à lumière, ce qui permettait d'apprécier sa régularité par le meilleur procédé ; mais ces derniers essais n'étaient permis qu'aux machines ayant déjà fourni de bons résultats aux premières épreuves au frein. C'est le moteur demi-fixe Swiderski de 10 chevaux qui a consommé le moins de pétrole, soit 375 grammes par cheval-heure effectif ; le moteur Altmann arrivait presque *ex æquo* avec 378 grammes. Beaucoup de machines consommaient de 400 à 600 grammes ; l'une d'elles monta à 1.190 grammes, et cela à pleine charge ! Ont été admises à l'épreuve de soixante heures les locomobiles Otto, Hille, Schwartzkopf, Seck et Swiderski, les machines fixes de Dürkopp, Langensiepen, Swiderski, Otto, Hille, Kœrting et Schwartzkopf.

L'utilité de semblables concours est incontestable ; les meilleures machines et les constructeurs les plus sérieux sont signalés aux intéressés, ce qui est un premier avantage ; l'opinion publique y gagne d'autre part un élément d'appréciation plus solide que celui qui ressort des réclames plus ou moins audacieuses qui revendiquent toutes les perfections pour leurs appareils. Enfin ces concours font la preuve officielle des progrès réalisés par la construction, et ils établissent nettement l'état présent de la fabrication. Les épreuves de Meaux, de Cambridge et de Berlin feront donc époque dans l'histoire des moteurs à pétrole.

A l'occasion de l'Exposition de Bruxelles de 1897, les Sociétés provinciales d'agriculture du Brabant et du Hainaut ont organisé un concours de moteurs et de locomobiles à pétrole, qui a encore présenté de l'intérêt.

L'année 1895 a failli être signalée par un combat singulier, par un match, entre deux concurrents réputés entre tous : la rencontre eût assurément vivement intéressé la galerie des spectateurs. Voici quelle a été la cause du différend : il n'y avait pas eu de gros mots échangés, encore moins de voies de fait commises, mais la Compagnie des Moteurs économiques avait annoncé des consommations inférieures à 500 litres pour un moteur Charon qu'elle installait à Bordeaux. « Tenez-vous l'engagement à pleine et à demi-charge ? » avaient demandé indiscrètement MM. Pierson, agents de la maison Crossley. On leur avait répondu en les provoquant à une épreuve

1. *Prüfung der Petroleum Motoren; Arbeiten der deutschen Landwirtschafts Gesellschaft*, volume VI Berlin, 1795.

comparative, et je fus choisi, d'un commun accord, par les deux parties pour décider entre elles. J'avais dressé le programme de la lutte et il avait été accepté de part et d'autre sans réserve. Mais il fallait que les concurrents puissent mettre en ligne deux moteurs de mêmes dimensions, les constituant dans des conditions d'égalité absolue ; cette difficulté ne put être surmontée.

La question à résoudre dans ce singulier conflit soulevé entre ces excellents moteurs était d'ordre théorique autant que pratique. En effet, il s'agissait de savoir si le cycle classique d'Otto, perfectionné par une haute compression, par une marche à grande vitesse, par un balayage des produits de la combustion, etc., pouvait donner le même rendement qu'un autre dans lequel la détente était prolongée au prix d'une variation de la compression. Voilà en réalité un curieux problème qu'il importerait de résoudre : il présente un réel intérêt, et des essais comparatifs faits à différentes charges auraient pu jeter quelque lumière sur ce point controversé.

Le moteur à quatre temps d'Otto ne donne certainement pas la dernière et la plus parfaite manière de transformer en travail l'énergie potentielle d'un mélange tonnant renfermé dans un cylindre. On pourrait faire mieux et nous allons développer cet aperçu,

Le cycle Otto, caractérisé par l'accomplissement des quatre temps dans un cylindre unique, en deux tours de manivelle, présente d'indiscutables avantages, qui lui ont valu la prééminence sur les moteurs à deux temps ; mais ce cycle soulève une objection, faite depuis longtemps, et à laquelle il paraissait très difficile d'échapper. C'est la suivante : le volume invariable de mélange admis, toujours égal à celui de la cylindrée, ne permet pas de détendre suffisamment les produits de l'explosion ; il en résulte une perte de travail assez importante, puisqu'on n'utilise pas toute l'énergie actualisée dans la déflagration ; par suite, les gaz s'échappent du cylindre à une température trop élevée, qui diminue le rendement thermique du cycle. Un grand nombre d'inventeurs ont cherché à corriger le cycle d'Otto de ce grave défaut ; Seraine, avait trouvé une élégante solution à laquelle on a eu tort de renoncer ; Charon a été un des mieux inspirés, mais il est tombé dans un autre défaut, résultant de la diminution de compression au prix de laquelle il réalise l'allongement de la détente ; or, cette diminution abaisse le rendement et compense en partie l'avantage obtenu, surtout quand le moteur travaille à faible charge. Niel avait eu une autre idée fort ingénieuse aussi, que nous avons déjà signalée ci-dessus ; il supprimait l'admission aux deux tiers environ de la course d'aspiration, et comprimait néanmoins à 3^h,5 ; la détente se trouvait ainsi allongée, mais il se produisait une dépression dans le cylindre à partir du moment où la soupape d'admission se fermait en phase d'aspiration du mélange ; de plus, l'admission n'était pas sous la dépendance du régulateur, qui opérait par prise de tout ou rien. Toutefois, il faut reconnaître que Niel obtenait fort simplement le résultat qu'Atkinson atteignait par son dispositif cinématique, si remarquable, mais si compliqué, du raccourcissement de la course d'aspiration et de compression. M. Heynen, dans le moteur Champion, a appliqué d'une autre manière le même principe ; une soupape disposée sur le côté du cylindre y laisse entrer de l'air

aussitôt que la soupape d'admission se ferme ; cette soupape reste ouverte, quand le piston revient en arrière pour commencer la compression, et elle ne retombe qu'après que le piston l'a dépassée dans son retour. Il y a donc aspiration d'air pendant un tiers de la course, et expulsion du même volume d'air pendant le premier tiers de la course de compression. Comme cet air est confiné au fond du cylindre, l'inventeur *suppose* qu'il ne se mêle pas au mélange renfermé dans le cylindre ; cette supposition ne se vérifie peut-être pas complètement en pratique, et il s'échappe sans doute un peu de gaz, mais la perte est minime, attendu que l'on obtient à peu près le même rendement suivant que l'air expulsé est jeté sur le toit ou bien remisé dans le socle du moteur.

Toutes ces solutions sont encore imparfaites.

Voici ce qu'il faudrait : on devrait faire fonctionner les moteurs à gaz comme fonctionnent les machines à vapeur, en admettant une charge tonnante de richesse constante, mais de volume variable, sous la dépendance du régulateur, suivant les besoins du travail et du réglage. De la sorte, le volume admis serait indépendant de la course du piston ; la détente pourrait être allongée à volonté, et elle serait maximum alors que le moteur travaillerait à moindre charge. La vitesse se réglerait donc sans supprimer aucune explosion, et chaque cycle de quatre temps aurait son impulsion motrice, sans qu'on soit exposé à avoir des ratés.

La maison Ganz avait exposé à Buda-Pesth un moteur conçu dans cet ordre d'idées. Il admettait un mélange de compression invariable, mais il en introduisait un volume variable, suivant la vitesse acquise et la position du régulateur.

M. Letombe a trouvé une solution équivalente en créant son moteur nouveau à admission de gaz variable sous l'action du régulateur. Mais on arrivait ainsi à avoir un mélange de teneur variable et l'on se trouvait exposé à introduire dans le cylindre des mélanges trop pauvres pour pouvoir exploser ; c'eût été une grave imperfection que M. Letombe a corrigée en augmentant la compression au fur et à mesure que la richesse en gaz du mélange diminue. Par ce moyen, le rendement thermique reste constant, et la marche à demi-charge continue d'être économique.

Personne ne s'intéressait plus depuis plusieurs années aux moteurs à combustion, genre Brayton, Simon et Gardie, quand un savant allemand a rappelé sur eux l'attention des constructeurs : nous lui devons une mention toute spéciale.

M. Rudolph Diesel, ingénieur à Munich, avait publié en 1893, une intéressante étude sur la théorie et la construction d'un moteur *thermique rationnel* destiné à supplanter les machines à feu connues aujourd'hui (1). L'auteur de cet intéressant travail y présentait une théorie nouvelle de la combustion, à la lumière de laquelle il se proposait d'énoncer les conditions qu'il faut remplir pour tirer d'une quantité de chaleur donnée la plus grande somme possible de travail. Passant de la théorie à la pratique, l'ingénieur bavarois établissait le projet d'une machine, analogue assurément

1. *Theorie und construction eines rationellen Wärmemotors zum Ersatz der Dampfmaschinen und der heute bekannten Verbrennungsmotoren.* Berlin, Julius Springer.

aux moteurs à air et à gaz, mais qui en différait essentiellement d'après lui, par le principe même qui l'avait inspirée. Il se faisait fort de démontrer que les moteurs mis en service précédemment étaient établis sur des bases fausses (dass sowohl Feuerluft als Gasmotoren principiell falsch arbeiten), et qu'il fallait renoncer à en tirer de meilleurs résultats aussi longtemps qu'on persévérerait dans l'erreur originelle de leur concept.

C'était une véritable révolution de la théorie ; il devait en résulter une révolution dans la pratique et l'on en escomptait par avance les brillants résultats.

Un premier essai de construction fut tenté dès l'année 1893 ⁽¹⁾ ; mais le nouveau moteur opérait des compressions si énormes, il réalisait de si grandes vitesses et il s'y développait des températures si élevées, que l'exécution des idées du maître se heurta à des difficultés pratiques insurmontables au début ; on voulut d'ailleurs employer d'abord comme combustible du charbon pulvérisé, et ce fut un autre écueil à franchir. On le tourna prudemment ; on sacrifia d'abord de la pression, puis on abandonna d'autres prétentions ; on aboutit, somme toute, en 1895, à un moteur de 12 chevaux, qui ne marcha pas trop mal. Enfin, en 1897, on put mettre sur pied un moteur de 20 chevaux, fonctionnant au pétrole, que nous décrirons plus loin, et qui donna de beaux résultats, officiellement constatés par un essai du savant professeur Schröter.

Ces expériences furent faites en présence d'ingénieurs délégués par des maisons de construction de tous pays, désireuses de s'assurer le privilège d'exploitation de ce merveilleux moteur ; on y vit aussi une commission française composée de M. Sauvage, professeur à l'École des Mines de Paris, Carié, ingénieur en chef des Forges et Chantiers de la Méditerranée, Merceras et Dyckhoff, constructeurs à Bar-le-Duc.

Les résultats furent remarquables ; la consommation de pétrole par cheval-heure effectif, en pleine charge, fut de 238 grammes et de 276 grammes à demi-charge ; or, les meilleures machines dépensaient généralement jusqu'alors de 300 à 350 grammes.

On cria la merveille dans toutes les revues techniques et le moteur Diesel fut l'objet de l'attention générale : il la méritait bien.

Mais les amis de M. Diesel se laissèrent emporter un peu trop loin par l'enthousiasme, lorsqu'ils annoncèrent qu'à bref délai les trains seraient remorqués par la nouvelle machine et que les transatlantiques feraient leur traversée à une vitesse double avec une consommation de charbon moitié moindre : nous n'en sommes malheureusement pas encore là. Ce n'est d'ailleurs pas la première fois qu'on nous fait espérer cette éventualité encourageante et les admirateurs des cycles de Stirling et d'Ericsson ont eu les mêmes illusions et, ajoutons-le, des déceptions égales à celles qu'on se prépare, en s'emballant outre mesure sur les résultats fournis par une machine à pétrole de 20 ou de 50 chevaux.

Le premier progrès à réaliser devra permettre l'emploi des gaz riches ou pauvres dans le moteur Diesel ; des essais ont été faits à Augsburg, mais ils ne paraissent pas avoir réussi.

1. *Diesel's Rationeller Warmemotor*; *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure*. Berlin, 1897.

Le moteur Diesel, tel qu'il est, est un moteur à pétrole, à combustion, et à quatre temps, grandement amélioré théoriquement par la haute compression préalable et pratiquement par la combinaison d'une marche à quatre temps avec la combustion. C'est peut-être ce fonctionnement à quatre temps qui a manqué au moteur Gardie pour obtenir de plus beaux résultats.

On s'est occupé beaucoup déjà des moteurs à combustion, mais la discussion théorique n'est pas épuisée et les recherches expérimentales ne sont encore qu'à leurs débuts : nous croyons que les très puissants moteurs de l'avenir seront des moteurs à combustion, avec admission en quantité variable d'un mélange de teneur constante.

L'année 1894 a été marquée par une application nouvelle du moteur à gaz qui lui a ouvert de plus vastes horizons et contribuera plus que toute autre à son expansion : je veux parler de l'emploi direct des gaz de hauts fourneaux.

Les moteurs de grande puissance étaient réalisés ; où allait-on trouver des gazogènes assez grands pour fournir les 1.800 mètres cubes de gaz qu'absorbe par heure un moteur de 600 chevaux ?

C'est ici qu'est intervenu le bon sens de tout le monde.

C'était un axiome indiscuté parmi les chimistes et les métallurgistes que les hauts fourneaux constituaient les meilleurs des gazogènes (1) ; on savait qu'un haut fourneau de 100 tonnes consomme au moins 100 tonnes de coke et fournit en vingt-quatre heures environ 400.000 mètres cubes d'un gaz dont le pouvoir calorifique est compris entre 900 et 1.000 calories ; on utilisait ces gaz du mieux qu'on le pouvait pour chauffer des appareils à air chaud du système Cowper Whitwell et pour produire la vapeur nécessaire aux machines soufflantes, aux pompes, aux monte-charges et aux concasseurs de minerais ; quelquefois, les gaz chauds étaient employés au grillage des minerais. En somme, on gaspillait beaucoup de mètres cubes de gaz, parce qu'on n'avait pas grand bénéfice à les capter, et l'on perdait beaucoup de calories, parce qu'on les utilisait mal. En effet, on a trouvé dans certaines installations nouvelles, parfaitement étudiées, que le cheval-heure effectif coûtait 8 m³ de gaz ; M. Lürmann, qui connaît parfaitement cette question, estime cette dépense à 12^{m³},6 et je suis porté à croire, à la suite d'expériences que j'ai faites, que ce chiffre est très souvent dépassé.

Dans un intéressant travail, publié dans *Stahl und Eisen*, en 1890, M. Gredt a estimé à 50.374.372 les calories utilisées par les chaudières adjointes à un haut fourneau de 100 tonnes, et à 339.633.147 les calories emportées par les gaz non recueillis. Quelqu'un a dû se dire un jour que le haut fourneau pourrait donc servir de gazogène à de puissants moteurs à gaz, qui tireraient un excellent parti des calories des gaz et permettraient de les employer en totalité : cet ingénieur était dans le vrai.

Est-ce M. Thwaite, M. von Echelhaeuser, M. Greiner ou MM. Bailly et Kraft, qui ont émis l'idée et l'ont lancée dans le public ? Je ne sais. Mais l'idée a fait rapidement son chemin.

1. C'est ainsi que s'exprimait, en 1878, M. Lencauchez, dans son *Etude sur les Combustibles en général*. Paris, Lacroix, page 58.

De petits moteurs de tout système furent essayés à Frondingham et à Wishaw, en Angleterre, en 1894, à Hörde, en Westphalie, le 12 octobre 1895, et à Seraing, en Belgique, le 20 décembre de la même année; ces dates montrent que ces essais ont été faits simultanément de divers côtés; les résultats furent encourageants partout et les études commencèrent aussitôt en vue de la généralisation et de l'extension du procédé.

Il s'agissait d'abord de s'assurer que le gaz de haut fourneau était *toujours* assez riche pour permettre une marche continue et régulière des moteurs. Le calcul assigne au gaz du haut fourneau un pouvoir qui oscille de 850 à 1.100 calories, suivant la proportion relative d'oxyde de carbone et d'anhydride carbonique (1); mais il fallait faire de nombreux essais pour contrôler ces résultats et ce calcul.

J'ai été amené à effectuer un grand nombre de déterminations de pouvoir à l'aide de ma bombe eudiométrique, qui permet une opération rapide et exacte; mes essais ont démontré que, malgré des variations considérables, le pouvoir calorifique des gaz de hauts fourneaux est généralement suffisant pour entretenir une marche continue et régulière des moteurs.

Restait l'objection des poussières entraînées hors des fourneaux par le courant qui les emporte dans les canalisations: M. Lürmann craignait que ce ne fût un obstacle à l'utilisation directe des gaz et ses craintes étaient partagées par la plupart des maîtres de forges. Ces poussières étaient, en effet, redoutables, car on estime qu'un mètre cube emporte avec lui 125 grammes de poussières; 100 grammes se séparent d'eux-mêmes dans les premières conduites, et on les repasse généralement aux fourneaux; 23 grammes qui accompagnent le gaz à grande distance, peuvent toutefois être retenus assez facilement encore dans les épurateurs; mais 2 grammes sont à un état de ténuité et de sublimation tel qu'on ne peut les arrêter par aucun moyen de lavage et d'épuration et ils traversent les lames d'eau qu'on leur fait rencontrer sans se mouiller et, par suite, sans abandonner le gaz qui les entraîne avec lui dans le moteur.

La question était de savoir si ces poussières s'y arrêteraient. Des précautions minutieuses furent prises à Seraing, à Differdange, à Hörde et ailleurs, et l'on multiplia les scrubbers et les appareils laveurs; la précaution était bonne, car on eut partout des ennuis par l'obstruction des soupapes; mais de faciles tours de main, que chacun a découverts et qu'il se garde bien de confier à son voisin, ont permis de supprimer presque entièrement tous ces épurateurs, et on se contente aujourd'hui, dans bien des cas, de chambres à chicanes avec rupture de courant contre une nappe d'eau ou munies de pulvérisateurs, qui suffisent souvent du moment qu'ils refroidissent bien les gaz: cette condition est plus importante qu'on ne l'avait cru d'abord.

Les poussières très fines qui ne sont pas fixées par ces épurateurs rudimentaires sont entièrement retenues par des ventilateurs à injection d'eau, qui brassent mécaniquement les gaz, malaxent dans l'eau les produits étrangers et les rejettent sous forme de boues. Cette invention si simple paraît due à un contremaître de Dudelange;

1. Nous empruntons les chiffres qui suivent au savant et remarquable rapport présenté par M. Greiner, directeur général de la Société Cockerill, à l'*Iron and Steel Institute*, en mai 1898.

MM. Lencauchez et Meyer ont recueilli l'idée et l'ont remarquablement développée. Les poussières qui pourraient encore accompagner les gaz au taux de 1 à 2 décigrammes par mètre cube, ne sont plus retenues par le cylindre des moteurs, et on constate que les gaz de l'échappement forment à la sortie du cylindre le même brouillard blanc qu'on voit apparaître au sommet des cheminées des fourneaux.

On redoutait aussi les variations de pression qui se produisent lors de la charge des fourneaux, mais ces oscillations n'ont pas l'étendue qu'on leur suppose, ainsi que j'ai pu le constater à Differdange, où j'ai placé un anémomètre, un thermomètre et un manomètre sur la conduite verticale de 1^m,70 de diamètre desservant les chaudières. La vitesse du gaz a varié de 2^m,75 à 9 m. ; leur température de 60° à 90°, et leur pression a subi une modification totale de 40 mm d'eau durant un essai de plus de six heures, correspondant à toutes les phases de la marche d'un fourneau et à ses allures les plus différentes. Or, pendant cette expérience, un moteur du genre Otto de 50 chevaux a fourni un fonctionnement d'une régularité parfaite. On avait, d'ailleurs, fait déjà à Seraing une constatation fort rassurante : un petit moteur Simplex avait marché quelque temps sous une dépression de 200 mm, résultant du calage accidentel du compteur placé sur la conduite.

La pratique devait faire évanouir toutes ces craintes, et les résultats obtenus finalement ont dépassé les espérances des plus optimistes.

La Société Cockerill de Seraing et la Société de Deutz s'engagèrent les premières dans la voie nouvelle ; les ingénieurs belges, sur les conseils de Delamare-Deboutteville, donnèrent la préférence aux machines monocylindriques tandis que les ingénieurs allemands, fidèles à leurs précédents, crurent plus sage de construire des machines à quatre cylindres. Nous discuterons ces deux solutions de la question.

M. von Echelhaeuser estima que le moteur à explosion, à quatre temps, ne répondait pas aux conditions du problème, et il créa un moteur à deux temps, caractérisé par l'emploi de deux pistons opposés marchant en sens contraire dans un seul cylindre ; son premier brevet de 1892 fut remanié en 1896, en vue de l'adaptation aux gaz de hauts fourneaux. Au lieu d'être introduit séparément dans le cylindre moteur et sous haute tension, le gaz est mélangé à l'air et comprimé à basse pression presque au point mort.

M. von Echelhaeuser a mis en marche son premier moteur de 120 chevaux construit par la Compagnie de Berlin-Anhalt, le 1^{er} juin 1896 ; le moteur de 600 chevaux fonctionne depuis le 12 mars 1898 ; les deux sont installés à Hörde.

Les nombreuses commandes qu'il a reçues depuis lors ont été exécutées par la *Deutsche Kraftgas-Gesellschaft* de Berlin, formée par le groupement de la maison Siemens et Halske et de l'*Union Electricitaets Gesellschaft (Løve)*.

L'Exposition de 1900 s'ouvrit sur ce remarquable succès du moteur à gaz.

Alors qu'en 1889, 31 exposants présentaient 53 moteurs à gaz de types différents, dont la puissance totale dépassait à peine mille chevaux ; en 1900, nous avons vu, tant au Champ-de-Mars qu'à l'annexe de Vincennes, plus de 200 moteurs, pour lesquels 56 constructeurs ou inventeurs sollicitaient l'attention des visiteurs, la préférence

des acheteurs et les faveurs du jury. Leur puissance totale avait pour le moins quintuplé; alors qu'en 1889 une machine unique était annoncée pour 50 et que deux moteurs seulement atteignaient cent chevaux, l'Exposition de 1900 en comptait un bon nombre de 50, 75 et 100 chevaux, un de 250, un de 500 et enfin un autre de 700 chevaux, à un seul cylindre. Voilà le progrès réalisé en onze ans (1).

Et pourtant l'Exposition reflétait mal l'état présent de cette branche de la construction mécanique; les moteurs à gaz étaient loin d'occuper la place et de jouer le rôle que nous avons rêvé pour eux et qu'ils devaient remplir. Nous avons l'espoir fondé et la légitime ambition de les voir contribuer pour une large part, concurremment avec les machines à vapeur, à la production et au transport de la force motrice et à l'éclairage électrique des jardins et galeries; nous nous attendions à trouver, en face des batteries de chaudières à vapeur, des batteries de gazogènes, alimentant de puissants moteurs; nous nous flattions de mettre en parallèle avec les admirables groupes électrogènes à vapeur de non moins admirables groupes électrogènes à gaz, dont l'élégance, la régularité, l'élasticité, l'allure rapide, l'ingéniosité mécanique et l'impeccable construction auraient pu conquérir également les suffrages de tous. Il n'en a rien été malheureusement et nous sommes contraints d'en appeler de ce concours à un autre, mieux préparé, organisé avec plus d'ensemble par une administration plus éclairée, sinon plus bienveillante, et appuyé peut-être sur un syndicat de bonnes volontés qui a fait défaut cette fois encore.

Il eût été d'un intérêt suprême de pouvoir compter les tonnes de charbon consommées d'une part pour le service des machines à vapeur, d'autre part pour l'alimentation de moteurs à gaz développant le même nombre de chevaux-heure effectifs: nos gaz pauvres, qui transportent l'énergie au loin avec une perte insignifiante, auraient fait valoir par des chiffres significatifs et incontestables leur supériorité sur la vapeur dont les condensations grevaient d'une perte considérable le bilan de la puissance motrice. Les gazogènes et les moteurs au rendement thermique élevé auraient d'autre part complété ce triomphe. Au point de vue de l'encombrement et de l'espace occupé, le générateur de gaz aurait lutté avantageusement avec les générateurs de vapeur les plus puissants et les plus actifs. Enfin, l'économie réalisée sur la construction des cheminées, dont les gazogènes n'ont pas besoin, aurait largement payé les frais d'établissement du gazomètre qui aurait recueilli et distribué le gaz.

Puisque nous exposons ici les espérances que nous avons caressées et les déceptions que nous avons éprouvées, pourquoi ne les dirions-nous pas toutes avec franchise? Nous pensons que les moteurs à gaz et les gazogènes auraient l'honneur d'une classe distincte et d'un jury composé uniquement de spécialistes; nous supposons qu'on pourrait grouper ces machines dans une halle qui leur serait réservée et qui aurait permis des études et des comparaisons fructueuses et fécondes. Nous espérons aussi que, répudiant des procédés qui ne conviennent plus à leur situation acquise

1. Les considérations qui suivent sont empruntées à notre étude sur *Les Moteurs à gaz et à pétrole et les gazogènes à l'Exposition Universelle de 1900*, parue dans la *Revue technique de l'Exposition de 1900*. E. Bernard et C^e, Paris.

aujourd'hui, les moteurs à gaz renonceraient aux enseignes voyantes, aux réclames tapageuses, aux boniments hyperboliques, et que, laissant au public et au jury la tâche ardue de reconnaître et de signaler les meilleurs, aucun d'eux ne se déclarerait lui-même le plus parfait, le plus économique et le premier de tous. Ces revendications ont le grand tort d'être peu modestes, sans compter qu'elles sont déplaisantes pour les voisins; de plus, l'affirmation audacieuse de qualités exceptionnelles qu'on ne réalise pas toujours et de consommations qu'on dépasse le plus souvent fait naître des exigences qu'il serait préférable de ne pas éveiller.

Ce sont, à vrai dire, de légères ombres dans un lumineux tableau : en somme, l'exposition des moteurs à gaz a consacré les brillants progrès accomplis. Ils sont incontestables au point de vue de la régularité, de la sécurité, de la marche silencieuse, de la consommation et de la construction.

Les moteurs à quatre temps du genre Otto n'avaient plus de concurrents à l'Exposition de 1900; les petits moteurs sans compression, les moteurs à combustion et les moteurs atmosphériques n'étaient plus représentés, et il n'y avait en tout que deux moteurs à deux temps. Le moteur du premier type, à explosion sans compression, dont la consommation est exagérée, n'a plus sa raison d'être et il n'y a aucune raison de le regretter. Le moteur à deux temps du genre Clerk possède au contraire des avantages incontestables, compensés, il est vrai, par son moindre rendement, mais cette infériorité est peu sensible, quand on alimente ces machines de gaz pauvre, ainsi que l'a fait avec succès M. Bénier; ce moteur dont la marche est remarquablement silencieuse et qui produit le cheval-heure effectif, dans de bonnes conditions, sans nécessiter de gazomètre, ni de chaudière, aurait fait bonne figure à Vincennes à côté des moteurs à quatre temps, accouplés comme lui avec des gazogènes à aspiration. Le moteur von Oechelhaeuser et le nouveau duplex Kœrting auraient aussi dû figurer à l'Exposition pour démontrer que les deux temps se prêtent bien à la production des grandes puissances. Quant aux moteurs à combustion, du troisième type, le succès de la machine Diesel déterminera certainement un revirement de l'opinion en leur faveur et je ne doute pas que la prochaine Exposition universelle (si toutefois il s'en fait encore une) ne soit marquée par la réapparition de ce type dont Simon, Crowe et Gardie ont été les premiers représentants. Le nom de Gardie n'était rappelé que par son gazogène à haute pression.

C'est donc uniquement vers les quatre temps de Beau de Rochas, devenus le chef-d'œuvre d'Otto, que tous les constructeurs portent aujourd'hui leurs préférences, s'efforçant d'en améliorer la construction, d'y perfectionner la distribution, de mieux disposer ses divers organes, de faciliter leur accès et leur démontage, d'augmenter leur durée et de réduire la consommation par cheval effectif, grâce à un rendement thermique et organique élevé. Le résultat a été remarquable; plusieurs moteurs sont descendus à moins de 500 litres de gaz à 5 250 calories; mais les consommations de 400 litres seront bientôt réalisées. C'est le triomphe de la réduction des actions de paroi et des fortes compressions préalables; on est limité malheureusement dans cette voie par les difficultés mécaniques de la construction et les inflammations prématu-

rées; Beau de Rochas les acceptait et opérait ainsi la mise de feu du mélange tonnant, il n'a pas bien dit comment; Diesel les évite, et c'est un de ses grands mérites, en introduisant le combustible dans le comburant, alors que sa compression est effectuée. Qu'on joigne à la haute compression les détentes rapides et longues que nous avons préconisées depuis le début de nos travaux, et le rendement thermique s'améliorera de plus en plus.

Les précautions prises pour réduire l'action de paroi ont malheureusement leur contre-partie dans les pertes à l'échappement qu'on n'évite que par une détente complète et très prolongée. Le type classique d'Otto ne s'y prête pas, si l'on n'y adjoint des dispositifs spéciaux, dans le genre de ceux qu'ont imaginés Seraine, de Bisschop, Atkinson, Charon, Niel, Letombe, Heynen (Champion) et d'autres. Tous ont réussi à abaisser la consommation et la théorie a été entièrement confirmée par l'expérience.

La meilleure qualité des huiles de lubrification a permis de réaliser une autre indication de la théorie, la marche à température élevée des cylindres; mais il convient de procéder avec prudence dans cette direction, car il faut être bien sûr des huiles qu'on emploie et se garder, d'autre part, de perdre à l'échappement ce qu'on a gagné sur l'action de paroi. Je dois citer néanmoins un résultat très net que j'ai observé sur un moteur Millot, qui consommait seulement 339 grammes de pétrole quand l'enveloppe du cylindre était traversée par de l'eau à 100 et 378^o grammes lorsque cette enveloppe était maintenue à 53^o.

M. Mathot a obtenu des résultats analogues avec un moteur Dudbridge.

Des artifices spéciaux, assurant une parfaite diffusion du gaz combustible dans la masse d'air comburant, ont aussi contribué à diminuer l'influence nuisible d'une imperfection des cycles dont on a longtemps méconnu l'importance. La combustion complète et parfaite qui en résulte contribue grandement à la réduction de consommation obtenue par la généralité des moteurs.

Le balayage des produits de l'explosion par une chasse d'air était une des idées préférées d'Atkinson, et le maître avait constitué, avec le concours de M. Crossley, le type remarquable appelé *scavenging engine*. Nous ne l'avons pas vu dans la belle exposition des moteurs Crossley que MM. Pierson avaient organisée, et l'on pourrait croire que ce type a cessé de plaire; il avait pourtant permis d'obtenir le cheval heure effectif par 467 lit. de gaz d'Openshaw à 5 650 calories par mètre cube, pour un moteur de 40 chevaux, faisant 174 révolutions par minute. On a dit que ce modèle était plus bruyant, ce qui serait un grave argument contre des moteurs au gaz de ville, destinés à des installations urbaines, dans des quartiers où l'on ne saurait tolérer, par respect des voisins, le bruit rythmé d'un moteur à décharge retentissante.

L'Exposition de 1900 ne nous a montré que des perfectionnements de détail pour les régulateurs, mais il semble que l'on ait réussi à les corriger de l'oscillation périodique que leur imprime la résistance des organes de distribution qu'ils commandent; les derniers moteurs Otto et Crossley sont remarquables à cet égard.

Rien de nouveau pour l'allumage, qui se fait surtout par incandescence; on a

réussi à prolonger la durée des tubes et à mieux régler le moment précis de la mise de feu, grâce à une soupape spéciale. L'allumage électrique est préféré par plusieurs constructeurs et l'emploi des magnétos se généralise : pour les puissants moteurs, on ne saurait guère admettre une autre solution.

* Bon nombre de constructeurs recourent sagement à un troisième palier pour éviter le porte-à-faux des lourds volants, qui chargent les arbres des puissants moteurs. La plupart des firmes ont aussi établi des types spéciaux à grande vitesse pour la commande des dynamos ; la régularité de la lumière y a gagné beaucoup, et un immense progrès a marqué à cet égard les dix dernières années.

L'emploi de l'air carburé par des pétroles légers, gazolines et autres, paraissait se restreindre beaucoup pour les moteurs fixes ; d'autre part, l'utilisation de l'alcool, tant désirée par nos agriculteurs français, n'était pas encore mise au point et c'est à peine si deux ou trois exposants de l'annexe de Vincennes inscrivaient sur leurs voyantes enseignes cette alléchante réclame.

Un seul exposant marchait réellement à l'alcool ; c'était un allemand. Le mouvement ne se dessinera en France qu'en 1901.

Par contre, l'utilisation des pétroles lampants avait progressé vivement, et le Champ-de-Mars aussi bien que Vincennes nous a présenté une belle collection de moteurs à huile de pétrole. Le but à poursuivre était connu depuis longtemps ; former un mélange gazeux homogène, pouvant brûler complètement dans le cylindre et ne produisant aucun encrassage. A cet égard, le moteur Diesel est parfait : il le doit à sa haute compression et au mode d'injection de la vapeur de pétrole. Le moteur Priestman et les analogues, qui pulvérisent le pétrole avant de le vaporiser, permettent aussi un excellent brassage de l'air et du carbure et donnent lieu à une bonne combustion ; les procédés de diffusion sont extrêmement variés et il en est de fort ingénieux ; le moteur Niel leur doit son beau succès.

L'injection d'eau essayée dès 1860, par Hugon et par Simon, avait été oubliée, quelque rationnelle qu'elle fût ; en effet, la vapeur formée réfrigère utilement le cylindre, fournit du travail et permet les compressions élevées, en empêchant les allumages anticipés. Dans cette voie, M. Banki, de la maison Ganz, est arrivé bon premier, et nous aurons à consacrer une étude spéciale à cette remarquable création.

En 1889, il n'y avait qu'un seul gazogène exposé ; en 1900, il y en avait huit types différents.

Le progrès était manifeste, et pourtant, il était en réalité bien plus considérable encore qu'il ne ressortait du parallèle établi entre ces deux expositions successives.

Et d'abord, le gazogène, qui exigeait au début un anthracite choisi et du coke lavé, s'accommode aujourd'hui de tout charbon non collant : il suffit en effet que le combustible descende régulièrement dans la cuve pour qu'on puisse produire de bon gaz ; tout charbon maigre n'ayant pas une teneur trop élevée en cendres et suffisamment criblé se prête à une bonne marche. J'ai fait récemment au tramway de Cassel des essais qui ont donné d'excellents résultats sur un gazogène Pierson, alimenté de braisette Lagrange (provenance des mines d'Anzin) criblée à 30/50, renfermant près

de 10 0/0 de cendres. J'en ai effectué d'autres sur un gazogène Letombe installé à Fives-Lille et ils ont fait ressortir un rendement total inattendu.

Les gazogènes Otto, Fichet et Heurtey, Lencauchez, Pierson, etc., installés de divers côtés, sont chargés avec des charbons maigres de Charleroi, du Nord, de Saône-et-Loire, du Gard, etc., qui donnent partout un bon gaz de moteur. M. Letombe nous a fait connaître aussi une expérience brillante faite sur son gazogène avec du charbon des Alpes, chargé de 44 de cendres. Mais la merveille est peut-être celle-ci : les gazogènes Mond emploient des charbons bitumineux, sous forme de menus, renfermant environ 62 0/0 de carbone fixe ou volatil. C'est par un dosage convenable du mélange d'air et de vapeur insufflé que ces résultats sont obtenus en réglant habilement l'allure du feu.

Le prix du mètre cube de gaz pauvre a évidemment considérablement baissé à la suite des progrès que nous venons de mentionner ; il baisserait bien plus encore, si l'on extrayait, comme cela se pratique à l'usine de MM. Brüner et Mond à Northwich, le sulfate d'ammoniaque du gaz avant de l'envoyer aux moteurs : le rendement en ammoniaque, dûment constaté, est de 31 kg. par tonne de houille. Dans cette remarquable installation, le rendement net des gazogènes est de 80 0/0 ; peu de chaudières utilisent aussi bien le calorique du combustible ; des moteurs Crossley donnent le cheval-heure indiqué par 1 975 lit. de ce gaz dépouillé d'ammoniaque, ce qui correspond à 467 grammes de charbon médiocre et fait ressortir le kilowatt-heure à 992 grammes.

Le prix net du mètre cube de gaz Mond, à 1430 calories, est d'au plus 1,7 centime, d'après M. Humphrey, et la *Northwich Electric Supply Company* a renoncé à utiliser des chutes d'eau dont elle disposait pour faire une installation de gazogènes.

La puissance des installations croît rapidement d'année en année ; ne citons que cette grande batterie, décrite dans l'*Iron Age* (1) et desservant les nouveaux ateliers de l'Erié Railway, à Jersey City ; elle est montée de gazogènes Taylor (connus en France sous le nom de Fichet et Heurtey) et de moteurs Otto, d'une puissance totale de 400 chevaux. L'expérience a démontré que l'on arrive à y produire maintenant la force motrice à un prix moitié moindre qu'autrefois par l'aide des chaudières et des machines à vapeur. Les moteurs Otto ont consommé 2 400 lit. de gaz par cheval-heure effectif, soit 450 grammes de charbon. Aux tramways de Saint-Ouen des moteurs Wintherthur ont dépensé 395 grammes ; le moteur Letombe de Fives est au même taux, avec 372 grammes ; le combustible est du bon charbon-belge dans les deux cas. A Winnington, en Angleterre, chaque gazogène Mond gazéfie 24 tonnes de charbon par jour et alimente, sans interposition d'aucun gazomètre, des moteurs pouvant développer 1 000 chevaux effectifs, quand l'installation sera achevée. En Amérique, la Compagnie Westinghouse a déjà une station de 1 500 chevaux et elle en projette une de 30 000.

Tout cela n'apparaissait pas à l'Exposition de Paris et la leçon de choses qu'elle donnait sur les gazogènes était donc incomplète.

1. Cf. *Génie civil*, 1899, 2 décembre, page 79.

M. Ayrton a dit autrefois qu'un moteur à gaz alimenté de gaz de ville est dans les mêmes conditions qu'un moteur électrique desservi par des piles. En rapportant ce propos, j'écrivais en 1886 (1) : « Il s'agit de produire le gaz de chauffage de même qu'on produit de la vapeur ; l'opération n'est pas plus compliquée, et nous n'hésitons pas à affirmer que dans un avenir prochain la cornue à gaz aura supplanté dans bien des industries, les bouilleurs des générateurs à vapeur ». M. Bramwell, célèbre ingénieur anglais, a été plus loin encore (2) ; il a prédit que dans cinquante ans, la machine à vapeur ne se verrait plus que dans les musées. C'est peut-être assigner à l'évolution une période trop courte et prévoir une solution trop radicale, mais il n'est pas nécessaire d'être fils de prophète et encore moins d'être prophète pour apprécier l'avenir réservé aux moteurs et aux gazogènes.

L'ère des grandes inventions est probablement close et nous ne pensons pas la voir se rouvrir de sitôt, mais nous sommes entrés dans la période plus féconde et plus positive des perfectionnements de détail, qui améliorent le rendement des machines tout en assurant leur parfait fonctionnement ; c'est ce qu'a fait ressortir la brillante Exposition de Dusseldorf en 1903, dans laquelle les ateliers de Deutz, de Bayenthal, de Siegen, de Dahlbruch et la compagnie Soëst, ont présenté des moteurs Otto, Koerting von Oechelhaeuser, Soëst, Schmitz, etc., qui n'avaient plus sans doute l'attrait d'une haute nouveauté, mais exerçaient sur les visiteurs éblouis la forte impression d'une bonne construction, d'une sécurité absolue de marche et d'une robustesse comparable à celle des machines à vapeur. Dans le but d'assurer aux moteurs un service régulier, silencieux et sans à-coups, les constructeurs allemands donnent visiblement la préférence, pour les puissantes machines, à une admission par chaque cycle d'opérations, le réglage par tout ou rien étant réservé aux petits moteurs ; ils pratiquent sans hésitation les fortes compressions de 9 à 10 kilogrammes ; ils emploient presque toujours l'allumage électrique par magnéto. Un soin particulier est donné par eux à la réfrigération des chambres renfermant les soupapes d'admission et d'échappement. Aucun moteur vertical n'était exposé, ce qui pouvait étonner les ingénieurs anglais et américains, qui s'engagent aujourd'hui dans cette voie. Par contre, les moteurs Koerting et von Oechelhaeuser témoignaient d'un retour en faveur des moteurs à deux temps, qui paraissaient abandonnés aux expositions précédentes.

Les gazogènes étaient nombreux à Dusseldorf, et ils y fabriquaient du gaz ; sans présenter visiblement de perfectionnements notables (ce qui ne veut pas dire qu'ils en fussent dénués), ils marquaient une étape nouvelle de l'industrie des moteurs, par le seul fait de leur présence et des services qu'ils rendaient pour la force motrice de l'exposition. Un gazogène de Deutz, alimenté de *braun-kohle*, (lignite des pays rhénans) à 2.000 calories et 60 pour cent d'eau, excitait une attention considérable.

L'utilisation de l'alcool pour la production de la force motrice constituait peut-être

1. *Traité des Moteurs à gaz*, 1^{re} édition, page 283.

2. When the next fifty years came round, the steam-engine, unless some means were found of making most important improvements (as he did not see where they were to come from) would be found only in museums.

une région inexplorée dans laquelle on découvrira encore des choses que personne n'avait prévues. Les premiers essais avaient été faits en 1894 par la maison Grob de Leipzig ; ils démontrèrent la possibilité de l'emploi de l'alcool, et eurent pour résultat de faire allouer par l'Etat prussien un subside de 10.000 marks pour la continuation de ces expériences.

MM. Haack, Pétréano, Gœslich, etc. et les maisons Otto de Deutz, Kœrting, Daimler, Hille, et d'autres encore consacrèrent du temps, de la science et de l'argent à la solution de cette question si importante pour l'agriculture ; d'intéressants résultats furent obtenus et l'on reconnut qu'il était aisé de produire le cheval-heure effectif par un demi-litre d'alcool dénaturé.

L'exposition de moteurs à alcool de Posen confirma ces données et encouragea les recherches des ingénieurs et des chimistes : une amélioration incontestable du rendement des moteurs, quand ils marchent à l'alcool, fut constatée ; on trouva les moyens de réduire encore la consommation. Bref : l'Allemagne créait un procédé nouveau permettant de tirer parti du précieux liquide, qui ruine et dégrade les peuples qui le boivent, mais enrichirait rapidement ceux qui le produiraient et le consommeraient pour engendrer de la force motrice. M. Dupuy, ministre de l'agriculture, estima que la France ne devait pas se désintéresser de la question et il organisa le premier concours d'octobre 1901 bientôt suivi du concours de juin 1902. M. Michel Lévy, membre de l'Institut, fut le président de ces concours dont l'organisation fut confiée à M. Ringelmann. Les moteurs furent l'objet d'essais au frein effectués dans les conditions considérées les plus favorables par les constructeurs : on détermina ainsi les quantités d'alcool consommées à pleine et demi-charge et à vide, et on employa successivement l'alcool dénaturé ordinaire et l'alcool carburé à 50 pour cent.

M. Ringelmann dirigeait les essais au frein et M. Sorel était chargé de l'étude physique et chimique des phénomènes de combustion. Les expériences furent conduites avec un soin parfait et une rigueur mathématique ; l'épreuve au frein fut malheureusement trop courte pour être absolument décisive ; les résultats relevés ont présenté néanmoins le plus grand intérêt à tous égards. MM. Japy et Fritscher et Houdry obtinrent des médailles d'or au premier concours et les lauréats du second furent M. Brouhot, Pruvost, la société Duplex et la société Suisse de Winterthur ; M. Beaupré reçut aussi une médaille d'or dans la section des locomobiles avec son moteur Millot. Signalons tout spécialement la consommation d'un moteur Brouhot, horizontal, d'une puissance de 16 chevaux, qui dépensa par cheval-heure effectif 340 grammes d'alcool pur et 233 grammes d'alcool carburé à 50 pour cent : ces chiffres correspondent à un rendement thermique effectif de 33,90 pour cent ; je n'en connais pas de plus élevé (1).

Le triomphe de l'alcool en présage d'autres : on emploiera peut-être un jour avec non moins de succès des combustibles autres que les gaz et les liquides carburés actuellement en usage. De savants ingénieurs ont préconisé les combustibles solides pul-

1. Witz. — Le triomphe de l'alcool moteur dans la *Locomotion automobile* (numéro du 12 juin 1902).

vérifiés et M. Diesel les introduisait dans son moteur : si les résultats ne paraissent pas avoir répondu jusqu'ici aux espérances qu'on avait conçues, il serait prématuré de condamner le procédé.

D'autres recherches ont été effectuées avec des gaz très riches et en particulier avec l'acétylène ; les premières expériences faites dans ce sens ont démontré que l'acétylène sera d'un emploi difficile. Ce terrible gaz a besoin d'être dompté ; mais on a asservi plus fort que lui, et la dynamite est une atténuation de la nitroglycérine qui témoigne des ressources de la chimie.

Qui sait même si l'on ne parviendra pas un jour à utiliser dans les moteurs ces explosifs brutaux dont l'énergie ne sert encore qu'à lancer des projectiles ? N'oublions pas que les moteurs à poudre ont été le prototype des moteurs à gaz. Le progrès des théories, des méthodes et des appareils nous ramènerait-il un jour au point de départ ? Cela s'est vu dans plus d'une invention humaine et pourrait se renouveler dans l'industrie des moteurs à gaz, qui nous ménage encore bien des surprises.

CHAPITRE DEUXIÈME

CLASSIFICATION DES MOTEURS A GAZ

I

Définition des divers types de moteurs.

L'histoire des moteurs à gaz, que nous venons d'écrire, nous a permis de suivre les développements successifs qu'a reçus l'idée primitive des premiers inventeurs, avant d'atteindre à la perfection relative que nous constatons aujourd'hui. Une longue et laborieuse période d'invention a précédé la période d'application et de remarquable expansion dans laquelle les moteurs sont entrés depuis quelques années.

L'accord de la théorie et de la pratique a été nécessaire pour réaliser ces progrès étonnants en un si court laps de temps.

Il s'agissait de corriger les cycles des imperfections qu'ils présentaient, d'améliorer la disposition des organes et des mécanismes, de les construire avec une perfection plus grande, et d'assurer leur conservation ; il fallait d'autre part adapter le moteur aux combustibles les plus divers, gaz riches et pauvres, pétroles légers et pétroles lourds, alcool, etc. Tous cela a été fait sans perte de temps, avec suite et avec méthode, et le succès a dépassé les espérances des plus optimistes.

Innombrables sont les types qui ont été proposés et essayés ; beaucoup moins nombreux sont, il est vrai, ceux qui ont survécu aux premiers essais ; mais notre Traité serait incomplet, s'il n'envisageait que les machines qui ont conquis le premier rang et nous devons à un certain nombre d'autres une mention de leurs succès plus ou moins éphémères et une discussion de leurs imperfections.

Une première base de classification repose sur la nature des opérations qui constituent le cycle des opérations (1) ; mais on peut aussi considérer la forme des mécanismes par lesquels s'opère cette suite d'opérations. Enfin, les moteurs diffèrent par l'espèce du combustible employé pour produire un mélange tonnant.

Occupons-nous d'abord des cycles.

Toutes les combinaisons possibles paraissent avoir été épuisées.

1. Le mot *cycle*, qui veut dire cercle, n'est applicable qu'aux séries d'opérations fermées ; mais on est convenu de l'étendre même aux machines réelles, bien qu'il n'y en ait aucune pour laquelle le cercle des transformations soit rigoureusement fermé ; jamais en effet le gaz ou la vapeur n'est ramené à son état initial.

Leur nombre n'est du reste pas illimité, et j'ai déjà fait voir que les brevets les plus nouveaux en apparence reproduisaient presque toujours d'anciens essais, souvent à l'insu des inventeurs. Philippe Lebon n'est-il pas l'auteur de la compression préalable ? Otto n'a-t-il pas repris et développé les idées de Barnett, Degrand et surtout de Beau de Rochas ? Les inventeurs des quinze dernières années n'ont-ils pas fait de nombreux et flagrants emprunts au chef-d'œuvre d'Otto, aux inventions de Hugon, de Simon, de Dugald Clerk, de Brayton, etc. ?

Les chercheurs se meuvent dans un cercle fermé et ils marchent fatalement sur les traces de ceux qui les ont précédés dans la carrière.

En réalité, il n'y a guère que quatre types distincts : je les classe de la manière suivante :

I^{er} type. — Moteurs à explosion sans compression.

II^e type. — Moteurs à explosion avec compression.

III^e type. — Moteurs à combustion avec compression.

IV^e type. — Moteurs atmosphériques et mixtes.

L'ancien moteur Lenoir est du premier type. Une certaine quantité d'air et de gaz est aspirée dans le cylindre, sous la pression atmosphérique ; à mi-course du piston environ, la communication avec l'extérieur est interrompue, et une étincelle vient provoquer la détonation du mélange ; il en résulte une expansion subite qui pousse le piston en avant, et les gaz se détendent jusqu'à fond de course. Le mouvement de retour du piston rejette les gaz dans l'atmosphère. L'ensemble de ces opérations se reproduit périodiquement.

Au lieu d'aspirer le mélange et de l'enflammer aussitôt, sous la pression de l'atmosphère, on peut le comprimer d'abord et le faire détoner sous le volume réduit qu'il occupe : c'est ce que font Millon, Otto, Clerk et tant d'autres, dans les moteurs du deuxième type, à explosion avec compression préalable. La compression peut se faire dans un cylindre spécial ou bien dans le cylindre moteur lui-même, qui doit alors être pourvu d'une chambre de compression, laquelle augmente évidemment le volume de ce qu'on appelle espace nuisible dans les appareils à piston moteur.

Mais au lieu de faire détoner instantanément le mélange à volume constant, on peut le faire brûler graduellement à pression constante : Brayton et Simon ont opéré de la sorte. Ils ont créé le troisième type, caractérisé par la combustion du gaz et non plus par son explosion. Le reste des opérations peut être d'ailleurs identique aux transformations des types précédents : ainsi la combustion n'exclut pas la compression.

Il reste le quatrième type qui est fort différent des autres. Otto et Langen crurent reconnaître que l'échauffement énorme du cylindre Lenoir provenait de ce que la vitesse du piston était trop lente : ils eurent dès lors l'idée de rendre le piston indépendant au moment de l'explosion, et de ne le faire travailler qu'au retour. A cet effet la tige du piston portait une crémaillère qui n'entraînait l'arbre moteur que dans un sens, alors que le piston redescendait sous l'action de la pression atmosphérique : c'était la seule période motrice.

Nous venons de décrire le type pur du moteur atmosphérique : il est pour le mo-

ment presque abandonné. Par contre, on a créé un grand nombre de petits moteurs d'un type mixte : tel est le moteur de Bisschop. Dans cette machine, l'explosion agit comme force motrice pendant la montée du piston, et la pression atmosphérique, pendant sa descente. Ce sont des moteurs à double action, dans lesquels, il est vrai, l'action atmosphérique est la moins puissante.

Le tableau ci-dessous retrace la suite des opérations qui se succèdent derrière le piston des divers types : il est dressé par colonnes parallèles, de manière à présenter synoptiquement aux yeux du lecteur les transformations correspondantes subies par les gaz, avant et après leur combustion.

PREMIER TYPE	DEUXIÈME TYPE	TROISIÈME TYPE	QUATRIÈME TYPE
1. Aspiration du mélange sous la pression atmosphérique.	1. Aspiration du mélange sous la pression atmosphérique.	1. Aspiration du mélange sous la pression atmosphérique.	1. Aspiration du mélange sous la pression atmosphérique.
	2. Compression du mélange.	2. Compression du mélange.	
2. Explosion à volume constant.	3. Explosion à volume constant.	3. Combustion à pression constante.	2. Explosion à volume constant en course libre.
3. Détente.	4. Détente.	4. Détente.	3. Détente.
			4. Refoulement du piston par l'atmosphère en course motrice.
4. Refoulement et échappement des produits de la combustion.	5. Refoulement et échappement des produits de la combustion.	5. Refoulement et échappement des produits de la combustion.	5. Refoulement et échappement des produits de la combustion.

Voilà la classification par cycles ; elle doit être complétée par l'examen des dispositifs par lesquels les cycles sont réalisés.

Pratiquement, il y a lieu de subdiviser les moteurs du deuxième type en trois classes, suivant que le cycle s'accomplit en deux, quatre ou six temps : le moteur Otto appartient à la première classe, le moteur Clerk est le modèle le plus connu de la seconde et Griffin a créé la troisième. Théoriquement, cette distinction n'a pas raison d'être, car l'emploi d'un cylindre auxiliaire de compression ne modifie pas l'espèce du cycle.

On doit encore tenir compte de certaines conditions spéciales qui affectent une opération ou l'autre du cycle : ainsi, il y a des moteurs à compression constante, à compression variable et à surcompression, créés par Otto, Charon et Letombe ; la détente est complète ou incomplète, la course de compression étant égale à la course de détente ou plus courte suivant les idées d'Otto ou de Niel et d'Atkinson ; le mélange a une

composition constante ou une composition variable, la vitesse se réglant dans le premier cas par admission de *tout ou rien* ou par la formation d'un mélange plus ou moins riche, dans le second cas ; l'admission est variable, comme l'ont proposé Ganz et Heirman, ou bien elle est constante ; le moteur est à simple ou double expansion, donc compound. La classification perdrait de sa limpide simplicité si l'on s'imposait d'entrer dans ces considérations de détail et nous nous voyons obligé de ne pas faire de séries aussi complexes et aussi multipliées. Les combinaisons qu'on peut effectuer sont d'ailleurs fort nombreuses ; ainsi le moteur Diesel est à combustion et à quatre temps ; le moteur Banki est mixte, puisqu'il pulvérise de l'eau dans le mélange tonnant et qu'il détend de la vapeur d'eau et des gaz brûlés ; le combustible est du gaz de ville, du gaz à l'eau, du gaz pauvre, du gaz de haut-fourneau ou de four à coke, de l'air carburé par du pétrole léger ou par du pétrole lourd, par de l'alcool pur ou carburé, par de l'acétylène, voire même par du poussier de charbon, comme l'avait tenté Diesel.

Il y a des moteurs à un, deux, trois ou quatre cylindres : on pourrait y ajouter les moteurs rotatifs ou turbo-moteurs.

Bref : on serait amené à établir d'innombrables catégories, si l'on voulait tenir compte de toutes les opérations subies par les gaz.

Mais c'est inutile, car toutes les machines actuelles trouvent place dans les quatre types définis plus haut, si l'on y joint en cinquième catégorie les turbo-moteurs.

Tout au plus aurions-nous quelque peine à y faire entrer des machines hybrides, telles que, par exemple, les moteurs Schweizer et Siemens : dans le premier, la force explosive du gaz est employée à comprimer un volume d'air considérable, que l'on utilise ensuite à faire mouvoir une machine à air comprimé ; dans le second, le gaz chauffe une certaine masse d'air qui alimente un moteur à air chaud. Mais l'étude de ces machines est tout à fait étrangère à notre sujet et nous ne nous en occuperons pas.

CHAPITRE TROISIÈME

CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES SUR LES MACHINES THERMIQUES (1)

I

La chaleur, source d'énergie

L'observation montre que la chaleur, en dilatant les corps, engendre un travail qui peut être recueilli : une source de chaleur devient donc ainsi une source d'énergie mécanique.

Réciproquement, en dépensant de l'énergie pour comprimer un corps, on produit de la chaleur ; le travail absorbé fait donc naître de la chaleur.

Ces deux phénomènes réciproques ont montré qu'il y a une corrélation intime entre la chaleur et le travail : la chaleur se transforme en travail et le travail produit de la chaleur. C'est la loi d'équivalence formulée par Mayer : elle constitue le premier principe de la Thermodynamique et s'énonce ainsi qu'il suit :

Toutes les fois qu'un corps produit ou subit un travail, il disparaît de la chaleur ou bien il en apparaît ; et il existe un rapport unique et constant entre les quantités de travail et de chaleur qui dépendent les unes des autres dans ces phénomènes (2).

Ce rapport unique et constant a été déterminé par l'expérience : sa valeur dépend des unités de chaleur et de travail adoptées. Si l'on choisit la calorie et le kilogrammètre, il est égale à 425, et l'on dira, par exemple, que le travail de 425 kilogrammètres correspond à la quantité de chaleur nécessaire pour élever de zéro à un degré centigrade la température d'un kilogramme d'eau.

Il n'y aurait aucun intérêt actuellement à dépenser de l'énergie mécanique pour produire de la chaleur ; mais les opérations qui ont pour but de créer du travail par la transformation de la chaleur obtenue en brûlant un combustible sont éminemment utiles et pratiques.

1. Ce chapitre est un résumé sommaire des notions de thermodynamique absolument indispensables à quiconque veut se rendre compte du fonctionnement des machines à gaz. Pour mieux étudier ces questions, le lecteur pourra lire notre *Thermodynamique à l'usage des ingénieurs*, et les *Machines thermiques à vapeur, à air et à gaz*. Gauthier-Villars, Paris, 1892 et 1894; 2^e édition, 1899.

2. Pour que cette proposition soit exacte, il faut que le corps revienne à son état initial et que ses phénomènes forment une série d'opérations fermées.

Toutes les machines motrices utilisées par l'industrie tirent leur puissance de la chaleur : les moteurs hydrauliques ou électriques et les moteurs animés eux-mêmes ne font point exception à cette loi générale; mais nous ne nous occuperons ici que des machines à feu. Dans ces moteurs, un combustible est brûlé; la chaleur, qui résulte de cette réaction chimique, dilate un gaz ou une vapeur et lui fait acquérir une tension déterminée, laquelle vient s'exercer sur le piston mobile d'un cylindre et le pousse en avant.

C'est la *course-avant* du piston. Or, pour produire un mouvement continu, il faut nécessairement lui faire succéder une *course-arrière* : ce résultat s'obtient en diminuant la pression moyenne du fluide, de telle sorte que ce soit maintenant le piston qui recule et refoule le fluide; cette diminution de la pression du fluide sera le résultat de la soustraction d'une quantité déterminée de calorique.

Pour produire une évolution complète, il faut donc alternativement échauffer le fluide au contact d'une *source* de chaleur et le refroidir au contact d'un *réfrigérant*. Admettons que la source ait cédé Q calories et que le réfrigérant en ait repris q ; une quantité de chaleur $Q - q$ a disparu dans l'opération et nous savons qu'elle s'est transformée en un travail \mathfrak{C} . D'après le premier principe, nous devons avoir :

$$425(Q - q) = \mathfrak{C} \text{ ou } Q - q = \frac{1}{425} \mathfrak{C}.$$

On écrit ces équations sous la forme suivante :

$$J(Q - q) = \mathfrak{C} \text{ et } Q - q = A \mathfrak{C} :$$

J est l'équivalent mécanique de la chaleur et A l'équivalent calorifique du travail.

Mais la thermodynamique va plus loin; elle nous apprend que le rapport des quantités de chaleur Q et q , reçue et cédée, dépend uniquement des températures T et t de la source qui fournit et du réfrigérant qui reprend le calorique, quand ces sources opèrent toutes deux à température constante :

$$\frac{Q}{q} = \frac{T}{t}$$

C'est le second principe de la théorie mécanique de la chaleur : comme le premier, c'est un principe expérimental, démontré par l'observation.

Voici son énoncé :

Lorsqu'un corps est mis successivement en communication avec une source de chaleur faisant office de foyer et une autre jouant le rôle de réfrigérant, et que les échanges de chaleur se font à température constante, le rapport de la quantité de chaleur fournie par le foyer à celle qui est reprise par le réfrigérant est indépendant de la nature du corps et il ne dépend que de la température absolue des sources.

Cette loi a été formulée par Sadi-Carnot, en 1824; elle a adjoint dans la science la notion de la qualité de la chaleur à celle de sa quantité.

Notons aussitôt que les températures T et t ne doivent pas être comptées, sur l'échelle centigrade, à partir du zéro de la glace fondante, mais à partir de -273° , zéro absolu que nous aurons bientôt l'occasion de définir.

Toute la théorie des machines à feu, généralement appelées *machines thermiques*, est fondée sur les deux principes que nous venons d'énoncer et sur les considérations qui en découlent.

Nous allons exposer succinctement cette théorie ; mais il convient de rappeler d'abord les données que la physique nous fournit sur les gaz, et nous commencerons par étudier les variations qu'ils subissent sous l'action de la chaleur.

II

Variations thermiques des gaz

Les lois de Mariotte et de Gay-Lussac, bien qu'elles ne soient vérifiées rigoureusement que pour les gaz parfaits, peuvent être appliquées sans inconvénient à tous les fluides que nous aurons à considérer dans ce travail.

Ces deux lois sont exprimées par les formules connues :

$$(1) \quad pv = p_0 v_0$$

$$(2) \quad v_0 = \frac{v}{1 + \alpha t} = \frac{v'}{1 + \alpha t'}$$

d'où l'on tire :

$$(3) \quad p_0 v_0 = \frac{pv}{1 + \alpha t}$$

Dans ces relations, p_0 et p représentent les pressions initiale et finale, v_0 et v les volumes correspondants, rapportés à l'unité de poids ; v' est un volume de la même masse à une température t' et v_0 est son volume à zéro. Enfin α est le coefficient de dilatation des gaz permanents, égal à $\frac{1}{273}$ environ.

Faisons observer aussitôt que les pressions s'expriment en kilogrammes par mètre carré ; on prendra donc, pour p_0 , 10.333 kilogrammes ; les volumes sont les volumes spécifiques de l'unité de poids, c'est-à-dire l'inverse des poids spécifiques.

L'équation (3) peut s'écrire :

$$pv = p_0 v_0 (1 + \alpha t)$$

ou

$$(4) \quad pv = p_0 v_0 \frac{1}{273} (273 + t)$$

Or, $\frac{p_0 v_0}{273}$ est une constante spécifique pour chaque gaz, puisque les volumes sont

ceux de l'unité de poids ; on représente généralement cette constante par la lettre R. Voici quelques valeurs de R.

	R
Hydrogène.	422, 68
Oxygène.	26, 475
Acide carbonique.	19, 143
Air	29, 272

Pour un gaz de densité d , on aura approximativement $R = \frac{29,272}{d}$

Le facteur $(273+t)$ peut être remplacé par T, si nous convenons de désigner de la sorte une température centigrade augmentée de 273 degrés : c'est ce qu'on appelle une température absolue. Son zéro correspond d'après cela à -273 , car nous avons alors $T = (273 - 273) = 0$.

La formule (4) est donc devenue :

$$(5) \quad pv = RT$$

Remarquons aussitôt que la dénomination de température absolue donnée à T est justifiée, car, à -273° centigrades, alors que T est égal à zéro, le volume v s'est réduit à zéro. Il semblerait dès lors que -273° centigrades soit une limite inférieure qui ne saurait être dépassée : le nom de zéro absolu lui convient donc bien.

Ce minimum existe certainement ; est-il exactement confondu avec la température -273° centigrades ? Nul n'oserait l'affirmer, non plus qu'il soit démontré que les températures absolues sont rigoureusement égales à $(273+t)$. Mais admettons que ce soit vrai comme l'ont admis les maîtres de la science.

Nous ferons constamment usage de ces températures absolues.

Pour déterminer la quantité de chaleur qu'il faut fournir à un gaz pour élever sa température de 1 degré, on compare d'ordinaire en physique cette quantité à celle qui est nécessaire pour élever de la même quantité l'unité de poids de l'eau. On détermine de la sorte les capacités calorifiques *en poids* du gaz : nous ne nous occuperons que de celles-ci.

Par le fait même qu'on fournit du calorique à un corps, on tend à le faire dilater : dans ce cas, le corps surmonte une pression extérieure ; il produit donc un travail extérieur, dont il faut donner au corps l'équivalent en chaleur. La capacité calorifique d'un corps qui se dilate est donc nécessairement plus grande que celle d'un corps qui ne se dilate pas. C'est pour cela qu'on a été amené à distinguer deux espèces de chaleurs spécifiques.

Supposons d'abord qu'on chauffe une masse gazeuse en lui permettant de se dilater librement, sans changer de pression : la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré, dans ces conditions, la température de 1 kilogramme de gaz est la capacité calorifique de ce gaz à *pression constante* : nous l'écrirons C.

Si le gaz était renfermé dans une enceinte inextensible, son volume resterait invariable, mais sa pression augmenterait, et sa capacité calorifique serait dite à *volume constant* ; on la distingue de la précédente en la notant c .

La première seule des capacités a pu être déterminée exactement par l'expérience; mais les physiciens ont d'excellentes méthodes pour mesurer le rapport $\frac{C}{c}$ des deux valeurs; c'est ce rapport que nous appellerons γ .

Voici, d'après Regnault, les chaleurs spécifiques des principaux gaz, sous pression constante et sous volume constant, entre zéro et 100°.

	C	c		C	c
H	3,4090	2,4177	Co	0,2479	0,1738
O	0,2438	0,1543	Co ²	0,2169	0,157
Az	0,2175	0,1729	CH ⁴	0,5929	
Air	0,2374	0,1684	C ² H ⁴	0,4040	0,320
Vapeur d'eau . .	0,4895	0,3585			

La valeur de γ est la suivante, à la température zéro et sous la pression de l'atmosphère :

Gaz	H	O	Az	Air	H ² O	Co	Co ²	C ² H ⁴
γ	1,41	1,41	1,41	1,41	1,34	1,41	1,29	1,26

Les chaleurs spécifiques à pression constante augmentent avec la pression; d'après M. Lussana (1), leurs valeurs seraient données par des formules de la forme $C = a + b(p - 1)$, a et b étant des paramètres variables pour chaque gaz et p la pression en kilos. Pour l'air à 20 kilos de pression, on aurait donc $C = 0,2371 + 0,001498(20 - 1) = 0,2656$; l'augmentation est sensible.

Elle est plus marquée encore avec les accroissements de température; ce fait a été démontré par MM. Mallard et Le Chatelier (2). Ils ont donné les valeurs suivantes des chaleurs spécifiques moléculaires à volume constant, rapportées au poids de gaz occupant un volume de 22,32 litres.

$$\begin{aligned} &\text{Vapeur d'eau (H}^2\text{O} = 18) \\ &c = 5,61 + 5,28. t. 10^{-3} \\ &\text{Acide carbonique (Co}^2 = 44) \\ &c = 6,3 + 6,0. t. 10^{-3} - 1,18. t.^2. 10^{-6} \\ &\text{Azote (Az} = 28) \\ &c = 4,8 + 6,0. t. 10^{-4}. \end{aligned}$$

À 2000° centigrades, ces chaleurs spécifiques deviennent égales à 12,17, 23,58 et 6,0; si nous les rapportons au kilogramme, nous trouvons :

$$\begin{aligned} \text{H}^2\text{O} & c = 0,677 \\ \text{Co}^2 & = 0,308 \\ \text{Az} & = 0,215. \end{aligned}$$

Ces nombres ne concordent pas fort bien avec ceux qui ont été indiqués par

1. *Journal de Physique*, 3^e série, tome V, page 47, 1896.
2. *Mallard et Le Chatelier*. Recherches sur la combustion des mélanges gazeux explosifs : *Annales des Mines*, 1883.

d'autres physiciens ; nous les prendrons néanmoins pour base de nos calculs ultérieurs (!).

Appliquons le premier principe aux transformations des gaz.

Quand on fournit une quantité de chaleur dQ à une masse de gaz, l'effet de cet apport est complexe ; la chaleur échauffe le gaz, et elle élève d'abord sa température ; en même temps, il se produit un travail intérieur, employé à vaincre des forces provenant des actions mutuelles des molécules ; enfin, il se développe un travail externe dû à ce que le gaz, en se dilatant, surmonte des résistances extérieures : appelons dU la quantité de chaleur employée à produire l'échauffement et le travail moléculaire ; nous aurons

$$dQ = dU + \Delta p dv$$

$v dv$ est le travail extérieur et $\Delta p dv$ son équivalent en chaleur.

Quand le corps revient à son état initial $\int dU$ est nul, et on a simplement $dQ = \Delta p dv$: c'est pourquoi, pour déterminer Δ , il est nécessaire de recourir à une série fermée d'opérations, ramenant le corps à son état initial.

La fonction U s'appelle la chaleur interne du gaz ; c'est une fonction du volume, de la pression et de la température :

$$U = f(v, p, t.)$$

Mais, comme t est déterminé par p et v , on ne considère en pratique U que comme une fonction de v et de p ; on écrit donc :

$$U = f(v, p.)$$

L'accroissement de la chaleur interne pour une variation de volume dv et de pression dp est par suite la différentielle totale de la fonction f , et nous avons :

$$(6) \quad dU = \frac{dU}{dv} dv + \frac{dU}{dp} dp.$$

Il viendra donc, pour représenter l'état thermique du gaz :

$$dQ = \frac{dU}{dv} dv + \frac{dU}{dp} dp + \Delta p dv$$

ou

$$(7) \quad dQ = \frac{dU}{dp} dp + \left(\frac{dU}{dv} + \Delta p \right) dv.$$

Remarquons incidemment que cette équation n'est pas intégrable ; donc Q ne peut être exprimé en fonction des valeurs initiale et finale des volumes et des pressions

1. M. Berthelot a donné les formules ci-dessous :

$$\begin{aligned} & \text{Vapour d'eau :} \\ c &= 46,2 + 0,0019 (t-2.000) \\ & \text{Acide carbonique :} \\ c &= 49,4 + 0,0015 (t-2.000) \end{aligned}$$

M. Wiedeman a proposé pour l'acide carbonique :

$$c = 6,4 + 0,3106. t.$$

du gaz, ce qui démontre que la dépense de chaleur nécessaire pour faire passer un gaz d'un état à un autre ne peut être déduite de la connaissance des états extrêmes, si l'on ne connaît pas en outre la suite des états intermédiaires. En d'autres termes, la quantité de chaleur nécessaire pour faire passer 1 kilogramme de gaz de l'état *p.v.t.* à l'état *p'v't'* dépend de la manière dont s'est opéré le passage du premier état au second. Nous devons donc étudier les différents modes de transformations possibles.

Mais avant d'aborder cette question, dont l'importance est capitale pour nous, il convient d'introduire dans l'équation (7) les capacités calorifiques qui n'y figurent qu'implicitement.

Que signifie la différentielle $\frac{dU}{dp}$?

Pour le savoir, imaginons que le gaz ait été chauffé de t° à $(t+dt)$ en conservant son même volume ; dans ce cas $dv = 0$ et nous avons dans l'équation (7) $dQ = \frac{dU}{dp} dp$. Mais nous venons d'opérer une transformation à volume constant ; donc $dQ = c dt$; d'où enfin

$$(8) \quad c \frac{dt}{dp} = \frac{dU}{dp}$$

De même, cherchons à trouver la signification physique de $\left(\frac{dU}{dv} + Ap\right)$. On voit sans peine que, si le corps varie de dt à pression constante, il faudra faire, dans l'équation (7), $dp = 0$, ce qui nous donnera $dQ = \left(\frac{dU}{dv} + Ap\right) dv$. La transformation s'étant effectuée à pression constante, la chaleur fournie sera $C dt$, d'où nous déduisons comme ci-dessus :

$$(9) \quad C \frac{dt}{dv} = \left(\frac{dU}{dv} + Ap\right)$$

Les équations (8) et (9) portées dans l'équation (7) fournissent enfin une expression de dQ , en fonction des deux capacités calorifiques.

$$(10) \quad dQ = c \frac{dt}{dp} dp + C \frac{dt}{dv} dv$$

Mais l'équation $p v = RT$, établie ci-dessus, donne encore :

$$\frac{dT}{dp} \text{ ou } \frac{dt}{dp} = \frac{v}{R}$$

et

$$\frac{dT}{dv} \text{ ou } \frac{dt}{dv} = \frac{p}{R}$$

Ce qui nous conduit finalement à cette dernière expression de dQ ,

$$(11) \quad dQ = \frac{1}{R} (cv.dp + Cp.dv).$$

Nous possédons maintenant le moyen de calculer la quantité de chaleur nécessaire

pour faire passer un gaz d'un état initial $p_0 v_0 t_0$ à un état final $p v t$ quelconque, lorsque nous connaissons le mode de transformation suivi dans l'opération.

Ces modes de transformation sont divers : ils dépendent uniquement de la relation $f(p.v.)$ qui lie les volumes aux pressions, laquelle peut varier à l'infini : la température t du gaz est déterminée par v et p .

L'opération subie par le gaz peut toujours être représentée graphiquement par un procédé dû à Clapeyron. Ainsi supposons que, sur deux axes rectangulaires ox et oy (fig. 4), nous portions l'abscisse oa égale à v_0 et l'ordonnée Aa égale à p_0 : le sommet A de cette ordonnée répond à l'état $p_0 v_0$ du fluide : de même B figure l'état $p v$. Si le corps éprouve une transformation de $p_0 v_0$ à $p v$ son changement d'état sera représenté par une ligne telle que AB , qui marque toutes les phases intermédiaires de la transformation et peint aux yeux la variation de la fonction $f(p.v.)$. La forme de AB peut varier à l'infini comme la fonction.

Un très petit nombre de cas présentent de l'intérêt pour nous ; nous ne nous occuperons que de ceux-là.

Le mode le plus simple de transformation est celui dans lequel on ne fait varier que le volume ou la pression, l'autre élément restant constant. Tel serait, par exemple, le cas du chemin ACB de la figure 4 ; le gaz à l'état $p_0 v_0$, devant être amené à l'état $p v$, y est conduit par deux séries d'opérations. Dans la première série, le gaz est distendu sous pression constante, le long de la droite AC , parallèle à l'axe des volumes : le volume croît de v_0 à v , la température de T_0 à T_1 (en valeurs absolues) et l'on a $\frac{v_0}{v} = \frac{T_0}{T_1}$ (1). La quantité de chaleur nécessaire à la transformation est $C(T_0 - T_1)$. Puis, il faut soustraire du calorique au gaz, de manière à abaisser sa pression de p_0 à p , sous volume constant, le long de CB : la température baissera de T_1 à T , ces deux valeurs étant liées aux pressions par la formule (12) $\frac{p_0}{p} = \frac{T}{T_1}$; d'où résulte une variation thermique égale à $-c(T_1 - T)$. La dépense totale de chaleur est par conséquent égale à $C(T_0 - T_1) - c(T_1 - T)$.

La détente d'un gaz sans variation de température est une des plus importantes que nous puissions considérer. C'est le cas auquel s'applique spécialement la loi de Mariotte : revenons donc à l'équation (5)

$$pv = RT$$

Elle définit la série continue des états par lesquels passe une masse gazeuse qui se détend en gardant sa température : T étant donné, nous déduisons à chaque instant v de p , ou réciproquement.

1. Cette relation est pour ainsi dire évidente, d'après ce qui précède : nous avons en effet, en marquant par τ_0 et τ_1 les températures centigrades et T_0 et T_1 les températures absolues.

$$\frac{v_0}{v} = \frac{1 + \alpha \tau_0}{1 + \alpha \tau_1} = \frac{273 + \tau_0}{273 + \tau_1} = \frac{T_0}{T_1}$$

Nous aurions une relation identique pour les pressions : $\frac{p_0}{p} = \frac{T_0}{T_1}$

La courbe de cette transformation est une hyperbole équilatère, ayant les axes pour asymptotes, puisque nous avons $p v = \text{constante}$. Il importe de faire observer que cette constante RT est entièrement déterminée par la température absolue T ; la courbe peut donc se tracer sans qu'on ait besoin de connaître le produit initial $p_0 v_0$.

Cette courbe est connue en théorie mécanique sous le nom de *courbe isothermique*.

Quand un gaz se détend suivant une isothermique, toute la chaleur qu'on lui fournit est transformée en travail. Or, il est aisé de calculer le travail $\bar{\epsilon}$ développé pendant que le gaz se détend du volume initial v_0 à un volume v quelconque. Ce travail est représenté par l'aire comprise entre la courbe hyperbolique, les deux ordonnées extrêmes et l'axe des volumes. Son expression analytique est :

$$\begin{aligned} \bar{\epsilon} &= \int_{v_0}^v p dv = p_0 v_0 \int_{v_0}^v \frac{dv}{v} \\ &= p_0 v_0 \log' \frac{v}{v_0} \\ (13) \qquad &= R \log' \frac{v}{v_0}. \end{aligned}$$

A cette production de travail correspond une disparition de calorique: la quantité de chaleur transformée est égale à $ART \log' \frac{v}{v_0}$ (13 bis).

Remarquons que la température du gaz varierait fatalement, si les corps environnants et surtout les parois de l'enceinte ne lui fournissaient à chaque instant le calorique nécessaire pour maintenir sa température. L'hypothèse du changement d'état, sans variation de température, entraîne donc en pratique celle d'une enceinte indéfiniment conductrice, qui cède au fluide toute la chaleur transformée en travail dans sa détente.

Au lieu d'une détente, nous aurions pu étudier une compression à température constante: elle se ferait suivant la même ligne isothermique et d'après les mêmes lois: la paroi absorberait la chaleur produite par le fait de la transformation du travail.

Il y a une autre transformation possible: c'est celle qui s'effectue sans perte ni gain de chaleur, le long d'une courbe *adiabatique* (1), dans une enceinte absolument imperméable à la chaleur.

Dans ce cas, la chaleur fournie étant nulle, nous devons poser $dQ = 0$.

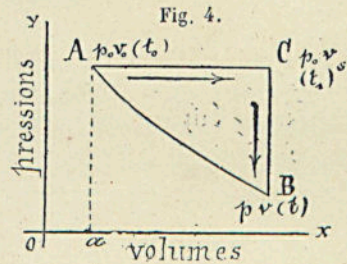
Il vient donc, en vertu de l'équation (11) :

$$c v dp + C p dv = 0$$

d'où, en remplaçant $\frac{C}{v}$ par γ et en divisant par $p v$:

$$\frac{dp}{p} + \gamma \frac{dv}{v} = 0$$

1. Du grec $\alpha\delta\iota\alpha\beta\alpha\tau\omicron\varsigma$, impénétrable; ce mot a été choisi par Rankine et il est devenu d'un usage courant.



L'intégrale de cette équation, prise entre les limites $p_0 v_0$ et $p v$, est :

$$\log' \frac{p_0}{p} + \gamma \log' \frac{v_0}{v} = 0$$

On en tire :

$$\log' \frac{p}{p_0} = \log' \left(\frac{v_0}{v} \right)^\gamma$$

et enfin

$$(14) \quad p_0 v_0^\gamma = p v^\gamma = \text{constante}$$

Cette formule est connue sous le nom de formule de Poisson.

Elle nous fait connaître la série continue des états par lesquels passe une masse gazeuse qui se détend dans une enceinte imperméable à la chaleur.

La courbe correspondante est une hyperbole, ayant les axes pour asymptotes, mais non symétrique par rapport à ces axes: c'est en quoi elle diffère de la courbe isothermique. Comme γ est plus grand que l'unité, on reconnaît sans peine que l'adiabatique se rapproche plus de l'axe des abscisses que l'isothermique. Ces deux courbes se coupent donc nécessairement en un point, ainsi que le fait voir la figure 5, sur laquelle AB est une adiabatique et A'B' une isothermique.

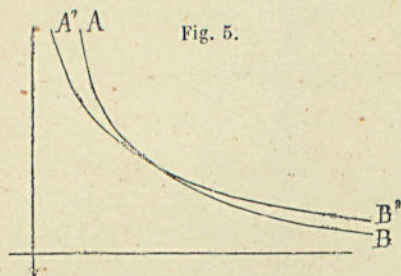


Fig. 5.

Toute la chaleur convertie en travail est empruntée dans ce cas à la masse gazeuse elle-même, dont la température décroît suivant une loi définie, qu'il est facile de découvrir :

En effet, nous pouvons écrire :

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{v}{v_0} \right)^\gamma = \frac{T v_0}{T_0 v}$$

d'où

$$(15) \quad \frac{T}{T_0} = \left(\frac{v_0}{v} \right)^{\gamma-1}$$

ou encore, puisque $\frac{v_0}{v} = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}}$,

$$(16) \quad \frac{T}{T_0} = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

Les deux équations (15) et (16) donnent la température du gaz en fonction de son volume et de sa pression : une augmentation de volume entraîne une diminution considérable de température, et la pression finale est bien moindre qu'elle ne le serait après une détente isothermique. Ainsi, une détente adiabatique au dixième produit, dans un gaz parfait, un abaissement de température de 177° et la pression finale n'est que le $\frac{1}{25}$ de la pression initiale.

Ces relations nous seront d'une grande utilité et nous en ferons constamment usage quand nous étudierons les phénomènes qui se succèdent dans le cylindre des moteurs à gaz.

L'exemple suivant montrera de quelle manière on doit manier ces formules (1).

Admettons qu'on fasse détendre 1 mètre cube d'air de 10 atmosphères à une, à la température constante de 20°; on propose de calculer le travail disponible dans cette opération.

Nous avons, pour une variation de volume de v_0 à v ou de pression de p à p_0 :

$$\mathcal{G} = RT \log' \frac{v}{v_0} = RT \log' \frac{p_0}{p}$$

Mais cette formule est relative à 1 kilogramme de gaz; or, nous considérons 1 mètre cube à 10 atmosphères et 20 degrés centigrades, qui pèse

$$\frac{1,293 \times 10}{1 + \alpha \cdot 20} = \frac{1,293 \times 10 \times 273}{(273 + 20)}$$

Nous avons d'ailleurs :

$$R = \frac{p_0 v_0}{273} = \frac{10,333}{273 \times 1,293} \text{ et } T = 273 + 20.$$

Il vient donc

$$\begin{aligned} \mathcal{G} &= \frac{1,293 \times 10 \times 273}{(273 + 20)} \frac{10,333}{(273 + 1,293)} (273 + 20) \log' 10 \\ &= 10,333 \times 10 \log' 10 = 237,928 \text{ kilogrammètres.} \end{aligned}$$

III

Du cycle des machines thermiques et de leur rendement.

Lorsqu'à la suite d'une série de transformations, les corps qui composent le système reprennent la température, le volume, la pression, et toutes les propriétés physiques et chimiques qu'ils possédaient au début des transformations, on dit que les corps ont parcouru un *cycle fermé*.

Si nous représentons graphiquement la suite des états du corps en volume et pression, nous obtenons une courbe fermée, telle que la courbe ABCD (fig. 6).

On peut dire que tout cycle d'opérations fermé est représenté en coordonnées p et v par une courbe fermée.

La réciproque n'est évidemment pas vraie, car les coordonnées ne représentent que la pression et le volume, et un corps peut repasser par mêmes pressions et volumes

1. Nous empruntons cet exemple à nos *Exercices de Physique et Applications*. (Paris, Gauthier-Villars et fils).

sans revenir à son état initial, si, par exemple, il a changé de composition dans le cours du cycle. Tel sera le cas du mélange tonnant, composé d'hydrogène, oxyde de carbone, méthane, acide carbonique, azote, etc., dont nous chargeons le cylindre des moteurs, lequel ne renferme plus, après combustion, que de la vapeur d'eau, de l'acide carbonique et de l'azote. Toutefois, remarquons que la masse de ces gaz est restée la même ; d'autre part, on pourrait admettre l'exac-

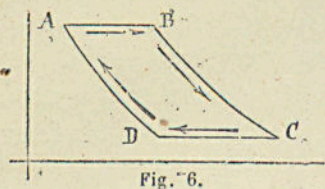


Fig. 6.

titude dans l'espèce de la loi de Woestyne, d'après laquelle les corps simples conserveraient dans les combinaisons la chaleur spécifique qu'ils possèdent à l'état libre (1).

Cette considération, que nous développerons plus loin, nous autorise donc à traiter comme des cycles les séries d'opérations périodiquement subies par les fluides intermédiaires (gaz ou vapeur) dans les machines thermiques, alors même que les cycles ne seraient pas rigoureusement fermés : la répétition et la périodicité même des phénomènes nous invite à accepter cette hypothèse, d'après laquelle les gaz repassent à chaque tour par un état initial à partir duquel se reproduisent tous les phénomènes de la phase précédente.

Un travail ϵ est produit dans le cycle ; il est équivalent à l'aire ABCD de la courbe fermée qui le représente.

Ce travail correspond à une certaine dépense de chaleur.

La machine serait une machine thermique parfaite, si toute la chaleur disponible était transformée en travail ; mais la pratique démontre, ainsi que la théorie permettait de le prévoir, que l'utilisation ne peut en aucun cas être entière et qu'il faut nécessairement dépenser Q calories pour ne recueillir en kilogrammètres que l'équivalent d'un nombre de calories plus petit que Q . En effet, nous avons déjà démontré ci-dessus que, pour obtenir du travail, il faut non seulement disposer d'un foyer, mais que la périodicité du mouvement et la continuité du travail ne peuvent être réalisées qu'à l'aide d'un réfrigérant, permettant en quelque sorte de faire tomber du calorique du niveau de la source supérieure au niveau de la source inférieure. Une quantité de chaleur Q étant empruntée au foyer, il faut rendre q au réfrigérant et la différence seule $Q - q$ est utilisable.

On a cru longtemps que le sacrifice de q pouvait être évité et l'on cherchait un moteur qui transformât en travail tout le calorique disponible au foyer : autant valait chercher la pierre philosophale, car, pour fermer le cycle, il faut absolument l'action alternative d'un foyer et d'un réfrigérant ; la perte de q est donc un fait naturel et nécessaire. Or, q ne peut jamais être nul, parce que nous ne disposons d'aucun réfrigérant qui soit à -273 degrés centigrades, c'est-à-dire au zéro absolu.

Il est aussi impossible de transformer en travail tout le calorique disponible qu'il l'est d'actualiser tout le travail potentiel d'une chute d'eau, en comptant comme hauteur de chute la distance du bief d'amont au centre de la terre, vers lequel la

1. Cette considération n'est qu'approximative, mais l'hypothèse admise de la constance des chaleurs spécifiques n'est pas rigoureuse non plus, et pourtant elle est acceptée dans les calculs des cycles.

gravitation tend à faire converger sa masse. Refroidir un gaz au zéro absolu est aussi impossible, mais ce serait tout aussi nécessaire, que d'atteindre le centre de notre globe.

Le premier perfectionnement qu'il faut chercher est de rendre q aussi petit que possible, de manière à ce que $Q - q$ devienne maximum relativement au calorique disponible Q .

C'est donc le rapport de $Q - q$ à Q qui définit la perfection plus ou moins grande d'une machine thermique. Verdet a appelé ce rapport le *coefficient économique* de la machine ; sa valeur est donnée par la fraction

$$(17) \quad \frac{Q - q}{Q}$$

Il est du plus grand intérêt pratique de savoir déterminer la valeur de ce coefficient économique pour une machine donnée : mais nous devons établir d'abord quelle est la valeur la plus grande qu'il peut atteindre.

Parmi tous les cycles que l'on peut concevoir, il en est un très remarquable connu sous le nom de cycle de Carnot : il est formé de deux isothermiques et de deux adiabatiques.

Le fluide évolue entre deux températures limites, l'une T supérieure, qui est celle du foyer, l'autre t inférieure, correspondante au réfrigérant, en subissant alternativement deux détentes et deux compressions, qui le ramènent à l'état initial.

Voici dans leur ordre, et d'après la figure 7, les opérations qui constituent le cycle de Carnot.

1° Une masse de fluide à l'état $p_0 v_0$, à la température T , est mise en contact avec le foyer qui entretient sa température T pendant qu'elle se détend et passe du volume v_0 au volume v_1 , suivant l'isothermique AB .

2° On laisse alors le gaz se détendre de v_1 à v_2 . Supposons qu'il ne perde ni reçoive de chaleur ; cette détente se fera suivant l'adiabatique BC et la température du fluide baissera de T à la température t du réfrigérant.

Dans la première phase, le fluide a reçu du foyer une quantité de chaleur $Q = ART \log' \frac{V_1}{V_0}$, d'après l'équation (13) ; dans la seconde phase, il n'y a eu ni perte ni gain de chaleur, mais les volumes sont liés par l'équation (15).

$$\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1} = \frac{T}{t}$$

3° Mettons, à ce moment, le fluide en communication avec le réfrigérant et comprimons-le, en lui soustrayant du calorique, de manière à réduire son volume de v_2 à v_3 , à température constante, suivant l'isothermique CD .

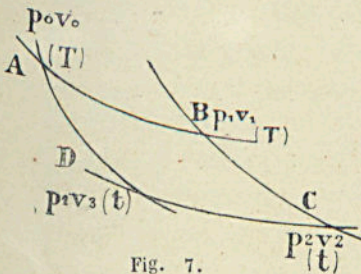


Fig. 7.

4° Enfin, continuons la compression sans soustraire de chaleur au fluide : la chaleur, équivalente au travail développé, élèvera la température du fluide. Le volume v_3 ayant été convenablement choisi, le gaz reviendra à son état primitif, le long de l'adiabatique D A.

* Nous aurons comme ci-dessus :

$$q = A R t \log' \frac{V_2}{V_3}$$

$$\left(\frac{V_3}{V_0}\right)^{\gamma-1} = \frac{T}{t}$$

Le cycle que nous venons de décrire est fermé.

Les quantités de chaleur Q et q ayant été cédées à température constante, nous savons par le deuxième principe que

$$\frac{Q}{q} = \frac{T}{t}$$

Le travail produit est égal à l'aire ABCD.

Le rendement du cycle est

$$(18) \quad \frac{Q-q}{Q} = \frac{T-t}{T} = 1 - \frac{t}{T}$$

Il est égal au rapport de la chute de température à la température du foyer.

Ce rendement est donc proportionnel à l'écart des températures du foyer et du réfrigérant et en raison inverse de la température absolue du foyer ; il sera maximum pour la machine thermique qui utilisera la plus grande chute à la température la plus basse.

En d'autres termes le rendement sera maximum, pour une chute de température déterminée, quand la température du réfrigérant sera la plus faible possible.

En réalité, on ne dispose pas entièrement de la température inférieure du réfrigérant, car on ne peut opérer pratiquement au-dessous de la température ambiante (') ; limité de ce côté, le constructeur se voit obligé de rechercher les valeurs élevées de T pour augmenter la chute $T - t$ et par suite améliorer le rendement.

Entre des limites données de température, le rendement du cycle de Carnot est maximum. Ce théorème si important pour la théorie des moteurs, se démontre sans peine, mais un peu longuement. Nous préférons emprunter à Hirn les considérations par lesquelles il justifie ce maximum *a posteriori*. « Il est en quelque sorte évident

1. Le fluide, véhicule de la chaleur, ne peut être abandonné au réfrigérant à une température ou à une pression inférieure à celle du milieu ambiant, sans l'intervention d'appareils auxiliaires, qui empruntent de l'énergie au moteur lui-même ou au dehors ; telles sont les pompes des machines à vapeur à condensation. Mais, la dépense résultant de l'intervention de ces appareils peut être largement compensée et, tous comptes faits, il reste souvent un bénéfice ; c'est ainsi que la marche à condensation est économique ; les avantages résultant de l'emploi des liquides volatils pour la condensation s'expliquent de même.

par soi-même, dit cet illustre savant, que ce cycle fermé a été décrit de manière à donner un travail maximum. La chaleur cédée par la source a été employée uniquement à produire du travail : celui-ci est donc un maximum. La chaleur envoyée à la source de froid a été développée aussi économiquement que possible, puisque le travail n'a donné aucune variation de température. Les deux autres opérations n'ont eu pour but que de faire tomber et puis de faire remonter la température et la pression (1) ».

On pourrait dire encore qu'il ne peut exister de meilleur mode d'utiliser la chaleur fournie par un foyer, qu'en lui empruntant cette chaleur à température constante et en cédant aussi au réfrigérant l'excès de chaleur non transformée à température constante, puisqu'ainsi toute la chaleur tombe du niveau le plus élevé au niveau le plus bas.

Le rendement du cycle de Carnot est donc une limite supérieure : mais hâtons-nous de constater que, si ce rendement ne peut être dépassé par celui d'aucun autre cycle, il peut du moins être atteint par un grand nombre d'entre eux ; il suffit qu'ils répondent aux deux conditions suivantes :

1° Il faut que les échanges de chaleur des sources aient lieu comme dans le cycle de Carnot, à température constante.

2° Il est nécessaire que les deux opérations, par lesquelles s'effectue le passage d'une source à l'autre, soient telles que la quantité de chaleur fournie par l'une suffise à l'accomplissement de l'autre.

La courbe fermée représentative d'un tel cycle est donc composée de deux isothermiques et deux *isodiabatiques* : c'est le nom qu'on a donné aux lignes d'*égale* transmission qui remplacent les lignes de *nulle* transmission.

Ce genre de cycle a, avec celui de Carnot, une analogie manifeste, qu'il est important de faire ressortir. Dans le cycle de Carnot, le travail extérieur effectué, suivant l'adiabatique de détente, est égal au travail extérieur dépensé suivant l'adiabatique de compression, de telle sorte que toute la transformation utile de chaleur en énergie s'effectue suivant l'isothermique supérieure ; il en est de même dans les cycles considérés, puisque les quantités de chaleur absorbées et dégagées sur les isodiabatiques sont égales, et que c'est encore sur les isothermiques que se produit utilement la conversion de la chaleur en travail. Il est dès lors évident qu'on aura, comme pour le cycle de Carnot, $\frac{Q - q}{Q} = \frac{T - t}{T}$.

On peut prendre arbitrairement une des lignes de transformation : l'autre est nécessairement déterminée par la condition imposée. La théorie démontre que les deux lignes répondent à une équation de même nature. En particulier, si l'une des isodiabatiques est parallèle à l'axe des pressions, l'autre le sera aussi, comme on le voit dans la figure 8 qui représente un cycle célèbre, connu sous le nom de Stirling : A B

1. « Exposition analytique et expérimentale de la théorie mécanique de la chaleur », par G.-A. Hirn, tome I, page 202, 3^e édition, 1875.

et CD sont les isothermiques. Les deux isodiabatiques pourraient être parallèles à l'axe des volumes : nous sommes conduits alors au cycle de la figure 9, lequel a été

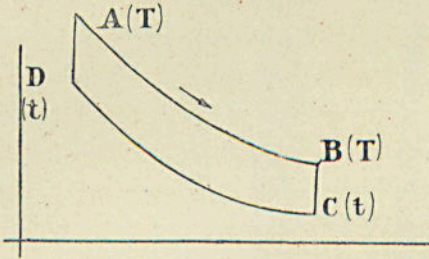


Fig. 8. — Cycle de Stirling.

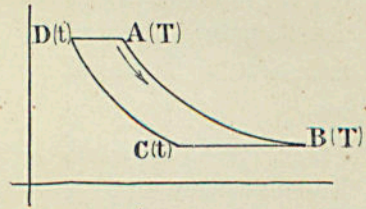


Fig. 9. — Cycle d'Ericsson.

imaginé par Ericsson : comme dans la figure précédente, les isothermiques sont encore les lignes AB et CD.

En somme, il est possible d'égaliser, mais on ne saurait dépasser le rendement du cycle de Carnot. L'effet maximum qu'on peut donc tirer d'un moteur thermique quelconque, fonctionnant entre des températures T et t , et transformant en travail une quantité de chaleur égale à Q , est égal à

$$J Q \left(\frac{T-t}{T} \right) = J Q \left(1 - \frac{t}{T} \right)$$

Pour juger de la valeur théorique d'un cycle, il convient de calculer d'abord le coefficient économique du moteur parcourant le cycle proposé, puis de le comparer au coefficient économique de Carnot entre les mêmes limites de température.

Le rapport des deux coefficients économiques, donne le *rendement générique* du moteur. C'est ce rendement générique qui caractérise la machine ; c'est par lui qu'on peut juger de la valeur relative de deux cycles ou de divers types de moteurs.

Nous désignerons le rendement théorique par la lettre ρ et le rendement générique par la lettre ρ_1 .

La connaissance du rendement générique d'un moteur n'est pas encore suffisante, car la note qui en résulte est incomplète à certains égards. En effet, on ne recueille pas tout le travail brut appliqué sur le piston du moteur : par suite du frottement, des chocs, de l'inertie et de toutes les résistances passives des organes mécaniques, il se perd une portion du travail fourni par la transformation de la chaleur et on ne trouve sur l'arbre de couche qu'une fraction du travail brut emmagasiné sur le piston. Le travail disponible sur l'arbre de couche se mesure au frein de Prony : il est immédiatement utilisable et porte le nom de *travail effectif* ; le travail disponible sur le piston s'évalue par l'indicateur de Watt, et il s'appelle le travail *indiqué*. Le rapport entre le travail indiqué et le travail réellement utilisable sur l'arbre moteur constitue le *rendement organique* de la machine. C'est ce rendement qui frappe le plus vivement les esprits des praticiens, parce que sa notion facilement accessible semble moins théorique et par là même plus industrielle. En réalité, le rendement organique ne dépend que de la construction plus ou moins parfaite des organes. Ce

rendement n'est pas caractéristique d'une espèce de machines à feu ; il dépend des conditions particulières d'agencement des mécanismes de tel type spécialement considéré, de la masse des pièces à mouvoir, de l'intensité des frottements à surmonter, du travail développé, de la vitesse de rotation, etc., etc.

IV

Parallèle entre les diverses machines thermiques.

Le problème pratique de la transformation du calorique en travail a été résolu de différentes manières, avec plus ou moins de succès. La machine à vapeur l'a emporté longtemps sur les autres machines thermiques dans ce concours engagé il y a près d'un siècle : les machines à air chaud parurent un moment vouloir lui disputer la palme ; elles n'eurent cependant qu'un succès théorique, j'allais dire un succès d'estime, et elles n'ont point pénétré dans les ateliers.

Nous devons rechercher les causes de cet échec.

Théoriquement, la machine à vapeur n'est point parfaite ; mais, au point de vue utilitaire, elle jouit encore d'une prééminence indiscutable, parce que sa marche est sûre et régulière et son rendement satisfaisant. Objet d'une étude assidue et de recherches continuelles depuis que Watt l'a créée, elle a réalisé successivement tous les perfectionnements possibles : elle paraît être arrivée à son point culminant et ne semble plus guère perfectible.

Les machines à air chaud, au contraire, répondent à un type qui est théoriquement supérieur à celui de la machine à vapeur ; mais si leur cycle promet un rendement élevé, il faut reconnaître que sa réalisation offre des difficultés qui n'ont pas été résolues et qu'il n'y a même plus aucun intérêt à résoudre, maintenant que le moteur à gaz tonnant est si brillamment entré dans la voie des grandes applications industrielles. Celui-ci, qui dérive directement du moteur à air chaud à foyer intérieur, n'a pas encore tenu toutes les promesses de la théorie, mais il atteint déjà le rendement le plus élevé et nous avons le droit d'espérer qu'il progressera encore.

Supposons d'abord que les machines thermiques à vapeur ou à gaz que nous voulons comparer réalisent également bien les conditions fondamentales des cycles parfaits de Carnot ou de Stirling ; leur rendement serait égal à $\frac{T-t}{T}$.

Or, prenons t égal à 0° centigrade, ou bien à 273° absolus ; nous aurons pour les diverses valeurs de la température T du foyer les valeurs suivantes du rendement ρ :

T	ρ
373° absolus	0, 268
473° —	0, 423
573° —	0, 522
673° —	0, 594

Cette température de 673° absolus ne peut guère être dépassée, si elle est partagée par la paroi, car elle est voisine du rouge ; cette impossibilité provient de la nature même de la paroi, qui est nécessairement métallique. On ne pourra donc pas obtenir dans ce genre de moteurs de rendement égal à 60 pour cent ⁽¹⁾.

Pratiquement, on est obligé de se tenir bien au-dessous de 673° ; il a été difficile d'opérer jusqu'ici même à 573° absolus (300° centigrades), car à cette température les graisses destinées à adoucir les frottements se décomposent et perdent leurs propriétés lubrifiantes : dans l'air, elles s'oxydent bien avant et elles forment, en se solidifiant, d'épais cambouis.

L'absence de tout moyen de graissage limite donc le rendement à 0,522, et, tant qu'on n'aura pas trouvé une substance pouvant remplacer les graisses dans les cylindres à haute température, il faudra renoncer à le dépasser. On a essayé un grand nombre de lubrifiants, parmi lesquels nous citerons le graphite et la plombagine ; mais les ingénieurs n'ont obtenu jusqu'à présent aucun succès dans cette voie.

Cette difficulté peut être surmontée, si l'on opère un refroidissement énergétique de la paroi du cylindre ; c'est ce qu'on fait dans les moteurs à gaz tonnant dans lesquels la température explosive instantanée peut atteindre momentanément 1800° absolus dans une enceinte maintenue à 345° . Le graissage reste alors possible : la température t du gaz explosif pouvant être abaissée à 350° centigrades (623° absolus) par une détente prolongée, on voit que la chute $T - t$ devient égale à près de 1450° . Les moteurs à gaz tonnant ont seuls un écart aussi considérable entre le foyer et le réfrigérant.

Dans les machines à vapeur d'eau saturée, le graissage ne cause plus aucune difficulté car cette vapeur, voisine de son point de liquéfaction, lubrifie la paroi par le fait même de sa condensation ; mais nous rencontrons ici un écueil d'un autre genre. La tension des vapeurs saturées croît en effet rapidement avec la température ; l'eau possède déjà une force élastique de plus de 15 atmosphères à 200° centigrades (473° absolus) et cette valeur est la limite supérieure de T : pour une valeur de t égale à 85° centigrades (308° absolus), $T - t = 165^{\circ}$ seulement. Le coefficient ρ ne saurait être supérieur à 0,423, et l'infériorité théorique de la machine à vapeur ressort de ce chiffre, sans qu'il soit besoin de commentaire. Il est vrai que la surchauffe permet de relever T sans faire monter la pression, mais alors se retrouvent les difficultés de graissage, signalées ci-dessus, pour peu que la surchauffe soit grande : en pratique, on ne fait qu'une surchauffe modérée de 120° au plus, qui peut porter T à 573° absolus et donner à $T - t$ une valeur de 270° .

Mais il est évident qu'il existe des liquides pour lesquels on pourra écarter davantage les limites du fonctionnement et par suite augmenter le rendement avec la hauteur de chute. La machine à vapeur pourrait devenir la plus parfaite des machines thermiques, même en théorie, si l'on trouvait un liquide à bas prix, de nature stable,

¹ Les cylindres de porcelaine, avec pistons non jointifs, ont été essayés par des inventeurs audacieux, mais il a fallu renoncer à leur emploi.

sans action corrosive, qui, à 673° absolus, possédât une tension modérée. Certaines huiles moins volatiles que l'eau répondent à ce desideratum, mais il se fait une compensation par le fait même de leur constitution et de leur faible volatilité, qui a pour effet de relever t en même temps que T ; la chute $T - t$ n'augmente donc pas autant qu'on pourrait le croire (1).

Si nous résumons ce qui vient d'être dit, nous voyons que la machine à vapeur surchauffée a pour limites de température 573° et 308°, ce qui correspond à une chute de 270° et à un rendement de 0,52; le moteur à gaz évolue entre 1800° et 623°, avec un rendement de 0,65.

Le rendement *théorique* du moteur à gaz est donc meilleur que celui de la machine à vapeur, même à haute surchauffe; le moteur à gaz doit sa supériorité aux limites de température entre lesquelles son cycle s'effectue; attribuer cette supériorité au fait que les gaz n'ont pas de chaleur latente est une erreur qui a été commise autrefois, mais qui témoigne d'un oubli complet des principes de la thermodynamique, ainsi que Hirn l'a éloquemment démontré il y a quarante ans.

Cette supériorité est du reste toute théorique; sa démonstration repose sur des considérations générales, qu'il était bon d'examiner, mais qui ne sont pas les seules à envisager.

Passons en effet à l'examen comparatif des cycles des divers moteurs que nous considérons.

Nous nous sommes tenu jusqu'ici dans une hypothèse fictive, en admettant qu'on pût réaliser un cycle de Carnot. Et d'abord, ce cycle composé de deux paires d'isothermiques et d'adiabatiques, est une impossibilité physique; il s'agirait en effet de faire détendre d'abord un gaz à température constante, ce qui suppose une paroi d'une conductibilité parfaite; puis, la détente devrait se faire dans la même enceinte, sans perte ni gain de chaleur, c'est-à-dire au contact d'une paroi absolument dénuée de conductibilité. Ces deux conditions sont évidemment contradictoires. Le cycle dans lequel deux isodiabatiques remplacent les adiabatiques est aussi irréalisable, pour les mêmes causes.

Du reste, j'ai démontré il y a un bon nombre d'années (2) qu'il est impossible d'observer un changement d'état effectué suivant une adiabatique, attendu que l'action de paroi est encore considérable sur un gaz relativement dénué de conductibilité, alors même que la durée du phénomène ne dépasse pas $\frac{1}{500}$ de seconde. Il serait plus facile de réaliser une isothermique; une détente lente dans une paroi chauffée très perméable pourrait dans certaines conditions se faire sans refroidissement; d'ailleurs la vapeur saturée admise dans le cylindre d'une machine à vapeur garde la même température durant toute l'admission et l'échappement au condenseur est aussi une opération isother-

1. MM. Yarrow, de Londres, et Escher et Wyss, de Zurich, ont réalisé des machines à vapeur d'huile dont le fonctionnement a été économique et satisfaisant.

2. « Essai sur l'effet thermique des parois d'une enceinte sur les gaz qu'elle renferme, thèse inaugurale », Paris, Gauthier-Villars, 1878, page 97.

mique ; mais ce ne sont que des phases de cycle. Le cycle complet de Carnot, formé d'isothermiques et d'adiabatiques est impossible à réaliser et ce n'est qu'une fiction théorique.

Le cycle réel des machines employées dans l'industrie n'est donc point le cycle parfait que nous avons étudié ci-dessus : leur rendement est moindre par conséquent. On le calcule dans chaque cas, pour chaque genre de machines en particulier, d'après le cycle des opérations effectuées, en évaluant tour à tour les quantités de chaleur Q

et q et en faisant le quotient $\frac{Q-q}{Q}$.

Ces calculs s'effectuent aisément dans certains cas, fort difficilement dans d'autres ; ils reposent généralement sur des hypothèses plus ou moins exactes, et ne comportent par suite qu'une approximation assez large. Toutefois cette manière de procéder permet d'analyser le fonctionnement des moteurs, de comparer les cycles entre eux, d'en discuter la valeur par les résultats promis, sinon obtenus : nous exposerons les conclusions de ces calculs dans le chapitre consacré à la *Théorie générique des moteurs*.

Mais cette étude est encore bien incomplète, parce qu'elle envisage les cycles tels qu'ils doivent être, et non pas tels qu'ils sont, et qu'elle ne tient nul compte de nombreux phénomènes de perturbation, dont la théorie générique ne se préoccupe pas. Ainsi, dans le cylindre de la machine à vapeur, il se produit des condensations de vapeur sur la paroi de métal, ainsi que dans la masse de la vapeur, et des vaporisations d'eau qui échappent aux équations des théoriciens.

Dans les machines à air chaud, de Stirling et d'Ericsson, on suppose l'intervention efficace de *régénérateurs de chaleur*, qui emmagasinent tour à tour et restituent sans perte le calorique, et réalisent les deux phases isodiabatiques du cycle théorique : ce double rôle des générateurs n'est jamais rempli, et les calculs qui le supposent sont donc sujets à caution. Enfin, nous avons dit ci-dessus que c'est grâce à une réfrigération énergique des parois des cylindres des moteurs à gaz que les hautes températures de l'explosion restent compatibles avec un fonctionnement prolongé et continu de la machine ; or, il en résulte une grande déperdition de calorique, lequel n'est pas transformé en chaleur et ne peut être récupéré utilement ; le calcul du rendement du cycle n'en fait pas état et il est par suite incomplet et inexact. Les valeurs calculées des rendements des diverses machines thermiques ne sont donc que des approximations et les mathématiciens qui consacrent leur talent à ces spéculations ne devraient nourrir aucune illusion relativement à la rigueur des chiffres auxquels ils sont conduits par ce procédé. Seule une *théorie expérimentale* solidement basée sur l'observation des faits pourra aboutir à des résultats pratiques ; la théorie générique ne devra être établie qu'en vue de comparer entre elles les différentes machines à feu ⁽¹⁾.

Hâtons-nous de dire qu'on peut déterminer bien plus sûrement le rendement des

1. Witz. — « Les Machines Thermiques » ; aide-mémoire de la collection Leauté ; Paris, Gauthier-Villars et fils.

machines par les expériences que l'on effectue en vue de mesurer leur consommation; si l'on évalue d'une part le pouvoir calorifique du combustible employé et de l'autre la quantité consommée, on aboutit à une estimation correcte et indiscutable du rendement réel de la machine, sur laquelle nous devons expressément attirer l'attention du lecteur dès maintenant.

Voici comment on évalue ce rendement.

Prenons une machine thermique quelconque, consommant par exemple du charbon, dont la puissance calorifique soit de 8000 calories par kilogramme. L'objet de toute machine thermique est de transformer les calories en kilogrammètres; le taux de cette transformation définit le rendement thermique de la machine. Le rendement sera d'autant plus beau qu'il faudra moins de calories pour produire une quantité déterminée de kilogrammètres. Rapportons la consommation aux 270.000 kilogrammètres auxquels correspond le travail du cheval-heure. (1) Si la machine dépense 400 grammes par cheval-heure, elle dispose de $0,400 \times 8000 = 3200$ calories. Or, si toute la chaleur disponible était transformée en travail, les 270.000 kilogrammètres correspondraient à $\frac{270.000}{425} = 635,29$ calories. Le rapport de 635,29 à 3200 définit donc le rendement vrai de la machine thermique, lequel est égal à $\frac{635,29}{3200} = 0,198$. La chaleur utilisée $Q - q$ est égale dans ce cas à 635,29; la chaleur disponible est d'autre part égale à 3200.

Dans cette détermination pratique, nous n'invoquons aucune théorie contestable, aucune hypothèse qu'on puisse discuter, aucune approximation admise pour les besoins du calcul; le rendement ainsi mesuré est réel. Suivant que le travail mesuré est indiqué ou effectif, on l'appellera le rendement thermique indiqué ou effectif; mais on a déjà introduit dans la science tant d'espèces de rendements, que nous nous reprocherions d'accréditer une nouvelle dénomination, si elle ne correspondait pas à un coefficient important entre tous. C'est par sa détermination qu'il nous a été possible de faire ressortir le mieux la valeur relative et les progrès des machines à vapeur, à air, à pétrole, à benzine, à gaz de ville, à gaz de gazogène et de hauts fourneaux, et à démontrer l'excellence indéniable des moteurs à gaz tonnant. Il y a vingt ans, on se déclarait satisfait, en machine à vapeur, d'une dépense de 8 kilogrammes de vapeur saturée sous 6 kilogrammes de pression et, en moteur à gaz, d'une consommation de 1000 litres de gaz de ville à 5000 calories, par cheval-heure effectif; les rendements effectifs correspondants étaient de 12 et 12,7 pour cent. La différence était grande entre ces chiffres et ceux que la théorie promettait pour la machine à vapeur, mais elle était énorme pour le moteur à gaz: en d'autres termes, la machine à vapeur avait un rendement générique très supérieur à celui du moteur à gaz, mais le moteur à gaz exigeait déjà moins de calories que la machine à vapeur.

Or, nous disions alors, dans nos *Etudes sur les Moteurs à gaz tonnant*, que les moteurs dont le rendement théorique est considérable sont les moteurs de l'avenir;

1. L'heure renfermant 3.600 secondes, on a pour le cheval-heure $75 \times 3.600 = 270.000$ kilogrammètres.

Moteurs à gaz et à pétrole. — WITZ.

au contraire, ceux pour lesquels le rendement générique est le plus voisin de l'unité sont les moteurs qui, approchant de la perfection dont leur espèce est susceptible, ne feront plus que de lents et faibles progrès.

• L'événement a justifié cette appréciation.

Aujourd'hui, certaines machines à vapeur, alimentées de vapeur surchauffée dans des conditions absolument exceptionnelles, ont pu ne consommer que 5 kilogrammes de vapeur par cheval-heure effectif au cours d'essais qui ne répondent pas toujours à la réalité d'une marche industrielle pratique : leur rendement a atteint de la sorte 17,5 pour cent. Or, il est des moteurs à gaz qui ont abaissé leur consommation à 368 litres de gaz possédant un pouvoir de 5784 calories ; le rendement correspondant était de 29,8 pour cent. (1) Mais voici qui est mieux encore ; un moteur à alcool de 16 chevaux a réalisé officiellement un rendement thermique effectif de 33,90 pour cent. Il est donc établi que les moteurs à gaz tonnant ou à vapeurs carburées rendent beaucoup plus que les meilleures machines à vapeur et nous constatons qu'en vingt ans leur rendement a plus que doublé, alors que celui des appareils à vapeur n'a pas augmenté de moitié.

C'est ce qu'il fallait démontrer.

1. Witz. — « Rendement comparé des machines à vapeur et des moteurs à gaz », dans l'Éclairage Électrique, nos des 4 et 11 janvier, 1902.

CHAPITRE QUATRIÈME

ÉTUDE SUR LES GAZ COMBUSTIBLES

I

Gaz d'éclairage dit « Gaz de ville. »

La composition du gaz de la houille est aussi variable que complexe ; M. Commines de Marsilly a démontré (1) que les gaz extraits par distillation de diverses qualités de charbon peuvent contenir un volume de 3 à 56 0/0 d'hydrogène et de 29 à 89 de gaz des marais. La température des cornues, l'allure des fours ainsi que les procédés fort divers d'épuration physique et chimique viennent encore modifier le produit final de la fabrication, de telle sorte qu'il paraît difficile de définir spécifiquement le gaz combustible connu sous le nom de gaz d'éclairage. C'est un mélange en proportions variables d'hydrogène, de formène, d'éthylène, de propylène, de vapeurs de benzine, de naphthaline et d'autres carbures, d'oxyde et de sulfure de carbone avec une faible proportion d'azote et des traces d'hydrogène sulfuré.

Il semble donc qu'on ne puisse établir une constitution moyenne du gaz des usines : et pourtant l'expérience démontre qu'en rapprochant les résultats d'un grand nombre d'analyses et en les discutant, on peut formuler, avec une approximation suffisante, la teneur de ce mélange dans ce qu'elle présente d'essentiel. C'est que le gaz, dont le pouvoir éclairant est réglé par les conditions strictes d'un cahier des charges, ne peut s'écarter beaucoup d'un type déterminé, que l'on s'efforce de reproduire uniformément par un choix judicieux des matières premières, et en dirigeant habilement la fabrication en vue du produit définitif à livrer à la consommation.

Donnons d'abord le résultat d'un certain nombre d'analyses de gaz de villes diverses.

Dans son *Dictionnaire de Chimie pure et appliquée*. Wurtz signalait la composition suivante, en volume, de trois gaz très différents dont le premier est mal épuré, alors que le troisième l'est très bien :

1. *Annales de Chimie et de Physique*, 3^e série, tome LXIX, page 297. Mémoire sur les gaz que produisent les diverses qualités de houille sous l'action de la chaleur.

	I	II	III
Hydrogène (H)	0	50,2	45,6
Oxyde de carbone (CO)	13	12,9	6,6
Azote (Az)	0	0	2,7
Formène (CH ⁴)	72	32,8	34,9
Ethylène (C ² H ⁴)	8	3,8	6,6
Acide carbonique (CO ²)	4	0,3	3,6
Acide sulfhydrique (H ² S)	3	0	0
	100	100,0	100,00

L'écart énorme de ces trois analyses montre bien quelles différences on peut constater entre divers gaz : le type n° 1 ne renferme pas d'hydrogène alors que le n° 2 en contient 50 0/0 ! Mais hâtons-nous de déclarer que Wurtz s'est plu à choisir les types qui présentaient le plus de divergence dans leur constitution.

Wagner et Gautier citent les analyses suivantes, d'après les travaux de Landolt et de Wunder.

	Gaz de Bonn	Gaz de Chemnitz	Gaz de Londres	Gaz de cannel coal de Londres
H.	39,80	51,29	46,0	27,7
CO	4,66	4,45	7,5	6,8
Az.	4,65	1,41	0,5	0,4
CH ⁴	43,12	36,45	39,5	50,0
C ² H ⁴	4,75	4,91	3,8	13,0
CO ²	3,02	1,08	0,7	0,1
H ² S	0,00	Divers 0,41	H ² O = 2,0	H ² O = 2,0
	100,00	100,00	100,00	100,00

Le gaz contient toujours en outre quelques millièmes d'acétylène, de la benzine et des carbures divers, qu'on n'indique pas le plus souvent dans les analyses industrielles, parce qu'on ne les distingue pas de l'éthylène; ce sont le propylène, l'allylène, le butylène, le crotonylène et le térébène.

Dans son *Gaz and Petroleum Engines* (1) M. W. Robinson indique les compositions de quelques gaz fabriqués dans les principales villes du Royaume-Uni; nous en extrayons les chiffres suivants :

	H	CO	Az	CH ⁴	C ² H ⁴	CO ²	O
Londres	53.14	4.11	3.19	36.55	2.92	0.09	0
Liverpool (cannel)	36.44	3.39	6.10	44.28	7.90	1.70	0.19
Birmingham	40.23	4.05	10.10	39.00	4.76	1.50	0.36
Edimbourg (cannel)	33.24	6.61	3.64	42.93	12.23	0.35	1.00
Glasgow (cannel)	39.18	7.14	3.07	40.26	10.00	0.29	0.06

1. Voir page 366.

Dans le gaz de cannel-coal, l'hydrogène est en moindre proportion, le gaz des marais y est, par contre, plus abondant.

Un certain nombre d'analyses ont conduit M. Hudelo (1) à attribuer la composition suivante au gaz des différentes usines de la Compagnie parisienne :

	En volume	En poids
H.	50,1	8,8
CO	6,3	15,6
Az	2,7	6,7
CH ⁴	33,1	47,3
C ² H ⁴	5,8	14,5
CO ²	1,5	5,8
O.	0,5	1,4
	<hr/> 100,0	<hr/> 100,0

Lors des essais des moteurs faits à Londres, sous les auspices de la Société des Arts, le gaz employé fut recueilli et analysé par M. Ch. Wilson qui a fait connaître les résultats suivants :

	19 septembre	21 septembre	27 septembre
H.	50,44	48,56	50,94
CO.	3,96	4,19	4,58
Az.	3,98	4,93	3,94
CH ⁴	37,34	37,73	36,14
C ² H ⁴ et carbures lourds	3,77	4,07	4,04
CO ² et O	0,51	0,52	0,36
	<hr/> 100,00	<hr/> 100,00	<hr/> 100,00

On le voit, la composition du gaz fourni par une même usine à quelques jours d'intervalle diffère sensiblement.

Dans les diverses expériences du *Gas-Engine Research Committee*, faites avec du gaz de Manchester, trois analyses ont donné les résultats suivants (2) :

Eléments	Premier échantillon	Second échantillon	Troisième échantillon
H.	46,7 volumes	45,8 volumes	43,40 volumes
CO	4,8 —	7,0 —	9,46 —
CH ⁴	36,2 —	34,4 —	33,67 —
Carbures divers	4,4 —	4,7 —	4,48 —
CO ²	0,0 —	0,0 —	0,16 —
O.	0,2 —	1,2 —	0,13 —
Az	7,7 —	6,9 —	8,70 —
	<hr/> 100,0 volumes	<hr/> 100,0 volumes	<hr/> 100,0 volumes

1. *Traité de la chaleur*, par Péclot, 4^e édition, publiée par M. Hudelo, tome I, page 116.
 2. *First Report to the Gas-Engine Research Committee*, by professor Burstall; in the proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 27 avril 1898; page 224; *second Report*... 18 octobre 1901, page 27.

Le troisième échantillon pesait 600 grammes par mètre cube à 15° et 760 mm de pression; sa densité était donc égale à 0,47; il exigeait théoriquement 5,49 volumes d'air pour sa combustion complète.

Le gaz de Leeds dont s'est servi M. Grover dans ses essais lui a donné à l'analyse :

H	52,9 volumes.
CO	6,5 —
CH ⁴	35,2 —
Carbures divers	4,2 —
CO ² et O	1,1 —
Az.	0,1 —
	100,0 volumes.

Voici, d'après Bryan Donkin, la composition du gaz d'éclairage de plusieurs villes de la Grande-Bretagne, d'Amérique et d'Allemagne (1) :

	Londres	Man- chester	Kilmar- nock	Dresde	Hanovre	New-York
H	47,99	45,58	43,60	48,70	46,27	39,50
CO	3,75	6,64	4,30	8,00	11,19	4,30
CH ⁴	37,64	34,90	42,80	33,40	37,55	37,30
Carbures divers	4,41	6,46	5,55	3,00	3,17	6,60
CO ²	»	3,67	»	1,50	0,81	2,70
Az.	5,95	2,46	2,70	4,00	1,01	8,20
O	0,26	»	1,05	1,40	»	1,40
H ² S	»	0,29	»	»	»	»
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

J'emprunte enfin les chiffres suivants à M. Schœttler (2) :

	Kœnigsberg	Heidelberg	Berlin
H	47,06	41,43	49,75
CO	5,20	4,57	9,54
CH ⁴	38,23	39,49	32,70
Carbures divers	6,87	7,77	4,61
CO ²	0,68	0,24	2,50
Az.	1,96	5,10	0,68
O	»	»	0,22
Total	100,00	100,00	100,00

Les variations de composition de ces divers gaz de ville sont considérables; l'hydrogène passe de 27,7 volumes à 53,14, alors que l'oxyde de carbone tombe de 13 à 3,39 et le formène de 50 à 33.

Dans ces conditions, est-il possible de dire quelle est la composition moyenne d'un bon gaz d'usine, répondant aux conditions ordinaires des cahiers des charges, c'est-à-dire donnant un carcel avec une dépense de 105 litres dans un bec Bengel, dans les conditions définies habituellement ?

1. Donkin, A Text-book on gaz, oil and air engines; 3^e édition, page 250; London, 1900.
 2. R. Schœttler. — « Die Gasmachine », 3^e édition, page 185; Braunschweig, 1899.

Mes études (1) et de nombreuses analyses m'autorisent à répondre affirmativement, et je ne crois pas être loin de la vérité en assignant la composition suivante à un bon gaz moyen, d'une richesse un peu supérieure, il est vrai, aux produits courants des usines françaises, belges et allemandes.

Eléments	Poids spécifiques	Teneur	
		en poids	en volume
H	0,0826	100 gr.	1116 ^{lit} 0
CO	1,254	150	119,6
CO ²	1,970	4	2,0
Az	1,256	120	95,2
CH ⁴	0,716	440	611,1
C ² H ⁴ et analogues	1,254	110	88,0
Carbures divers	2,5 (?)	76	30,4
		Total = 1000 gr.	Total = 2062 ^{lit} 3

Le poids du mètre cube de ce gaz serait en conséquence de 488 grammes, ce qui correspond à une densité égale à 0,37.

Le tableau suivant donne les quantités de chaleur dégagées par la combustion des divers éléments, en supposant que la vapeur d'eau produite soit condensée. J'ai pris comme base des calculs les chiffres de M. Berthelot, et j'ai évalué les pouvoirs calorifiques des gaz par gramme et par litre sur les bases ci-dessous.

*Calories dégagées dans la combustion
(vapeur d'eau condensée)*

	par gramme	par litre
H	34,462	3,09
CO	2,439	3,05
CH ⁴	13,344	9,55
C ² H ⁴	12,193	15,29
Autres carbures	5,000	12,50

Voici dès lors comment s'établit le pouvoir calorifique de notre gaz.

ÉLÉMENTS	H	CO	CH ⁴	C ² H ⁴	Carbures divers
Volume du combustible	1116 lit.,0	119 lit.,6	611 lit.,1	83 lit.,0	30 lit.,4
Volume du comburant (oxygène)	558 lit.,0	59 lit.,8	1222 lit.,2	264 lit.,0	182 lit.,4
Chaleur dégagée	3446 cal.,0	365 cal.,2	5836 cal.,0	1346 cal.,4	380 cal.,0
Produits de la combustion en volumes	H ² O	—	1222 lit.,2	176 lit.,0	121 lit.,6
	CO ²	—	119,6	611,1	176,0

Le volume d'oxygène strictement exigé pour la combustion d'un kilogramme de gaz

1. Études sur les moteurs à gaz tonnant, in *Annales de Chimie et de Physique*, 5^e série tome XX, 1883.

d'éclairage est donc de 2.286 litres : le cube d'air équivalent est égal à 10.881 litres ; c'est 5,3 fois le volume du gaz employé.

Le nombre total de calories dégagé par la combustion d'un kilogramme de ce gaz est égal à 11.373 ; cela fait par mètre cube de gaz 5.515 calories, à 0° et 760 millimètres (1).

Tous ces calculs sont relatifs à une combustion sous pression constante, et supposent la vapeur d'eau condensée.

Les chiffres que je viens de produire sont théoriques ; ils avaient besoin d'être confirmés par l'expérience. Cette constatation était d'autant plus nécessaire qu'il existait la plus grande divergence entre les opinions de ceux qui se sont occupés de la question. Grashof estimait le pouvoir calorifique du gaz à 6.000 calories par mètre cube ; Rühlmann, à 6.390 ; Devillez, à 6.100 ; Schöttler, à 6.000 ; Ayrton et Perry, à 6.083 ; Slaby, à 4.875 ; Richard, à 8.000 ; Dugald Clerk, à 5.372 et 5.640 pour les gaz de Londres et de Manchester ; enfin Steward et Brooks ont conclu à 5.495.

Ces appréciations différaient sensiblement l'une de l'autre.

Les écarts relevés tiennent à des causes multiples que nous devons faire ressortir, avant d'entrer dans le vif de la question.

Et d'abord, on ne définissait pas suffisamment les conditions auxquelles se rapportaient les pouvoirs calorifiques des gaz : il doit être entendu qu'ils énoncent le nombre de calories-kilogrammes fournis par la combustion complète et totale d'un mètre cube de gaz pris à 0° et à 760 millimètres de pression, les produits de la combustion étant ramenés à cette même température zéro et à la pression atmosphérique. S'il en est ainsi, il faut logiquement supposer que la vapeur d'eau engendrée est condensée : c'est ce qu'on fait en France. En Angleterre et surtout en Allemagne, l'usage a prévalu de se placer dans l'hypothèse contraire et de considérer que la vapeur n'est pas condensée ; cette convention n'est pas indifférente, attendu qu'elle a pour résultat de diminuer notablement le pouvoir. On appelle pouvoir *supérieur* celui qui répond à la condensation, pouvoir *inférieur* celui qui suppose la vapeur non condensée ; la différence entre les deux pouvoirs varie avec la composition du gaz. Elle sera d'autant plus grande, que celui-ci renfermera plus d'hydrogène et de carbures d'hydrogène, dont la combustion donne de l'eau. Nous discuterons plus loin les arguments qui nous font envisager de préférence le pouvoir supérieur.

Mais il y a une autre distinction à faire : le pouvoir sera-t-il déterminé à volume constant ou bien à pression constante ?

Ce sont deux pouvoirs différents, mais il est peu de personnes qui se rendent compte des causes de cette différence.

Nous essaierons de les exposer brièvement et avec netteté.

Quand un combustible gazeux brûle, il se contracte généralement (2) et les produits

1. Des calculs analogues à ceux qui précèdent conduisent M. Schöttler à attribuer au gaz qu'il considère comme moyen un pouvoir un peu inférieur au nôtre ; il conclut à 5.212 calories, vapeur d'eau condensée, le gaz ayant un poids spécifique égal à 0,52.

2. Un combustible solide, tel que le carbone, donnerait au contraire un volume plus grand de gaz brûlés.

de la combustion, ramenés à la température initiale du mélange du gaz combustible et de son comburant, ont un volume moindre que celui qu'ils avaient avant la réaction, donc une tension moindre. Pour les évacuer dans l'atmosphère, il y a nécessité de développer un travail ; l'équivalent en chaleur de l'énergie nécessaire vient par suite en décompte de la chaleur disponible. Voilà pourquoi et en quoi le pouvoir à volume constant Q_v est plus faible que le pouvoir à pression constante Q_p .

On pourrait dire encore, que pour ramener les gaz à leur volume initial, il faut les dilater, en leur fournissant du calorique : c'est ce calorique qui est égal à $Q_p - Q_v$.

Cette différence entre les deux pouvoirs peut se calculer : elle a une valeur déterminée pour chaque gaz. Prenons le travail comme base du calcul.

Soit \mathcal{E} ce travail nécessaire pour évacuer les gaz brûlés dans l'atmosphère et les faire passer du volume v_1 qu'ils occupent à leur volume initial v_0 ;

$$Q_p - Q_v = A \mathcal{E}.$$

$$\mathcal{E} = \int_{v_1}^{v_0} p dv = p (v_0 - v_1).$$

puisque p est constant dans l'opération.

Observons que v_1 est le volume du composé, et v_0 celui des composants.

Or, si nous appelons n et n' le nombre d'unités de volume (égaux à 22 lit. 32, à 0° et 760 millimètres) du composé et des composants, nous aurons :

$$v_0 = n \times 22,32 (1 + \alpha T)$$

$$v_1 = n' \times 22,32 (1 + \alpha T)$$

Il vient donc :

$$Q_p - Q_v = A \mathcal{E} = \frac{1,0333}{1,000} \frac{1}{425} 22,32 (n - n') (1 + \alpha T),$$

$$= 0,5424 (n - n') + 0,002 (n - n') T.$$

Pour la combinaison de l'hydrogène et de l'oxygène, formant de l'eau, la différence des nombres n et n' égale $\frac{1}{2}$, ce qui donne $Q_p - Q_v = 0,286$ calories ; l'expérience confirme le calcul, attendu que $Q_p = 34,500$ et $Q_v = 34,214$ d'après M. Berthelot, à qui nous empruntons les considérations qui précèdent (*). » Pour le formène et l'éthylène, n est égal à n' et les deux pouvoirs sont égaux ; pour les vapeurs de benzine, le phénomène est interverti. En somme, la différence des deux pouvoirs est très faible pour le gaz d'éclairage et elle ne dépasse certainement pas 50 calories sur 5.500

Mais revenons aux pouvoirs qu'on attribuait au gaz d'éclairage : pour décider de la valeur qu'il convient d'adopter, il faut recourir à l'expérience.

De nombreux savants ont étudié la question.

Et d'abord, rappelons les essais de Favre et Silbermann ; ces habiles physiciens avaient construit un calorimètre, devenu classique, dans lequel ils brûlaient les gaz combustibles en présence de l'oxygène ; la chambre de combustion, faite en laiton doré, était disposée dans un récipient de grande dimension, renfermant l'eau dont on

1. Berthelot. — « Essai de Mécanique chimique fondée sur la Thermo-chimie » ; page 414 ; Paris, 1879. Les volumes n et n' sont rapportés à 2 vol. d'hydrogène, soit au volume de 2 grammes d'hydrogène.

mesurait l'élévation de température. Cet ensemble était isolé de l'extérieur par une caisse à double enveloppe d'eau et de substances calorifuges. L'oxygène pénétrait dans la boîte de combustion par un tube qui débouchait en face d'un second tube amenant le gaz à brûler, de manière à assurer une combustion complète : les produits de la combustion s'échappaient par un troisième tube, qui les conduisait à un serpentín enroulé autour de la boîte à combustion au sein même du liquide du calorimètre. Ces gaz ne s'échappaient qu'après avoir pris la température de l'eau de ce calorimètre. Le poids de combustible brûlé se déterminait par l'analyse et par le dosage des produits de la combustion.

Cet appareil ne paraît pas avoir été employé par Favre et Silbermann pour mesurer le pouvoir calorifique du gaz d'éclairage, mais il convenait de le mentionner, car c'est un instrument original, duquel dérivent tous les autres de ce genre.

Le calorimètre de Hartley appartient à cette classe de calorimètres et il a été spécialement étudié en vue de la mesure de la chaleur développée par la combustion des gaz. Il se compose d'un réservoir d'eau, muni d'un robinet et alimenté n'importe comment ; l'écoulement de l'eau se fait à la sortie du réservoir, par un tube de verre fort large, dans lequel est immergé un thermomètre donnant à tout instant la température du liquide. Cette eau se rend d'abord dans un cône métallique creux, entourant un brûleur Bunsen, qui est disposé en dessous d'un calorimètre ; du cône, elle passe à ce calorimètre et elle s'écoule enfin dans un réservoir placé à côté. Ce calorimètre est pourvu de larges ailettes se prêtant à une meilleure absorption de la chaleur ; il est surmonté d'une cheminée en cuivre qui évacue les gaz brûlés. Le gaz d'éclairage est débité par un compteur donnant un litre et demi par tour ; avant d'arriver au bec brûleur, il traverse encore un régulateur de pression très sensible. Des thermomètres de précision sont disposés à l'entrée et à la sortie de l'eau dans le calorimètre, à l'arrivée du gaz et dans la cheminée de dégagement des produits de la combustion.

On brûle généralement 42 litres de gaz à l'heure ; mais un essai de 10 minutes suffit et l'on ne dépense donc que 7 litres chaque fois. Le courant d'eau et le débit du gaz sont réglés de façon à ce que l'élévation de température ne dépasse pas 3 à 4 degrés centigrades : cette condition étant réalisée, on procède aux expériences. Pour cela, on note l'indication du compteur et l'on ouvre le robinet d'évacuation de l'eau.

Pendant toute la durée de l'épreuve, il faut relever les températures à intervalles réguliers de temps, de manière à avoir le plus grand nombre possible de chiffres. Lorsque le compteur marque une consommation de 7 litres, on arrête l'essai, et l'on recueille l'eau mise en œuvre, pour la peser ou la jauge. Le poids de cette eau, multiplié par l'élévation de température, et divisé par 7, donne le pouvoir calorifique du gaz en calories par litre.

Mais un certain nombre de corrections s'imposent :

1° Le corps du calorimètre rayonne de la chaleur quand la température est supérieure à celle du milieu ambiant : M. Hartley évalue cette perte à 0,00252 calorie par minute et par degré Fahrenheit, soit 0,0014 calorie par minute et par degré centigrade.

2° Quelquefois il peut arriver que le corps du calorimètre reste à une température inférieure à celle de l'air extérieur ; dans ce cas, il y a un gain de 0,0035 calorie par minute et par degré centigrade de différence.

3° La perte de chaleur pour l'air fourni au brûleur est négligeable.

3° Le brûleur Bunsen est si bien entouré, qu'il n'y a qu'une perte négligeable par rayonnement.

Cet instrument a une valeur réelle, si nous nous en rapportons à ce que M. Love en a dit à une réunion de l'*American Gas Light Association* ; cette conférence a été reproduite par le *Journal du Gaz et de l'Electricité* (1).

M. Hugo Junkers en a établi un autre, qui n'en diffère pas grandement mais qui impose moins de corrections.

Dans cet appareil, un bec de gaz, à combustion aussi complète que possible, dont la consommation est déterminée par un gazomètre très exact, brûle au milieu d'une enceinte dont la paroi est traversée par un courant d'eau, coulant continuellement et à une vitesse constante ; on règle la dépense du bec et le débit du liquide de manière à ce que la température de l'eau demeure stationnaire. Les produits de la combustion traversent, à leur sortie de la chambre de combustion, une série de tubes métalliques entourés par l'eau du calorimètre et présentant une surface de refroidissement suffisante pour que les gaz ne s'échappent du calorimètre qu'après avoir pris sensiblement la température de la pièce dans laquelle on opère.

Pour obtenir un écoulement constant de l'eau, le liquide traverse d'abord un petit récipient à déversoir avec réglage de niveau par un trop-plein : la différence de niveau, qui provoque le mouvement de l'eau, ne varie donc pas au cours de l'expérience et la vitesse s'établit et reste uniforme. Sur le parcours du liquide, se trouve un robinet par lequel on introduit une résistance permettant de modifier le débit à volonté : la masse d'eau en circulation varie donc au gré de l'expérimentateur.

De plus, pour assurer un parfait mélange de l'eau du calorimètre, on lui fait traverser quelques chicanes constituées par des plaques perforées.

Le calorimètre est protégé contre les déperditions par une enveloppe nickelée polie, qui ménage un coussin d'air entre les deux surfaces métalliques en présence.

Deux thermomètres très sensibles et parfaitement d'accord sont disposés à l'entrée de l'eau, à sa sortie et dans le tuyau d'échappement des gaz brûlés. On détermine le poids d'eau qui a passé en la recueillant dans un réservoir dont la tare a été soigneusement faite avant l'essai et qu'on pèse après qu'il s'y est amassée une masse d'eau suffisante.

Cet instrument est construit aujourd'hui en France par MM. Ducretet et Lejeune, à l'obligeance desquels nous devons la figure ci-contre.

L'appareil est représenté en expérience.

Le calorimètre C est constitué par une chambre de combustion centrale, entourée d'une enveloppe d'eau que traversent des tubes verticaux ramenant les gaz brûlés à

1. Numéro du 15 décembre 1889.

l'orifice d'échappement qu'on voit sur la droite à la partie inférieure de l'appareil ; une valve permet de régler le tirage à volonté.

Le débit de l'eau est très régulier, grâce aux dispositions qui ont été prises ; le liquide entre par *w*, traverse le régulateur *ab*, descend verticalement, traverse le coude *ef* et s'échappe par *c* ; deux thermomètres donnent les températures *t* et *t'* à l'entrée et à la sortie. Le gaz traverse le compteur d'expérience CO, dont un thermomètre marque aussi la température ; le régulateur R règle le débit.

On recueille l'eau condensée dans l'éprouvette graduée *d'* figurée en dessous du calorimètre. Cette donnée est très utile, car elle permet d'apprécier la richesse du gaz en hydrogène et en carbures et de faire intervenir dans le calcul du pouvoir calorifique la chaleur de vaporisation de l'eau. Toutefois c'est le pouvoir du gaz, à vapeur d'eau condensée qui est celui dont on doit tenir compte dans l'établissement des bilans des moteurs

L'eau du calorimètre s'écoule par le trop-plein C dans une éprouvette qui permet de la jauger en volume, mais il nous paraît plus exact de la peser, ainsi qu'il a été dit ci-dessus.

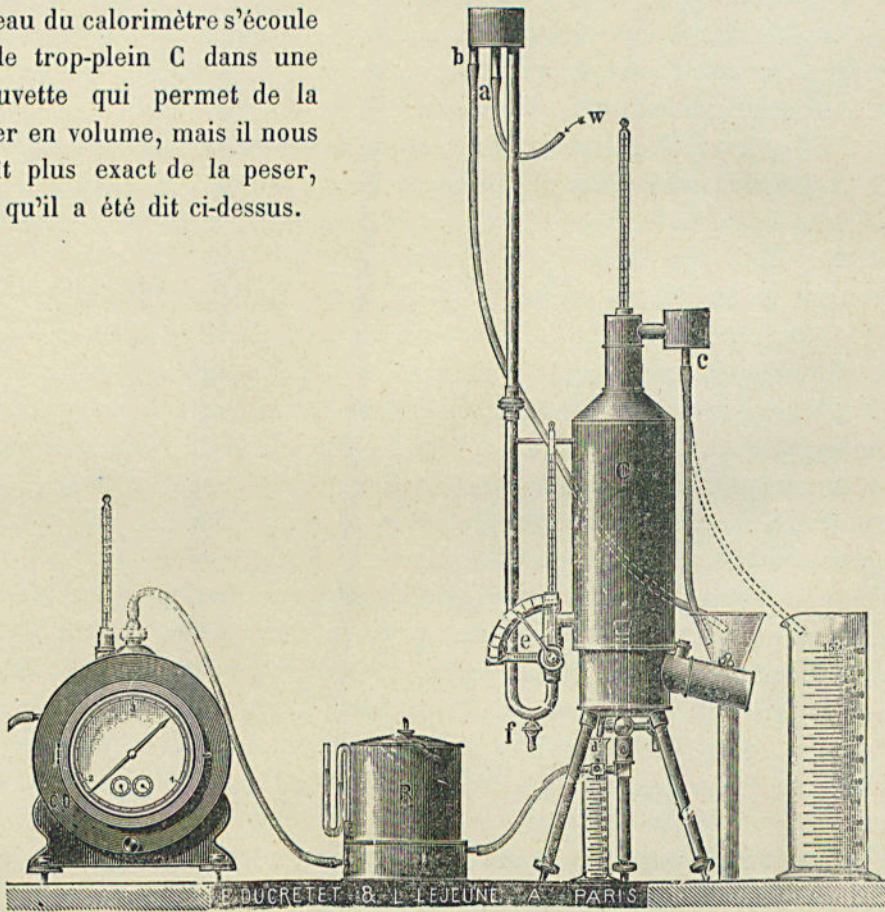


Fig. 10. — Calorimètre Junkors.

Pour faire une observation, il faut d'abord régler les débits d'eau et de gaz, s'assurer que la charge reste constante, qu'il n'y a pas de perte de chaleur, et, en un mot, que l'opération ne nécessite aucune correction : on lit alors les index du compteur, on

relève les températures, puis on commence l'essai en manœuvrant le robinet à deux voies. Il faut déterminer le volume du gaz écoulé, le poids d'eau débité et les températures initiale et finale de l'essai : le pouvoir se déduit de ces données par une formule dont les paramètres ont été établis par le constructeur.

Nous croyons utile de donner un exemple des calculs à faire.

Consommation de gaz.	10 litres
Pression du gaz en centimètres d'eau.	24
Pression barométrique	750 ^m /m,16
Température du compteur.	11°,75
Poids d'eau de circulation.	5750 grammes.
Température moyenne de l'eau.	} à l'entrée . . . 12°,4 à la sortie . . . 21,9
Température des gaz brûlés à la sortie.	16,7
Poids d'eau condensé	7,78 grammes.

Calculs :

1° Sans tenir compte de l'eau condensée (Pouvoir supérieur) :

Calories par 10 litres	$5750 \times 9,5 = 54,62$
— par mètre cube à 11°,75 et 750 millim.	$= 5462,$
— par mètre cube à 0° et 760 ^{mm}	$5462 \frac{760}{750} (1 + \alpha 11°,75)$
	$= 5462 \times 1,0569$
	$= 5783$

2° En tenant compte de l'eau condensée (Pouvoir inférieur) :

Eau condensée par litre de gaz	0,778 grammes.
Eau condensée par mètre cube	0°,778 —
Calories par kilogramme de vapeur à 16°,7 = 606,5 + 0,305 × 16,7 = 611,6	
Calories du gaz par mètre cube à 11°,75 et 750 ^{mm} = 5783 — 611,6 × 0,778	
	$= 5307.$

La différence entre les deux pouvoirs supérieur et inférieur de ce gaz atteint donc 476 calories.

L'appareil Junkers peut être appliqué aisément à la mesure du pouvoir calorifique des pétroles.

Nous compléterons donc cette description du procédé en donnant les chiffres relevés dans un essai de pétrole ; nous les empruntons au mémoire de M. Schœttler, publié à la suite de ses remarquables expériences sur le moteur Diesel.

Poids du pétrole brûlé dans le calorimètre	15 grammes.
Poids d'eau de circulation	9.600 —
Eau condensée	21 —
Température de l'air extérieur	19°,6
Température des gaz à la sortie du calorimètre.	17°,5
Température de l'eau de circulation	} à l'entrée. . . 9°,584 à la sortie. . . 26°,758
Élévation de température	
Pouvoir calorifique supérieur en calories par kilog.	10 991,36
Chaleur latente de l'eau condensée	866,60
Pouvoir calorifique inférieur.	10.124,76.

Les appareils Hartley et Junkers donnent le pouvoir calorifique du gaz à pression

constante et non pas à volume constant ; nous avons dit que ce dernier est un peu plus faible.

Les bombes fournissent au contraire les pouvoirs à volume constant ; c'est le pouvoir qu'il faut connaître pour calculer le rendement des moteurs à explosion.

Ce procédé de la bombe calorimétrique a été inauguré par Andrews en 1848 et appliqué maintes fois par M. Berthelot. En faisant détoner dans une bombe un mélange tonnant d'air et de gaz, fait dans des proportions connues, et en mesurant au calorimètre la chaleur dégagée dans la réaction explosive, on détermine sûrement le pouvoir calorifique du gaz proposé.

J'ai modifié ce procédé de manière à le rendre aussi simple que possible : ma bombe eudiométrique est plus facile à manier, elle se prête au remplissage sur la cuve à mercure et supprime l'emploi d'une pompe pour l'introduction et l'extraction du gaz (1).

La figure 11 représente cette bombe en demi-grandeur d'exécution ; elle est formée d'un cylindre d'acier A de 60 millimètres de diamètre intérieur, sur environ 2 millimètres d'épaisseur ; sa hauteur est de 90 millimètres, ce qui lui donne une capacité d'environ 255 centimètres cubes. Deux couvercles CC sont vissés sur le cylindre et

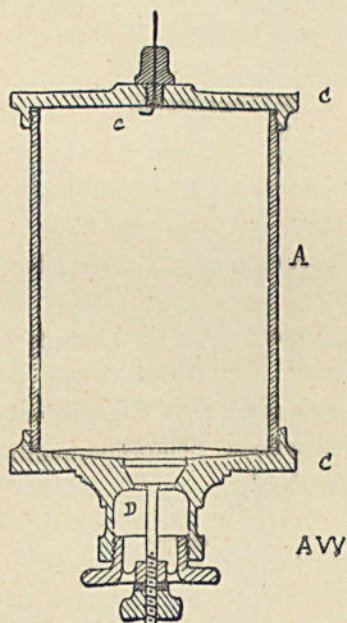


Fig. 11. — Bombe Witz.

en effectuent la fermeture hermétique, par simple interposition d'un papier huilé. Le couvercle supérieur porte l'excitateur d'étincelle *e* ; le couvercle est muni d'une soupape autoclave *D*, qui débouche dans un ajutage cylindrique de 27 millimètres de diamètre. Ce second couvercle présente une déclivité de la circonférence au centre, de manière à faciliter l'écoulement complet du mercure par l'ouverture centrale. Toutes les surfaces sont nickelées ; les poids de l'acier et du nickel ont été relevés par le constructeur, de manière à permettre l'évaluation par le calcul du poids en eau de l'appareil.

Cette bombe étant complètement remplie de mercure, est renversée sur ce liquide à la façon d'une éprouvette ; le mélange tonnant *y* est introduit, en le transvasant d'une cloche, dans laquelle il a été préparé à l'avance, par l'intermédiaire d'un tuyau de caoutchouc ; le gaz passe, grâce à une pression déterminée, dans la cloche. La forme conique

du fond permet à la bombe de se vider complètement et de se remplir entièrement de gaz tonnant, à une pression légèrement supérieure à celle de l'atmo-

1. J'ai décrit mon procédé dans les *Annales de Chimie et de Physique*, 6^e série, tome VI, octobre 1885 ; M. Scheurer-Kostner le mentionne à la page 150 de son ouvrage sur le *Pouvoir calorifique des Combustibles*, Paris, 1896 ; enfin il est indiqué par M. Herman Poole dans *The Calorific Power of fuels*, New-York, 1898.

sphère ; on rétablit l'égalité en desserrant un peu la soupape D, pendant un instant très court, de manière à livrer issue à l'excès de gaz ; il faut que cette opération se fasse en tenant la bombe verticalement dans la position de la figure. On lit au baromètre la pression atmosphérique au $\frac{1}{10}$ de millimètre et l'on prend pour température du gaz celle de la cuve à mercure.

Le mélange tonnant est préparé sur la cuve à eau, en se servant de l'ampoule de verre figurée ci-contre. Cette ampoule, fermée par un robinet R à la partie supérieure, se termine à la partie inférieure par un bout effilé ; le gaz ou l'air arrive par le haut, à travers un tuyau de caoutchouc, et il se substitue lentement à l'eau qui s'écoule par le bout. Mes ampoules jaugent de 200 à 500 centimètres cubes et l'erreur commise à chaque remplissage est certainement inférieure à 15 millimètres cubes. On vide ensuite le contenu dans une cloche, en glissant l'ampoule en dessous dans l'eau et en ouvrant le robinet R. Si l'on mêle 7 ampoules d'air et une ampoule de gaz, on a un mélange tonnant au $\frac{1}{7}$: c'est la proportion que j'emploie habituel-

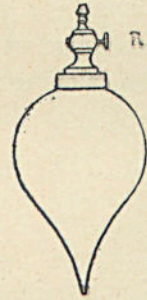


Fig. 12.

lement pour les gaz de ville ; pour les gaz pauvres je forme de préférence un mélange de un pour un, l'air étant souvent additionné d'oxygène, pour assurer une combustion complète.

La bombe étant chargée, je l'introduis dans un calorimètre renfermant près d'un litre d'eau, de manière à l'y noyer, et je fais passer l'étincelle : l'explosion a lieu sans aucun bruit, la température s'élève d'une quantité δ et il est aisé d'en déduire la quantité de chaleur dégagée. Chaque division de mon thermomètre équivaut à $0^{\circ},01502$; je l'observe au viseur, à distance, et en divisant chaque intervalle au $\frac{1}{10}$ j'apprécie le millième et demi de degré.

Il est à noter que le mélange formé sur la cuve à eau est saturé de vapeur d'eau à la température de cette cuve ; il en résulte que la vapeur d'eau formée dans l'explosion se condense nécessairement dans la bombe, si toutefois la température finale du calorimètre est la même que celle de la cuve à eau ; au cas, où la température serait légèrement différente, il y aurait lieu à correction, mais elle est négligeable pour un écart de 2 à 3 degrés, qu'on n'atteint jamais quand l'opération est faite dans de bonnes conditions (').

Voici un exemple des calculs à faire pour une opération calorimétrique :

Mélange de 1 gaz et 6 air.

Poids d'eau : 999^{gr},865.

Poids en eau du calorimètre, de la bombe et du thermomètre : 120^{gr},994.

Poids total d'eau : 1120^{gr},859.

1. Avec les gaz de la pile, la température de la cuve étant de $13^{\circ},97$ et celle du calorimètre $14^{\circ},40$, le pouvoir de l'hydrogène trouvé par l'expérience devrait être augmenté de 2 calories sur 34.200.

Elévation de température : $0^{\circ},1627$.

Température initiale du gaz : 15° .

Pression atmosphérique : $776^{\text{mm}},2$.

Chaleur dégagée : $0^{\text{cal}},1824$.

Telle est la chaleur développée par la combustion d'un volume de gaz égal au $\frac{1}{7}$ du volume de la bombe, lequel est exactement en litre $0,2568$; quelle serait la chaleur donnée par un 1 mètre cube de gaz, à 0° et 760 millimètres de pression ?

Le calcul est aisé :

$$Q = \frac{760}{776,2} \frac{(1 + \alpha \cdot 15)}{1} \frac{7 \times 1000}{0,2568} 0,1824 = 5136 \text{ calories.}$$

Le pouvoir de ce gaz est donc de 5136 calories à volume constant, vapeur d'eau condensée à 15° .

Il ne m'appartient pas de dire du bien de cet appareil que j'ai créé ; qu'il me soit permis toutefois de faire observer qu'il n'exige aucune manœuvre de pompe ; la pression du mélange se lit au baromètre avec la précision que comporte cet instrument ; la bombe est entièrement immergée dans l'eau du calorimètre et j'évite ainsi des corrections d'une exactitude discutable. Les dimensions de la bombe que j'ai décrite sont, je le reconnais, un peu trop restreintes, mais cet inconvénient peut être corrigé aisément ; il est d'ailleurs racheté par la précision de la méthode, qui ne comporte qu'une très faible correction de température. On peut opérer avec de l'air ou avec de l'oxygène ; j'ai fréquemment recours à un mélange d'air et d'oxygène.

Le prix élevé des bombes Berthelot a amené M. Mahler à substituer au vase de platine un récipient en acier, émaillé à l'intérieur, beaucoup moins coûteux ; cet instrument qui a eu grand succès est parfaitement approprié à la détermination des pouvoirs des combustibles solides, mais il perd une partie de ses avantages, quand on l'applique à la combustion des gaz.

Voici comment fonctionne la bombe Mahler : le combustible est brûlé dans l'oxygène pur, sous une pression considérable, dans une bombe de 654 centimètres cubes de capacité, pouvant résister à une pression de 5.500 kilogrammes par centimètre carré. La combustion est instantanée et tout le calorique développé est absorbé par le métal de la bombe et par l'eau du calorimètre dans lequel il est immergé.

Cette bombe est faite en acier supérieur demi-doux, forgé sur mandrin ; elle est nickelée extérieurement et émaillée à l'intérieur. L'obturation est opérée par un bouchon à vis, serrant une rondelle de plomb : le bouchon porte un robinet à vis conique, par lequel on introduit l'oxygène comburant. Il est traversé par une électrode bien isolée, prolongée à l'intérieur par une tige de platine terminée par un petit fil de fer jouant le rôle d'amorce.

Le comburant est emprunté à un tube d'oxygène : on l'emploie sous une pression de 25 atmosphères (').

Quand on opère sur un combustible solide, on le broie finement et l'on en introduit un gramme dans une capsule de platine suspendue dans la chambre de combustion : la mise de feu est opérée par une spirale de fil de fer fin, portée à l'incandescence par un courant de 2 ampères environ.

La détermination du pouvoir calorifique d'un combustible liquide se fait de même, ce liquide étant renfermé dans une ampoule de verre mince à pointes effilées, par où passe l'amorce électrique.

Pour les gaz, on fait le vide dans l'obus, puis on y introduit le gaz ; on y refait le vide une seconde fois, et on le remplit définitivement de gaz sous la pression atmosphérique : l'oxygène est ajouté ensuite, sous cinq atmosphères de pression pour le gaz de ville, une demi-atmosphère pour un gaz pauvre de gazogène.

Quand on ne dispose pas d'une machine pneumatique, on se contente de remplir d'abord l'obus d'eau, pour chasser l'air avant d'y laisser pénétrer le gaz combustible.

M. Mahler a fait des expériences à l'usine de la Compagnie parisienne de La Villette ; et nous croyons intéressant de faire connaître les résultats qu'il a obtenus ; nous les rapprocherons de ceux qui ont été relevés par lui sur le gaz de Commentry et sur du gaz obtenu avec du *Cannel coal*.

	Gaz de Cannel	Gaz de Commentry	Gaz de la Villette
Vapeur de benzol.	1,53	1,11	1,09
Autres carbures absorbables par le brome.	14,03	3,88	3,28
CH ⁴ et Az.	38,00	33,56	33,09
H	30,41	49,44	50,88
CO	11,09	9,15	8,86
CO ²	3,85	1,87	1,80
O	1,09	0,99	1,00
Total.	100,00	100,00	100,00
Densité.	0,6367	0,4040	0,4033
Poids spécifique	0,8232	0,5223	0,5215
<i>Pouvoir supérieur à volume constant</i>			
Au kilogramme	7.735c.	11 111c.	10.744c.
Au mètre cube à 0° et 760 millim. . .	6 365	5 804	5.602

1. Dans les comptes rendus de l'Académie des Sciences (17 novembre 1902), M. Berthelot a fait observer que l'oxygène du commerce peut renfermer de l'hydrogène et autres combustibles résultant de sa préparation ou de la manutention qu'il a subie; on l'en débarrasse en le faisant passer à travers un tube de cuivre chauffé au rouge. L'hydrogène est l'impureté habituelle de l'oxygène obtenu par électrolyse ; M. Berthelot estime qu'un litre en contient environ 0,06 milligramme, pouvant dégager au plus 2 à 3 calories. Dans une détermination à la bombe Berthelot, la chaleur ainsi gagnée ne dépasse pas 17 calories, en donnant lieu à une erreur de 2 à 3 millièmes dans les cas ordinaires. L'erreur est donc négligeable.

M. Mahler conclut de ces essais qu'on peut dans les calculs adopter 5.600 calories pour la chaleur de combustion d'un gaz de pouvoir éclairant normal; ce chiffre est un peu fort.

Il est à noter d'ailleurs que les pouvoirs déterminés à la bombe sont généralement supérieurs à ceux que l'on obtient par les calorimètres à combustion du genre Hartley et Junkers; j'attribue ces écarts à une combustion incomplète dans le brûleur de ces derniers appareils. J'ai d'ailleurs constaté que ces écarts sont plus considérables pour les gaz très pauvres que pour les gaz riches.

Voilà des procédés directs de mesure du pouvoir calorifique du gaz d'éclairage; il existe aussi un procédé indirect.

Ce procédé est dû à M. Schilling, dont la haute compétence dans la question du gaz est indiscutable. M. Slaby l'a transformé et rendu pratique par les considérations théoriques et les moyens opératoires qui suivent.

L'analyse d'un gaz d'éclairage est une opération assez simple, quand on se borne à la recherche de H_2CO et CH_4 ; elle devient fort délicate, quand on se propose de déterminer la proportion relative des carbures lourds absorbables par le brome ou l'acide sulfurique fumant, tels que notamment l'éthylène, le butylène et le térébène. Généralement on évalue leur proportion *in globo*, comme nous l'avons fait ci-dessus; mais cette évaluation est arbitraire et elle peut faire commettre une erreur de 8 0/0 dans le calcul du pouvoir calorifique. M. Slaby cherche à rendre le calcul plus sûr, en supprimant cette incertitude, et il y parvient élégamment par des mesures de densité. Soit un gaz d'éclairage de poids spécifique égal à 0,528, renfermant 3,29 0/0 de carbures lourds et 2,54 0/0 d'acide carbonique; faisons-lui traverser de l'acide sulfurique fumant et de la potasse pour le dépouiller des carbures et de CO_2 ; après l'opération, son poids spécifique est devenu par exemple, égal à 0,445. Appelons x la densité des carbures lourds; il est facile de calculer x par les données précédentes, car on a évidemment :

$$0,0329 x + 0,0254 \times 1,969 + (100 - (3,29 + 2,54)) 0,445 = 0,528$$

Il vient donc :

$$x = 1,75.$$

C'est le poids spécifique moyen des carbures lourds renfermés dans le gaz; or, le pouvoir calorifique des carbures lourds est facile à déduire de leur poids spécifique, car il est proportionnel à ce poids spécifique; on a, en effet :

$$Q = 100 + 10,5 \times x$$

Toute la question est donc ramenée à deux mesures de densité: on les fait sans peine, soit par l'appareil de Bunsen, soit par celui de M. Schilling, soit par la balance de M. Lux.

La méthode de M. Slaby est fort ingénieuse et très exacte, mais elle exige une analyse, deux mesures de densité et un calcul.

Souvent on recourt à l'analyse chimique du gaz pour calculer son pouvoir; con-

naissant sa composition, ainsi que la chaleur de combustion de ses éléments, il n'y a qu'à additionner les nombres obtenus pour chaque gaz.

Ce procédé présente un grand intérêt pour les théoriciens qui poursuivent l'étude du moteur à gaz ; mais il faut reconnaître que cette analyse est longue et délicate et le plus souvent au-dessus des moyens des ingénieurs qui auraient besoin de la faire.

C'est pourquoi nous signalerons les recherches poursuivies par M. Vivian Lewes dans le but de faciliter ce travail ; les résultats en ont été communiqués par l'auteur à la Société de Chimie industrielle de Londres.

Ce savant a cherché à établir la manière dont on peut employer les différents réactifs d'absorption pour opérer une analyse d'un gaz de houille ; il a commencé par déterminer la durée de contact nécessaire pour absorber un gaz par son dissolvant approprié. Il a trouvé les résultats suivants :

Oxygène

Absorbant : Pyrogallate alcalin.

Quantité absorbée en volume	sans agitation	10 m.	84,2 %
		20 m.	84,4
	avec agitation	10 m.	92,6
		20 m.	100,0

Oxyde de carbone

Absorbant : Chloruré cuivreux acide (1).

Quantité absorbée en volume	sans agitation	10 m.	83,1 %
		20 m.	90,0
	avec agitation	10 m.	98,8
		20 m.	100,0

Ethylène

Absorbant : Brôme dans bromure de potassium.

Quantité absorbée en volume	sans agitation	10 m.	99,2 %
		20 m.	100,0
	avec agitation	10 m.	100,0
		20 m.	100,0

Ethane (hydrure d'éthyle)

Absorbant : Huile de paraffine.

Quantité absorbée en volume	sans agitation	10 m.	82,1 %
		20 m.	89,2
	avec agitation	10 m.	100,0
		20 m.	100,0

Gaz des Marais (formène)

Absorbant : Huile de paraffine.

Quantité absorbée en volume	sans agitation	10 m.	19,6 %
		20 m.	36,9
	avec agitation	10 m.	64,2
		20 m.	66,7

Sauf dans ce dernier cas, les absorbants conviennent donc parfaitement à leur usage.

1. Ce produit s'obtient d'après M. de Saint-Martin, en faisant digérer à froid 40 grammes de tournure de cuivre et 40 grammes de bioxyde dans 450 grammes d'acide chlorhydrique. L'absorption de CO donne 3 CO, 2 Cu² Cl² + 7 H²O (Berthelot).

BIBLIOTHÈQUE
UNIVERSITAIRE
LILLE

Voici dès lors comment M. Lewes propose d'opérer :

On absorbe d'abord CO^2 et HS par une solution d'hydrate de soude à 50 0/0 ; il faut dix minutes avec agitation.

L'oxygène est ensuite absorbé par le pyrogallate ; vingt minutes sont nécessaires avec agitation.

On passe aux hydrocarbures non saturés, qu'on fixe par la solution de brôme dans le bromure de potassium ; avec une bonne agitation, on attendra vingt minutes.

La vapeur de brôme restante sera éliminée par une opération avec l'hydrate de soude, avant de procéder à la lecture des volumes.

L'oxyde de carbone a un absorbant énergique dans le chlorure cuivreux acide (et non pas ammoniacal, lequel agit moins vite et moins sûrement) ; il est indispensable d'attendre 20 à 30 minutes en agitant fréquemment. Mais le chlorure ne devra pas être employé plus de deux fois avec des gaz contenant 20 0/0 de CO, ni plus de quatre fois avec n'importe quel gaz de houille.

On traite ensuite par l'huile de paraffine pour absorber une partie des hydrocarbures saturés ; il faut 30 minutes pour compléter leur élimination.

Le résidu ne peut plus être analysé que par l'eudiomètre ; on le mélangera donc d'un excès d'oxygène et l'on produira l'explosion ; l'acide carbonique formé sera absorbé par l'hydrate de soude ; on en déduit le volume du carbure non absorbé dans l'opération précédente par l'huile de paraffine. Il reste un excès d'oxygène et de l'azote. L'hydrogène se dose par différence.

La méthode que nous venons de décrire laisse assurément encore à désirer, mais elle est rapide et relativement facile, et elle peut rendre de sérieux services aux gaziers et aux ingénieurs : en veillant à ne pas perdre de gaz dans les transports d'une éprouvette à l'autre, on arrive à des résultats suffisamment approchés pour les applications.

Une analyse plus difficile à faire que celle du gaz de ville est celle des gaz de gazogènes, car les gaz absorbables sont alors mêlés d'un grand volume d'azote inerte : on surmonte cette difficulté en prolongeant la durée du contact et en redoublant de soins.

Mais quand on se propose d'analyser les gaz brûlés, les méthodes ordinaires d'absorption deviennent insuffisantes. M. Lewes les modifie alors en employant de l'amiante au palladium pour absorber à chaud l'hydrogène et l'oxyde de carbone. Il importe de débarrasser d'abord le gaz de l'acide carbonique qu'il renferme en le faisant passer sur de la potasse caustique ; puis on le dessèche par le chlorure de calcium. Le gaz est ensuite introduit dans un tube chauffé par des lampes à alcool : il se produit de la vapeur d'eau et de l'acide carbonique par la combustion de H et de CO. En dosant de nouveau CO^2 et en desséchant le gaz, on peut par le calcul déterminer les proportions d'hydrogène et d'oxyde de carbone. Mais il faut avouer que ce procédé est bien compliqué et bien délicat.

Aussi se contente-t-on le plus souvent de déterminer *in globo* les quantités totales d'hydrogène et de carbure échappées à la combustion par le procédé classique

de Bunsen, en faisant détoner le gaz dans l'eudiomètre avec un excès d'oxygène.

Ce qui précède justifie bien les préférences que nous avons témoignées en faveur de la détermination directe du pouvoir par une méthode calorimétrique.

Nous pouvons maintenant passer à l'examen des résultats obtenus par les diverses méthodes que nous venons de décrire.

La composition très différente des gaz d'éclairage nous fait prévoir des différences considérables dans leur pouvoir. M. Bueb-Dessau, cité par M. Scheurer-Kestner, a trouvé un jour 4.440 calories dans une ville d'Allemagne ; il a constaté d'autre part 7.370 calories dans une autre ville ; ce sont des chiffres extrêmes (1).

J'ai déterminé le pouvoir calorifique d'un très grand nombre d'échantillons de gaz, qui m'ont été soumis ou que j'ai prélevés sur divers points, et je n'ai jamais observé de pouvoirs aussi faibles ni aussi élevés. Le pouvoir le plus bas que j'aie constaté était de 4.680 calories (pouvoir supérieur) ; par contre, j'ai reçu un gaz à 6.767 calories, que j'ai considéré comme exceptionnel. Le plus souvent le pouvoir est voisin de 5.500 calories en France pour les bonnes usines. En Angleterre, les gaz de ville sont plus riches, et l'exemple du gaz de Manchester, étudié par Bunsen, est devenu classique ; son pouvoir était de 6.099 calories. M. Geitel estime en moyenne le pouvoir supérieur à 5.810 calories et le pouvoir inférieur à 5.154 ; j'estime ce chiffre trop élevé en France, mais exact en Angleterre. Frankland l'a confirmé pour ce pays.

Constatons pourtant que le pouvoir calorifique du gaz employé par le *Gas Engine Research Committee* était relativement peu élevé ; le rapport du professeur Burstall indique, pour deux prises de gaz, les valeurs ci-dessous du pouvoir inférieur du gaz (2).

Échantillons	A. 18.817	}	B.T.U. par livre, soit par kilog.	{	10.462 calories,
	B. 17.811				9.903
ce qui revient à	5.126	}	calories par mètre cube ; le pouvoir supérieur serait sans doute de :		
	4.852			5.580 et 5.300 calories.	

M. Grover a employé du gaz de Leeds, dont le pouvoir inférieur était de 5.080 calories : le pouvoir supérieur n'eût vraisemblablement guère dépassé 5.500 calories.

M. Slaby a donné le tableau ci-dessous comme une moyenne des nombreuses déterminations qu'il a faites par le calorimètre Junkers (3) ; ce sont des pouvoirs inférieurs à pression constante.

1. Scheurer-Kestner. — « Pouvoir calorifique des Combustibles », page 458 ; Paris, 1896.

2. Les ingénieurs anglais expriment les pouvoirs des gaz en *British Thermal Units* (B.T.U.) par livre, ou par pied cube (cubic feet).

1 B.T.U. par livre équivaut à 0,556 calorie par kilogramme.

1 — par pied cube équivaut à 8,9 calories par mètre cube.

La capacité d'un pied cube est de 28,375 litres ; un mètre cube vaut 35,315 pieds cubes. La livre vaut 453,593 grammes.

3. Slaby. — « Calorimetrische Untersuchungen », page 224 ; Berlin.

Dépense de gaz	Pression atmosphérique	Température de la salle	Poids d'eau évouée	Températures de l'eau		Température des gaz à la sortie	Pouvoir calorifique à 0° et 760 millim.
				Entrée	Sortie		
9 lit.	752 m/m	19°, 6	5 ^h , 169	10°, 92	20°, 00	16°, 2	5.257 c.
9 »	752 »	19, 8	6, 485	10, 80	18, 20	16, 2	5.123
9 »	752 »	21, 0	5, 152	11, 30	20, 50	16, 6	5.263

Remarquons que ces chiffres confirment les pouvoirs moyens du gaz de ville établis par nos expériences.

De tout ce qui précède et de nos fort nombreuses déterminations, nous déduisons donc que du gaz à 6.000 calories est exceptionnellement riche et que le plus souvent son pouvoir est voisin de 5.500 calories.

On doit donc fixer en moyenne à 5.500 calories le pouvoir calorifique *supérieur* du gaz d'éclairage, à volume constant, dans les conditions normales de température et pression. On en déduit le pouvoir que possède le gaz à pression constante (1) ; il est de 5.550 calories, la vapeur d'eau produite étant supposée entièrement condensée. Le premier chiffre est celui qu'il faut adopter pour établir le coefficient de rendement des moteurs en général ; le second convient à une classe seulement de moteurs et à tous les brûleurs à air libre ; il est voisin de la valeur théorique calculée d'après la composition de notre gaz type. Cette composition est donc justifiée, et elle pourra nous servir de base pour le calcul des températures développées dans la combustion.

Mais, avant d'aborder ce point, nous aurons à demander à l'expérience la solution de quelques problèmes qui, pour être accessoires, présentent cependant une grande importance pratique.

Et d'abord, nous avons à justifier notre opinion relativement au pouvoir *supérieur*, que nous considérons de préférence alors que plusieurs ingénieurs anglais et allemands envisagent toujours le pouvoir *inférieur*. La différence est sensible, attendu qu'elle peut atteindre et même dépasser 500 calories par mètre cube de gaz d'éclairage, soit 10 0/0 des calories qu'il possède (2). Le rendement thermique d'un moteur est par suite grandement amélioré quand on prend pour base des calculs le pouvoir inférieur au lieu du pouvoir supérieur ; par contre, le rendement thermique d'un gazogène est diminué : on favorise donc l'un au préjudice de l'autre. Il faut justifier l'une ou l'autre manière de faire. La question présente une sérieuse importance et nous devons la discuter à fond.

Le pouvoir calorifique d'un gaz complexe est défini par le sens des mots eux-mêmes ; c'est la somme des quantités de chaleur dégagées par la combustion intégrale des éléments qui le composent. Ces quantités de chaleur dégagées peuvent être calculées en

1. Voir ci-dessus page 88.

2. La différence est moindre pour les gaz pauvres : elle n'est alors que de 5 à 6 pour cent. Pour les pétroles cart moyen est d'environ 7 à 8 pour cent ; pour l'alcool dénaturé pur, il est à peu près le même.

supposant ramenés à la température zéro centigrade les produits de la combustion ; cette convention implique nécessairement la condensation de la vapeur d'eau. Mais on peut supposer aussi que les produits restent à 100°, auquel cas la vapeur d'eau ne se condense pas. Il y a donc deux pouvoirs correspondants à ces deux conventions ; ainsi l'hydrogène a un pouvoir de 34.500 ou de 29.100 calories ⁽¹⁾, suivant que la vapeur d'eau est condensée ou non ; tous les gaz donnant naissance à de la vapeur d'eau ont de même deux pouvoirs, supérieur et inférieur. Le premier, qui suppose les gaz revenus à leur température initiale, représente en totalité la chaleur correspondante à la combustion, alors que le second a subi une réduction, du chef d'un phénomène physique concomitant ; celui-ci n'est donc pas le pouvoir *vrai*, c'est un pouvoir *réduit*. Voilà pourquoi nous ne croyons pas devoir le prendre en considération.

Mais nous avons d'autres raisons plus décisives.

Et d'abord, les bombes aussi bien que les calorimètres donnent directement le pouvoir supérieur, puisque la vapeur se condense dans les deux genres d'opérations : dans les calorimètres du genre Hartley ou Junkers, on est contraint pour déterminer le pouvoir inférieur de faire une correction dont on n'est jamais sûr et qui enlève à l'opération sa précision ⁽²⁾.

D'autre part, n'est-il pas incorrect de décompter les chaleurs latentes de condensation dans les moteurs à gaz alors que nous les portons au passif de la machine à vapeur ? En effet, on calcule les calories de la vapeur par la formule de Regnault ($L = 606,5 + 0,303 t$), qui correspond à la condensation à zéro. Or, aujourd'hui que nous mettons en parallèle les moteurs à gaz et les machines à vapeur, nous n'avons pas le droit de ne pas traiter de même les deux concurrents et de faire pencher de parti pris la balance d'un côté.

Mais on nous objecte que les gaz s'échappent des moteurs à haute température et que la vapeur ne s'y condense pas. Nous répondrons qu'elle ne se condense pas non plus dans les machines à vapeur sans condensation, à échappement libre dans l'atmosphère. Du reste, si les moteurs à gaz ne récupèrent pas les chaleurs latentes de la vapeur, c'est par suite d'une imperfection dont ils doivent porter la charge. Ce déchet pourrait être évité si la détente était assez complète, ou si l'on mettait un condenseur à la suite du moteur, ou si la compression était isothermique dans le cylindre, au lieu d'être adiabatique.

Donnons un dernier argument en faveur de notre thèse. Comparons deux gaz complexes, de même richesse calorifique, renfermant le premier de l'hydrogène et des carbures hydrogénés, le second de l'oxyde de carbone ; si nous faisons intervenir les pouvoirs inférieurs, nous attribuerons au second plus de calories qu'au premier, et

1. Nous adoptons le chiffre classique de Fabre et Silbermann : d'après Bunsen, il faudrait prendre 34.180 ; M. Berthelot admet 34.600.

2. On n'est jamais sûr de recueillir toute l'eau qui ruisselle sur les parois, parce qu'il peut en adhérer aux surfaces ; si l'atmosphère est très sèche, la vapeur ne se condense d'ailleurs pas en totalité ; si l'atmosphère est saturée, elle peut donner lieu à une condensation supplémentaire. Ce sont là des faits que j'ai constatés à maintes reprises.

nous nous défendons d'établir un parallèle rationnel et impartial entre les résultats qu'ils donnent.

Nous persistons donc à ne faire emploi que des pouvoirs supérieurs dans les bilans que nous dressons du fonctionnement des moteurs à gaz : c'est la seule manière correcte et juste d'envisager les choses.

C'est d'ailleurs la méthode française.

Cette équivoque éliminée, reprenons la suite de notre étude des gaz combustibles.

Tout ce qui précède est relatif à un gaz d'usine, dit *gaz de ville*, fabriqué en vue de la production de la lumière.

C'est assurément une anomalie d'employer un gaz spécialement destiné à l'éclairage pour alimenter des moteurs : toutefois cette anomalie est plus apparente que réelle, et l'opposition est plus prononcée dans les termes qu'elle ne l'est effectivement. Le pouvoir calorifique est, en effet, lié au pouvoir éclairant, d'une manière bien plus étroite qu'on ne le croirait de premier abord : il me serait aisé de le prouver par de nombreux arguments, mais je me contenterai de citer un très curieux travail de M. Hunt, communiqué à l'une des dernières réunions du *Gas Institute*, dont j'emprunte l'analyse à la *Revue Industrielle* du 12 juillet 1882. Ce savant ingénieur s'est proposé de rechercher les variations de consommation correspondantes à la production d'un même travail, lorsque le pouvoir éclairant varie : il est arrivé aux résultats résumés dans le tableau ci-dessous.

Pouvoir éclairant du gaz en candles	Consommation en pieds cubes par cheval-heure indiqué	Valeur en lumière	Valeur en travail
11,96	30,31	1	1
17,20	22,70	1,435	1,338
26,00	16,26	2,173	1,864
29,14	15,00	2,436	2,020

Ce travail de comparaison entre les valeurs en lumière et en travail d'un gaz de ville présente un grand intérêt. Il a été repris récemment par M. Aguitton, d'une manière plus directe, en rapprochant les pouvoirs photométriques et calorimétriques déterminés par les meilleures méthodes (1).

Pour mener à bonne fin ces savantes recherches, il fallait disposer de gaz possédant des qualités variables du maximum au minimum.

A cet effet, M. Aguitton a distillé des houilles diverses en vue d'obtenir des gaz de richesse très différente. Les *cannel-coal* lui donnaient un gaz très lumineux ; il obtenait encore des gaz riches en recueillant à part les premières parties de la distillation de bonnes houilles grasses ; en poussant cette distillation à fond, on obtenait, au contraire, des gaz relativement pauvres. Les pouvoirs éclairants étaient mesurés par le photomètre réglementaire de Dumas et Regnault. La chaleur de combustion se dé-

1. *Revue Industrielle*, 22 juillet, 1893.

terminait par la bombe de Mahler. Le pouvoir éclairant a été exprimé en bougies décimales (1) : c'est le nombre de bougies fournies par une combustion horaire de 100 litres. Quant à la chaleur de combustion, elle est définie par le nombre de calories données par la combustion sous volume constant, vapeur d'eau condensée, de 1 mètre cube de gaz pris à 15°, sous une pression de 760 millimètres.

M. Aguitton a traité plus de cent échantillons de gaz, présentant des richesses extrêmement diverses. Tous les résultats obtenus ont été reportés sur un tracé, dont les abscisses représentaient les intensités lumineuses et les ordonnées les pouvoirs calorifiques : la courbe obtenue était assez voisine d'une ligne droite ayant pour équation :

$$Q = 2.280 + 352,6 I,$$

dans laquelle Q est le pouvoir calorifique et I l'intensité lumineuse ; les valeurs extrêmes de I ont été :

$$I = 5 \text{ et } I = 15.$$

Le tableau suivant résume les résultats obtenus par M. Aguitton :

I en bougies	Titre photométrique ordinaire en litres par carcel	Q en calories	I en bougies	Titre photométrique ordinaire en litres par carcel	Q en calories
15	64	7.569	9,60	100	5.665
14,5	66,2	7.392	9,14	105	5.503
14	68,5	7.216	9	106,6	5.453
13,5	71,1	7.040	8,1	112,9	5.277
13	73,8	6.864	8	120	5.101
12,5	76,8	6.687	7,5	128	4.924
12	80	6.511	7	137	4.748
11,5	83,4	6.335	6,5	147,6	4.572
11	98,2	6.158	6	160	4.395
10,5	97,4	5.982	5,5	174,5	4.219
10	61	5.806	5	192	4.043

Ces essais montrent le parallélisme qui existe entre la chaleur de combustion et le pouvoir éclairant d'un gaz de ville. Il est beaucoup plus parfait que la composition de ce gaz ne permettait de l'espérer, car on y trouve des gaz donnant beaucoup de chaleur et peu de lumière (hydrogène, oxyde de carbone et formène), mêlés à des gaz donnant à la fois chaleur et lumière, tels que l'éthylène, la benzine et les hydrocarbures lourds : suivant que les proportions relatives à ces divers produits varient, les pouvoirs lumineux et calorifiques devraient se modifier indépendamment l'un de l'autre. Or, l'expérience montre qu'il n'en est rien, ou du moins qu'il se produit des compensations conduisant à une graduation simultanée des deux pouvoirs.

Ces résultats de M. Aguitton sont réellement intéressants et ils sont utiles à connaître : on ne pourra plus dire qu'un gaz de ville peu éclairant, tel qu'en fournissent

1. Le Congrès international de 1889 a adopté pour unité photométrique la bougie dite *decimale*, équivalente au vingtième de l'unité Violle ; la carcel vaut 9,6 bougies décimales.

certaines usines, soit, au contraire, très riche en calories et, par suite, parfaitement propre à la production de la force motrice.

Toutefois, nous estimons qu'il ne faudrait pas généraliser outre mesure la thèse de M. Aguitton, car la proportion d'hydrogène extrêmement variable d'un gaz à l'autre pourrait, dans certains cas extrêmes, détruire le parallélisme constaté par le savant et habile expérimentateur.

Sir William Siemens avait proposé, en 1881, de fractionner la distillation de la houille pour fabriquer un gaz spécialement destiné au chauffage ; le gaz de la première heure serait recueilli séparément et appliqué de préférence à l'éclairage. J'ai constaté en effet que les gaz distillés en dernier lieu ont un moindre pouvoir lumineux ; il est vrai que leur pouvoir calorifique est lui-même légèrement diminué. Ainsi j'ai trouvé dans une usine une baisse de 5.281 à 4.921 calories, soit de 7 0/0. Le projet de Siemens n'a pas été réalisé que je sache.

Si l'on voulait fabriquer spécialement du gaz de chauffage, il serait inutile de le soumettre à une épuration chimique complète : les conditions hygiéniques et photogéniques imposées aux compagnies, sont en effet restrictives au point de vue calorifique. L'épreuve calorimétrique démontre qu'un gaz mauvais par défaut d'épuration est généralement plus riche qu'un gaz parfaitement épuré ; c'est ce qui ressort à l'évidence d'une série d'essais que j'ai entrepris sur les gaz aux diverses étapes de sa fabrication (1). J'ai opéré sur un produit qui avait un pouvoir de 5.607 calories au sortir du collecteur et avant d'entrer aux condenseurs ; après les condenseurs et avant les scrubbers ce pouvoir n'était déjà plus que de 5.535 calories ; il tombait à 5.512 après scrubbers, et devenait, après épuration, égal à 5.292. La perte dépasse donc 5 0/0.

La carburation permet aussi d'augmenter la puissance calorifique d'un gaz donné : en le faisant barboter dans une gazoline de densité 0,68, bouillant à 54°, j'ai pu l'enrichir de 77 0/0. Dix volumes d'air sont alors nécessaires pour opérer une combustion complète. Ces procédés de carburation sont susceptibles d'application : ils m'ont permis d'augmenter la puissance d'un moteur.

Nous avons maintenant à demander à l'expérience la solution de quelques problèmes, qui, pour être accessoires, présentent cependant une grande importance pratique.

Et d'abord, quelle quantité d'air est nécessaire pour opérer la combustion complète du gaz ?

Nous l'avons calculée ci-dessus et nous avons trouvé que, pour notre gaz type, il faut pour le moins 5,3 volumes d'air : c'est le volume strictement nécessaire. Il est prudent d'employer toujours un léger excès de comburant : l'expérience confirme cette conclusion.

En effet, dans mes nombreux essais de gaz, le pouvoir calorifique le plus élevé que

1. L'épuration physique dépouille les gaz des produits ammoniacaux, parmi lesquels les carbonates, les chlorures, les sulfates et les cyanures sont en plus grande proportion ; on trouve aussi de l'ammoniaque libre et du soufre dans les eaux du gaz. L'épuration chimique élimine spécialement l'acide sulfhydrique et le sulfhydrate d'ammoniaque. La plupart de ces produits sont combustibles.

j'ai pu constater correspond à un volume d'oxygène égal à un volume et quart du gaz : dans ce cas, l'analyse des produits de la combustion témoigne d'une combustion complète. Ce volume d'oxygène équivaut à 5,95 volumes d'air. La plupart de mes déterminations ont été faites sur un mélange de 6 ou 7 volumes d'air ; la chaleur dégagée dans ces conditions est moindre de 3 0/0 qu'avec l'oxygène pur employé comme comburant ; cette différence tient à ce que la combustion des mélanges tonnants dilués dans les gaz inertes est toujours incomplète (1). Il y a donc lieu de tenir compte dans la théorie des moteurs à gaz de l'imperfection du cycle produite par la combustion incomplète : nous verrons qu'il peut en résulter une perte sensible.

La limite supérieure pratique du mélange tonnant correspond par suite, pour sa richesse, à une proportion de 6 volumes d'air par volume de gaz ; l'explosion est alors très vive ; elle s'atténue graduellement au fur et à mesure que la teneur en air augmente ; pour 15 volumes d'air, le mélange devient généralement inexplosible.

On peut calculer la température et la pression explosive d'un mélange donné.

Considérons le cas indiqué ci-dessus où 2.063 litres de gaz, c'est-à-dire 1 kilogramme, sont additionnés de 6 fois leur volume d'air, soit de 12.378 litres ; le volume total du mélange est de 14.441 litres.

Dans l'explosion, il se produit 2.636 litres de vapeur d'eau et 1.028 litres d'acide carbonique ; il faut y ajouter les 124 litres d'azote et d'acide carbonique déjà contenus dans le gaz et 9.779 de ce même gaz azote constituant les $\frac{79}{100}$ de l'air comburant. Le volume total des gaz produits est de 13.567 litres.

Le tableau suivant résume synoptiquement ces données et il fournit la composition en poids des gaz brûlés.

	Volumes	Poids spécifiques	Poids
H ² O	2.636 lit.	0,804	2.119 gr.
CO ²	1.032	1,977	2.040
Az.	9.899	1,256	12.433

Prenons les chaleurs spécifiques à volume constant déterminées ci-dessus à 2.000'. La somme totale des poids en eau de la combustion est :

$$\Sigma pc = 2.119 \times 0,677 + 2.040 \times 0,308 + 12.433 \times 0,215 = 4.736 \text{ calories}$$

Nous pouvons dès lors calculer la température des gaz produits à la suite de la combustion. La chaleur dégagée est égale à 5 515 calories par mètre cube, à volume constant ; elle atteint 11 373 calories par kilogramme, la vapeur d'eau étant condensée. Mais nous avons à nous placer ici dans l'hypothèse contraire de non-condensation ; il

1. Voir à ce sujet mes deux notes, dans les *Comptes rendus de l'Académie* : De la combustion des gaz tonnants en divers états de dilution, 28 juillet 1884 ; Du pouvoir calorifique des gaz en divers états de dilution, 16 février 1885.

y a donc 0 cal., 5065 à retrancher par gramme d'eau formée; soit 1 073 calories en tout et il reste 10 300 calories disponibles. Si nous appelons T la température inconnue de la combustion, nous aurons dès lors:

$$10,300 = \Sigma pc T$$

$$T = 2177^{\circ} \text{ C.} = 2450 \text{ absolus.}$$

Telle est la température théorique des gaz de la combustion à volume constant. La pression développée consécutivement est donnée par la formule $\frac{P}{H} = \frac{T}{t}$ dans laquelle T est la température absolue des gaz brûlés, et t leur température initiale; nous trouvons:

$$P = \frac{2177 + 273}{273}$$

$$= 8,9 \text{ atmosphères.}$$

A pression constante, la pression et la température est un peu moindre; les chaleurs spécifiques sont en effet dans ce cas plus considérables, alors que les chaleurs de combustion n'ont augmenté que de 50 calories environ. J'admettrai avec M. Berthelot qu'à ces températures élevées le rapport γ des chaleurs spécifiques est égal à 1,12 pour la vapeur d'eau et l'acide carbonique, et à 1,33 pour l'azote.

Le rapport moyen est donc égal à

$$\frac{2,119 \cdot 1,12 + 2,040 \cdot 1,12 + 12,433 \cdot 1,33}{16,592} = 1,28$$

Il vient par suite:

$$\Sigma pc = 6,06$$

$$T = \frac{10,350}{6,06} = 1708^{\circ} \text{ C} = 1981^{\circ} \text{ absolus}$$

$$P = \frac{1708 + 273}{273} = 7,3 \text{ atmosphères.}$$

Ce sont les résultats de la combustion instantanée d'un mélange de 1 volume de gaz avec 6 volumes d'air, quantité nécessaire et suffisante pour la réaction: nous supposons en tout ceci une combustion totale du gaz et nous ne tenons point compte des pertes du calorique.

Il nous reste à calculer les effets d'une dilution plus grande du combustible dans le comburant; je me contenterai de donner ici les résultats nets du calcul, dans lequel j'ai appliqué les formules de MM. Mallard et Le Châtelier, pour déterminer les capacités calorifiques des gaz brûlés; vers 1,500°, elles sont respectivement égales à 0,59; 0,29 et 0,22 pour la vapeur d'eau, l'acide carbonique, l'azote et l'oxygène.

Mélange de 1 volume de gaz avec 10 volumes d'air.

A volume constant.
 $T = 1525^{\circ} \text{ C} = 1798^{\circ} \text{ absolus}$
 $P = 6,5 \text{ atmosphères}$
 A pression constante.
 $T = 1190^{\circ} \text{ C} = 1463^{\circ} \text{ absolus}$
 $P = 5,3 \text{ atmosphères}$

Avant de discuter ces diverses valeurs de T et de P, relevons un fait important que nous avons déjà signalé : la combustion de ces mélanges tonnants est toujours accompagnée d'une contraction sensible du volume. Ainsi, dans l'exemple choisi ci-dessus, le volume total des gaz brûlés était de 13.567 litres, la vapeur d'eau n'étant pas condensée, alors que le mélange initial cubait 14 441 litres ; la contraction est de 874 litres sur 14 441, soit de 6 pour cent. Cela pour 6 volumes d'air ; avec 10 volumes, elle n'est plus que de 4 pour cent (1). On devrait tenir compte de ce phénomène dans les calculs ; mais ce serait chercher une précision que les données ne comportent nullement, et nous négligerons cette correction.

Dans les moteurs, le mélange s'opérait généralement à la teneur moyenne de 6 à 7 volumes d'air. MM. Steward et Brooks ont constaté dans leurs excellents essais faits sur un moteur Otto de 6,2 à 7,7 volumes d'air par volume de gaz.

Pour moi, j'ai relevé dans un grand nombre d'essais effectués sur des moteurs de diverses constructions une proportion de 7 à 8 volumes d'air ; mais il y a aujourd'hui une tendance manifeste et d'ailleurs fort rationnelle d'appauvrir le mélange tonnant, afin de pouvoir le comprimer davantage et j'ai vu employer avec succès 9 à 13 volumes d'air dans certains moteurs très modernes. Toutefois il ne faut pas tomber dans l'exagération, car une dilution trop forte pourrait occasionner des combustions incomplètes, si la compression devenait trop faible ou si le gaz combustible n'était pas parfaitement diffusé dans le comburant : ce dernier point a une importance capitale dans les moteurs, car on y découvre presque toujours des traces d'oxyde de carbone.

Il est à remarquer que la compression recule les limites d'explosibilité des gaz : il en résulte que des mélanges d'une teneur relativement très faible, qui seraient incombustibles à la pression de l'atmosphère, brûlent parfaitement aux tensions élevées. En même temps, les réactions s'activent et se complètent. Ces observations trouveront leur application dans l'analyse du jeu des moteurs, et elles nous serviront pour déterminer le mode d'emploi le plus rationnel des gaz pauvres.

Un calcul élémentaire permet d'évaluer les pressions explosives développées dans les mélanges tonnants préalablement comprimés ; la formule $\frac{P}{\pi} = \frac{T}{\theta}$ nous conduit directement au résultat cherché ; P est la pression explosive, π la pression développée par la compression et θ la température avant la mise de feu. La valeur de T— θ reste la même, quelle que soit la compression : en effet la chaleur Q produite par la réaction chimique est toujours égale à c (T— θ).

Nous ferons plus loin un certain nombre de calculs de pressions : ils reposent toujours sur la connaissance des températures ; c'est dire qu'ils sont tributaires des erreurs qu'on commet dans cette évaluation.

De fait, les résultats donnés par les divers auteurs qui ont traité de la question sont peu d'accord : cela tient à ce que l'on envisage des compositions différentes du gaz et

1. En considérant un gaz ayant un poids spécifique égal à 0,52 et un pouvoir inférieur de 5.242 calories, M. Schöttler trouve, pour un mélange contenant 5,57 volumes d'air, une contraction de 4 pour cent. La valeur de γ ressort ainsi à 1,37.

des dilutions plus ou moins fortes; mais le désaccord provient surtout des valeurs différentes qu'on attribue aux chaleurs spécifiques.

Nous adopterons dans tous nos calculs les chiffres de MM. Mallard et Le Chatelier.

M. Vermand s'en est aussi servi pour calculer les pressions et les températures consignées dans les tableaux ci-dessous. Il a mis la formule de MM. Mallard et Le Chatelier sous la forme $c = a + bRT$, dans laquelle a et b sont des paramètres déterminés pour chaque espèce de gaz. Considérant le gaz d'éclairage que j'ai adopté comme gaz moyen (1), M. Vermand obtient pour un mélange à 6 volumes d'air la valeur: $c = 0,172 + 0,000492 T$.

Le tableau A donne les paramètres et les valeurs de T, P et Q pour divers mélanges sans compression préalable; B et C renferment les températures et pressions explosives pour des mélanges comprimés diversement.

Mélanges non comprimés — A. — Paramètres et données générales.

Composition du mélange	a	$b R$	R	$\frac{A R}{a}$	$\frac{b R}{a}$	T	P	Q
Mélange à 6 volumes.	0,172	0,000492	30,87	0,422	0,00057	2298°	atm. 7,62	cal. 573,7
Mélange à 8 volumes.	0,169	423	30,48	0,423	50	1933°	6,50	436,5
Mélange à 10 volumes.	0,167	382	30,25	0,426	46	1720°	5,72	352,3

Mélanges comprimés. — B. — Température maximum explosive.

Composition du mélange	Compression	COMPRESSION ADIABATIQUE		
	isothermique	3 atmosphères	5 atmosphères	7 atmosphères
Mélange à 6 volumes.	2298°	2390°	2435°	2480°
Mélange à 8 volumes.	1933°	2090°	2135°	2170°
Mélange à 10 volumes.	1720°	1875°	1920°	1979°

C. — Pression maximum explosive.

Composition du mélange	Compression isothermique			Compression adiabatique		
	3 atmo-sphères	5 atmo-sphères	7 atmo-sphères	3 atmo-sphères	5 atmo-sphères	7 atmo-sphères
	atm.	atm.	atm.	atm.	atm.	atm.
Mélange à 6 volumes.	22,86	38,10	53,34	17,20	25,15	32,40
Mélange à 8 volumes.	19,50	32,50	45,50	15,10	22,35	28,60
Mélange à 10 volumes.	17,16	28,59	40,02	13,40	19,80	25,80

1. Loc. cit. : page 47.

M. Schöttler, considérant un gaz à 5000 calories (pouvoir inférieur) mélangé de 5, 6 volumes d'air, part des données ci-dessous :

$$\text{Mélange à froid : } \left. \begin{array}{l} c = 0,185 \\ C = 0,259 \end{array} \right\} \gamma = 1,40$$

$$\text{Gaz brûlés chauds : } \left. \begin{array}{l} c = 0,310 \\ C = 0,411 \end{array} \right\} \gamma = 1,21$$

Il trouve pour une compression à 5 kilogrammes :

Température θ des gaz comprimés : 549° absolu

Température explosive T : 2549° —

Pression explosive P = 23,3 atmosphères

Devant le désaccord des calculs, une étude expérimentale s'imposait: elle devait d'ailleurs résoudre certaines difficultés que la théorie ne peut pas même envisager, relativement aux influences externes qui s'exercent sur les phénomènes explosifs.

La détermination de la pression produite dans l'explosion d'un mélange tonnant a été l'objet de travaux nombreux: rappelons les plus importants, en signalant le procédé employé pour mesurer exactement les pressions développées. Bunsen relevait ces pressions en observant l'entraînement d'un poids déterminé, attaché à une soupape de sûreté; Berthelot et Vieille appréciaient la vitesse de progression d'un piston de section et de masse connues; Mallard et Le Châtelier employaient des manomètres Deprez ou Bourdon; Dugald-Clerk faisait usage d'un indicateur Richard; nous devons une mention toute spéciale aux recherches de ce savant ingénieur, qui a tant contribué aux progrès des moteurs.

M. Dugald-Clerk a opéré dans une bombe très résistante faite en acier, ayant 228 millimètres de diamètre sur 228 millimètres de hauteur, jaugeant un peu plus de cinq litres: le fond de l'appareil est sphérique, et l'on a cherché à rapprocher sa forme de celle de la culasse d'un cylindre de moteur. Le couvercle, qui est plat, porte un indicateur Richard, lequel enregistre les pressions successives développées à l'intérieur de la bombe. Le cylindre revêtu de papier, sur lequel le style marque ses indications, reçoit un mouvement de rotation uniforme par un mouvement d'horlogerie, entraîné par un poids: il fait une révolution complète en 0,33 seconde. Le diagramme tracé donne donc les pressions en ordonnée et les temps en abscisse: il permet non seulement de relever la pression maximum développée par l'explosion, mais encore on peut en déduire avec une grande précision la durée du phénomène. M. Clerk a opéré sur des mélanges de richesse variable; il a déduit de ses observations les températures correspondantes des gaz.

Les expériences ont été faites avec du gaz de Glasgow et d'Oldham; voici les résultats obtenus avec ce dernier gaz:

1. Dugald Clerk. — « The gas and oil Engines », 6^e édition, page 95; London, 1902.

*Pression du mélange : celle de l'atmosphère.
Température du mélange : 17°*

Mélange Teneur en volumes		Pression explosive	Durée de l'explosion	Température développée
Gaz	Air	kg.	sec.	degrés
1	14	2,81	0,45	806
1	13	3,62	0,31	1033
1	12	4,22	0,24	1202
1	11	4,29	0,17	1220
1	9	5,48	0,08	1557
1	7	6,12	0,06	1733
1	6	6,33	0,04	1792
1	5	6,40	0,055	1812
1	4	5,62	0,16	1595

Ces pressions et ces températures sont inférieures à celles que nous avons calculées ci-dessus; l'expérience prouve donc que les chaleurs spécifiques croissent notablement avec la température et qu'il faut absolument tenir compte de cet accroissement quand on cherche à déterminer théoriquement les pressions et les températures explosives.

D'autres expériences ont été effectuées plus récemment dans la même voie, par MM. Lean et Bone, d'Edimbourg, et nous résumons leur travail d'après une analyse donnée par le *Journal du Gaz et de l'Electricité* (1).

Le mélange tonnant étudié par ces ingénieurs était formé de deux volumes d'hydrogène pour un d'oxygène. Ils l'introduisaient dans un serpentín de plomb de deux litres de capacité terminé par un épais tube de verre, jaugeant 25 centimètres cubes, relié au serpentín par un collier d'acier bien étanche; ce tube est rempli d'air, qui sera refoulé ou comprimé par l'explosion. Si l'on pouvait déterminer la diminution de volume de cet air, on en déduirait la pression correspondante; mais cette pression se développe avec une rapidité extrême et ne dure qu'un instant très court: comment saisir cette variation de volume instantanée? Un seul procédé pouvait être mis en œuvre, et c'est celui auquel MM. Lean et Bone ont eu recours: ils ont photographié l'image de la flamme qui pénètre dans le tube de verre, et, sur l'épreuve produite, en relevant l'extrémité de la flamme, ils ont mesuré la compression qui s'est exercée dans le tube.

Les auteurs de ce travail ont trouvé que l'air du tube était comprimé adiabatiquement, instantanément, en un intervalle de temps inférieur à $\frac{1}{5000}$ de seconde; en effet, en comparant des photographies directes de la flamme avec celles qu'on prend sur un miroir se mouvant à une vitesse de 2^m,5 par seconde, on constate qu'elles

1. Numéro du 15 novembre 1892.

sont symétriques et de même largeur. Dans un temps aussi court, il n'est pas possible que le gaz perde une quantité de chaleur sensible, ni qu'il se diffuse d'une quantité appréciable dans le tube. Des expériences faites avec des tubes de volumes différents, variant de 11 à 24 centimètres cubes, ont démontré que les pressions calculées étaient indépendantes de ces volumes.

En opérant sur un mélange tonnant obtenu par électrolyse, la valeur moyenne de six différentes séries d'expériences a donné pour le rapport des volumes 8,6, d'où, en prenant $\gamma = 1,408$, on déduit pour P la valeur de 20,7 atmosphères. Cette valeur est double de celle qui a été donnée par d'autres expérimentateurs.

Ces belles études ont fait ressortir des pressions assez voisines de celles que nous avons calculées, mais toujours inférieures.

L'examen des diagrammes des moteurs vient enfin confirmer nos calculs. Dans le moteur primitif Lenoir, admettant un mélange au $\frac{1}{10}$, sans compression préalable, M. Tresca avait relevé une pression maximum de 4,87 atmosphères, au lieu de 6,5 : il y a un écart de plus d'une atmosphère, mais il faut tenir compte de ce que la combustion du mélange n'est pas instantanée et de ce qu'elle a lieu derrière un piston en mouvement ; l'explosion ne se fait donc pas rigoureusement à volume constant et l'action de paroi intervient encore. Dans le moteur Dugald Clerk, à compression préalable, la pression atteignait 16 atmosphères pour une combustion de 3 atmosphères : le calcul indiquait 19,5. Enfin, dans les moteurs Otto, si l'on tient compte de la dilution des gaz dans le résidu d'une combustion antérieure, la pression devrait atteindre 15 atmosphères : on relève au diagramme 12 atmosphères au plus.

La théorie est donc vérifiée par l'expérience dans une certaine mesure ; toutefois les pressions et les températures observées sont toujours moindres qu'on ne pourrait le croire.

Pour expliquer ce désaccord manifeste, on a fait intervenir la dissociation.

Cette théorie, imaginée par M. Dugald Clerk, mérite d'être exposée ici : elle est très ingénieuse.

H. Sainte-Claire Deville a observé le premier que, sous l'influence de la chaleur, la vapeur d'eau tend à se résoudre en ses éléments : cette dissociation des atômes composants commence de même à une température déterminée pour chaque corps, variable avec la pression ; elle se poursuit d'une manière progressive à mesure que la température s'élève ; mais elle est limitée par une tendance inverse à la recombinaison, de telle sorte que les éléments restés en présence, renouent graduellement leur première association, si la température s'abaisse suffisamment.

La dissociation peut se produire dans la combinaison explosive des gaz tonnants très riches. La température de dissociation étant atteinte, la combustion ne s'effectue que partiellement et elle se trouve limitée de fait : elle ne se complètera qu'après que la température aura baissé, par l'action du refroidissement. Il en résulte qu'au lieu d'être instantanée, la combustion devient progressive ; de plus, la pression explosive est diminuée et elle reste nécessairement inférieure à la valeur qu'elle aurait acquise si la combustion avait été instantanément complète.

Ces faits sont dûment constatés et absolument certains.

M. Dugald Clerk est parti de là pour édifier une théorie nouvelle des phénomènes de combustion qui se déroulent dans les cylindres des moteurs. C'est par la dissociation qu'il explique les différences que l'on constate entre les pressions calculées théoriquement et les pressions effectives. La même cause produirait ces combustions prolongées (*slow combustion*) qui modifient si considérablement les courbes de détente. D'après cet ingénieur distingué, cet effet serait fatal et inévitable.

Telle est la théorie qui tendait à prévaloir il y a quelques années : elle est discutable. Et d'abord, on peut contester l'existence des phénomènes de dissociation dans la détonation des mélanges de gaz d'éclairage et d'air, parce que la température n'atteint pas le degré voulu. Sainte-Claire Deville a fixé, il est vrai, à 1.200° environ la dissociation de la vapeur d'eau et de l'acide carbonique ; mais les expériences de MM. Mallard et Le Châtelier montrent péremptoirement (1) que, dans les détonations, la dissociation ne se produit que bien au delà. Ce n'est que vers 1.800° que la dissociation de l'acide carbonique commence à devenir perceptible et elle est encore très faible vers 2.000° ; sa valeur est alors moindre que 5 0/0. Quant à la vapeur d'eau, elle paraît ne se dissocier qu'au delà de 2.500° , et à 3.300° l'effet est encore négligeable. Les beaux travaux de M. Crafts avaient déjà fait pressentir ces importantes conclusions : elles sont parfaitement établies aujourd'hui. Il n'y a donc pas de dissociation appréciable dans des détonations dont la température reste comprise entre 2.064 et 1.514° centigrades. Nous sommes par suite autorisé à nier la dissociation du moins dans les limites que lui attribue la théorie de M. Clerk.

Mais alors, comment expliquer les divergences de l'expérience et des calculs basés sur les données les plus solides de la physique ?

Il suffit de faire intervenir l'action refroidissante de la paroi, qui soustrait du calorique au mélange explosé, abaisse par suite sa température et diminue la pression développée. L'action thermique des parois des enceintes sur les gaz qu'elle renferme est beaucoup plus énergique et rapide qu'aucuns ne le pensaient autrefois et elle dispense de recourir à toute autre explication des phénomènes dont nous venons de rendre compte (2).

Parmi les arguments qu'on peut fournir à l'appui de cette manière de voir, il en est de décisifs que nous ferons valoir plus loin ; mais nous croyons utile de signaler maintenant déjà les expériences suivantes :

M. Roszkowski a fait à Carlsruhe, dans le laboratoire de M. Bunte, une série d'essais fort intéressants sur l'effet produit par la température sur les limites d'explosibilité des mélanges tonnants : nous allons en résumer les résultats d'après un article publié en 1891 dans le *Journal für Gasbeleuchtung*.

L'auteur de ce travail appelle limite inférieure d'explosion celle qui correspond à la plus faible proportion de gaz combustible, par rapport au comburant ; la limite

1. *Recherches sur la combustion des mélanges explosifs*, pages 185 et 273.

2. Witz. — « De l'effet thermique des parois d'une enceinte sur les gaz qu'elle renferme » ; thèse inaugurale de doctorat ; Paris, 1878.

supérieure correspond au contraire à la plus faible proportion de comburant par rapport au gaz combustible.

Le rôle de la température sur ces limites avait été démontré autrefois par une expérience de Wagner : ce savant avait observé qu'un mélange, qui ne pouvait pas exploser au contact d'une étincelle produite par une bobine d'induction de faible puissance, donnait au contraire une forte explosion quand on opérant la mise du feu par l'étincelle d'une grande bobine.

Un effet analogue doit s'observer quand on opère sur des mélanges à température élevée : M. Roszkowski a donc effectué de nombreux essais sur des gaz dont la température variait de 15 à 300° ; il a opéré sur l'hydrogène, l'oxyde de carbone, le gaz des marais et le gaz d'éclairage. Nous ne relèverons que ces derniers résultats.

Le gaz de Carlsruhe employé avait la composition suivante :

H.	50,6
CH ⁴	34,8
CO	6,2
Hydrocarbures divers	5,3
CO ²	1,9
Az	1,2
Total	<u>100,00</u>

A la température de 15°, ce gaz de houille exige au moins 0,4358 de son volume pour former un mélange explosif, mais il peut supporter 12,25 volumes d'oxygène sans cesser d'être détonant, la quantité trouvée pour produire une combustion complète étant exactement un volume. A 300°, la limite supérieure est de 0,71 d'oxygène, alors que la limite inférieure serait de 2,85. La limite supérieure s'est donc accrue ainsi que la limite inférieure : cette dernière donnée étant seule intéressante pour nous, nous y concentrerons toute notre attention.

La proportion maximum d'air serait par conséquent de 12,25 volumes à 15° et 13,1 à 300° : dans un cylindre chaud, il se produira dès lors moins de ratés.

Mais la présence de l'acide carbonique dans le mélange, produit le singulier effet de modifier cette explosibilité dans un sens inattendu : l'adjonction d'une forte proportion de ce gaz inerte aurait pour résultat de rapprocher les deux limites. Ce serait donc un argument en faveur de ceux qui estiment qu'il y a un intérêt à expulser du cylindre des moteurs le résidu des gaz brûlés restant à la suite des précédentes explosions.

Nous reviendrons plus loin sur ces faits en établissant la théorie expérimentale des moteurs, et nous démontrerons que le rôle des parois est prépondérant dans les phénomènes qui se produisent dans le cylindre des moteurs à gaz.

II

Étude des divers gaz combustibles obtenus par distillation.

Le gaz d'éclairage, dit *gas de ville*, dont nous venons d'étudier longuement les propriétés, est un produit de distillation des houilles grasses, dénommées houilles à gaz pour l'emploi qu'on en fait.

La meilleure houille à employer est la houille grasse à longue flamme : ces houilles sont assez répandues en France et en Belgique, où elles forment les couches les plus élevées du Pas-de-Calais et du bassin de Mons (*flénus gras*) ; on en trouve aussi dans la Loire, à Commentry, à Blanzky, à Sarrebrück, en Silésie et à Newcastle (*cherry-coal*) (1).

Mais on peut utiliser d'autres combustibles moins chers que la houille à gaz.

Quand on soumet de la tourbe à la distillation sèche, on obtient, exactement comme avec la houille, du gaz, du goudron et un coke, dit *charbon de tourbe*.

Vohl a obtenu les résultats suivants en distillant une tourbe marécageuse de Zurich.

Gaz	17,625
Goudron	5,375
Autres liquides	52,000
Charbon de tourbe	25,000
	<hr/>
	100,000

Les gaz sont constitués par H, CO, CH⁴ et des hydrocarbures lourds : les liquides renferment l'huile de tourbe, pesant 0,820, une autre huile de densité 0,855 et de la paraffine. Avec 100 kilogrammes de tourbe, on recueille environ 20 mètres cubes de gaz, et ce gaz est excellent.

Reissig a publié les résultats de ses analyses effectuées sur un gaz de tourbe fabriqué aux environs de Munich.

1. Il peut y avoir intérêt pour un industriel de fabriquer lui-même son gaz. En effet, supposons qu'on emploie un four à cinq ou sept cornues, et qu'on les chauffe avec le coke obtenu comme résidu de distillation : on sait que 100 kilogrammes de charbon donnent 30 mètres cubes de gaz environ. Or, il reste au fabricant de gaz, déduction faite du coke brûlé, 50 kilogrammes de coke, dont le prix équivaut au moins à celui de 55 kilogrammes de houille à gaz : de plus, on obtient du goudron, et l'on pourrait assez facilement tirer parti des eaux ammoniacales. Négligeons cependant ces derniers sous-produits et ne tenons compte que du coke : on peut dire que 45 kilogrammes de houille ont donné 30 mètres cubes de gaz ; cela fait 1 mètre cube de gaz par 4,5 kilogramme de houille. Doublons ce prix pour tenir compte des frais de fabrication, de l'intérêt et de l'amortissement du matériel : on peut donc établir comme règle, que le mètre cube coûte autant que 3 kilogrammes de charbon à gaz : cela fait environ 6 centimes au mètre cube. Ce résultat explique la faveur dont jouissent en Allemagne les appareils à gaz de distillation pour l'alimentation des moteurs : pour un moteur de 25 chevaux, on trouve donc souvent bénéfice à fabriquer son gaz soi-même, d'autant plus qu'on peut éclairer en même temps ses ateliers.

	I	II
H	27,50	35,18
CO	20,33	18,34
CH ⁴	42,65	33,00
Hydrocarbures lourds.	9,52	13,16
Azote	0,00	0,32
	100,00	100,00

En certaines circonstances, il peut devenir avantageux de distiller la tourbe en vue d'en utiliser les gaz en même temps que le coke, et alors le gaz devient un produit accessoire peu coûteux.

On pratique depuis longtemps la distillation des bois en vase clos pour en extraire un gaz combustible ; ce gaz fut même le premier gaz d'éclairage produit par Philippe Lebon, dès 1795. Mais sa flamme était fuligineuse et son utilisation exigeait une épuration complète à la chaux ; sa fabrication donnait d'ailleurs des sous-produits dont on ne put pas d'abord trouver l'emploi.

Ebelmen a fait des essais prolongés de gazéification du bois dans les gazogènes et il a obtenu des résultats remarquables ; le gaz recueilli était un mélange de gaz de distillation et de gaz de fourneau. Les expériences d'Audincourt démontrèrent qu'un kilogramme de bois, renfermant 25 0/0 d'eau, fournissait 1.615 litres de gaz dont le pouvoir moyen était, par mètre cube, de 1.479 calories. On retrouvait ainsi 82 0/0 du calorique disponible dans le bois employé, sans tenir compte de celui qu'on récupérait par la combustion des sous-produits.

Berthier, Sauvage, Pettenkofer, Reissig, et d'autres encore, se sont appliqués à faire une distillation rationnelle des bois. Le tableau ci-dessous indique les quantités de gaz et de charbon de bois fournies par la distillation de 100 kilogrammes de bois de diverses essences, d'après Reissig.

Essences	Gaz produit	Charbon de bois
—	—	—
	m ³	kg.
Pin	33,84 de gaz purifié	18,40 de charbon de bois
Sapin	38,88 —	18,00 —
Mélèze	33,00 —	25,00 —
Tilleul	38,00 —	20,00 —
Peuplier	35,44 —	19,80 —

Mais il faut reconnaître que ces chiffres n'ont qu'une exactitude relative, car les résultats diffèrent grandement avec l'état de siccité des bois.

En thèse générale, ce sont les bois résineux secs qui donnent le gaz le plus riche.

En 1849, Pettenkofer distillait de préférence du pin ou du mélèze ; voici la composition moyenne des gaz recueillis.

H	15,72 volumes
C O	40,59 —
CH ⁴	11,06 —
Hydrocarbures lourds	6,91 —
C O ²	25,72 —

Le pouvoir calorifique de ces gaz était estimé à 3.300 calories, vapeur d'eau non condensée.

Les eaux de distillation renfermaient de l'ammoniaque, de l'acide pyroligneux, de l'esprit de bois, du goudron et diverses essences. Le lavage des cendres donnait en outre des carbonates et des sulfates de potasse, valant plus de 1 franc le kilogramme.

M. Lencauchez (¹), dont la compétence en ces matières est indiscutable, résume dans les chiffres suivants les conclusions d'une fructueuse étude théorique et expérimentale poursuivie durant de longues années.

Produits de la distillation du bois (en cornues)

Volume de gaz à 0° et 760 ^m /m par kilog. de bois	0 ^m ³ , 334
Pouvoir calorifique du gaz par mètre cube	3283 cal.
Rendement en charbon de bois	0kg., 235
— en eau acide utilisable	0 ,336
— en goudron	0 ,070
Quantité de bois nécessaire pour donner au gaz 2.500 calories	2 ^k , 273

M. Lencauchez estime à 76 fr. 90 la valeur des sous-produits obtenus par tonne de bois ; on voit quel bénéfice on peut retirer de la distillation en vase clos substituée aux procédés barbares encore en usage dans les régions montagneuses : la vente du goudron et des eaux acides est une première source de revenu à laquelle s'ajoute l'utilisation des gaz recueillis pour la production de la force motrice par les moteurs à gaz.

Delamare-Deboutteville alimentait, il y a quinze ans déjà, ses moteurs Simplex avec du gaz fourni dans les Landes par des appareils de distillation appropriés à cet usage : les résultats furent satisfaisants.

Les beaux travaux de M. Riché ont multiplié ces applications en ces dernières années, mais nous remettons à un chapitre suivant l'exposé des résultats obtenus ; le gaz Riché est en effet un gaz mixte de distillation et de gazogène.

Les procédés des cornues, que nous considérons ici, s'appliquent à un grand nombre de produits combustibles.

Tous les corps en général peuvent fournir des gaz carburés par distillation ; on a fait partout du gaz d'huile ; en Russie, on a utilisé certaines résines ; au Brésil, on emploie encore des graines de lin sauvage et, dans la République Argentine, les restes des animaux ; à Reims, on a tiré parti des eaux savonneuses produites dans le désintuage des laines. Le procédé consiste toujours en une distillation dans des cornues :

1. On lira avec grand fruit les ouvrages de M. Lencauchez, traitant de cette question : « Étude sur les combustibles », Paris, Lacroix, 1878 ; « Études sur divers gaz combustibles », Paris, Bernard Tignol, 1899.

il peut conduire en certains cas à des résultats économiques. Les résidus noirs et épais de la rectification du pétrole ont été exploités avec un succès remarquable, tant qu'ils ne valaient que 15 à 20 francs les 100 kilogrammes et les systèmes Hirzel, de Leipzig, et Riedinger, d'Augshourg, avaient conquis une grande vogue : un filet de l'hydrocarbure visqueux tombait dans l'intérieur d'une cornue en fonte chauffée au rouge sombre et se convertissait en un gaz qui possédait, à volume égal, un pouvoir calorifique double de celui du gaz de houille. En 1878, M. Launoy exposait à Paris un appareil du même genre qui fonctionnait avec une parfaite régularité : la cornue de fer forgé qu'il employait était chauffée au rouge-cerise dans un fourneau et recevait de l'huile de schiste, qui y tombait goutte à goutte et se transformait immédiatement en gaz. Citons encore les appareils Gapiaud, Lecourt, Studt (de Ludwigshafen), Maring et Mertz (de Bâle) : ces derniers constructeurs ont établi plus de 50 petites usines privées en Alsace, et le *Bulletin de la Société Industrielle de Mulhouse* a témoigné de leur bon fonctionnement. Avec des matières coûtant 20 francs les 100 kilogrammes, on peut obtenir un gaz dont le pouvoir calorifique est quadruple de celui du gaz ordinaire et qui revient au plus à 50 centimes le mètre cube. Les ressources actuelles offertes à l'extension de cette industrie sont encore très grandes : presque tous les pays produisent aujourd'hui des schistes bitumineux, des bitumes liquides, des huiles minérales ou des résidus de tout genre qu'on peut utiliser ; d'immenses réserves existent en Amérique, dans l'Asie Mineure, en Chine, à Rangoon et même dans l'Afrique centrale, où l'on a découvert des gisements considérables. A la fabrique royale de conserves de Mayence, on a obtenu un gaz excellent au prix de 8 centimes le mètre cube, à égalité de pouvoir calorifique avec le gaz de la houille (1). Bref, en bien des cas, l'industriel qui demande la force motrice au gaz peut alimenter ses machines avec un produit fabriqué sur place dans des conditions réellement avantageuses (2).

Le gaz Pintsch est aussi un gaz d'huile de pétrole : on emploie le pétrole brut de Pensylvanie. L'huile, contenue dans un réservoir placé au-dessus du foyer, coule lentement dans les cornues par un ajutage à robinet, qui permet d'en régler le débit suivant les besoins de l'opération.

Cet ajutage est percé dans la tête même de la cornue, laquelle est amovible afin de permettre facilement le nettoyage des cornues. L'huile se vaporise et se dissocie, en produisant des gaz et en laissant un résidu solide abondant. Les gaz traversent un barillet avant de se rendre aux condenseurs, aux épurateurs et aux laveurs : l'épuration est faite par de la sciure de bois et un peu de chaux. Les cornues assemblées deux par deux, sont chauffées par un foyer dans lequel on brûle du charbon : l'huile tombe dans les cornues, placées à la partie supérieure, lesquelles sont à la température la plus basse ; les cornues inférieures doivent être maintenues au rouge-cerise clair. Une tonne d'huile donne 600 mètres cubes d'un gaz riche possédant un grand pou-

1. « Revue industrielle », année 1882, page 454.

2. Au tissage mécanique de M. Jacquet, à Schirmock, le prix de revient du mètre cube n'a pas dépassé 3 centimes amortissement et intérêt du matériel non compris.

voir calorifique ; le chauffage des cornues consomme un kilogramme de coke et de charbon par mètre cube de gaz produit. D'après M. Hunter, le mètre cube coûterait 29 centimes ; c'est l'équivalent du gaz de houille à 5 centimes.

Les gaz de pétrole nous amènent à parler des gaz naturels qu'on recueille abondamment en Pensylvanie, dans l'Ohio et à Pittsburg ; on en trouve aussi dans le Caucase, à Bakou. M. Robinson donne la composition de quelques gaz, d'après des analyses faites et publiées par la Société des Ingénieurs civils américains ; nous lui empruntons les chiffres qui suivent (1).

	Pittsburg	Leechburgh	Bakou
H	22,0	4,79	0,98
CO	0,6	0,26	—
Az.	3,0	—	0,49
CH ⁴	67,0	89,05	93,09
C ² H ⁴ , etc.	6,0	4,95	3,26
O	0,8	—	—
CO ²	0,6	0,35	2,18
	<hr/> 100,0	<hr/> 100,00	<hr/> 100,00

Mais revenons à la fabrication des gaz de distillation.

On a proposé récemment d'utiliser les goudrons.

Les bas prix auxquels sont descendus les goudrons en ces dernières années ont démontré que le marché en était encombré et qu'il fallait chercher de nouveaux débouchés à cet important sous-produit de la fabrication du gaz. La préparation des asphaltes, des cartons imperméables, des peintures préservatrices du bois absorbe une minime quantité de goudron ; la distillation elle-même, opérée dans le but de recueillir les huiles d'anthracène, de créosote, et autres, ne constitue pas encore un exutoire suffisant pour ce produit, dont l'Angleterre seule produit annuellement plus de 600.000 tonnes ; la combustion directe du goudron est d'autre part une ressource extrême, qui ne peut être considérée comme une solution de ce problème économique. Ces considérations ont amené M. Stafford Ellery à chercher à extraire du goudron un combustible gazeux utilisable pour l'éclairage ou la production d'énergie, et il a entrepris de son projet le *Gaz Institute* du Royaume-Uni, au congrès de 1894 (2).

Voici, d'après cet ingénieur, la composition moyenne en poids d'un goudron de gaz :

Huiles légères	3,0
— de créosote	20,5
— d'anthracène.	6,9
Gaz et liqueur ammoniacale	9,0
Brai	60,4
Divers.	0,2
	<hr/> 100,0

1. Cf. « *Gaz and Petroleum Engines* », page 361.

2. « *Journal du gaz et de l'électricité* », 31 juillet, 1894.

Le goudron est d'autant plus riche en hydrocarbures que les cornues ont fonctionné à plus basse température. En général, il semble qu'une *tonne anglaise* (1.016 kilogr.) donne 16.000 *pieds cubes* (452 mètres cubes) de gaz riche, 508 kilogrammes de coke et 7^k,25 de sulfate d'ammoniaque. Ce coke est exempt de cendres et égal comme qualité au meilleur coke de fonderie ; le liquide ammoniacal est aussi de vente facile. La distillation constitue par suite une opération fructueuse, car le coke et l'ammoniaque valent au moins 9 shillings, soit 11 fr. 25. La distillation s'effectue aisément dans des cornues de fonte au fond desquelles on injecte le goudron ; le condenseur est formé par une série de tuyaux légèrement inclinés, de manière à ce que les premiers produits de la condensation retournent à la cornue pour y subir de nouveau le contact des parois chaudes.

L'application économique de ce procédé dépend évidemment du prix des goudrons.

Les gaz riches obtenus par la distillation des charbons et des carbures sont fréquemment comprimés dans des réservoirs en métal très résistants, et utilisés ainsi pour alimenter des moteurs de voitures ou de bateaux : nous en verrons d'intéressants exemples dans l'industrie des tramways. En les comprimant à 20 kilogrammes, on arriverait à emmagasiner dans un litre environ 100 calories : c'est peu de chose comparativement aux calories que peut fournir un litre de pétrole, et pourtant le gaz comprimé trouverait encore son emploi en certains cas déterminés. Malheureusement, il est établi que les gaz riches de distillation éprouvent une certaine perte par la compression, qui entraîne la liquéfaction des carbures lourds. M. Love a signalé à la Société de Chimie de New-York, des pertes de 16 0/0. Mais il faut observer que l'évaporation des liquides condensés peut restituer les calories qu'on croyait perdues ; quand on recueillait le gaz sous une pression élevée, ces liquides restaient dans le réservoir et le gaz était appauvri ; par contre, lorsque la pression descend au voisinage de la pression atmosphérique, les hydrocarbures redeviennent volatils, si toutefois la température n'a pas été trop abaissée par la détente. Le pouvoir d'un gaz comprimé en réservoir varie donc du commencement à la fin de sa détente. C'était un fait à signaler.

J'ai du reste procédé à des expériences précises en vue de déterminer la perte que subit le gaz ordinaire de ville, par le fait de son séjour sous haute pression dans des réservoirs métalliques ; elle est très faible, si la température du gaz détendu est maintenue au voisinage de la température ordinaire ; or cette condition est assez facile à réaliser dans la pratique.

III

Air carburé.

Il existe un autre genre d'appareils gazogènes, tout différents des cornues à distillation, qui peuvent fournir une seconde solution non moins remarquable du problème : ce sont les hydrocarburateurs à froid. En saturant l'air, à la température ordinaire

de vapeurs d'essences volatiles, telles que la gazoline ou les éthers de pétrole, on constitue un mélange combustible qui présente les propriétés du gaz d'éclairage.

Ces appareils, dont Mille a créé le prototype, ont été appliqués avec un grand succès à l'alimentation des moteurs à gaz ; ils ont rendu de grands services dans les lieux non desservis par des usines à gaz, lesquels sont encore plus nombreux qu'on ne le croit. L'automobilisme leur a plus tard ouvert un vaste champ d'exploitation et ces appareils ont réalisé dans ces derniers temps une grande perfection.

Nous décrirons succinctement les premiers carburateurs qui ont été établis. MM. Mignon et Rouart ont sans doute le droit de figurer en tête de cette liste.

Ces habiles constructeurs ont construit d'abord, sur les indications de Lenoir, un carburateur tournant très ingénieusement conçu, qui est représenté par la figure 13. Sa forme est celle d'un cylindre, dont l'axe est horizontal ; on lui fait accomplir une révolution en cinq minutes, en commandant la roue dentée R par un pignon mû par le moteur lui-même. Des cloisons verticales perforées divisent le cylindre en compartiments E, qui sont garnis d'étoupes :

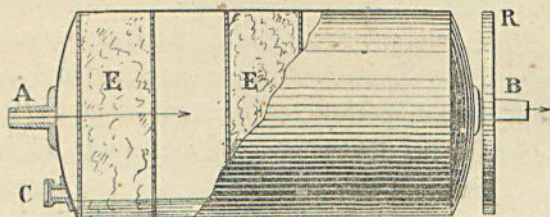


Fig. 13. — Carburateur Mignon et Rouart.

la gazoline les humecte constamment par capillarité et en vertu du mouvement continu de l'appareil ; l'air, appelé en A, va au moteur par B, entièrement saturé des vapeurs combustibles. Le regard C permet de s'assurer que la quantité de liquide

est suffisante. On ne saurait imaginer de dispositif plus simple, mais les étoupes perdaient assez rapidement leurs propriétés absorbantes.

MM. Rouart frères ont perfectionné dans la suite leur carburateur et ils ont créé un appareil à augets, montés sur chaîne, à l'instar d'une noria ; le carbure était soulevé au sommet du récipient et il y retombait en pluie. L'air, aspiré par le moteur, traversait le carburateur et se saturait de vapeurs combustibles. Par mesure de précaution, MM. Rouart frères intercalaient entre le carburateur et le moteur un cylindre vertical, contenant des toiles métalliques, pour empêcher tout retour de flamme : on n'est jamais trop prudent, mais la précaution était superflue ; en effet, l'air carburé n'est pas explosif, l'oxygène qu'il renferme étant insuffisant à sa combustion, attendu qu'il ne forme que le $\frac{1}{5}$ de son volume, et qu'il faut à peu près $\frac{4}{5}$ pour constituer un mélange tonnant.

MM. Rouart ont alimenté ainsi d'air carburé une locomobile agricole et des moteurs de bateaux, qui ont obtenu un grand succès : ils paraissent être les initiateurs de ces applications, si multiples aujourd'hui.

M. Piéplu préparait un bon gaz en faisant barboter dans l'hydrocarbure un rouleau de bois, garni de poils de sanglier, présentant l'aspect d'une brosse circulaire : ce rouleau, qui était mû par le moteur, produisait une évaporation très rapide du liquide volatil. On produisait un mètre cube de gaz riche avec 450 grammes de gazoline ordinaire.

Le *Technologiste* a signalé, dans son numéro du 11 juin 1884, un curieux brevet Schrab, qui reposait sur une idée vraiment originale. L'hydrocarbure était renfermé dans l'enveloppe même du cylindre du moteur, où il remplaçait l'eau en bénéficiant des chaleurs perdues par la paroi ; de là, il passait, à une température de 80 degrés environ, dans un récipient de carburation, à plusieurs compartiments, que traversaient les gaz de la décharge du moteur. Les gaz brûlés étaient donc refoulés dans le liquide bouillant, où ils se recarburèrent, en se chargeant d'hydrogène, d'oxyde de carbone et d'autres gaz éminemment combustibles, et ils redevenaient aptes à rentrer dans le cycle et à produire une nouvelle explosion, à la condition de retrouver toutefois l'oxygène nécessaire à leur combustion : on a prétendu que M. Schrab avait obtenu des rendements extraordinaires par ce procédé.

En suivant l'ordre chronologique, nous trouvons l'intéressant carburateur de Delamare-Deboutteville et Malandin, adjoint par eux à leur moteur Simplex.

Un récipient renferme la gazoline, laquelle s'écoule en un mince filet, réglé par un robinet. L'essence tombe sur une brosse en crin, de forme hélicoïdale, en même temps qu'un jet d'eau chaude, provenant de l'eau de circulation du cylindre. L'eau contribue, par sa température, à faciliter la vaporisation du carbure, et les deux liquides tombent ensemble dans un vase clos. La gazoline surnage l'eau et il ne s'en perd pas par le tuyau d'évacuation. Cet appareil a rendu des services et nous lui devons une mention des plus honorables.

M. Tenting a inventé un carburateur plus rudimentaire : il se compose de trois caisses superposées. La première, placée au-dessus des deux autres, est un réservoir dans lequel on renferme la provision d'hydrocarbure nécessaire au travail d'une journée ; un tube amène le liquide dans la seconde caisse, mais un conduit latéral, relié à la caisse du dessus, limite à une hauteur déterminée le niveau de ce liquide. Les gaz de l'échappement du moteur traversent la caisse inférieure et réchauffent le liquide volatil refroidi par son changement d'état.

M. Durand a étudié avec soin un dispositif nouveau, qui est ingénieux et sort de la routine. Ce carburateur est automatique, et non seulement il fonctionne tout seul, mais encore il se règle de lui-même. Il est formé d'un récipient cylindrique, hermétiquement clos, rempli d'essence de pétrole ; un macaron poreux, en liège, flotte à la surface du liquide et s'en imprègne complètement. C'est une éponge au milieu de laquelle débouche l'air à carburer, par l'intermédiaire d'un tuyau qui traverse, à frottement doux, le couvercle du carburateur : l'évaporation est donc toujours superficielle. Le carbure employé est une essence relativement lourde de densité comprise entre 0,70 et 0,72. En hiver, on réchauffe l'appareil en y lançant les gaz de la décharge, mais la carburation se fait bien sans cela. Le carburateur Durand a le grand avantage de fonctionner, sans qu'on ait à toucher à aucun robinet : la mise en train est extrêmement facile et ne donne jamais d'ennuis. S'il s'accumule des huiles lourdes au fond de l'appareil, on les évacue par un robinet de vidange disposé dans ce but à la partie la plus basse du récipient.

La Compagnie Otto allemande (*Gasmotoren Fabrik Deutz*) a adopté un appareil

du même genre ; il se compose d'un récipient cylindrique, entouré d'une enveloppe dans laquelle circule l'eau qui vient du cylindre du moteur ; la gazoline renfermée dans le récipient est ainsi maintenue à une température de 50 degrés environ. L'air à carburer est amené au fond du récipient par un large tuyau à pomme d'arrosoir qui le divise en bulles nombreuses dont le tourbillon rapide émulsionne le liquide ; le courant traverse ensuite un filtre et il se dirige vers le moteur en franchissant une soupape de retenue, destinée à empêcher un retour vers le carburateur. Pour plus de précautions, la conduite porte même une soupape de sûreté (1).

Plusieurs constructeurs ont copié ce dispositif : ce sont des carburateurs à barbotage, fort simples, mais qui n'opèrent pas une diffusion parfaite.

Daimler, auquel les moteurs de voitures ont conquis une grande et légitime notoriété, établit en 1890 un carburateur plus efficace et mieux étudié que les précédents dont le fonctionnement régulier a grandement contribué à l'expansion des appareils producteurs d'air carburé. Un réservoir supérieur alimente de gazoline le carburateur, qui est pourvu d'un flotteur, dont la fonction est de maintenir un niveau constant.

Ce carburateur est formé de deux enceintes superposées : l'enceinte supérieure est coupée par des chicanes ; celle de dessous renferme le liquide et le flotteur. L'air aspiré par le moteur traverse une couche de gazoline de hauteur toujours égale, grâce à la constance du niveau maintenue par le flotteur, l'émulsionne et l'entraîne avec lui dans les chicanes, d'où l'excès de liquide retombe dans le compartiment inférieur. C'est donc le flotteur qui constitue l'invention de Daimler : le perfectionnement est notable, attendu que la résistance créée par le liquide est invariable et que la carburation ne varie pas, puisque la hauteur de liquide traversée par l'air est elle-même invariable. Pour mieux assurer la vaporisation du liquide, Daimler chauffait l'air avant son entrée dans le carburateur ; il voulait éviter ainsi l'accumulation des huiles lourdes, qui se produit fréquemment, quand on emploie des gazolines de qualité inférieure.

Cette considération nous conduit à étudier ces carbures. En théorie, ce sont des éthers de pétrole, obtenus par la distillation de l'huile brute de pétrole, entre les températures de 60° à 100°. Leur densité est comprise entre 0,650 et 0,710 ; ils sont inflammables à la température zéro ; ils sont solubles dans l'alcool. Ce sont des liquides clairs et transparents ; leur odeur est douce. Si l'on en verse quelques gouttes dans la main, ils s'évaporent rapidement, sans laisser aucun résidu gras, ni odorant. La formule chimique de ces carbures est éminemment complexe. Leur pouvoir calorifique supérieur (vapeur d'eau condensée) est de 11.500 à 11.800 calories par kilogramme, donc de 7.750 à 8.250 par litre (2).

En pratique, on trouve souvent dans le commerce des gazolines, qui ne répondent

1. Lieckfeld. — « Die petroleum and Benzin Motoren » ; München, 1894.

2. Il est important de noter que les densités doivent être prises à 15°, et qu'on doit corriger les chiffres marqués par le densimètre, si l'on opère à une autre température ; on ajoute ou l'on retranche 0,8 millièmes par degré au-dessus ou au-dessous de 15°.

à la définition que nous venons d'en donner que par un point, par leur densité. Or, cette densité moyenne peut être obtenue par le mélange d'éthers légers (rhigolènes) de densité inférieure à 0,65 et d'essences lourdes (ligroïnes, benzines, etc.), voire même d'une faible quantité d'huiles lourdes, qui ne s'évaporent pas dans l'air à la température ordinaire. Assurément, si l'on emploie des gazolines de marque (stelline, motonaphta ou autre), livrées en bidons plombés, on ne rencontre pas ces savants mélanges ; mais les produits de choix sont chers et leur emploi n'est guère possible pour l'alimentation des moteurs fixes, les seuls dont nous nous occupons dans cet ouvrage. A l'époque où Daimler inventait son carburateur, les gazolines étaient du reste moins bien distillées qu'aujourd'hui, et il fallait ou bien chauffer le carburateur, comme le faisait le célèbre ingénieur allemand, ou bien se ménager le moyen d'évacuer les huiles lourdes résiduelles par une vidange.

Daimler a perfectionné son carburateur en disposant la chambre à niveau constant à côté de la chambre d'évaporation et de carburation. Cet intéressant appareil est représenté par la figure 14. L'essence arrive d'un réservoir surélevé et pénètre par N dans le récipient A pourvu du flotteur B : aussitôt que ce flotteur a été soulevé par le liquide d'une quantité déterminée, il agit sur les leviers articulés E, qui oscillent sur leurs axes et ferment la soupape c, qui livre passage à l'essence. Le niveau du liquide est ainsi maintenu à une hauteur constante. Or le vase A communique avec le carburateur F et l'essence monte dans l'ajutage J, au sommet duquel elle vient former une

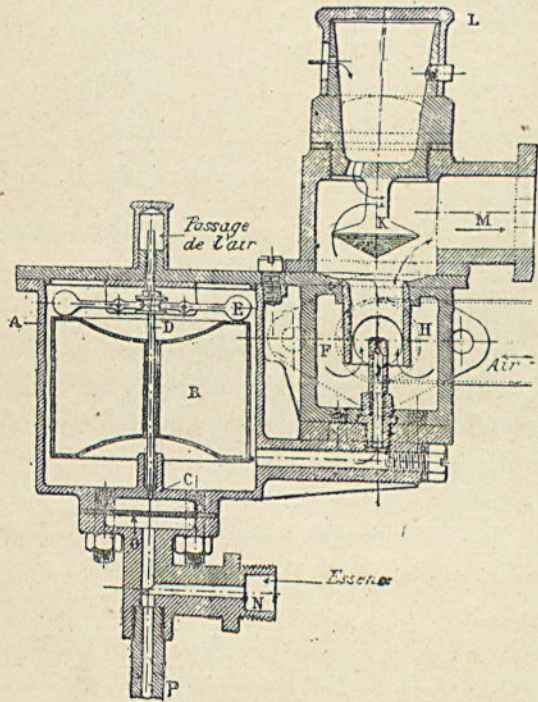


Fig. 14. — Carburateur Daimler.

goutte, qui est saisie par le courant d'air et projetée contre le champignon X ; elle est ainsi pulvérisée et vaporisée. L'excès d'air nécessaire pour la formation du mélange tonnant est reçu par la lanterne supérieure L ; il rencontre à angle droit la veine d'air carburé et il s'y diffuse parfaitement. Une bague tournante permet de régler la quantité d'air admise.

Innombrables sont les carburateurs qui ont été inventés depuis ces dernières années. On peut les ranger en deux catégories, suivant qu'ils sont à niveau constant, comme le carburateur Daimler, ou à alimentation directe. Ce second type a été créé par M. Gautier-Wehrlé : il est caractérisé par l'absence de flotteur, et présente une remarquable simplicité.

Nous le voyons représenté sur la figure 15. Son organe essentiel est un large disque lenticulaire *L*, monté sur un axe, qui le guide par-dessus et par-dessous, par les tiges *T* et *T'*; la tige inférieure *T* a une section carrée, alors que son guidage est cylindrique. L'essence, amenée sous pression par *c c'*, passe donc par les plats de la tige; mais elle est arrêtée par la soupape conique *s*, placée en dessous du disque lenticulaire. L'air, appelé par le moteur, entre par *P* dans le récipient, et soulève le disque; la soupape *s* s'ouvre donc et débite son carbure, qui est pulvérisé dans le courant d'air; le ressort antagoniste *R* fait retomber la soupape, aussitôt que l'aspiration cesse. L'air comburant est admis par les trous *o* du couvercle du récipient; son afflux est réglable par le chapeau *B*.

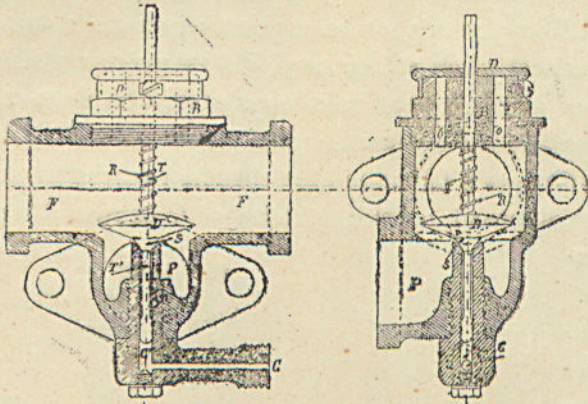


Fig. 15. — Carburateur Gantier-Wehrlé.

Il ne rentre pas dans le cadre de cet ouvrage de décrire les carburateurs employés pour alimenter les moteurs des voitures automobiles; mentionnons toutefois quelques-uns de ces appareils, qui sont susceptibles d'être adaptés aux machines fixes.

Le carburateur Longuemare a été fréquemment appliqué à ce service.

C'est un carburateur à niveau constant; la figure 16 montre une de ses formes les plus répandues. Avant que le flotteur ait atteint la position normale, qu'il doit garder, il repose sur deux leviers dont l'autre extrémité agit sur la soupape d'entrée de l'essence et la maintient levée; mais aussitôt que le flotteur est soulevé par le liquide, le poids de la soupape la fait retomber et l'essence cesse d'affluer. Elle passe, par un tuyau horizontal de communication, dans le carburateur, et elle s'échappe par un ajustage, en forme de champignon; le jet se brise contre un chapeau et se pulvérise; le courant d'air, qui circule autour du pulvérisateur, entraîne le carbure, dont la diffusion est assurée par les chicanes, visibles sur notre dessin.

Le carburateur Mors se compose d'un récipient cylindrique *q* dans lequel l'essence arrive par le conduit vertical *r* et le tuyau *s*, branché sur le réservoir *t*. Le conduit *r* se termine par un large cône *u* strié à l'intérieur.

Le piston du moteur aspire de l'air qui entre par *v*, pénètre dans le cône *u* et y vaporise l'essence qu'il y trouve. L'obturateur *x* limite l'afflux de cet air, et la valve *y* règle d'ailleurs le débit du carburateur.

Notons que le niveau de l'essence dans le cône est toujours maintenu à la hauteur des ouvertures *r'* faites dans le tube *r*, attendu que le niveau dans le réservoir *t* reste aussi toujours à cette hauteur *r'*. Pour obtenir cet effet, le réservoir *t* est alimenté lui-même par un autre réservoir, relié à celui-ci par le conduit *z*, et il renferme un flotteur *t₁*, portant une aiguille *t₂*, qui vient obturer la sortie du pétrole, aussitôt que le niveau monte.

La maison Koerting a donné la préférence à l'alimentation directe. La gazoline descend dans le carburateur en traversant un robinet à pointeau vertical, qui règle son débit : elle suit alors un canal creusé dans l'axe de la tige d'une large soupape et se distribue entre de nombreux conduits rayonnants ménagés dans la soupape. Le liquide s'échappe en formant un cône d'éparpillement. L'air, qui passe entre la soupape et son siège, brise ce cône et pulvérise le liquide dans sa masse : une chicane force le courant à s'infléchir, afin de mieux brasser le mélange avant son entrée au cylindre. La soupape porte à sa partie inférieure sur le prolongement de sa tige, un petit piston de guidage, qui appuie sur un ressort, destiné à empêcher un mouvement vibratoire de la soupape, qui couperait le jet d'air et ferait un bruit désagréable.

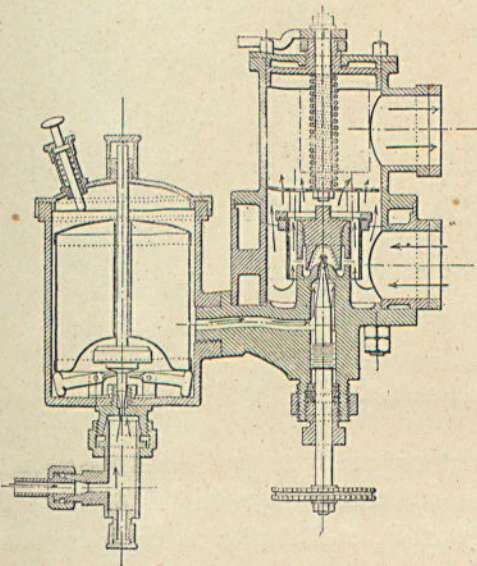


Fig. 46. — Carburateur Longomare.

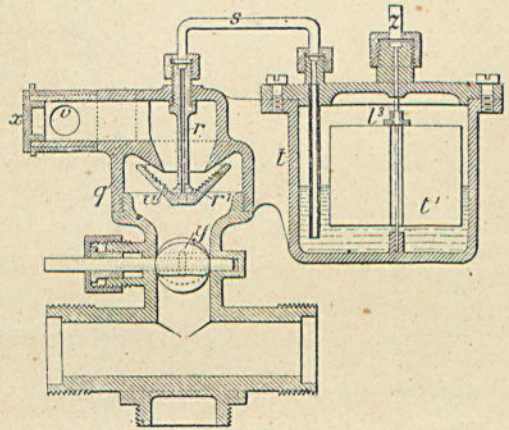


Fig. 47. — Carburateur Mors.

Le carburateur Fessard opère par pulvérisation et vaporisation. Il se compose d'un vase à niveau constant, d'un pulvérisateur à double ajutage et d'un serpentin vaporisateur.

Le niveau est maintenu constant dans le vase par un robinet à flotteur, qui débite le pétrole reçu en charge au fur et à mesure que la consommation tend à faire baisser le niveau. Le pétrole est aspiré dans le pulvérisateur. Cet appareil comporte deux ajutages disposés angulairement, dont on règle la distance par le vissage plus ou moins complet de l'un ou de l'autre dans la boîte constituant le corps du pulvérisateur ; l'ajutage vertical amène le pétrole, l'autre permet l'entrée de l'air puisé dans l'atmosphère et appelé par le jeu même du moteur.

Le vaporisateur est formé d'un serpentin dont les spires sont enroulées sur la cheminée d'allumage du moteur ; il est traversé par le courant d'air et de pétrole pulvérisé. On peut aussi loger ces spires dans la cheminée elle-même et l'on augmente ainsi l'activité de l'appareil.

La constance du niveau dans le vase assure une régularité parfaite de la marche du moteur ; la pulvérisation a pour effet de produire un mélange intime du comburant et du combustible, et de contribuer à une combustion entière et complète. Enfin l'ensemble de cet appareil est très ramassé, peu encombrant et il se place très facilement sur les moteurs.

Appliqué au moteur Pygmée, ce carburateur a donné les meilleurs résultats.

On peut aussi utiliser la capillarité pour élever le liquide dans le carburateur.

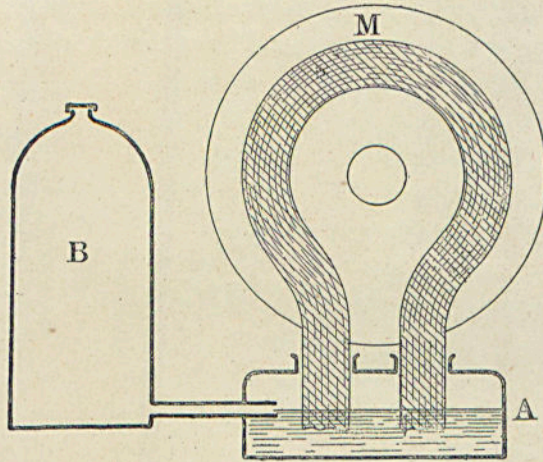


Fig. 48. — Carburateur Southall.

Brayton avait employé, dans son premier moteur, une boîte garnie de filasse, qu'il imbibait de pétrole par une pompe d'injection et à travers laquelle l'air était appelé dans le cylindre. Southall est revenu à ce procédé, et il l'applique de la manière suivante :

Une mèche M, ayant la forme de la figure 18, trempe par ses deux bouts libres dans un godet d'huile A à niveau constant : la constance du niveau est obtenue par une sorte de flacon de Mariotte B, dont le tube d'écoulement débouche dans A, de sorte que l'air ne puisse y rentrer que lorsque l'orifice de ce tube est découvert. La mèche est encastrée dans un canal circulaire, dans lequel est pratiquée une série de trous que l'air doit traverser pour aboutir à la soupape d'admission du cylindre ; cet air entraîne avec lui de fines gouttelettes d'huile, cédées par la mèche. Le mélange carburé passe alors par une chambre à haute température qui complète la gazéification et contribue à assurer l'homogénéité du produit.

Voici encore un carburateur dans lequel on utilise la capillarité ; nous voulons parler du carburateur Pétréano.

Un tube central r est parcouru par les gaz de la décharge, qui élèvent sa température et celle du cylindre V dont il est enveloppé : le tube est garni d'une chemise en tissu d'amiante d , spongieux et perméable, constamment humecté du carbure liquide, lequel est introduit dans le cylindre par un orifice pratiqué à la partie supérieure du

cylindre ; l'air à carburer y pénètre par un second orifice, visible sur la droite de notre dessin.

Quatre entonnoirs, dont deux sont eux-mêmes garnis d'amiante, forment des chicanes dans le cylindre V et obligent le carbure et l'air de se mêler et de se diffuser

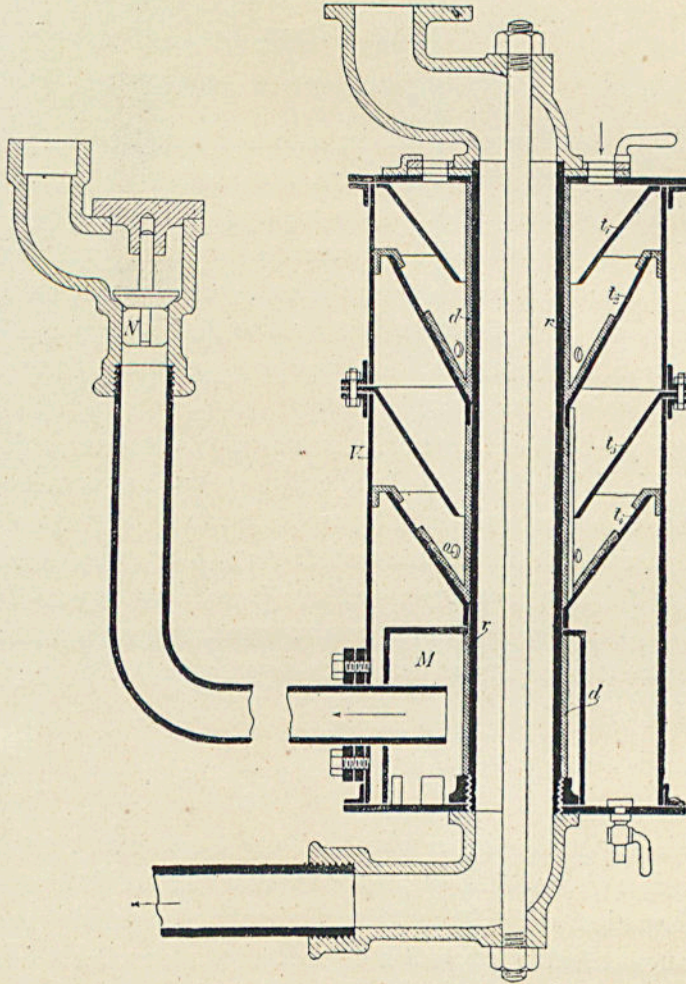


Fig. 49. — Carbureteur Pétréano.

complètement l'un dans l'autre. L'air carburé arrive enfin dans la chambre M et il passe de là au moteur, à travers la valve d'admission N.

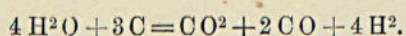
Bien que cet appareil soit chauffé, il se pourrait que des huiles lourdes s'accumulent à la longue au fond du caisson N ; un robinet de vidange permet d'en opérer l'extraction quand c'est devenu nécessaire.

IV

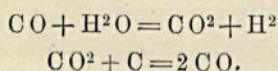
Gaz à l'eau.

Les procédés que nous venons de décrire tendent à remplacer les usines à gaz dans l'alimentation des moteurs, et à produire un gaz combustible moins cher que celui qu'elles fournissent sous la protection du monopole; il est vrai que les tentatives faites jusqu'ici n'ont pas toutes été également heureuses; cependant l'importance des résultats qu'on peut obtenir a soutenu le courage des inventeurs et nous avons à signaler une autre méthode générale de production d'un gaz combustible. Nous voulons parler du procédé qui consiste à décomposer l'eau en ses éléments: le produit de l'opération a reçu le nom de *gaz à l'eau*.

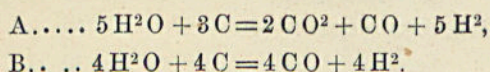
Nous ne ferons pas l'histoire de tous les essais qu'on a poursuivis depuis cinquante ans dans cette voie, à la suite de Kirkhan, qui inaugura les premières recherches: après de nombreux échecs, on a enfin trouvé un mode de fabrication du gaz à l'eau assez pratique pour donner des résultats satisfaisants. L'invention consiste essentiellement à mettre en présence, à une température élevée, de la vapeur d'eau et du carbone: la moitié de l'oxygène de l'eau se combinera au carbone pour former de l'acide carbonique, l'autre moitié donnera de l'oxyde de carbone, et l'hydrogène restera en liberté, suivant la formule:



Le résultat de l'opération est combustible, car il contient 57 0/0 d'hydrogène et 28 0/0 d'oxyde de carbone. Mais on peut faire subir aux gaz obtenus de la sorte une seconde transformation, soit en faisant intervenir une plus grande quantité de vapeur d'eau, soit en augmentant la proportion de carbone; les formules ci-dessous indiquent les réactions qui se produisent dans les deux cas:



Le résultat final peut dès lors être représenté des deux manières suivantes:



Le procédé B est bien préférable au procédé A, car le gaz ne contient plus d'acide carbonique: 36 kilogrammes de vapeur d'eau donnent ainsi, avec 24 kilogrammes de

charbon, 4 kilogrammes d'hydrogène et 56 d'oxyde de carbone, soit un mélange composé de deux volumes égaux d'hydrogène et d'oxyde de carbone, mesurant sous la pression de l'atmosphère et à la température ordinaire environ 89 mètres cubes.

Ces réactions sont endothermiques, et elles exigent une température d'au moins 450°; il faut donc aviser au moyen de maintenir cette haute température. On a proposé de chauffer l'appareil gazéificateur par un foyer extérieur; mais le calorique se transmet difficilement à travers des parois réfractaires et, si l'on emploie des cuves métalliques, on risque de les brûler rapidement. On a donné la préférence à un moyen indirect de chauffage, qui consiste à fractionner l'opération en deux périodes alternantes. Dans la première période, on insuffle de l'air sur le charbon, de manière à produire une combustion intense et une température très élevée; puis on fait arriver le jet de vapeur d'eau, qui se dissocie au contact du coke incandescent et en abaisse la température. On recommence l'insufflation d'air aussitôt que le coke a besoin d'être réchauffé. Bien que l'on sépare les produits du soufflage, les gaz développés à la suite du passage de l'air sont toujours mêlés d'un peu d'azote et d'acide carbonique, qui abaissent leur pouvoir calorifique.

La composition du gaz à l'eau varie beaucoup avec la qualité du combustible employé, coke ou anthracite; mais la température à laquelle s'effectuent les réactions influe plus encore, ainsi qu'il résulte des travaux de M. Bunte. Le tableau ci-dessous fait ressortir ce rôle de la température (1).

Température du gazogène	Composition du gaz en volume			Vapeur d'eau	
	H	CO	CO ₂	dissociée	non dissociée
674°	65,2	4,9	28,9	8,8 %	91,2 %
861°	59,9	18,1	21,9	48,2 —	51,8 —
1125°	50,9	48,5	0,6	99,4 —	0,6 —

Il y a donc un avantage considérable à marcher en allure chaude.

Les mélanges tonnants formés avec le gaz à l'eau ont à peu de chose près le même volume et ils dégagent le même nombre de calories que ceux qu'on produit avec le gaz d'éclairage, étant donné qu'on ne mêle le gaz à l'eau qu'à 2 à 3 volumes d'air au lieu de 6: il en résulte qu'un moteur développe presque le même travail, qu'il soit alimenté par l'un ou l'autre gaz. Mais les mélanges faits avec le gaz à l'eau sont moins facilement inflammables et il y a lieu d'effectuer plus de compression dans le cylindre.

Le pouvoir des gaz à l'eau bien faits est estimé généralement à 2.550 calories, vapeur d'eau non condensée; pour former un mélange tonnant, la proportion en volume de ces gaz et de l'air doit être comprise entre 12 et 65 0/0.

1. Geitel. — « Das Wassergas und Seine Verwendung in der Technik; Berlin, 1899.

Un des meilleurs, quoique des plus anciens modèles de gazogènes à l'eau, est le gazogène américain de Strong, à soufflage intermittent (1).

La figure 20 donne une idée complète de cet appareil ; A est le générateur : on y fait brûler du charbon, de l'anthracite ou même du coke, qu'on charge en morceaux, soit par les portes latérales P, soit par la trémie T. Un courant d'air forcé pénètre en B, sous la grille, alimente le foyer et chasse les gaz produits dans la chambre A' contiguë, remplie de briques réfractaires, où s'effectue leur combustion et où elle s'achève complètement, sous l'influence des courants d'air qui partent de C et se mêlent aux gaz combustibles. La combustion est parfaite quand les gaz s'échappent de la seconde chambre A'' et gagnent la chambre E. Au bout d'un certain temps, toute la

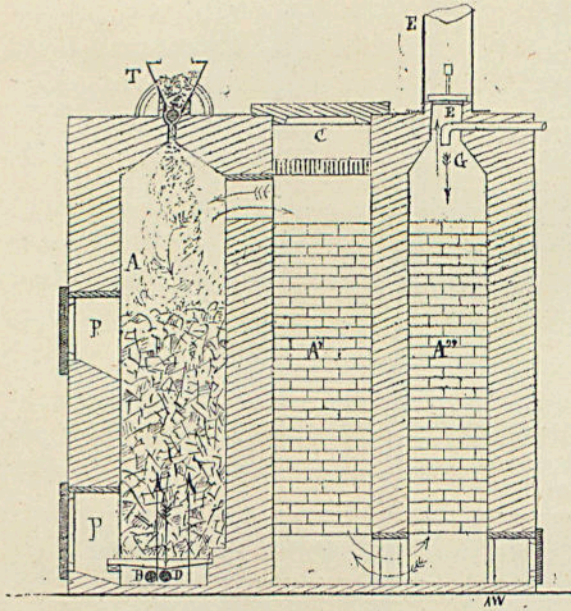


Fig. 20. — Gazogène Strong.

masse de charbon renfermée dans le générateur A est en pleine combustion, au rouge vif, et les briques réfractaires des chambres A' et A'' sont chauffées au blanc. On suspend alors l'introduction de l'air forcé par la grille et par C, et l'on admet de la vapeur d'eau par la prise G. Celle-ci suit maintenant une marche contraire à celle des produits de la combustion : elle se surchauffe au contact des briques, et vient traverser la colonne de combustible incandescent du générateur. Le gaz à l'eau produit est recueilli en D et conduit au gazomètre. La provision de carbone du générateur est maintenue constante par la trémie T, qui distribue du charbon concassé au moyen d'une vis d'Archimède animée d'un mouvement très lent. Au contact de cette masse de charbon incandescent, la vapeur se dissocie et la réaction cherchée se produit instantanément. On fait de nouveau repasser de l'air de B en E dès que l'incandescence du charbon diminue et que la température des chambres A' et A'' s'abaisse au-dessous du rouge blanc. Les flèches pennées de la figure permettent de suivre la marche de la vapeur, les flèches non pennées, celle de l'air.

On produit donc simultanément deux sortes de gaz ; du gaz à l'eau, quand la colonne de charbon est en pleine incandescence, et un gaz pauvre, contenant encore de l'hydrogène et de l'oxyde de carbone, en notable proportion, mais fortement mêlé d'azote, ce qui diminue beaucoup son pouvoir calorifique. Ce gaz convient bien au chauffage ; on lui donne le nom de gaz à l'air ou de gaz Siemens.

1. Voir « Revue industrielle », 5 janvier 1881 et 10 octobre 1883. Le procédé Strong est exploité par la « Yonkers fuel gas company », et il est désigné quelquefois par ce nom de Yonkers.

Voici d'après M. Fischer la composition des deux gaz successifs obtenus, à divers moments de la fabrication.

Gaz à l'eau (1)

	1 ^{re} minute	après 2,5 minutes	après 4 minutes
H	44,8	48,9	51,4
CO	45,2	44,6	40,9
CH ⁴	1,1	0,4	0,2
	91,1	93,9	92,5
CO ²	1,8	3,0	5,6
Az	7,1	3,1	1,9
	8,9	6,1	7,5

Gaz Siemens.

	1 ^{re} minute	après 6 minutes	après 10 minutes
H	2,95	2,20	1,11
CO	23,68	28,44	32,21
CH ⁴	0,44	0,39	0,18
	27,07	31,03	34,50
CO ²	7,04	4,03	1,60
Az	65,89	64,94	63,90
	72,93	68,97	65,50

On fait du gaz à l'eau pendant quatre minutes et du gaz Siemens pendant onze minutes. Le coke employé renferme 84,8 de carbone, 0,5 d'hydrogène, 2,1 d'azote et d'oxygène, 10,6 de cendres et 2,0 d'eau. On produit par kilogramme 1.130 litres de gaz à l'eau et 3.130 de gaz Siemens, soit en tout 4.260 litres de gaz mixte.

Nous extrayons d'un mémoire de M. Moore, la composition moyenne du gaz à l'eau produit par l'appareil Strong :

Hydrogène	53 volumes
Oxyde de carbone	35 —
Carbures	4 —
Gaz inertes (Az et CO ²)	8 —
	100 volumes

La densité moyenne est égale à 0,54; son pouvoir calorifique ne dépasse pas 2.500 calories par mètre cube.

Ce gazogène a été heureusement modifié et perfectionné par M. Goodyear (2), qui a cherché à utiliser la chaleur latente du gaz Siemens produit dans la première phase de l'opération et la chaleur sensible du gaz à l'eau de la seconde phase. A cet effet, la cuve est placée entre deux générateurs A et B construits en matières réfractaires;

1. Ces chiffres sont empruntés à une étude de M. Fischer, sur le travail des gazogènes à Essen; elle a été publiée dans le « Zeitschrift für angewandte Chemie ».

2. G. Richard. — « Les nouveaux moteurs à gaz »; Vve Dunod, Paris, 1891; page 576.

on dirige d'abord dans A le gaz Siemens mêlé d'air et on l'y brûle; le gaz à l'eau traverse ensuite B. Puis on intervertit le sens du mouvement; l'air est admis à la cuve par le régénérateur B, et la vapeur passe par A. L'utilisation des chaleurs des gaz est ainsi parfaite et il en résulte une notable économie; mais ce gazogène est très encombrant et il est muni de nombreuses valves, dont l'établissement est coûteux et la manœuvre compliquée.

Le gaz à l'eau a eu un grand succès en Allemagne; les appareils employés par les ingénieurs allemands ne diffèrent des appareils américains que par quelques modifications de détail, imposées surtout par la nature du combustible mis en œuvre. En Amérique, on se sert d'anhracite, parce qu'on l'y rencontre abondamment et à bas prix: on évite ainsi les escarbilles et les scories, et les cuves ne s'obstruent nullement, attendu que ces charbons durs et secs se tassent régulièrement, sans faire voûte; on peut donc prolonger fort longtemps le passage de la vapeur d'eau. Sur le continent au contraire, on utilise du petit coke, provenant des fours de puddlage et des fours à souder tout autant que des usines à gaz et des fours à coke. Ces cokes donnent de 10 à 25 0/0 de cendres et de scories. On est alors obligé de faire de fréquentes injections d'air; de plus, on se voit forcé de protéger les grilles contre l'action corrosive des mâchefers, en ménageant des portes de nettoyage; enfin, on doit abaisser la température des générateurs en les entourant à la base d'une enveloppe à circulation d'eau: il n'en résulte aucune perte sensible, parce que les gaz produits doivent, en toute hypothèse, être refroidis avant d'arriver au scrubber, mais l'opération est moins simple qu'avec les anhracites durs concassés en gros morceaux.

L'usine que MM. Schultz et Knaut ont établie à Essen a acquis une certaine célébrité: on y opère par le procédé Strong. Il faut 1^k,200 de coke pour produire un mètre cube de gaz à l'eau, possédant un pouvoir de 2.900 calories environ.

Dans tous ces gazogènes, les deux phases de fonctionnement étaient à longue période. La marche d'insufflation en Siemens durait 40 minutes sur une heure de travail, de sorte qu'on ne recueillait du gaz à l'eau que pendant vingt minutes. Le premier gaz était pauvre: il valait 750 calories à 800 au maximum. Le gaz à l'eau avait un pouvoir de 2.800 à 3.200 calories: sa composition moyenne était la suivante:

H.	46	à 54	volumes.
CO	38	à 46	
CO ²	2	à 4	
Carbures divers.	0,1	à 1	
Az	2	à 4	

Ces appareils furent successivement perfectionnés; aujourd'hui on arrive à réduire la marche en soufflage à 15 minutes, la production du gaz à l'eau durant par conséquent 45 minutes; la proportion a donc été renversée. De plus, on réussit à former du gaz à l'eau qui contient 82 0/0 du calorique disponible dans le charbon employé. Le progrès est dès lors considérable.

Parmi les nouveaux gazogènes, celui de M. Strache, assez répandu en Allemagne et en Autriche, mérite une mention spéciale.

Il dérive du type Strong, et on y trouve encore un régénérateur accolé à la cuve : mais la cuve est reliée au régénérateur par deux conduits, dont l'un part de la région moyenne de la charge du combustible tandis que l'autre est situé au niveau supérieur ; une valve permet de faire passer les gaz par l'un ou l'autre conduit. Dans la phase de combustion et de réchauffement, le gaz Siemens formé se dégage par le conduit moyen ; il reçoit le volume d'air nécessaire à sa combustion et porte au rouge blanc les terres réfractaires du régénérateur.

Ce résultat étant obtenu, on introduit un courant de vapeur par l'extrémité du régénérateur et on le fait marcher en sens inverse ; il pénètre dans la cuve par le conduit supérieur, traverse le charbon frais introduit par la trémie et entraîne avec lui les produits distillés vers le bas de la cuve d'où il est évacué vers les appareils d'épuration et le gazomètre. On voit donc que, dans la première période, l'air monte dans la cuve, mais qu'il n'en parcourt que la moitié ; au contraire, dans la phase de production de gaz à l'eau, la vapeur traverse toute la hauteur de la cuve, en allant de haut en bas. La grande surchauffe de la vapeur contribue à améliorer le rendement de ce gazogène, qui donne de bons résultats.

Au nombre des meilleurs appareils et des plus récents il faut compter encore le gazogène Dellwick-Fleischer (1).

Il repose sur un principe nouveau : le combustible est chargé dans la cuve sous petite épaisseur, et il y subit une combustion presque complète ; la pression d'insufflation est considérable et il suffit d'un volume d'air relativement faible et d'un temps très court pour réaliser la première phase de l'opération. Les gaz brûlés s'échappent par la trémie de chargement. Dans la seconde période, on introduit de la vapeur par le haut de la cuve et le gaz sort par le bas. Avec du coke, bien criblé, pris en morceaux de la grosseur du poing, la phase de combustion dure deux minutes et la gazéification huit minutes ; dans ces conditions, avec un gazomètre suffisant, on réalise une fabrication continue. On recueille environ 2.500 litres par kilogramme de coke ; le gaz est bon.

Un essai fait aux mines de Warstein a démontré qu'avec 240 kilogrammes de coke on peut produire 575 mètres cubes de gaz à l'eau, soit 2.400 litres par kilogramme de coke. Le gaz renfermait 51 d'hydrogène, 40,4 d'oxyde de carbone, 3,6 d'anhydride carbonique, 0,5 de protocarbure d'hydrogène et 5 0/0 d'azote et son pouvoir était égal à 2.600 calories. Le rendement atteignait par suite 81 0/0, ce qui est remarquable.

De nouvelles expériences ont été faites récemment en Westphalie, avec du coke à gaz d'Essen contenant 87,6 0/0 de carbone ; on a obtenu 2.560 litres de gaz par kilogramme de coke ; ce gaz renfermait 75 volumes d'hydrogène, 20 d'oxyde de carbone, 3,93 d'azote et 0,88 0/0 d'autres gaz, avait une densité égale à 0,53 et possédait un pouvoir inférieur de 2.800 calories.

Il est vrai qu'il faut tenir compte d'une dépense surnuméraire de coke pour engendrer la vapeur et faire mouvoir les compresseurs d'air.

1. « Fortschritte in der Erzeugung und Verwendung von Wassergas ; Schilling's Journal », 4897.

Ce gazogène est construit en France par la *Société d'exploitation des procédés de production des gaz industriels*, qui a déjà fait plusieurs installations considérables pour l'alimentation des moteurs à gaz, notamment des moteurs Letombe. Elle emploie souvent un mélange de 35 volumes de gaz à l'eau avec 65 volumes de gaz d'éclairage. Cette idée a été lancée par M. Paterson, à la suite d'essais qu'il a faits à l'usine de Birkenhead, avec du gaz à l'eau carburé ou mélangé de gaz de ville. Il a fait connaître les résultats qu'il a obtenus avec un moteur Crossley de 10 chevaux : nous les empruntons à Bryan Donkin (1).

Gaz	Pouvoir calorifique inférieur	Travail effectif	Gaz consommé par cheval-heure effectif	Rendement thermique
Gaz à l'eau pur	2460 col.	10, 24 chev.	1248 litres	21, 4 %
Gaz à l'eau carburé	5058 —	11, 16 —	781 —	16, 3 --
Gaz à l'eau additionné de son volume de gaz d'éclairage	5506 —	10 60 —	705 —	16, 7 —

Il est à noter que le gaz à l'eau pur donnait encore le meilleur rendement.

Une objection a été faite à l'emploi du gaz à l'eau, c'est sa toxicité, due à la présence d'une notable quantité de gaz oxyde de carbone. Or, M. Longsdon (2) a réussi à obtenir un produit presque exempt de ce gaz en ajoutant au charbon, avant de le porter au rouge dans les cornues à réaction, une certaine quantité de sel de soude : on réussit de plus ainsi à abaisser la température de la réaction.

L'analyse du gaz traité de la sorte a donné la composition suivante :

CO ²	26, 4 volumes
CO	1, 2 —
H	62, 2 —
C H ⁴	2, 2 —
Az	6, 5 —
O.	1, 5 --
	100, 0 volumes

C'est encore un gaz riche, mais il renferme une forte proportion d'acide carbonique : on pourrait au besoin s'en débarrasser en l'absorbant par une lessive alcaline, ou mieux encore par du coke imprégné de carbonate de soude, lequel se transformera en bi-carbonate. Pour revivifier l'absorbant, on n'aurait qu'à le chauffer. La chaux vive donnerait le même résultat à moins de frais encore.

En Allemagne, on aromatise souvent le gaz par du mercaptan, ce qui paraît inutile, car les goudrons et les produits sulfureux renfermés dans les gaz leur donnent géné-

1. Bryan Donkin. — « A Text Book » 2^e édition, page 165.

2. *Revue industrielle*, 17 décembre 1892.

ralement une odeur assez forte pour déceler les fuites qui pourraient se produire dans les canalisations.

Toutefois quelques municipalités ont subordonné les autorisations demandées pour des gazogènes à l'obligation de rendre les gaz très odorants; il a été facile de les satisfaire.

V

Les Alcools.

La crise que traverse depuis quelques années l'industrie de la distillerie a forcé les intéressés à chercher de nouveaux moyens d'utiliser l'alcool, et l'idée est venue à des chimistes, à des économistes, voire même à des hommes d'Etat, d'appliquer l'excédent de production à l'alimentation des moteurs; on trouverait ainsi un grand débouché à un produit national et notre pays serait déchargé de la lourde redevance qu'il paie aux régions pétrolifères. Ces patriotiques espérances ne reposaient d'abord que sur des idées théoriques, émises par des savants plus versés assurément dans l'étude des combinaisons moléculaires que dans celle des cycles; elles avaient besoin d'être confirmées par l'expérience.

C'est M. Ringelmann qui a fourni aux constructeurs français les premiers documents sur la question; dès 1893 la Société d'Agriculture de Meaux avait mis un crédit spécial à sa disposition en vue de comparer les résultats obtenus par l'alcool dénaturé avec ceux que donne la gazoline. Les liquides sur lesquels porta cette étude, avaient la composition suivante, déterminée par les analyses de M. Müntz.

	Gazoline	Alcool
Carbone	84,3	41,5
Hydrogène	15,7	13,0
Oxygène	0	45,5
Densité à 15°	0,708	0,834
Point d'ébullition (pression de 767 ^{m/m} ,5) . . .	88°	78,5

Sur ces bases on a pu calculer les données ci-dessous.

	Gazoline	Alcool
Pouvoir calorifique par kilogramme .	11359,5 calories	6521,75
Mètres cubes d'air nécessaires à la combustion	11,782	5,698
Quantités relatives de gazoline et d'alcool nécessaires par cylindrée (en poids) .	100	207
Quantités de chaleur correspondantes .	100	119

Ces deux produits ont été l'objet d'études fort diverses.

M. Ringelmann a jugé utile de déterminer expérimentalement les quantités d'essence et d'alcool évaporées par heure et par décimètre carré de surface dans différentes conditions, c'était une manière indirecte de déterminer leurs chaleurs de vaporisation relatives. Sous un hall, à une température de 18°, les liquides ayant des températures de 15°,2 et 15°,6, il s'est volatilisé 9^{gr},37 d'essence et seulement 3^{gr},47 d'alcool ; à l'air libre, à l'ombre, par une température d'environ 11°,5, il s'est évaporé 35,06 de gazoline contre 16,66 d'alcool. La gazéification de l'alcool est donc beaucoup plus difficile que celle de la gazoline et il importe de tenir compte de cet élément pour l'établissement des carburateurs.

Il s'agissait alors de faire la preuve de la possibilité d'alimenter des moteurs par l'alcool.

Les essais ont porté sur deux moteurs, l'un à quatre temps, du modèle Brouhot, l'autre à deux temps, du type Benz, disposés tous deux pour marcher avec un carburateur.

Le premier moteur, à soupapes automatiques et allumage électrique, ne put être mis en route avec de l'alcool et il fallut fonctionner d'abord avec de la gazoline, pour le chauffer ; cela prouvait que la tension de vapeur de l'alcool est trop faible pour qu'il puisse se former un bon mélange tonnant à basse température. D'autre part, comme il faut plus du double d'alcool par cylindrée que de gazoline, on éprouvait de grandes difficultés pour substituer l'alcool à l'essence, en marche, car il fallait modifier tout d'un coup la composition de la charge et former aussitôt un bon mélange. On y parvint cependant après quelques tâtonnements et le fonctionnement à l'alcool fut satisfaisant.

Ce moteur donna lieu aux observations suivantes :

	Consommations par cheval-heure effectif	
	Gazoline	Alcool
A vide	1040 grammes	2267 grammes
A demi-charge.	950 —	1767 —
A pleine-charge	892 —	1396 —

Cette consommation de gazoline était un peu forte, et elle aurait dû pouvoir être diminuée ; mais il est probable que le moteur fonctionnait néanmoins dans des conditions normales, de telle sorte que les résultats comparatifs obtenus ne perdaient rien de leur valeur. Ils établissaient qu'il fallait environ une fois et demie à deux fois plus d'alcool en poids que de gazoline pour obtenir le même travail industriel.

Pour faire fonctionner le second moteur, du type Benz, M. Ringelmann se décida à chauffer le carburateur à une température de 42° à 47°, qui lui parut la plus favorable à une bonne marche : on obtenait aisément ce résultat en utilisant la chaleur des gaz de la décharge, mais il fallait, pour l'alcool, recourir d'abord à une source de chaleur extérieure, sinon l'on n'eut pas réussi à mettre en route.

Ce moteur consomma beaucoup moins que le premier : la dépense à vide fut même

très remarquée ; elle était de 328 grammes de gazoline et de 771 grammes d'alcool. En travail, on releva les consommations ci-dessous :

	Consommations par cheval-heure effectif	
	Gazoline	Alcool
A demi-charge	619 grammes	1097 grammes
A pleine charge.	407 —	763 —

Le résultat relatif était le même que ci-dessus ; il fallait en moyenne 1,9 fois plus d'alcool en poids que de gazoline (1).

Le prix de revient pour l'alimentation des moteurs s'établissait dès lors comme il suit, en estimant le litre d'alcool *dénaturé* à 1 franc alors que le litre de gazoline n'atteignait pas 50 centimes et que le pétrole coûtait 30 francs les 100 kilogrammes. C'étaient les prix en 1894.

	Gazoline	Alcool	Pétrole ^m
Consommation par cheval- heure effectif	400 gr.	756	400
{ en poids.			
{ en volume	0,565	0,906	0,500
Prix du cheval-heure effectif	0 fr.28	0 fr.90	0 fr.12

D'après ces expériences, le cheval-heure développé par l'alcool coûtait donc à cette époque 3,22 fois plus cher que par la gazoline et 7,5 fois plus cher que par le pétrole lampant ; il eût fallu le vendre moins de 15 francs l'hectolitre pour qu'il pût entrer en ligne de comparaison ; aussi M. Ringelmann a-t-il conclu alors que c'était encore un rêve de songer à l'utilisation économique de l'alcool par les moteurs.

Ce jugement a été réformé depuis lors, du moins dans une certaine mesure : l'alcool dénaturé a baissé de prix, et on a su mieux l'employer.

Les ingénieurs allemands nous ont devancés dans cette voie féconde.

Les premiers essais pratiques ont été entrepris en 1894 par la maison Grob de Leipzig ; elle exposa un moteur à alcool au concours agricole de Berlin de la même année, qui marchait bien ; mais il consommait 839 grammes d'alcool par cheval-heure effectif, ce qui était énorme et justifiait les conclusions de M. Ringelmann.

L'Etat prussien ayant alloué un subside considérable à l'Association des distillateurs d'alcool en vue de favoriser les essais des moteurs, on fonda une station d'expériences, et l'on fit appel au concours de tous ; de nombreux constructeurs se mirent à l'œuvre et envoyèrent des moteurs à la station. Divers progrès de détail améliorèrent bientôt le rendement et abaissèrent la dépense.

Sous la direction de M. Slaby, M. Pétréano créa un vaporisateur-diffuseur, qui donna de bons résultats. Cet habile ingénieur mit en lumière la nécessité d'une diffusion parfaite et d'une rigoureuse homogénéité du mélange.

1. Cette proportion n'est plus exacte aujourd'hui, à la suite des remarquables progrès réalisés dans l'emploi de l'alcool ; mais nous avons cru nécessaire de rappeler ces constatations du début et de faire ressortir l'importance des premières études de M. Ringelmann.

Ses essais ont porté sur un moteur Otto, modèle 1884, de 270 millimètres de diamètre et 0^m,400 de course, pouvant développer 5 chevaux environ par 180 tours.

Voici les résultats obtenus dans ces expériences :

Titre de l'alcool employé	90,2 0/0
Sa densité à 15° centigrades	0,815
Pouvoir calorifique estimé au kilog.	5412 calories
Travail indiqué en chevaux	4,945
Consommation par cheval-heure indiqué	0 ^k ,540

Le rendement thermique indiqué ressortait déjà à 21,7 0/0, ce qui constituait un fort beau résultat.

Des résultats meilleurs encore furent obtenus par M. Haack (1), en 1897, avec un moteur Kœrting : un moteur à gazoline d'une puissance nominale de 6 chevaux, transformé pour employer de l'alcool, développa près de 10 chevaux en consommant 390 grammes d'alcool à 93° par cheval-heure effectif. Cette machine détint longtemps le record de l'alcool.

En février, 1899, M. Göslich démontrait l'avantage pratique qu'il y avait à dénaturer l'alcool par le benzol.

En 1900, la *Gasmotoren Fabrik* de Deutz, la *Daimler Motorengesellschaft* de Cannstadt, les maisons Kœrting de Hanovre, Moritz Hille de Dresde, etc., construisaient et vendaient de bons moteurs à alcool et le succès des nouvelles machines s'affirmait décidément.

Néanmoins, à l'Exposition de Paris de 1900, la maison Kœrting fut seule à exposer un moteur à alcool, qui se voyait à l'annexe de Vincennes et ne provoqua pas une attention suffisante ; sur ce terrain encore, comme sur d'autres, cette exposition si brillante présentait une grave lacune pour l'industrie des moteurs à explosion.

L'utilisation industrielle de l'alcool pour la production de l'énergie motrice était cependant déjà un fait acquis. Le concours agricole de Halle, en Saxe, en témoigna péremptoirement. Aux constructeurs nommés ci-dessus se joignirent les ateliers Swiderski, Dürr, Baldwin, la Société de Marienfeld, celle d'Oberursel, et d'autres encore.

L'Allemagne avait donc pris une avance considérable sur les autres pays : c'est qu'elle produit à bas prix un alcool de pommes de terre qui convient très bien à l'emploi industriel ; d'autre part, les frais de dénaturation y étaient réduits au minimum, de telle sorte que l'hectolitre d'alcool pour moteurs se payait 20 marks, soit 25 francs au plus. En France, l'alcool dénaturé coûtait encore 45 francs, en 1901.

Malgré cette énorme différence de prix, il se manifesta chez nous un mouvement sérieux en faveur de l'alcool au Concours agricole de Paris, de 1901. Mais ce mouvement se dessina plus largement au Concours général de novembre, organisé par le ministère de l'Agriculture ; 26 moteurs, dont un de 24 chevaux et un autre de 25 chevaux se mirent sur les rangs pour se disputer les récompenses officielles. MM. Fritscher et Houdry, Japy frères et Brouhot, reçurent des médailles d'or ; on distribua, en

1. Oelkers. — « Die Entwicklung der Spiritus-Motoren » ; Berlin, 1901.

outre, un certain nombre de médailles d'argent grand module à MM. Merlin, la Compagnie française de moteurs Otto, Pruvost, la Société Panhard et Levassor, la Compagnie Duplex, la Société des fonderies de Lyon ; nous renonçons à nommer les lauréats des médailles d'argent ordinaires et de bronze.

Le 24 mai, 1902, s'ouvrait à Paris un deuxième concours international, auquel prirent part 42 moteurs ; les médailles d'or échurent à MM. Brouhot, la Compagnie Duplex, l'Aster, MM. Pruvost, Beaupré, et Bardon. On remarqua à ce Concours la consommation extrêmement réduite et absolument inattendue de 233 grammes d'alcool carburé à 50 0/0 et de 340 grammes d'alcool pur du moteur Brouhot de 16 chevaux ; cette dépense correspond à un rendement thermique effectif de 30,24 0/0 et de 33,90, le plus beau qui ait jamais été relevé sur un moteur thermique quelconque. L'alcool se révélait donc à ce concours comme éminemment propre à la production de la force motrice.

Berlin a eu aussi son Exposition de l'alcool en 1902, avec un égal succès, et un concours de locomobiles à alcool a été organisé à Mannheim : le moteur de 14 chevaux, de Marienfeld, a consommé 347 grammes, et un moteur de Deutz, de 12 chevaux, 365 grammes d'alcool à 86 0/0 par cheval-heure effectif (1).

Le problème de l'emploi de l'alcool par les moteurs paraît donc avoir trouvé dès maintenant sa solution technique ; il reste à découvrir la solution financière laquelle est surtout d'ordre fiscal.

Un alcool destiné à alimenter des moteurs doit subir le minimum de droits et de taxes ; il doit être vendu presque à son prix de revient ; il importe, d'autre part, que son prix ne soit pas exposé à des fluctuations de cours incessantes, produites par la spéculation. Pour cela, il faut d'abord qu'il soit *dénaturé*, c'est-à-dire rendu impropre à la consommation de bouche et qu'il ne puisse être débarrassé des liquides de mauvais goût dont on l'a chargé. Le programme de la dénaturation est très délicat.

En France, la dénaturation qui garantit le trésor contre la fraude, consiste dans l'addition à un hectolitre d'alcool concentré à 90 ou 95 degrés, de 10 litres de Méthylène, et de 0 lit. 500 de Benzine dite *Benzine-Régie*.

Le Méthylène est extrait des produits qui distillent, quand on chauffe le bois en vases clos pour le transformer en charbon ; c'est un mélange d'*alcool Méthylique* (bouillant à 66 degrés) avec 20 0/0 d'acétone (bouillant à 56 degrés). On donne quelquefois aussi à ce produit le nom d'*Esprit de bois* ; il est fourni à la régie par les industriels forestiers qui ont grand intérêt à conserver ce client.

La *Benzine-Régie*, n'est pas ce que les chimistes appellent Benzine ou Benzol

1. E. Meyer ; Die Hauptprüfung von Spirituslokomobilen, 1902 ; ce travail du savant professeur est plein de renseignements intéressants. Voici son tableau comparé des prix de revient des moteurs à alcool, à benzine (gazoline) et à pétrole lampant.

	Alcool.	Benzine.	Pétrole.
Consommation par cheval-heure effectif .	365 gr.	297 gr.	330 gr.
Prix en pfennig	7,45	7,40	7,30

(bouillant à 81 degrés), mais bien un mélange de corps homologues, *Toluène*, *Cymène*, etc. (1).

La *Benzine* au moyen de laquelle on *carbure* l'alcool pour lui donner une plus grande puissance éclairante, calorifique ou motrice, est au contraire de la vraie benzine ; elle est extraite des goudrons de la distillation de la houille. Elle est plus pure que la benzine-régie et se dissout en toutes proportions dans l'alcool absolu.

On définit sa qualité par le nombre de volumes pour 100 qui distillent à 100° ; il passe généralement 94,5 volumes, le reste se vaporisant entre 100° et 112°, d'après les essais de M. Sorel.

L'alcool n'est jamais carburé avec les produits du pétrole, qui ne peuvent se dissoudre dans l'alcool.

Le dénaturant allemand se compose le plus souvent de quatre parties en volume de méthylène et d'une partie de bases pyridiques ; il n'est pas cher et répond bien au but recherché.

On dénature aussi au benzol, par une addition de 5 0/0 ; ce procédé est moins coûteux encore, mais il est moins sûr pour le fisc.

Les Suisses ont adopté l'éthylméthylacétone, qui est le meilleur dénaturant actuellement connu.

Le fisc français colorait autrefois l'alcool dénaturé par du vert malachite, qui avait l'inconvénient de laisser un résidu fixe après sa combustion ; on l'a supprimé à la suite du concours d'automobiles de Paris-Rouen de 1900. L'hectolitre était d'abord frappé d'un droit dit d'analyse, qui grevait fortement le prix du produit ; antérieurement à la loi du 16 décembre 1897, l'hectolitre était taxé à 37 fr. 50. Ce droit était prohibitif pour les moteurs ; il a été abaissé d'abord à 3 francs, puis finalement il a été réduit à 0 fr. 25 pour droits de statistique et 0 fr. 80 pour frais d'analyse. Mais l'addition du méthylène, dont le prix a augmenté par l'excès de demande, maintient encore trop haut le prix de la dénaturation ; on estime aujourd'hui que l'alcool dénaturé coûte en somme 2 fr. 75 de plus par hectolitre que l'alcool à 90° compté à son prix de revient ; son prix varie donc suivant le cours du jour (2). En Allemagne, où l'alcool pour moteurs est tiré de la pomme de terre et non de la betterave, le prix est plus stable. On conclut maintenant encore de gros marchés à des prix voisins de 25 francs, tous droits et frais de transport compris (3).

On appelle alcool dénaturé *pur* celui qui n'a été additionné que du dénaturant légal ; il est pris à 90°. Mais on y dissout fréquemment 20 ou 50 0/0 de benzine de houille ; on obtient ainsi l'alcool carburé à 80 ou 50. Le moto Schnick et l'alcool carburé Lepêtre (de Montrouge) jouissent d'une réputation justement méritée.

L'alcool pur a une densité de 0,832 à 15° centigrades ; l'alcool carburé à 50 0/0 a une densité un peu plus grande égale à 0,840.

1. En Allemagne, on appelle *benzol* la benzine de gaz et *benzin* l'essence de pétrole.

2. L'alcool à 90° valait à Paris 46 fr. 90, en août 1889 ; il est tombé à 23 fr. le 28 février 1902 ; mais il a remonté depuis lors et sa cote en bourse était de 42 fr. environ sur la fin de l'année 1902, et de 48 fr. 25 en mars 1903. Voilà donc l'alcool dénaturé à 50 francs.

3. En Allemagne, sur 3.845,569 hectos produits, 3.406,734 provenaient des pommes de terre, en 1899.

M. Sorel a déterminé la composition élémentaire des alcools Leprêtre, employés aux concours de 1901 et 1902 :

	Composition par kilogramme	
	Alcool dénaturé pur	Alcool dénaturé carburé à 50 0/0
C	0,4372	0,6718
H	0,1112	0,1119
O	0,3029	0,1502
Eau	0,1408	0,0698
	<hr/> 0,9921	<hr/> 1,0037

Pouvoir calorifique supérieur :

Calculé 5521 cal.	7903
Observé 5906	7878

Le rapport de ces deux pouvoirs est égal à 0,749.

La consommation des deux alcools dans les moteurs varie à peu près dans le rapport 0,7, c'est-à-dire qu'il faut 7 litres d'alcool carburé à 50 0/0 pour 10 litres d'alcool pur.

J'ai fait de nombreuses déterminations du pouvoir des divers alcools Leprêtre, au calorimètre, et j'estime que les chiffres suivants sont des moyennes que l'on peut adopter pour le calcul des rendements.

	Pouvoirs	
	supérieurs	inférieurs
Alcool pur marquant 93°	5820	5124 (1)
Alcool carburé à 80 0/0 d'alcool	6451	5767
— — à 50 0/0 —	7869	7215

L'expérience a montré que le rendement thermique des moteurs alimentés d'alcool à 50 était meilleur qu'avec de l'alcool pur ; ainsi au concours international de 1902, le remarquable moteur Brouhot donnait un rendement thermique effectif plus élevé avec de l'alcool Leprêtre à 50 qu'avec l'alcool pur (2). Mais des essais de M. Behrend, professeur à l'Institut technologique de Hohenheim, semblent démontrer que c'est l'alcool additionné de 18 0/0 de benzine qui donnerait les meilleurs résultats (3). Cet expérimentateur a opéré sur un moteur Kœrting de 6 chevaux dont il déterminait la consommation par cheval-heure effectif.

Il a employé dans ces essais les liquides suivants :

1° Alcool dénaturé par les procédés allemands ordinaires (bases pyridiques et alcool méthylique) ;

1. M. Vautier estime à 5,444 calories le pouvoir inférieur d'un alcool pur français renfermant 664 grammes d'alcool éthylique, 55 de méthylène, 28 d'acétone et 83 d'eau, le mélange possédant une densité égale à 0,83. Ce chiffre est donc d'accord avec le nôtre.

2. Witz. — Le triomphe de l'alcool moteur ; *Locomotion Automobile*, 18 juin, 1902.

3. M. Grandeaun a résumé ce travail dans le *Journal d'agriculture pratique*, 1901. Voir aussi *Locomotion Automobile*, 8 août, 1901.

2° Alcool additionné de benzine en quantité égale à la moitié de celle du dénaturant ordinaire ;

3° Ce même mélange additionné en outre de 18 0/0 de benzine.

Voici les résultats, par heure et par cheval constatés expérimentalement dans l'emploi des trois combustibles :

	Volume brut
1° Alcool à 88.6 0/0 (en poids), dénaturé par le procédé ordinaire	0 l., 595
2° Alcool à 91.0 0/0 (en poids), dénaturé avec le mélange (bases pyridiques, alcool et benzine)	0 l., 585
3° Le même mélange que le n° 2, plus une addition de de 18 0/0 de benzine	0 l., 519

La consommation de combustible serait donc réduite au minimum, par l'emploi du mélange additionné de 18 0/0 de benzine.

L'écart entre la consommation de l'alcool dénaturé par le procédé ordinaire et de l'alcool dénaturé par la benzine n'est pas très considérable, mais il est cependant appréciable.

Le coût de l'alcool additionné de 18 0/0 de benzine ne diffère pas sensiblement du précédent, le prix de la benzine étant égal à celui de l'alcool dénaturé.

La dépense de combustible, par heure et par cheval, s'établit comme suit :

1° Avec l'alcool dénaturé par le procédé allemand ordinaire	0, 149 fr.
2° Avec l'alcool dénaturé avec la benzine	0, 146
3° Même alcool avec une addition de 18 0/0 de benzine	0, 130

L'enrichissement de l'alcool est donc une opération fructueuse (1) puisqu'il améliore le rendement thermique et abaisse le prix de revient du cheval-heure effectif.

Que l'alcool soit pur ou carburé, il donne aujourd'hui des résultats inespérés, au point de vue de l'utilisation du calorique ; nous avons signalé ci-dessus le rendement extraordinaire relevé officiellement sur le moteur Brouhot du concours international de 1902 ; les alcoolistes les plus convaincus ne s'attendaient pas à ce triomphe. Cet admirable résultat est dû à des causes multiples et diverses que nous allons examiner et discuter ; il est produit évidemment par un ensemble de dispositions, que tout le monde ne sait pas réaliser ; la preuve nous en est fournie par les résultats des concours de 1901 et 1902, dans lesquels on a vu les consommations varier entre 340 grammes et 788 grammes d'alcool pur par cheval-heure effectif, d'un moteur à l'autre.

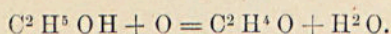
La composition du mélange tonnant est certainement le principal facteur du succès. L'alcool doit être vaporisé complètement ; sa vapeur doit être diluée dans l'air de manière à former un gaz tonnant parfaitement homogène ; le mélange doit enfin ren-

1. Citons ici pour mémoire des essais qui ont été faits pour carburer l'alcool par l'acétylène ; mais la faible solubilité de ce gaz dans l'alcool ne permet pas d'espérer des résultats satisfaisants.

fermer une quantité d'oxygène suffisante pour assurer *pratiquement* une combustion complète.

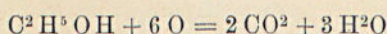
La quantité requise se calcule sans peine. En effet, l'alcool a pour formule C^2H^5OH ; sa combustion peut avoir lieu de deux façons.

1° Avec l'oxygène strictement nécessaire pour une première combustion :



Il y a donc formation d'aldéhyde ; la combustion est incomplète, puisque les produits sont encore oxydables ; l'aldéhyde donne ultérieurement de l'acide acétique et de l'éther acétique.

2° Avec l'oxygène requis pour parachever la combustion de tous les produits :



Dans ce cas, les gaz sont entièrement brûlés ; ils ne renferment plus que de l'anhydride carbonique et de la vapeur d'eau.

C'est le terme vers lequel il faut tendre : et d'abord on recueille alors tout le calorique disponible ; de plus, on évite la formation pernicieuse de l'acide acétique qui corrode les organes du moteur (¹).

On calcule sur ces bases la quantité d'air nécessaire ; il faut environ 8 kilogrammes d'air par kilogramme d'alcool dénaturé pur, soit près de 6 mètres cubes d'air ; c'est le minimum obligatoire qu'il faut toujours dépasser. J'estime qu'il est prudent de fournir au moins une fois et demie ce volume d'air, soit 9 à 10 mètres cubes par kilogramme (²). L'alcool carburé à 50 0/0 exige théoriquement 8 mètres cubes d'air, donc 12 mètres cubes en pratique.

Il est essentiel que le mélange arrive chaud au cylindre, de façon à éviter absolument toute condensation d'alcool ou d'eau dans les tuyaux qui relie le carburateur au cylindre ou dans le cylindre même. Une température de 100° est largement suffisante ; il y aurait inconvénient à la dépasser, nous verrons pourquoi, quand nous traiterons la question de l'utilisation dans le moteur.

Il convient de prendre les mesures les plus efficaces pour éviter la formation de gouttelettes liquides, pouvant adhérer sur les parois métalliques et y subir des décompositions pyrogénées : il s'y dépose alors des carbures ou du coke, pouvant produire des adhérences des soupapes sur leur siège, ainsi qu'on le constate quelquefois dans des moteurs mal réglés ou pourvus de carburateurs défectueux.

Le brassage énergique des gaz et des vapeurs peut seul assurer l'homogénéité du mélange tonnant : l'air pur ajouté à l'air carburé doit donc être parfaitement diffusé dans sa masse, à la traversée de la soupape d'admission.

La présence de la vapeur d'eau dans le mélange joue un rôle utile dans le fonction-

1. Cette corrosion se manifeste par la poussière de rouille qui adhère aux soupapes et revêt les fonds de culasse des moteurs : la présence de l'acide acétique est caractéristique de la fabrication d'un mauvais mélange tonnant.

2. Dans sa remarquable *Note sur les phénomènes de combustion dans les moteurs fixes à alcool*, M. Sorel établit qu'à mesure qu'on se rapproche de la quantité d'air théorique nécessaire à la combustion complète, l'utilisation devient de plus en plus mauvaise.

nement des moteurs ; les expériences de M. Göslich, Elkers, etc., ont en effet démontré qu'avec de l'alcool à 86°, renfermant donc 14 0/0 d'eau, le rendement thermique était meilleur qu'avec l'alcool à 93° en même temps que les grippages devenaient plus rares et que la lubrification s'opérait mieux. On rattachera aux mêmes causes l'avantage constaté dans l'emploi de l'alcool carburé à 80 0/0 d'alcool, que les allemands emploient de préférence.

Les hautes compressions, si efficaces dans les moteurs à gaz, ne le sont pas moins dans les moteurs à alcool ; l'alcool s'y prête mieux que la gazoline, et ce fait contribue à ses succès ; on peut en effet comprimer sans difficulté à 8 ou à 10 kilogrammes.

Dans un moteur bien réglé, alimenté dans de bonnes conditions, la pression explosive est 3 à 4 fois plus grande que la pression sur la fin de la compression ; la courbe s'élève presque parallèlement à l'axe des pressions, dessine un léger arrondi et retombe régulièrement jusqu'à la fin de la course motrice, donnant une pression moyenne légèrement supérieure à celle du diagramme à essence de pétrole, ce qui explique l'accroissement de puissance constaté fréquemment. L'introduction d'un mélange à une température trop élevée présenterait le double inconvénient de réduire la masse du mélange introduit, de faire baisser la pression moyenne et de ne pas permettre une compression préalable aussi forte, sans s'exposer à des allumages prématurés.

Les grandes vitesses sont favorables dans les moteurs à alcool, par atténuation de l'action de paroi ; mais je ne vois pas pourquoi les longues courses, qui ont été préconisées, auraient de l'influence sur le rendement, du moment que la vitesse linéaire du piston est suffisante.

Il est à noter, du reste, que l'action de paroi est plus malfaisante dans les moteurs à alcool ; les mises en route dans des cylindres froids sont marquées par des combustions incomplètes qui souillent les soupapes.

Les considérations qui précèdent font ressortir à l'évidence l'importance prédominante de la bonne fabrication du mélange tonnant dans les moteurs à alcool ; le carburateur est l'organe essentiel de ces moteurs, et nous n'hésitons pas à dire que tant vaut le carburateur, tant vaut le moteur. Nous croyons donc devoir insister spécialement sur la construction des appareils de carburation.

Ils remplissent une triple fonction : 1° ils diffusent ou pulvérisent l'alcool dans l'air ; 2° ils le vaporisent ; 3° ils brassent le mélange. La pulvérisation est effectuée par l'aspiration du moteur ; elle suppose une grande vitesse de la veine gazeuse qui broie la goutte d'alcool ; on ne saurait méconnaître qu'elle s'opère plus énergiquement quand le piston est au milieu de sa course et animé de sa plus grande vitesse (1). Elle est donc variable ; mais la vaporisation vient y suppléer. Le réchauffage du carburateur est indispensable ; étant donnée la chaleur latente de vaporisation de l'alcool, qui tend à faire baisser la température du carburateur, il faut lui fournir du calori-

1. Cette remarque judicieuse a été faite par M. Mulhoux ; voir le n° du 7 août 1902, de la *Locomotion Automobile*.

que en quantité suffisante ; cette quantité est plus grande pour l'alcool que pour la gazoline et les autres essences de pétrole : en effet la chaleur latente de l'alcool est de 213 calories par kilogramme et celle de l'eau est de 537 calories, à la température de 100° (1). Le réchauffement peut être obtenu par conductibilité ou par mélange d'air chaud. On utilise généralement les chaleurs perdues du moteur. Le dosage du mélange s'obtient par un jeu de valve réglant l'afflux de l'air, ou bien par un appareil de dosage volumétrique. Le nombre de ces éléments permet un nombre infini de combinaisons : il y a donc une très grande variété de carburateurs.

Nous décrirons quelques carburateurs, choisis parmi ceux qui sont les plus répandus.

Un certain nombre d'appareils utilisent l'évaporation par surface, soit que l'air barbote dans le liquide, soit que le liquide imprègne par capillarité des tissus absorbants, revêtant la paroi du carburateur. Tel est le carburateur Pétréano, que nous avons déjà décrit (2). Tel est encore le carburateur Delahaye, dans lequel l'air arrive par un tuyau central débouchant au fond d'un réservoir renfermant le liquide ; le liquide qui pourrait être entraîné est arrêté par des foiles métalliques superposées, qui tamisent l'air et contribuent à l'homogénéité du mélange. La Société Duplex fait couler l'alcool sur un plan incliné chauffé ; la vapeur ainsi formée est entraînée par le courant d'air. On chauffe l'appareil par la lampe d'allumage du moteur.

Mais on procède plus habituellement par pulvérisation et vaporisation ; on règle en effet plus facilement ce genre d'instruments.

Le carburateur Martha est un des premiers qui ait été appliqué à l'alcool ; il se compose d'un cylindre horizontal en fonte dont l'axe est traversé par le tuyau d'échappement du moteur, ce dernier étant garni d'ailettes hélicoïdales ; la chambre à ailettes reçoit l'alcool pulvérisé. Le pulvérisateur est alimenté par un réservoir latéral à niveau constant qui amène le liquide à un ajutage nickelé débitant l'alcool sur un cône à gradins surmonté d'un champignon contre lequel se brise le jet ; le courant d'air aspiré par le moteur entraîne avec lui la poussière d'alcool. La trajectoire hélicoïdale que le courant d'air est astreint à parcourir opère un mélange suffisant du combustible et du comburant. Cet appareil avait le défaut d'être privé de réglage.

La maison Longuemare a adapté son carburateur (3) à l'alcool en facilitant la graduation de la quantité des gaz de décharge nécessaire au réchauffage ; de plus, pour les mises en marche, on s'est donné le moyen de chauffer par une lampe la paroi du carburateur ; il suffit pour cela de découvrir des orifices latéraux par le déplacement d'une bague circulaire.

Le carburateur employé depuis de longues années par la maison Kœrting se compose d'un vaporisateur disposé contre la culasse du moteur, pour bénéficier de ses

1. M. Sorel recommande avec raison de donner aux carburateurs une grande masse, pour y mieux emmagasiner le calorique.

2. Voir ci-dessus, page 129.

3. Cf. : page 127 ci-dessus.

chaleurs perdues ; l'alcool débité en jet divergent par une soupape conique disposée à cet effet est rencontré par le courant d'air, qui le coupe en travers, et l'entraîne dans son tourbillon. Une lanterne placée sur l'orifice d'entrée de l'air lui imprime un mouvement giratoire, qui contribue au brassage parfait des produits.

MM. Gobron-Brillié ont imaginé un dispositif mécanique de pulvérisation (fig. 21), dont le principe diffère essentiellement des appareils précédents. Un robinet ou clef

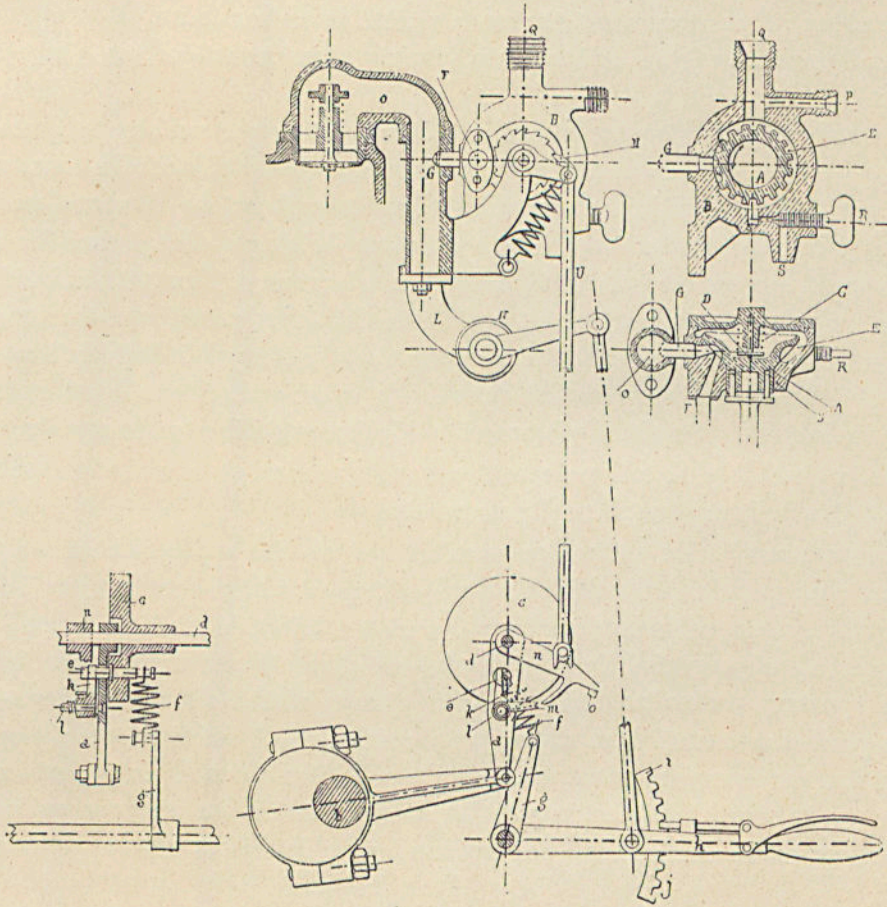


Fig. 21. — Carburateur Gobron-Brillié.

conique à alvéoles reçoit un mouvement saccadé par un levier commandé par une roue à rochet, sous la dépendance du régulateur. Ce robinet porte sur son pourtour des crans, qui prennent le liquide dans une rainure circulaire E pratiquée dans le boisseau ; les conduits F amènent l'air et les conduits G conduisent le mélange carburé à la soupape d'admission des cylindres. La clef A est commandée par un arbre à rochet, ayant autant de dents qu'il y a d'alvéoles à la clef ; ce rochet Z est mis en mouvement par le cliquet H. Un régulateur agissant sur le levier U, qui commande ce cliquet H, peut en paralyser le mouvement, et alors la clef cesse de tourner.

Le régulateur, qui commande la rotation de la clef, est constitué par un levier *a*,

lequel reçoit un mouvement d'oscillation d'une came montée sur l'arbre *b* du moteur. La masse *c*, folle sur le tourillon *d*, est entraînée par le toc *e*, contre lequel un ressort tend à appliquer le culbuteur *K*, dont le couteau *m* attaque le mouvement d'encliquetage *H*.

Lorsque la vitesse de régime est dépassée, la masse *c* fait osciller le culbuteur et le couteau manque le bec du levier *n*. C'est en somme un distributeur volumétrique commandé par un régulateur d'inertie.

Ce dispositif, qui a été appliqué surtout aux moteurs à gazoline, donne de bons résultats avec l'alcool ; il suffit de chauffer le carburateur convenablement. La variabilité du débit par le régulateur est la caractéristique du système.

Les ateliers d'Oberursel livrent aussi l'alcool au vaporisateur par des moyens mécaniques ; une petite pompe est actionnée par un arbre secondaire faisant un tour pour quatre tours du moteur ; l'arbre commande le piston par une coulisse ; deux billes servent de soupapes d'aspiration et de refoulement. La pompe débite plus d'alcool que le moteur n'en exige ; le liquide en excès revient au récipient de réserve par un déversoir, tandis que l'alcool à vaporiser s'écoule par un ajutage pulvérisateur dans la conduite d'air.

La *Gasmotoren Fabrik* de Deutz, qui ne fait pas usage de vaporisateurs à chaud, attache au contraire un grand soin à la pulvérisation, pour laquelle elle emploie aussi une pompe. Le moteur n'est pas réglé par admission de tout ou rien, et il ne se produit aucun passage à vide, mais on fait varier le volume d'air carburé admis en gardant sa richesse constante.

La came oblique, soumise au régulateur, qui fournit le mélange tonnant au cylindre, commande aussi la pompe ; celle-ci injecte donc à chaque coup la quantité d'alcool dont le moteur a besoin pour garder une vitesse constante.

L'emploi des pompes est moins général que celui des appareils automatiques à flotteur dont les formes varient beaucoup.

Le carburateur Brouhot, qui a valu au moteur de ce nom son remarquable succès au concours de 1902, est représenté sur la figure 22. *M* est un distributeur à niveau constant auquel l'alcool est servi par la tubulure *A* ; le flotteur *B* dont il est muni maintient la constance du niveau grâce au jeu du pointeau *C*, commandé par un levier de renvoi.

L'alcool se rend dans la chambre de distribution *N*, par le canal *D* ; l'air extérieur y arrive par *L* et il entraîne l'alcool dans le tuyau *H*, qui aboutit au vaporisateur, lequel n'est pas figuré sur notre dessin. La pulvérisation est effectuée par les soupapes *I* et *G*, reposant sur des sièges de conicité inverse : leurs tiges *J* et *L* sont concentriques ; *E* est une chambre ménagée au-dessus des soupapes et *L* constitue un piston qui permet de régler la capacité de cette chambre *E* par l'écrou moleté *F*. Cela posé, voici comment fonctionne l'appareil : la soupape supérieure *I* est soulevée en même temps que la valve d'échappement du moteur, et la chambre *E* se remplit d'alcool ; à ce moment la soupape *G* est fermée. Au moment de l'aspiration *I* redes-

ce qui se ferme avant que C ne s'ouvre, repoussé par sa tige J. Le contenu de la capacité E est donc pulvérisé et aspiré à chaque coup.

La vaporisation s'effectue dans un appareil spécial, disposé de manière à utiliser le mieux possible la chaleur des gaz de l'échappement : dans ce but, les gaz brûlés par-

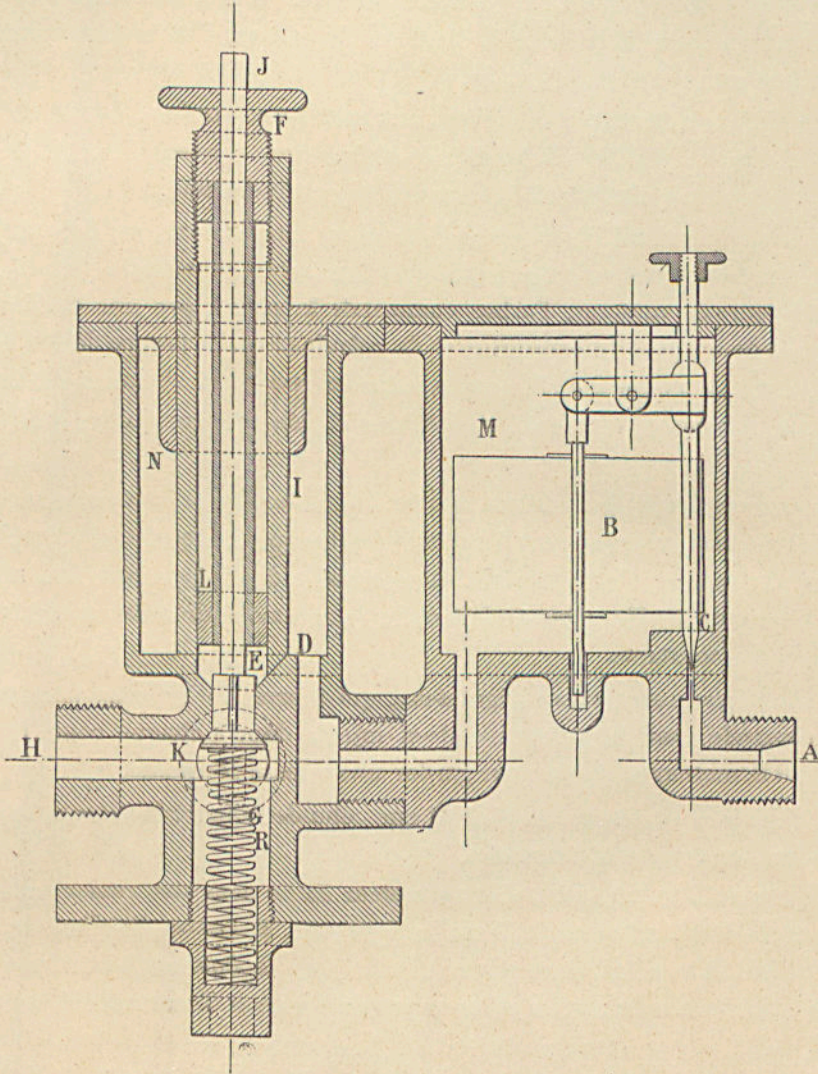


Fig. 22. — Carburateur à alcool Brouhot.

courent les spires d'une hélice double dont l'air carburé suit le second filet, en sens inverse. Une valve qui permet de limiter le volume des gaz brûlés assure un réglage excellent de la température du vaporisateur : l'air pur se mêle à l'air carburé à la partie supérieure de l'appareil, dans une proportion variable, qu'on modifie par une valve suivant le besoin.

Les ateliers de Kühlstein ont adopté un vaporisateur du même genre, sauf que les spires hélicoïdales sont remplacées par de simples tôles perforées, empilées dans un

cylindre annulaire ; les gaz brûlés traversent un cylindre central, qui chauffe les tôles par conductibilité. La récupération du calorique se fait dans de bonnes conditions par ce genre de réchauffeurs, auxquels on pourrait reprocher toutefois de créer une contrepression à l'échappement. Aussi les constructeurs ont-ils une tendance à simplifier les vaporisateurs en les formant de cylindres concentriques s'enveloppant l'un l'autre ; le circuit de l'air carburé est garni de chicanes, afin de bien brasser le mélange, mais le chemin des gaz brûlés est au contraire maintenu libre, sous la dépendance d'une valve de réglage permettant de modérer la température du vaporisateur entre certaines limites.

Le modèle adopté par la Société des moteurs à alcool de Dürr est un type de ces gazéificateurs, de construction peu coûteuse, dont l'action est cependant efficace ; l'air à carburer entre en A, traverse un clapet de réglage, et la soupape *s*, sur laquelle est projeté l'alcool, par l'orifice à pointeau I : on suit aisément son trajet marqué par des flèches pennées, sur la figure 23 de A en D. D'autre part, les gaz de la décharge pénètrent en B dans une enveloppe extérieure qu'ils sont obligés de parcourir en entier, grâce à un déflecteur E ; ils sortent par l'ouverture inférieure E. Pour mieux réchauffer l'air carburé, l'intervalle cylindrique annulaire est garni de spirales de métal qui multiplient les contacts (1).

Le carburateur de MM. Fritscher et Houdry présente des particularités fort intéressantes. L'alcool arrive d'un réservoir supérieur par la tubulure K (fig. 24) ; il traverse une grille *l* et passe dans la chambre *m*, dans laquelle le flotteur *n* maintient un niveau constant. Le pointeau *i* fait l'office de distributeur d'alcool. Le liquide est rencontré et pulvérisé par un jet d'air amené chaud par le tuyau *g*, qui traverse le pot d'échappement du moteur. La veine d'air descend verticalement de haut en bas de *h* en *o*, et remonte dans le canal annulaire pour gagner le conduit *n q*, qui va au moteur.

On règle à volonté le débit de l'air appelé au moteur en tournant convenablement l'obturateur *h*, placé au coude supérieur de la conduite d'air.

Pour arrêter la carburation, on dispose un robinet *g*, qui ouvre une entrée directe à l'air extérieur. Notons enfin que la cuvette *m* est pourvue à sa partie inférieure d'une bassine *r*, qui permet de chauffer préalablement l'alcool pour faciliter la mise

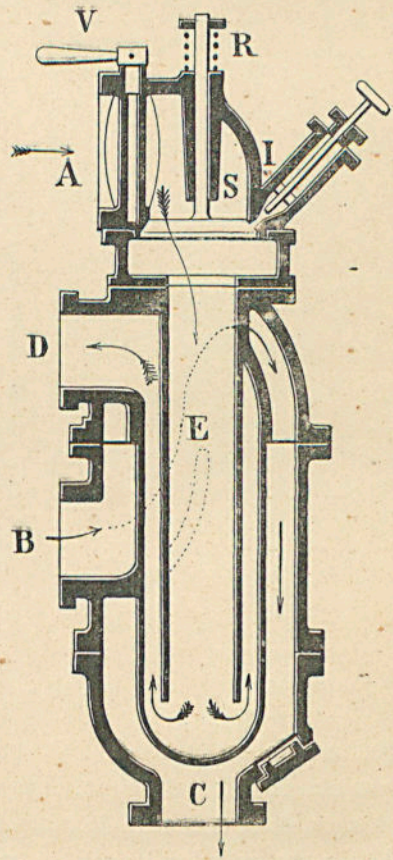


Fig. 23. — Vaporisateur de Dürr.

1. Schöttler. — « Zeitschrift des vereines Deutscher Ingenieure », août, 1902 ; on trouve dans cet article la description des moteurs de l'exposition des industries de l'alcool tenue à Berlin, en 1902.

en marche par les grands froids ou bien encore lorsque le moteur fonctionne avec de l'alcool non carburé.

MM. Japy frères ont créé un carburateur de petit volume, qui donne d'excellents résultats, et assure un rendement élevé aux moteurs, par suite de la parfaite diffusion qu'il opère. L'alcool est amené, par le conduit *d* à la cuvette *a*, à travers un orifice à pointeau, commandé par le flotteur *b*, qui vient appuyer, quand il le faut, sur le contrepois agissant sur la tige *c* du pointeau. L'alcool gicle par l'ajutage central *i*. Le jet est pris en travers par le courant d'air venant de *e*. Le liquide, pulvérisé par la rencontre du cône diviseur *m*, est entraîné dans le canal courbe *l*, où il est brassé

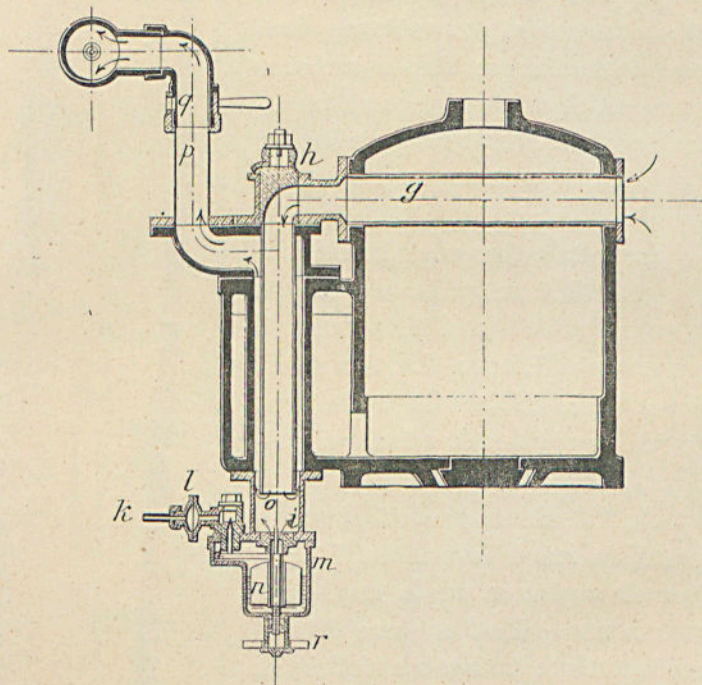


Fig. 24. — Carburateur à alcool Fritscher et Houdry.

par un violent tourbillon. Ce canal est d'ailleurs réchauffé à la température voulue par une double enveloppe, dans laquelle on peut faire circuler une dérivation réglée des gaz de la décharge du moteur ; on peut aussi y faire passer l'eau chaude de circulation du cylindre, quand on marche à une température suffisamment élevée. Les ailettes dont le tuyau *l* est muni vers l'enveloppe assurent les échanges de chaleur.

Le carburateur Sthenos prend l'air à l'atmosphère par un large pavillon d'aspiration : le courant s'engage ensuite dans un cône divergent à 7° d'ouverture, à l'entrée duquel débouche l'orifice par lequel arrive le carbure à pulvériser.

Par le fait même du passage de l'air à travers la base du cône divergent, il s'y produit une contraction de la veine qui crée une dépression très efficace pour la pulvérisation du liquide. Il est à remarquer, en effet, que la forme de l'appareil contribue davantage à cette pulvérisation que l'appel du moteur, car on constate l'existence d'une dépres-

sion à la base du cône, quand on insuffle de l'air par le pavillon. On prétend que la quantité de carbure entraînée est proportionnelle rigoureusement à la quantité d'air qui passe; la teneur et le titre du mélange seraient donc constants. Le cône est réchauffé par une circulation d'eau ou de gaz chaud. Un flotteur maintient la constance du niveau dans le réservoir d'alcool à la façon habituelle: il est équilibré par une aiguille qu'on manœuvre par une vis. Ce carburateur doit être placé tout contre le cylindre du moteur.

Nous avons décrit les principaux types de carburateurs à alcool; cette nomenclature n'est pas complète et elle n'a pas la prétention de l'être, mais elle suffit pour apprécier ce qui a été fait.

Le problème de la carburation est résolu, et l'emploi rationnel de l'alcool est réalisé.

Si l'alcool était à bas prix et si ce prix se maintenait avec quelque fixité, les moteurs à alcool pourraient aspirer à remplacer les moteurs à pétrole (1).

1. La fabrication de l'alcool par synthèse contribuera peut-être à cette fixité des prix que l'origine agricole du produit ne permet guère d'espérer pour le moment. Il semble que les moyens théoriques d'opérer cette synthèse, à partir du carbure de calcium, en passant par l'acétylène, l'éthylène et l'acide sulfovinique soit entre les mains des chimistes, formés à l'école de M. Berthelot; mais le résultat de cette opération est encore très impur et son prix dépend de celui du carbure, lequel est encore trop élevé. Un kilogramme de carbure de calcium donnerait, dit-on, 80 centilitres d'alcool à 90°; en estimant à 40 centimes le prix du kilogramme de carbure, le litre d'alcool ressortirait à un prix de revient exagéré. Mais avec du carbure à 20 centimes, la lutte serait possible; d'autre part l'emploi de carbures de baryum, de strontium, etc., fournissant des sous-produits ayant une valeur commerciale donnerait lieu à une récupération avantageuse. L'alcool synthétique (on l'appellera l'alcool *minéral*) pourrait donc un jour concurrencer l'alcool agricole pour l'alimentation des moteurs de l'industrie.

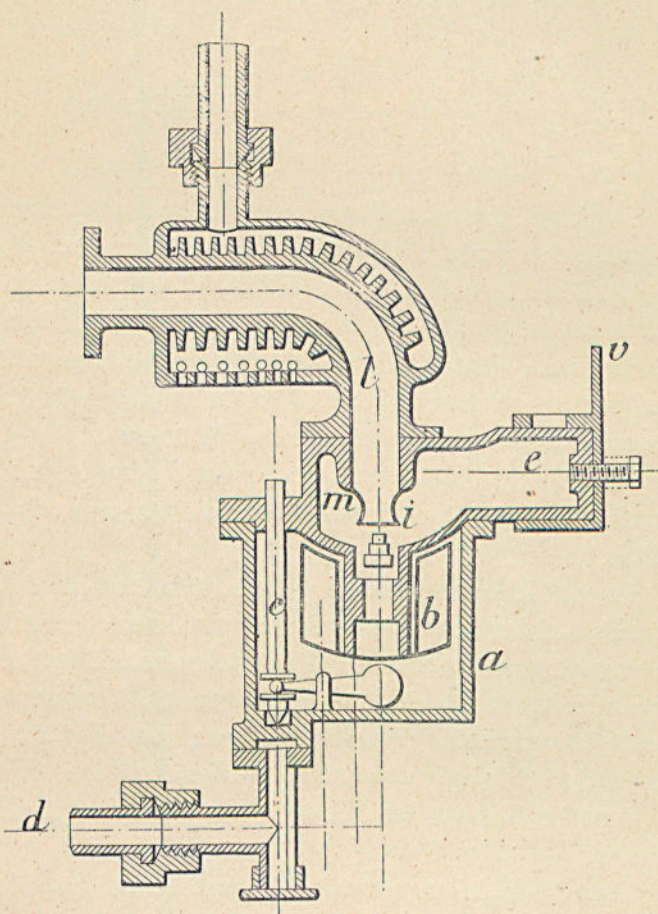


Fig. 25. — Carburateur Japy à alcool.

VI

Les pétroles.

Le pétrole est, comme son nom l'indique, une huile de pierre, donc une huile minérale ; on discutera longtemps encore son origine.

L'Italie et la Grèce, l'Inde, la Perse et surtout les bords de la mer Caspienne fournissaient du pétrole depuis des siècles quand on découvrit d'importantes sources en Pensylvanie, dans les Etats-Unis d'Amérique, vers 1850 ; depuis lors, on en tire du sol dans toutes les parties du monde. Toutefois la Pensylvanie et le Caucase sont encore les deux principaux centres d'extraction.

L'Europe est peu favorisée au point de vue de la richesse en pétrole ; la Galicie autrichienne, la Roumanie, le Hanovre, l'Alsace ont quelques puits, mais de faible débit.

La production annuelle du pétrole est formidable aujourd'hui ; mais les réserves enfouies dans les couches souterraines paraissent si considérables que nous n'avons pas à envisager leur épuisement et l'extraction actuelle est assez développée de toutes parts pour défier toute tentative d'accaparement. Aussi peut-on affirmer que le prix du pétrole n'augmentera certainement pas ; son emploi pour la force motrice est donc assuré pour de longues années dans les conditions présentes.

Les pétroles sont des mélanges complexes dont la définition chimique est difficile à donner.

Leur étude théorique avait été poussée fort loin, il y a plus de quarante ans déjà, par Henri Sainte-Claire Deville, Pelouze et Cahours ; en Angleterre et en Allemagne, on a aussi publié d'importants travaux sur cet inépuisable sujet et nous citerons en première ligne les recherches d'un caractère plus pratique de M. Robinson, présentées à la Société des Arts de Londres ; on trouvera plus loin quelques tableaux extraits de cette monographie.

La composition des pétroles de Pensylvanie a été établie d'abord d'une manière générale par Pelouze et Cahours : elle est donnée synoptiquement dans les colonnes ci-dessous.

Composition d'un pétrole américain
(d'après Pelouze et Cahours)

Carbures $C^n H^{2n+2}$	Noms	Densité du liquide	Point d'ébullition degrés	Densité du gaz
$C^1 H^4$	Gaz des marais (méthane)	—	—	0,559
$C^2 H^6$	Acétène (éthane)	—	— 20	—
$C^3 H^8$	Hydruve de propylène (propane)	—	—	—
$C^4 H^{10}$	— de butylène (butane)	0,590	0	2,000
$C^5 H^{12}$	— d'amylène (pentane)	0,628	30	2,557
$C^6 H^{14}$	— d'oléène (hexane)	0,669	68	3,055
$C^7 H^{16}$	— d'œnantylène (heptane)	0,690	93	3,600
$C^8 H^{18}$	— de caprylène (octane)	0,726	117	4,010
$C^9 H^{20}$	— d'élaène (nonane)	0,741	137	4,541
$C^{10} H^{22}$	— de paramylène (décane)	0,757	160	5,040
$C^{15} H^{32}$	Pentadécane	0,825	260	7,526
Etc.,	—	—	—	—

Le pétrole brut jaillit du sol ou bien il en est aspiré sous forme d'un liquide plus ou moins visqueux, rarement clair, insoluble dans l'eau, doué d'une odeur pénétrante, présentant un toucher gras ; il est de composition fort différente suivant son origine. Comme on le voit ci-dessus, le pétrole d'Amérique est un mélange d'hydrocarbures gazeux, liquides et solides de la série saturée $C^n H^{2n+2}$; certains pétroles du Caucase ont la même composition, mais ils contiennent en plus des carbures divers ; dans les pétroles de Bakou, on trouve presque tous les termes de la série éthylénique $C^n H^{2n}$, dite série des naphténes ($C^2 H^4$, éthylène, $C^3 H^6$, propylène, $C^4 H^8$, butylène, $C^5 H^{10}$, amylène, etc.) Enfin, on rencontre, en Égypte, certains pétroles dont la densité atteint 0,935 et qui se présentent sous la forme de véritables goudrons minéraux.

Cette diversité de composition a aussi été fort bien mise en lumière par Henri Sainte-Claire Deville.

Composition des pétroles
(d'après Sainte-Claire Deville)

	Pétrole léger de Pensylvanie	Pétrole lourd de Pensylvanie	Pétrole du Caucase	Pétrole d'Alsace (Pechelbronn)	
Partie volatile à 100.	4,3	—	—	—	
— 140.	16,0	—	2,7	—	
— 180.	28,7	—	13,3	7,8	
— 200.	31,0	—	—	15,2	
— 220.	—	—	19,0	25,7	
— 260.	—	—	29,3	40,6	
— 280.	—	12,0	36,0	—	
Densité à 0°	0,816	0,886	0,884	0,892	
Composition {	C.	82,0	84,9	86,3	85,7
	H.	14,8	13,7	13,6	12,0
	O.	3,2	1,4	0,1	2,3
Chaleur de combustion.	9.963	10.672	11.460	10.020	

Nous voyons donc que la composition change avec la densité ; la puissance calorifique subit les mêmes variations. Le pétrole est, par suite, un produit complexe dont la formule ne saurait être donnée. Pour le définir, il convient de relever sa densité, son aspect, son odeur, le point d'éclair⁽¹⁾, le point d'ébullition et la manière dont il distille.

Les qualités des pétroles ressortent des quantités d'éther, de gazoline, d'huile lampante et d'huile lourde qu'ils peuvent fournir.

Les tableaux suivants donnent, à ce sujet, des indications utiles.

Données relatives à quelques pétroles
d'après M. Robinson.

DÉSIGNATION des huiles	Densité	Aspect	Odeur à froid	Point d'éclair Abel	Point d'ébullition	VOLUME distillé pour cent
				degrés	degrés	
Américaine ordinaire . . .	0,791	jaune paille	odeur âcre	24	145	36 p. 100 en 3 heures
— Water-White . . .	0,780	incolore	agréable	42	145	56 » »
— Royal-Daylight . . .	0,799	jaune paille	un peu âcre	25,5	144	34,5 » »
— Tea Rose . . .	0,797	un peu trouble	id.	28,3	150	37,5 » »
Russe ordinaire . . .	0,825	fluorescent	id.	27,8	151	55,5 » »
Broxburn (phare). . .	0,811	très clair	insensible	66,7	162	56,0 » »
Trinity House. . .	0,811	jaune paille	id.	66,7	164	54 » en 2 h. 1/2
Pétroline Broxburn. . .	0,805	très clair	âcre	35,6	160	65 » en 2 h.
American mineral sperm.	0,833	jaune clair	odeur de brûlé		195	4,5 » en 3h.

La différence qui existe entre les pétroles américains et russes ressort bien de l'examen des produits qu'on en tire par distillation fractionnée. En général, les huiles russes sont plus denses et moins volatiles.

Produits de distillation des pétroles.

	Température	Pétrole américain		Pétrole russe	
		Pour cent	Densité	Pour cent	Densité
	degrés				
Ethers, benzine.	45 à 70	1,5	0,59 à 0,66	1,0	0,725
Gazoline. . .	70 à 170	14,5	0,66 à 0,74	3,0	0,775
Huile lampante.	170	50,0	0,74 à 0,85	39,0	0,850
Huile lourde. . .	250	15,0	0,85 à 0,91	22,0	0,910
Paraffine. . .	—	2,0	—	1,0	0,926
Résidus et pertes	—	17,0	—	24,0	—

1. Le point d'éclair ou *flashing point* correspond à la température à l'huile donne assez de vapeur pour que celle-ci puisse être enflammée.

Chaleurs de combustion (calories par kilog.)

D'après Deville, Robinson et Goulishambarof.

	Calories
Pétrole lourd de Pensylvanie (0, 886)	10. 680
— — de Virginie	10. 102
Pétrole russe (0, 884).	12. 650
— (0, 938).	10. 750
Pétrole de Bakou (0, 938)	11. 200
— (0, 928)	10. 760
Pétrole de Novorossisk	10. 328
Ozokérite de Boryslaw	10. 946
Pétrole raffiné de Russie (1) (0, 823)	11. 040
— (inflammation à 31°, 5) (0, 826) (2)	10. 878
— d'Amérique (inflammation à 25°) (0, 797) (2)	10. 767
Gazoline à 0, 708	11. 360
Astatki, résidu de Bakou	10. 340

La gazoline ou pétrole léger, appelée aussi quelquefois ligroïne ou benzine, a une densité comprise entre 0,690 et 0,750. C'est un produit très volatil, ininflammable à 5°, souvent même à zéro, d'un maniement dangereux, très explosif, qu'on utilise beaucoup pour carburer l'air, en vue de l'alimentation des moteurs. Les moteurs à gazoline étaient répandus beaucoup avant qu'on ait découvert le moyen d'utiliser directement pour les moteurs l'huile lampante: nous en avons déjà parlé ci-dessus (1).

L'huile lampante se compose théoriquement de tous les produits qui passent à la distillation entre 150 et 275 degrés; elle est raffinée par un traitement à l'acide sulfurique, suivi d'un lavage à l'eau pure et enfin complété par un dernier lavage à l'eau alcaline. On obtient ainsi un beau produit, bien fluide, incolore, légèrement fluorescent.

Le pétrole lampant rectifié doit pouvoir être soumis à l'épreuve du feu à 35° sans s'enflammer; en d'autres termes, il faut que le point d'inflammabilité (*flashing point*) soit tout au plus égal à 35°; c'est la condition légale en France (2).

Pour faire cette épreuve, on chauffe à l'aide d'une petite lampe à alcool le pétrole renfermé dans une capsule de porcelaine, où plonge le réservoir d'un thermomètre. Dès que la température a atteint 35° on promène une flamme à la surface du liquide; s'il se dégage des vapeurs qui prennent feu, l'huile n'est pas dans les conditions voulues (3).

Souvent, les pétroles du commerce présentent une trop grande inflammabilité, ce qui tient à ce que certains raffineurs y mêlent des essences et des huiles lourdes de pétrole dont la valeur est moindre. D'après M. White, 2 0/0 d'essence abaissent l'inflammabilité d'une huile de 35° à 33°,3, 5 0/0 à 28°,3 et 10 0/0 à 15°. Il importe d'observer qu'un mélange d'huile lourde, de densité 0,82 et d'essence de densité 0,73,

1. *Vide supra*, page 121.

2. Les Allemands, plus prudents, exigent que l'inflammabilité soit inférieure à 21°.

3. On détermine ce point d'inflammabilité par les appareils Granier, Luchaire ou Abel.

fait en proportion convenable, n'abaisse pas la densité de l'huile qui subit cette sophistication au-dessous de 0,80.

MM. Urbain et Salleron avaient inventé, il y a longtemps déjà, un appareil permettant simplement de reconnaître les qualités d'une bonne huile lampante par la tension de ses vapeurs à diverses températures. Cet appareil se compose d'une petite boîte en cuivre, hermétiquement fermée par un disque rodé sur ses bords, donnant passage à un tube manométrique en verre de 35 centimètres de hauteur, gradué en millimètres et à un thermomètre de précision ; ces deux instruments permettent donc de mesurer la pression et la température. Le disque est percé, en outre, d'une ouverture circulaire, qui peut être fermée, et qui fait communiquer l'intérieur de la boîte avec une petite chambre cylindrique rapportée sur le disque. Or, on verse 50 centimètres cubes d'eau dans la boîte et 5 centimètres cubes de l'huile à essayer dans la chambre cylindrique, en maintenant fermée l'ouverture annulaire, et l'on plonge le tout dans un vase plein d'eau que l'on chauffe au degré voulu. Cette température étant obtenue, on fait tomber l'huile dans l'eau en ouvrant la communication entre la chambre et la boîte ; l'huile est remplacée par un égal volume d'air. Quand la pression est devenue stationnaire, il n'y a qu'à lire l'augmentation de pression produite par le mélange de l'huile à l'eau. Une bonne huile possède à 15° une tension de 64 millimètres d'eau.

Voici, d'après MM. Urbain et Salleron, les densités et les tensions correspondantes de la vapeur de l'huile de pétrole prise à 15 degrés :

Densité à 15° centigrades.	Tensions de vapeur en millimètres d'eau.
0,812	0
0,797	5
0,780	15
0,772	40
0,762	85
0,756	125
0,736	410
0,695	930
0,680	1,185
0,650	2,110

Les tensions de vapeur des huiles lampantes varient avec leur origine et leur rectification. M. Robinson a déterminé cet élément sur un grand nombre d'échantillons. A 100°, cette tension est d'environ 800 millimètres de mercure pour l'huile de phares, de 810 pour le Royal Daylight, de 818 pour le Water White, et de 854 pour l'huile Tea Rose. Ces diverses huiles ne conviennent évidemment pas également bien à leur emploi dans les moteurs, car il importe qu'elles se vaporisent aisément ; mais ce n'est pas la seule condition requise. Il faut encore qu'elles se vaporisent entièrement et que vers 250 ou 300° la majeure partie en soit gazéifiée. M. Robinson a donc fait des essais pour déterminer le rendement des différentes huiles dans les moteurs : il a relevé des différences très nettes et bien caractéristiques entre les pétroles de diverses provenances.

On a entrepris d'intéressantes recherches pratiques dans le but de déterminer les conditions que doit remplir une huile pour donner les meilleurs résultats.

Voici notamment quelques données recueillies par plusieurs expérimentateurs des plus autorisés.

A l'occasion de ses expériences sur le moteur Diesel, M. Schrøeter a fait faire une étude complète du pétrole employé et nous trouvons dans ce travail des données à recueillir.

C'était un pétrole américain ayant, à 15°, une densité égale à 0,7955.

L'analyse des gaz brûlés a fourni, pour 0gr. 5187 de pétrole, 1gr. 6188 CO² et 0gr. 6648 H²O ; la composition chimique de l'huile est donc la suivante :

C.	85, 11 0/0
H.	14, 24
O.	0, 65

La distillation fractionnée a donné comme résultats :

1 ^{re} fraction	15 0/0	de 15° à 150°
2 ^e —	8, 8 »	de 150 à 175
3 ^e —	10, 2 »	de 175 à 200
4 ^e —	9, 0 »	de 200 à 225
5 ^e —	10, 0 »	de 225 à 250
6 ^e —	10, 2 »	de 250 à 275
7 ^e —	11, 8 »	de 275 à 300
8 ^e —	25, 0 »	au-dessus de 300
	<hr/>	
	100, 0	

Cette forte teneur en huiles à ébullition élevée est caractéristique de la provenance américaine.

Le calorimètre Junkers a donné, *vapeur d'eau condensée*, 10.935 calories pour l'échantillon susdit ; *vapeur non condensée*, on trouvait seulement 10.151 calories, attendu qu'on a recueilli 3 gr. 7 d'eau condensée dans le calorimètre par kilogramme d'huile brûlée.

A la bombe Mahler, on observa un pouvoir plus élevé d'une centaine de calories : c'est le contraire qu'on aurait dû relever, car le pouvoir à *volume constant* déterminé par les bombes devrait être inférieur au pouvoir à *pression constante* déterminé par les appareils à combustion analogues à l'appareil Junkers. J'ai déjà fait ressortir cette différence entre les résultats fournis par les calorimètres et les bombes, et je l'ai attribuée à une combustion plus complète.

Le pétrole américain employé par M. Ringelmann au Concours de Meaux avait à 15° une densité de 0,8231 ; son pouvoir fut trouvé de 11.040 calories par kilogramme à la bombe Mahler. Sa composition était la suivante :

C.	84, 23 0/0
H.	15, 44
O.	0, 30
	<hr/>
	100, 00

Il fallait 15 kil. 117 ou 11.690 litres d'air sec pour brûler complètement 1 kilogramme de ce pétrole.

La distillation fractionnée par dixièmes a varié de 67 à 219°, la densité passant de 0,782 à 0,858.

On avait d'ailleurs :

Burning point		54°, 2
Point d'éclair {	Abel-Pensky	29°, 0
	Granier	34°, 2

Au concours de Berlin, de 1894, on employa des pétroles américain et russe, pour lesquels on a fourni les données ci-dessous :

	Pétrole américain.	Pétrole russe.
C	84,54 0/0	83,52 0/0
H	14,08 »	13,98 »
O	1,38 »	0,50 »
Pouvoir calorifique inférieur.	10767 calories.	10878 calories.
Densité à 15 0/0	0,7971	0,8257
Point d'éclair Abel-Pensky .	25°	31°, 5

A Cambridge, on consumma de l'huile dite russolène.

Densité	0,8239
Point d'éclair Abel-Pensky	30°
Pouvoir calorifique supérieur	11055 calories.
— vapeur non condensée.	10313 —

Le pétrole lampant, de densité comprise entre 0,79 et 0,83, convient bien aux carburateurs des moteurs fixes et demi-fixes, mais les constructeurs d'automobiles n'ont pas encore réussi à en tirer parti ; les essences de densité égale à 0,700 peuvent seules être utilisées pour la traction des voitures.

On a fréquemment proposé aux constructeurs de moteurs l'utilisation directe des pétroles bruts non raffinés : des essais intéressants ont été faits dans ce sens par la Compagnie des Moteurs Midland dans les services de la Société des pétroles de Bakou. Les ateliers dans lesquels sont installées ces machines étant remplis de vapeurs carburées, qui constituent de dangereux mélanges tonnants, on imposa aux constructeurs un programme sévère. Aucune des pièces extérieures des moteurs ne devait jamais être portée au rouge ; il était défendu d'employer des tubes d'allumage et la mise en marche devait se faire automatiquement. Le problème de l'emploi du pétrole brut fut résolu de la manière suivante : le vaporisateur a été enfermé dans une boîte hermétiquement close, placée à l'avant du moteur. Avant de chauffer ce vaporisateur, on met en marche pendant trente minutes à l'aide d'air carburé. L'air traverse des couches de ouate, imbibées de gasoline, et il pénètre dans le cylindre par un clapet de sûreté, qui empêche le retour des gaz brûlés. Le vaporisateur se chauffe ainsi ; la température voulue étant atteinte, on ouvre le robinet de pétrole lourd.

Ces moteurs fonctionnent bien au pétrole lourd : ils marchent une centaine d'heures consécutives sans arrêt.

La densité moyenne du pétrole brut employé est égale à 0,870.

Cette curieuse application constituerait un grand progrès économique si elle se poursuivait dans de bonnes conditions ; or, il est permis de croire que les essais ont été heureux, car la Compagnie de Bakou supprime graduellement ses chaudières chauffées au pétrole et ses machines à vapeur. Il y aurait déjà 320 chevaux en service et l'on aurait l'intention d'en installer d'autres.

Le graissage des moteurs à pétrole entraîne une dépense généralement moindre que pour les moteurs à gaz, car leur cylindre se trouve lubrifié par le pétrole admis et l'on peut souvent fermer les graisseurs après la mise en marche. M. Ringelmann a fait à ce sujet d'intéressants relevés au concours de Meaux. Voici par exemple les chiffres qu'il a publiés relativement au moteur Niel.

Consommation par heure	TRAVAIL EFFECTUÉ EN CHEVAUX			
	à vide	1,98	3,93	6,22
D'huile au cylindre	gr. 27,5	gr. 15	gr. 14,25	gr. 35
De graisse { à la bielle	1	1	0,5	0
aux 2 paliers	2	2	10	1
D'huile des burettes à main	8,5	0	0	10

Ce tableau montre une consommation d'huile de graissage au cylindre moindre pour un travail de 4 chevaux qu'à vide ; par contre la dépense horaire croît quand le travail dépasse une certaine limite. On observe des résultats semblables avec la plupart des moteurs.

L'emploi du pétrole lampant dans les moteurs exige des carburateurs à chaud très efficaces, qui diffèrent essentiellement des carburateurs à froid décrits ci-dessus pour les pétroles légers (1).

Le prototype de ces carburateurs est celui de Brayton ; on y faisait usage de corps poreux. Mais on a reconnu bientôt qu'il était utile de pulvériser d'abord le pétrole dans un jet d'air avant d'essayer de le vaporiser par l'action de la chaleur. Ces appareils se compliquent donc de pompes d'injection de formes diverses ; ces auxiliaires mécaniques de la carburation font plus ou moins partie du moteur. Nous ne les ferons donc connaître que lorsque nous aborderons, dans le Tome II, la monographie des machines à pétrole lourd.

Nous nous contenterons de faire ressortir dès maintenant la difficulté qu'on éprouve à empêcher l'encrassement des carburateurs ; il tend à se former contre les parois des dépôts charbonneux, qui sont une entrave à la marche régulière de l'opération et constituent une perte de rendement. M. Claudel a proposé de conjurer ce grave inconvénient par une injection de vapeur d'eau, qui se dissocierait aux températures élevées et brûlerait le carbone au fur et à mesure de sa formation.

1. Voir ci-dessus, page 122 et suivantes.

VII

Les gaz mixtes ou gaz pauvres.

Au lieu de fabriquer tour à tour et par intermittences du gaz à l'eau et du gaz Siemens et de les mélanger, on préféra bientôt employer un procédé mixte, qui donnait les deux gaz à la fois, d'une façon continue.

Le producteur de gaz ainsi disposé se nomme un gazogène et le résultat de l'opération est un gaz *mixte*; on l'appelle aussi un gaz *pauvre* par comparaison avec le gaz de ville.

C'est à Ebelmen et à Thomas et Laurens que revient l'honneur de la création de ce genre de gazogènes : leurs premiers essais remontent à l'année 1840. Ils employaient des fours à cuve verticaux, d'une forme analogue à celle des cubilots et des hauts fourneaux, soufflés par dessous à l'air et à la vapeur surchauffée, le poids d'eau injecté étant estimé au $\frac{1}{35}$ du poids de l'air.

De nombreux inventeurs étudièrent la question à la suite de Thomas et Laurens, et nous pourrions même trouver dans ces tentatives des expériences intéressantes sur la combustion renversée, qui témoignent de l'ancienneté de cette invention, remise en honneur aujourd'hui.

Vint alors Siemens, dont le premier brevet porte la date du 13 février 1857. L'appareil du savant allemand se composait d'une chambre rectangulaire voûtée en briques réfractaires, mesurant environ 2^m,40 de hauteur sur 2^m,15 de largeur ; la paroi antérieure de cette chambre formait un plan incliné à 60° et se terminait par une grille à gradins, descendant presque jusqu'au sol.

Le combustible se chargeait par une trémie supérieure pourvue d'une valve d'obturation, empêchant les rentrées d'air et les pertes de gaz : des ouvertures permettaient à l'ouvrier de remuer le combustible à l'aide d'un ringard de forme appropriée et de faciliter sa descente vers le fond de la cuve ; les scories et les mâchefers se retiraient par dessous la grille inclinée. Quant à la vapeur d'eau, elle était fournie par la libre évaporation d'une certaine quantité d'eau que Siemens faisait couler sur le sol ; ce dispositif avait l'avantage de rafraîchir la grille et de contribuer à sa conservation. L'air était soufflé à la partie inférieure ; les gaz s'échappaient par le haut.

Ces gazogènes donnaient des gaz de valeur très variable, mais qui méritaient toujours l'épithète de *pauvre* qu'on leur accole généralement : voici quelques résultats d'analyse faites par MM. Kraus, Boistel, Lencauchez et moi-même (1) :

1. Nous emprunterons dans cette étude d'intéressants documents à M. Lencauchez, à M. Lodebur et à M. Putsch : Lencauchez. — « Étude sur les combustibles en général », Paris, 1878 ; « Étude sur divers gaz combustibles » ; Paris, 1899 et 1902.

Lodebur. — « Le chauffage au gaz dans ses applications à la métallurgie », traduction Krawtsoff, Paris, 1893.

Putsch. — « Neuere Gasfuerungen » ; Berlin, 1888 et 1899.

Composition en volume

	D'après M. KRAUS	D'après M. BOISTEL	D'après M. LENCAUCHEZ	D'après M. WITZ
H	8,2	5,2 à 9,5	10,75	16,00
CO	24,2	21,5 à 24,0	26,50	11,80
CH ⁴	2,2	1,3 à 2,6	3,75	2,71
C ² H ⁴	—	—	0,50	0,29
Az	61,2	61,2 à 64	57,25	64,20
CO ²	4,2	—	1,25	4,18
O	—	—	—	0,82
	34,6		41,50	30,80
	65,4		58,50	69,20

Leur pouvoir calorifique dépassait rarement 1.200 calories. Ils étaient assez riches à la vérité pour être utilisés pour la production de la force motrice dans les moteurs; mais il y avait tout intérêt à élever leur pouvoir, afin d'assurer un fonctionnement meilleur des moteurs alimentés par les gazogènes et surtout d'augmenter leur puissance. Un grand nombre d'ingénieurs ont appliqué leur génie inventif à ce résultat, dont quelques-uns entrevoyaient l'immense portée.

M. Ermeson Dowson est arrivé bon premier et il a réalisé, en 1878, un gazogène à cuve vertical analogue à celui de Thomas et Laurens, dont les produits convenaient bien aux moteurs à gaz; des milliers de moteurs sont desservis en France, en Angleterre, en Allemagne, en Amérique, par des appareils Dowson, car l'habile inventeur a eu beaucoup d'imitateurs. Son mérite personnel a été reconnu par la grande médaille d'or et le prix de 50 guinées de sir William Siemens.

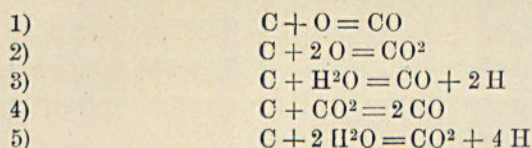
On a peu innové depuis lors en matière de gazogènes pour moteurs (1); mais d'intéressantes modifications de détail ont été apportées aux premiers appareils en vue de résoudre certaines difficultés pratiques, de permettre l'emploi de divers charbons, de gouverner plus sûrement la production du gaz et d'améliorer sa qualité moyenne. L'aspiration du gaz par le moteur lui-même, inventée par Arbos, est enfin devenue depuis quelque temps le point de départ d'une application plus générale des gazogènes.

Avant d'aborder l'étude pratique de la production des gaz pauvres et de décrire les appareils qui ont le plus de succès, nous jugeons nécessaire de faire un exposé succinct de la théorie des opérations qui se succèdent dans la cuve entre la grille qui porte le combustible et la canalisation de départ du gaz vers le moteur.

Supposons d'abord qu'on ne charge que du coke dans la cuve; nous ne mettons donc en présence que du carbone, des cendres minérales, de l'air et de la vapeur d'eau: pour fixer les idées, considérons un appareil soufflé par dessous, analogue à celui de

1. Nous ne considérons ici les gazogènes qu'en vue de leur application à la production de la force motrice: la nécessité de refroidir les gaz à la sortie des appareils met ces gazogènes dans une condition particulière, et en fait une classe à part.

Thomas et Laurens. Voici les réactions qui se produisent sur la grille et à la traversée du coke incandescent.



Il faut remarquer que les réactions 1 et 2 sont exothermiques, alors que les trois autres sont endothermiques ; le calorique rendu disponible dans 1 et 2 doit donc être supérieur à celui qu'exigent 3, 4 et 5 augmenté de ce qui se perd fatalement par rayonnement et conductibilité.

C'est la première loi du fonctionnement des gazogènes : elle est absolue. Toutefois, au lieu de demander aux combustions incomplètes et complètes du charbon tout le calorique nécessaire aux opérations concomitantes ou suivantes, on pourrait utiliser des chaleurs apportées du dehors par des gaz chauds, ou par de la vapeur saturée ou surchauffée. Cette seconde observation est aussi importante que la première.

Il ressort comme corollaire de ce qui précède que l'introduction de la vapeur saturée dans la cuve ne saurait être illimitée ; car elle abaisserait outre mesure la température du foyer au point de rendre impossibles toutes les réactions et d'éteindre le feu. Mais en augmentant l'introduction de l'air, en chauffant cet air préalablement et en surchauffant la vapeur d'eau on se donne de la marge et on permet une injection d'eau plus considérable. Enfin, la réduction des pertes par conductibilité et par rayonnement prend aussi une importance qu'on ne soupçonne pas à première vue et qui a été souvent méconnue.

Notons à titre de documents théoriques ce qui suit : il faut, par kilogramme de carbone, 14 kilogrammes d'air pour le brûler complètement (c'est un minimum), et il se dégage 8.080 calories ; si ce kilogramme brûle incomplètement en formant CO, au lieu de CO², le calorique disponible tombe à 2.473 calories. Par volume de 22,5 litres, il se produit dans les deux cas 94,3 ou 26,1 calories ; il en résulte que la combustion d'un volume de CO fournit 68,2 calories ; réciproquement, la réaction 4 exige 68,2 calories par volume.

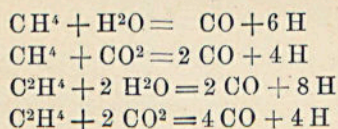
Quant aux réactions 3 et 5, elles coûtent respectivement 32 et 22 calories, l'eau étant fournie à l'état de vapeur saturée à 100°. Enfin, la réaction 4 se produit entre 550 et 800° ; la réaction 5, depuis 800° jusqu'aux plus hautes températures ; la réaction 4 réclame au moins une température de 850°. M. Lencauchez en conclut que la réaction 5 précède la réaction 4. A noter encore que l'énergie de la réaction de C sur CO augmente avec la température (1).

En restant dans l'hypothèse que nous avons faite d'un gazogène chargé de coke, le calcul approximatif qu'on peut baser sur les données précédentes conduit à estimer

1. Les chiffres ci-dessus ne sont que des valeurs approchées ; en effet la chaleur de formation de l'acide carbonique et de l'eau diminue avec la température, ainsi que M. Berthelot l'a démontré. Ce savant thermochimiste estime que cette chaleur de combinaison passe de 29.350 à 23.300 quand la température monte de 0° à 2.000°.

la température des gaz à la sortie du gazogène à 1.200°, quand l'air est sec, et à 800°, lorsqu'on fournit la vapeur d'eau nécessaire pour donner lieu à la réaction 3. Ces chiffres permettent d'estimer la diminution de température résultant de l'introduction de la vapeur d'eau saturée dans le vent.

Mais, il nous faut considérer maintenant l'hypothèse d'une marche au charbon maigre ou à l'anhracite; dans ce cas, le phénomène est compliqué d'une distillation de produits volatils carburés donnant lieu à des réactions secondaires multiples, dont les équations ci-dessous font connaître les résultats principaux.



L'altération des hydrocarbures engendre donc de l'hydrogène et de l'oxyde de carbone, gaz combustibles qui augmentent la richesse des produits de la gazéification: la proportion de vapeur d'eau et d'acide carbonique baisse au contraire. Mais ces réactions exigent encore une certaine disponibilité en calories et elles n'ont lieu qu'à une température déterminée, de telle sorte qu'elles ne se produisent pas nécessairement. Aussi trouve-t-on dans le gaz pauvre du méthane et de l'éthylène qui n'ont pas subi la transformation indiquée par nos équations, et il passe toujours des goudrons en quantité notable.

Ce qui précède témoigne de l'avantage qui résulte d'un contact prolongé des gaz distillés avec la vapeur d'eau et le charbon incandescent dans la cuve du gazogène; c'est la justification de la marche à flamme renversée, obtenue en faisant circuler l'air injecté, la vapeur d'eau et les carbures qu'il entraîne non plus de bas en haut, mais de haut en bas. Dans ce dispositif, les produits de la distillation traversent forcément la zone de combustion de la cuve et filtrent à travers le coke incandescent en transformant leurs goudrons; ce serait une épuration automatique fort rationnelle, si on pouvait l'effectuer sans difficulté et si l'on ne se heurtait pas à des inconvénients pratiques fort sérieux.

Entrons maintenant dans le domaine plus réel de la pratique et soumettons les considérations théoriques ci-dessus au contrôle de l'expérience.

Les gaz pauvres renferment toujours, outre l'hydrogène et l'oxyde de carbone qui constituent leurs éléments combustibles essentiels, des carbures CH^4 et C^2H^4 , etc., l'azote résiduel de l'air injecté, l'anhydride carbonique qui a échappé à la réduction et un peu d'oxygène libre.

Etudions d'abord l'influence de la nature du charbon employé, sur la marche et les produits de la gazéification.

La décomposition de CO^2 par le carbone incandescent se fait d'autant mieux que le charbon est plus poreux, car il présente alors plus de surfaces de contact: au contraire, un combustible dense et compact ralentit la réaction. Ainsi Bell a relevé les ré-

sultats ci-dessous en faisant passer au rouge vif de l'acide carbonique sec sur du coke dense ou poreux et sur des charbons de bois.

	Coke dense.	Coke poreux.	Charbon de bois.
CO ²	94,56	69,81	35,3
CO.	5,44	30,19	64,8

Mais il y a une autre influence bien plus énergique ; c'est la perméabilité de la charge. Il faut que les fragments de charbon soient tels que la résistance opposée au passage des gaz soit minimum, alors même que les morceaux présentent une surface maximum : ces deux conditions qui paraissent contradictoires sont néanmoins absolues toutes deux, et l'on se trouve amené ainsi à concasser le charbon en menus morceaux présentant au moins le volume d'une grosse noix, sans aucune poussière. Il est donc nécessaire de cribler le charbon après l'avoir brisé.

Des charbons gras, donnant un coke agglutiné et collant, ne conviendraient généralement pas à l'usage du gazogène ; ils obstrueraient les passages laissés libres entre les morceaux. (1).

Ils auraient d'ailleurs un autre inconvénient plus grave encore, de faire voûte et de ne pas descendre dans la cuve au fur et à mesure de leur combustion, ce qui obligerait de ringarder constamment le feu et provoquerait d'abord de grandes inégalités d'allure, suivies bientôt d'extinction.

Des charbons décrépitant au feu ne vaudraient pas mieux, car ils encombreraient rapidement les voies d'air, par la poussière qu'ils produiraient.

De ce qui précède, il résulte que l'on ne peut pas employer les charbons que l'on veut dans les gazogènes. Les meilleurs résultats sont fournis avec les anthracites, parmi lesquels ceux du pays de Galles et de Llanelly sont à mettre au premier rang. Des anthracites de l'Isère, ceux d'Espagne, et l'Amérique sont aussi à conseiller, mais non sans réserves, car leurs qualités sont inégales. On a souvent employé avec succès certains charbons maigres, notamment ceux de Vicoigne, de Nœux, dans le Pas-de-Calais, d'Anzin dans le Nord (puits de Chabaud-Latour et Lagrange), de Charleroi, en Belgique, etc. Nous sommes convaincu que les bassins de Saône-et-Loire, du Tarn, du Gard, de l'Aveyron, voire même de la Sarthe et de la Mayenne renferment également d'excellentes couches à usage de gazogène (2).

Il importe d'éviter l'emploi des charbons renfermant trop de cendres, car celles-ci obstrueraient les passages et seraient entraînées dans les canalisations : des cendres trop fusibles présentent aussi des inconvénients, parce qu'elles attaquent les parois de fonte et de terre et forment des coulées dans les fonds de cuve ; une fois vitrifiées, elles constituent une grande gêne pour la conduite des appareils. A noter que des

1. M. Lencauchez, a vu des gazogènes refuser le vent sous des pressions de 120 millimètres d'eau ; une augmentation de pression chassait des charges de poussière et encombrait les canalisations.

2. On obtient quelquefois des résultats inattendus par des mélanges : témoin ce fait que j'emprunte à M. Lencauchez. De l'anthracite de Briançon (Hautes-Alpes) renfermant 12 0/0 de cendres, 4 de matières volatiles et 4 d'eau s'est très bien comporté quand on l'a eu additionné de 27 0/0 de houille de Liévin, dont la teneur en matières volatiles dépasse 30 0/0.

cendres rougeâtres sont généralement très fusibles, par le fer qu'elles renferment. Une houille goudronneuse présente aussi des inconvénients, car des produits bitumineux trop abondants se condensent contre les soupapes et dans les coudes et nuisent au fonctionnement des appareils. Mais il y a des goudrons d'espèce très différente, et il en est qui sont beaucoup plus nuisibles que les autres : il est important d'être fixé à l'avance sur leur manière d'être ; les uns restent liquides et se soutirent sans difficulté, alors que d'autres forment une glu épaisse qui engobe les soupapes et les colle sur leurs sièges. Plusieurs ingénieurs ont fait à ce point de vue de regrettables et fort ruineuses écoles.

En résumé, les charbons qui conviennent le mieux pour la fabrication des gaz pauvres sont des charbons ayant une bonne tenue au feu, ne tombant pas en poussière sous l'action de la température élevée à laquelle ils sont nécessairement portés, fournissant peu de cendres, ne collant pas et ne s'agglutinant pas au feu, ne formant donc pas voûte dans la cuve du gazogène, glissant au contraire graduellement vers la grille, au fur et à mesure qu'ils se consomment. Répondent plus spécialement à ces conditions le charbon de bois, le coke et l'antracite. Mais le charbon de bois est trop cher et il y a plus d'avantage à employer le bois, surtout en combustion renversée, comme nous le dirons plus loin. Le coke a des qualités exceptionnelles, à condition qu'il ne renferme pas trop de cendres : les cokes lavés sont donc à rechercher. Les cokes ont d'ailleurs souvent le défaut de renfermer du soufre.

L'antracite de provenance anglaise ou américaine est par excellence le combustible des gazogènes. Des charbons maigres peuvent aussi donner d'excellents résultats, à condition que la proportion des produits volatils reste inférieure à 15 0/0.

Telles sont les règles qu'on peut formuler *a priori* ; mais il faut se garder d'énoncer des aphorismes trop généraux. Le perfectionnement des gazogènes consiste précisément à permettre l'emploi de charbons moins spéciaux : cela a pu être réalisé déjà dans des gazogènes établis en vue de l'utilisation de combustibles déterminés. Ainsi M. Letombe a su tirer parti de charbons maigres des Alpes renfermant 44 0/0 de cendres. D'autre part, M. Lencauchez fils a pu marcher au charbon tout venant de Birmingham renfermant 20 0/0 de gaillettes de 120 millimètres et 80 0/0 de fines. Ce combustible a une apparence terreuse ; en brûlant, il répand l'odeur caractéristique des lignites ; il renferme 8 0/0 d'eau. Desséché, il a la composition ci-dessous :

Eau d'absorption.	60 grammes.
— de constitution	53 —
Goudron et brai sec	51 —
Matières volatiles.	210 —
Carbone fixe	463 —
Cendres	163 —
	<hr/>
	1000 grammes.

Notons cette teneur en 21 0/0 de matières volatiles et 16 de cendres ; elle est caractéristique d'une qualité que l'on n'est point habitué à pouvoir utiliser dans les gazogènes. C'est en effet une houille bitumineuse ; son coke est assez collant, mais il a

par contre, la propriété d'être friable et, par suite, de ne pas s'agglomérer en masse et de ne pas faire voûte.

La puissance calorique du gaz produit est de 1.650 calories par mètre cube (1) : c'est donc un gaz d'un pouvoir relativement élevé.

M. Mond a mieux encore généralisé l'emploi de combustibles quelconques très gras, sous forme de menus et de fines, chargés de cendres. En Allemagne, la compagnie de Deutz a réalisé une autre merveille ; elle a réussi à utiliser les lignites du Rhin (*braunkohle*) renfermant 60 0/0 d'eau, ne donnant que 1.800 calories par kilogramme et elle en a tiré un gaz d'un pouvoir inférieur de 1.100 calories, utilisable pour les moteurs.

Enfin, on a même obtenu des gaz satisfaisants en traitant des ordures ménagères, des gadoues et autres résidus plus ou moins combustibles.

Nous voilà loin du coke et de l'anthracite obligatoires.

Mais revenons à l'étude des meilleures conditions de fonctionnement des gazogènes.

La durée du contact entre l'acide carbonique produit dans le foyer et la colonne incandescente est un facteur qui exerce toujours une influence marquée sur le rendement des gazogènes. Dans ses recherches sur le travail des gazogènes à coke, Bunte a constaté que, si la vitesse du gaz augmente, la teneur en CO diminue. Nous en trouvons la preuve dans les essais faits à pression variable de l'air injecté :

Pression.	CO ²	CO
1 ^m ,6 d'eau.	1,7 pour 100 en volume.	29,1
10,0	4,8 —	23,6

L'épaisseur de la couche de charbon traversée par les gaz constitue un autre facteur non moins important : avec du coke, il faut au minimum 50 centimètres de hauteur ; avec de la houille, il est à conseiller de donner pour le moins 75 centimètres à la couche. Mais il n'y a pas de chiffres absolus à indiquer dans ce cas, car l'épaisseur devra être plus grande lorsqu'on opérera à haute pression, afin que le carbone ait mieux le temps d'agir sur CO². Une épaisseur insuffisante se traduit par une composition défectueuse des gaz et par un excès d'acide carbonique.

L'air insufflé doit traverser tout le combustible ; s'il glisse le long des parois ou bien s'il s'échappe par des cheminées, formées au sein de la masse incandescente, la condition du contact de tout le charbon par tout le gaz ne serait point remplie et les résultats seraient mauvais. Il importe donc de donner aux cuves des formes qui empêchent ces effets nuisibles.

Le mode d'introduction de l'air dans le gazogène a une importance considérable sur les résultats, parce que la pression du vent influence la combustion ainsi que nous venons de le voir. Dowson a employé de préférence les injecteurs à vapeur : c'est le procédé le plus simple et qui exige le moins de frais d'établissement ; il permet de faire varier et de régler à volonté l'afflux de l'air et de gouverner par suite l'allure

1. Communication de M. Leneauchez père à la Société de l'Industrie Minérale, janvier 1898.

du feu ; mais il présente en retour l'inconvénient de faire dépendre la quantité d'air insufflé de la quantité de vapeur d'eau introduite avec lui, ce qui peut quelquefois devenir une gêne pour le conducteur du gazogène.

M. Lencauchez donne la préférence à un appareil mécanique d'insufflation, tel qu'un ventilateur Root par exemple ; l'emploi des compresseurs indépendants augmente l'élasticité de fonctionnement des gazogènes, mais il impose l'obligation d'un moteur, et il aggrave singulièrement les difficultés des mises en train. Ces inconvénients disparaissent, il est vrai, dans les usines qui possèdent des moteurs indépendants du gazogène.

Aux injecteurs et aux ventilateurs s'adjoignent parfois des exhausteurs, placés entre le gazogène et la cloche à gaz, qui aspirent les gaz hors de la cuve et les refoulent vers les canalisations ; leur rôle est fort apprécié dans certaines installations très développées. Quand on emploie des combustibles renfermant une forte proportion d'eau, qui ne tolèrent pas l'introduction d'une grande quantité de vapeur par l'injecteur, tout en exigeant beaucoup d'air, le concours d'un exhausteur peut devenir obligatoire.

Dans les gazogènes à haute pression, tels que le gazogène Gardie, on fait agir un compresseur d'air à piston, développant des pressions considérables de 6 à 8 kilogrammes. Il en résulte une allure très chaude permettant d'introduire beaucoup de vapeur d'eau ; la production de goudron est alors nulle, ce qui a permis de supprimer les scrubbers et laveurs, dont on ne saurait se passer dans aucun autre appareil. C'est le caractère particulier et fort remarquable des moteurs et des gazogènes Gardie.

Les gazogènes peuvent encore être alimentés d'air par l'aspiration des moteurs mêmes qu'ils desservent ; ce genre d'appareils a obtenu une grande vogue depuis quelques années et l'on ne se compromet pas en leur prédisant un grand avenir. Mais le moteur ne peut produire qu'une faible dépression par son appel, et il faut nécessairement que les résistances opposées au mouvement des gaz par les couches de combustible et les appareils d'épuration soient réduites au minimum ; d'où la nécessité pour ces gazogènes de n'employer que des charbons criblés et de bonne tenue. Les intermittences d'appel des moteurs à quatre temps, se réglant par admission de tout ou rien, ne s'opposent pas à l'emploi des gazogènes par aspiration ; mais il est sage de donner un certain volume aux conduites allant au moteur pour lui constituer une petite réserve et produire un amortissement des aspirations.

L'allure plus ou moins chaude du fonctionnement des gazogènes exerce la plus grande influence sur la marche et le rendement de ces appareils. Mais la question est fort complexe et il faut tenir compte d'éléments nombreux et divers.

La température des gazogènes est difficile à déterminer.

En général, on estime à 1.000° la température au bas de la cuve ; elle s'élève à 1.300° à quelques centimètres en dessus, pour tomber à 500° ou 600° au haut de la cuve ; les gaz s'échappent à environ 550°, mais ces températures varient beaucoup avec les conditions de marche, la nature du combustible, la quantité d'eau injectée,

la surchauffe de l'air et de la vapeur, etc. M. Fischer a constaté que les gaz pourraient avoir même 690° avec des houilles de choix, donnant un gaz composé de 27,3 CO, 1,9 C H⁴, 0,5 H, 5,3 CO², et 67,6 d'azote.

En chauffant préalablement l'air injecté, on réalise au gazogène une température plus élevée ; ce chauffage s'opère en faisant passer l'air comburant dans les parois mêmes du gazogène ou dans des conduites spéciales chauffées par les produits du gazogène. On améliore ainsi la marche de l'appareil, car l'énergie de l'action de CO sur le carbone augmente avec la température.

M. Ledebur l'a démontré en faisant passer à différentes températures un courant d'air sec et privé de CO² sur du charbon de bois : voici les résultats obtenus par ce savant :

	CO ² en poids	CO en poids.
A 350°	85,2	14,8
A 440°	80,4	19,6
A 520°	79,6	20,4
A 700°	72,4	27,6
A 1.100°	2,2	97,8

En faisant traverser du charbon de bois incandescent par un courant d'acide carbonique, Akermann a observé que la composition du gaz varie, suivant la température, de la façon suivante :

	CO
A 319°	0 0/0
A 393°	0,4
A 918°	13,0

L'allure chaude permet donc de développer un gaz plus riche.

Elle a encore un autre avantage. Soit que l'on injecte de l'air humide, soit que l'on mêle à l'air comburant de la vapeur d'eau, soit enfin que l'injecteur adopté soit à vapeur, le vent soufflé renferme de la vapeur d'eau en quantité notable. La décomposition de l'eau en ses éléments entraîne une dépense supplémentaire de chaleur, qu'il est facile de calculer.

En effet, pour dissocier 1 kilogramme d'eau, qui contient $\frac{1}{9}$ d'hydrogène (') il faut dépenser $\frac{1}{9} \times 28.780 \text{ calories} = 3.198 \text{ calories}$; or, les $\frac{2}{3}$ de kilogramme de carbone transformés par 1 kilogramme d'eau en CO ne développent que $\frac{2}{3} \times 2.463 = 1.649 \text{ calories}$, ce qui fait une différence de 1.549 calories par kilogramme d'eau décomposée. Le gazogène marche donc plus froid quand on travaille à l'eau, et ce refroidissement tend à augmenter la teneur en acide carbonique.

1. Nous prenons 28.780 calories pour la chaleur de combustion de l'hydrogène aux températures élevées sans condensation de la vapeur d'eau : l'oxygène du kilogramme d'eau transforme $\frac{2}{3}$ de C en CO.

Ce fait a encore été démontré expérimentalement par Bunte, dont nous rappelons ci-dessous quelques essais.

Quantité de vapeur d'eau par kilogramme de coke	Composition du gaz			
	CO ²	CO	H	Az
0	4,6 %	24,2	3,3	67,9
1,51	7,0	17,6	9,1	64,3
0,66	8,3	19,3	12,2	60,2
0,71	9,0	18,4	12,9	59,7
0,75	13,2	14,6	14,0	58,2
0,86	12,0	12,0	15,8	60,2
0,92	14,8	11,7	16,3	57,2

Le résultat est net ; la proportion d'azote diminue, celle d'hydrogène augmente ; par contre, la teneur baisse en oxyde de carbone.

Et pourtant le pouvoir calorifique des gaz engendrés par un kilogramme de carbone peut être augmenté notablement par le fait de l'injection de l'eau, ainsi qu'il ressort des chiffres suivants.

Eau par kil. de carbone .	0	0 ^k ,510	0,660	0,710	0,750	0,860	0,920
Calories du gaz produit .	5.263	5.334	6.001	5.800	5.347	5.944	5.413

Il y a évidemment bénéfice à injecter 660 grammes d'eau par kilogramme de carbone : le pouvoir calorifique maximum du gaz produit correspond à cette proportion moyenne qu'on n'a aucun intérêt à dépasser, à moins qu'on ne s'arrange de manière à maintenir quand même la température du gazogène. C'est ce qu'on fait d'ordinaire : dans la pratique, on donne fréquemment un kilogramme de vapeur par kilogramme d'antracite anglais, voire même davantage.

Il ressort de ce qui précède qu'en ajoutant à l'air comburant une certaine quantité de vapeur d'eau, on peut accroître l'effet utile du combustible.

Mais un excès d'eau abaisserait la température du gazogène et deviendrait nuisible, si on laissait tomber la température.

Il y a par conséquent avantage à marcher à allure chaude, car cette allure tolère plus d'eau et donne par suite un gaz plus riche.

A tous égards donc, il y a intérêt à chauffer préalablement l'air injecté en utilisant les chaleurs perdues et à réduire les pertes de calorifique par l'extérieur.

C'est en quelque sorte un théorème que l'on ne devrait jamais perdre de vue.

L'avantage de l'emploi de la vapeur surchauffée résulte des mêmes considérations.

La pratique justifie toutes nos précédentes observations : elle montre aussi que la quantité de vapeur à injecter varie avec la nature du combustible ; ainsi le coke tolère plus d'eau que les houilles, ce qui tient sans doute à ce que la distillation des produits volatils provoque un certain refroidissement du gazogène. Smidhammer a constaté que des lignites à 67,6 0/0 de carbone ne doivent pas recevoir plus de 0,2 kilogramme

de vapeur d'eau par kilogramme de combustible. Aussi suffit-il quelquefois d'employer simplement de l'air humide avec certains charbons.

Les quantités d'eau injectées doivent donc être l'objet d'une étude approfondie pour chaque espèce de charbon.

Voici des expériences que j'ai faites en 1898 sur un gazogène Pierson, servi de charbon maigre d'Anzin ; j'avais précisément pour but de chercher, dans ce cas particulier, le régime de marche le plus favorable. Le charbon avait un pouvoir calorifique de 7.642 calories ; il renfermait 8 0/0 de cendres et 9,2 0/0 de matières volatiles. Je procédai à deux journées d'expériences, d'une durée égale de onze heures, y compris une heure d'arrêt. Les résultats obtenus furent les suivants :

	Première journée	Deuxième journée
Consommation de charbon au gazogène . .	186 ^k , 0	204 ^k , 0
— de coke pour la chaudière	41 ^k , 5	35 ^k , 5
— de vapeur	206 ^k , 0	174 ^k , 0
Production de gaz à 0° et 760 ^{mm}	896, 4 M ³	892 ^k , 0 M ³
Pouvoir calorifique supérieur du gaz au M ³ . .	1.208 cal.	1.283 cal.
Calories du gaz par kilog. de charbon . . .	5.825 »	5.610 »

Nous voyons donc que 206 kilogrammes d'eau, soit 1 kil. 1 par kilogramme de charbon, ont produit un gaz moins riche, dans la première journée, que 174 kilogrammes d'eau, soit 0 kil. 83 par kilogramme de charbon, dans la seconde journée ; mais le rendement a été meilleur en cette seconde journée. Les gaz avaient d'ailleurs la composition suivante, d'après mes analyses.

	Première journée	Seconde journée
CO	19,7	22,0
H	20,7	20,2
CH ⁴	1,0	1,1
CO ²	3,1	1,9
O	0,6	0,6
Az	54,9	54,2
	41,4	43,3
	58,6	56,7
	100	100

La quantité d'eau injectée au gazogène produit encore un autre effet de la plus grande importance ; elle donne, suivant les cas, du mâchefer fondu ou des cendres pulvérulentes et cette différence de nature des scories sert de critérium au conducteur du gazogène pour gouverner son feu dans les meilleures conditions.

Ces résultats s'expliquent aisément. Les cendres de houille ou de coke fondent à des températures variables qui sont comprises entre 1000 et 1300° ; si la quantité d'eau maintient une allure froide, les cendres tombent en poussière ; à une température plus élevée, elles fondent et se combinent avec le fer des grilles et l'alumine des parois réfractaires pour former des silicates doubles d'alumine et de chaux ou de fer, très fusibles, c'est-à-dire des mâchefers qui sont donc l'indice d'une marche à allure chaude.

Ces cendres fusibles peuvent nuire à la circulation de l'air en empâtant les couches de combustible ; il faut donc leur prévoir un écoulement facile. A cet effet, il y a des précautions à prendre dans le tracé du profil de la cuve. On a proposé aussi d'augmenter leur fluidité en jetant dans le foyer un fondant approprié, calcaire ou siliceux, suivant le besoin : cette manière de faire ne me paraît par bien indiquée pour le genre de gazogène pour moteurs auquel s'applique uniquement notre étude.

La vapeur d'injection est souvent produite par un petit générateur spécial, qui présente deux avantages indiscutables, nous l'avons déjà dit : il donne à la conduite du feu une liberté d'allure et une élasticité de fonctionnement très appréciée, surtout dans les gazogènes qui emploient un injecteur genre Kœrting pour le soufflage ; de plus, il se prête bien à la surchauffe de la vapeur. Par contre, l'entretien d'un feu spécial grève d'une charge coûteuse le bilan de l'appareil, alors même qu'on utiliserait les menus ou les escarbilles provenant des anthracites de la cuve. Mieux vaut assurément produire la vapeur par récupération des chaleurs perdues ; c'est ce qui a lieu quand on place un vaporisateur sur le gazogène, contre la trémie de chargement, ou dans les conduites de départ des gaz chauds, ou bien encore en logeant un serpentín dans la garniture isolante de la cuve. Il résulte de ces manières de faire une économie que j'évalue à 10 0/0 ; elle compense largement les dépenses d'entretien imposées par ce genre d'appareils. A mon sens, la meilleure disposition consiste à installer le vaporisateur sur le chemin des gaz chauds, parce que la quantité de vapeur produite varie ainsi proportionnellement à l'ardeur du foyer ; le débit de vapeur croissant à mesure que l'allure devient plus chaude, il en résulte un réglage automatique de cette allure qui maintient un équilibre stable très avantageux. Mais ces générateurs sont exposés à se détériorer rapidement s'ils ne sont établis dans d'excellentes conditions, et l'on doit toujours redouter une obstruction des serpentins par accumulation de dépôts calcaires.

Les considérations qui précèdent permettent de prévoir que la composition des gaz pauvres dépend d'éléments nombreux et qu'elle doit être extrêmement variable.

Voici quelques résultats d'analyse, qu'il est utile de rapprocher et de comparer.

Composition du gaz Wilson

(d'après M. Rowan.)

	Houille de Durham	Gailloterie du Yorkshire	Charbon belge	Rebuts de charbons	Bon charbon, en charge plus haute, avec excès de vapeur
CO.	26,89	23,41	23,60	19,83	26,48
H	11,55	13,82	10,55	12,15	12,42
C H ⁴	1,45	2,22	3,05	3,61	5,91
C O ²	4,00	4,69	5,25	7,14	4,11
Az.	56,11	55,86	57,55	57,24	51,06

M. Spangler a relevé la composition suivante du gaz obtenu avec de l'antracite-anglais renfermant 80,41 de carbone fixe et 6,88 de carbures volatils.

CO	26,08	} 27,46
H	0,33	
CH ⁴	1,05	
Az	65,81	} 72,54
O	0,25	
CO ²	6,50	

Le gaz mixte Taylor a la composition suivante, quand on emploie de la houille anthraciteuse.

CO	27,0	} 40,2
H	12,0	
CH ⁴	1,2	
CO ²	2,5	} 59,8
Az	57,3	

Ces chiffres sont extraits d'une notice publiée par les constructeurs du gazogène Taylor; ils correspondent sans doute à une faible injection de vapeur d'eau; mais on pourrait aisément forcer la proportion d'hydrogène. Remarquons encore que certains combustibles donnent un gaz plus riche en carbures.

Le gaz ci-dessous est un gaz de gazogène Buire-Lencachez, extraordinairement riche : la teneur en hydrogène a augmenté sensiblement et il y a des carbures en quantité notable.

H	20,00	} 45
CO	21,00	
CH ⁴	3,50	
C ² H ⁴	0,50	} 55
O	0,50	
CO ²	5,00	
Az	49,50	

En opérant à allure froide avec grand excès d'eau, Mond fabrique des gaz à 26 0/0 d'hydrogène.

M. Schröter évalue ainsi qu'il suit la composition moyenne des gaz pauvres.

CO	22 à 26
H	17 à 19
CH ⁴ , etc	5 à 7
CO ²	4 à 6
Az	44 à 50

On trouve rarement une aussi forte proportion de carbures de distillation et aussi peu d'azote : c'est donc un gaz excellent et exceptionnel.

Etude des produits

Obtenus avec de l'anthracite des usines de Garnaut (sud du pays de Galles)
par M. Foster

H.	18,73	}	44,42
CO	25,07		
CH ⁴	0,31		
C ² H ⁴	0,31	}	55,58
Az	48,98		
CO ²	6,57		
O.	0,03		

La densité de ce gaz était de 0,833 et son pouvoir calorifique supérieur par mètre cube atteignait 1.432 calories.

Etude des produits d'un gazogène Dowson

par M. Monaco, de Turin.

(Essais faits à Canale, Piémont).

Composition de l'anthracite employé

Carbone	92,90
Eau	1,70
Cendres	3,87
Soufre	0,83
	<hr/>
	100,00

Gaz produit

H.	16,67
CO	27,50
CO ²	8,40
O.	0,90
Az	46,73
	<hr/>
	100,20

Etude des produits d'un gazogène Dowson

par M. Witz.

(Essais faits à Sabadell, Espagne)

Anthracite du pays de Galles

(Great Mountain de Llanelly)

Carbone fixe	90 à 92 %
Cendres	1 à 2

Gaz

CO ²	4,8
O.	1,2
Az.	51,1
	<hr/>
	57,1
CO.	25,4
H.	16,5
CH ⁴	1,0
	<hr/>
	42,9

Pouvoir calorifique supérieur par mètre cube à 0° et 760 ^{mm}	1.287
Quantité de gaz produit par kilogr. d'anthracite.	4.000 lit.

M. Lencauchez, a donné le tableau ci-dessous qui résume de nombreuses observations personnelles.

	Gazogène Siemens modifié	Gazogène Lencauchez de St-Denis	Gazogène Lencauchez d'Anzin Escaut-et-Meuse	Gazogène Lencauchez de Paris (C. Say)	Gazogène Lencauchez de Geugnon Saône-et-Loire	Gazogène Lencauchez de Sandvickon (Suède)	Gazogène Buire-Lencauchez n° 16 bis
Nature du charbon	Houille noisettes à 32 % de matières volatiles	Coke n° 2 d'usine à gaz	Poussières gras et maigres mélangés	Anthracite à 12 % de matières volatiles	Poussier de houille à 14 % de matières volatiles	Houille d'Ecosse en noisettes à 41 % de matières volatiles	Anthracite
Composition en volumes :							
H.	16,85	10,83	6,88	20,00	12,27	11,00	18,8
CO	22,75	24,76	25,84	21,00	22,91	26,65	21,3
CH ⁴	2,05	1,10	3,85	3,50	4,62	4,86	4,1
C ² H ⁴	0,00	1,38	0,57	0,50	1,00	0,27	0,5
O.	0,00	0,00	0,00	0,50	0,62	0,00	0,7
CO ²	4,55	3,57	0,45	5,00	2,96	3,42	1,6
Az	58,35	61,36	62,41	49,50	53,62	53,80	53,0
Pouvoir calorifique par mètre cube à 0 degré et 760 millimètres.	4.303 cal.	4.212 cal.	4.362 cal.	4.519 cal.	4.535 cal.	4.542 cal.	4.548 cal.
Observations :	Air chaud mélangé de vapeur.					Air froid soufflé par ventilateur, cendrier fermé.	Air chaud à 300° environ cendrier fermé.

Voici un autre tableau comparatif plein d'enseignements.

Nature des gaz	Composition d'après MM. Schilling, Dowson, Lencauchez, etc.					Pouvoir calorifique par m ³
	H	CO	CH ⁴	CO ²	Az	
Gaz Siemens au coke (A)	traces	25,7	»	4,5	69,8	773
Gaz à l'eau (B)	49,2	43,8	0,3	2,7	4,0	2.884
Mélange 4 A + 1 B	11,2	30,8	»	2,2	55,8	1.223
Gaz mixte normal	12,7	23,2	»	8,8	55,3	1.026
Gaz avec excès de vapeur d'eau normal (M. Pfeifer)	19,9	16,0	»	14,2	49,9	1.081
— (M. Schilling)	17,6	29,4	»	5,9	47,1	1.363
Gaz Dowson — (M. Schilling)	17,0	23,0	2,0	6,0	52,0	1.313
à l'anthracite anglais	18,4	26,8	0,6	7,2	47,0	1.346
Charbons divers	18,2	18,2	1,0	9,0	53,5	1.115
Charbons allemands	21,9	15,9	0,7	11,4	50,7	1.018
Gaz Mond.	25,0	13,0	2,3	12,9	46,8	1.386

Comme complément et justification des renseignements généraux qui précèdent, nous croyons utile d'extraire d'une étude faite à Deutz, sur un gazogène Dowson, les renseignements et les prescriptions qui suivent.

La pression de la vapeur était au minimum de 3, au plus de 4, 5 atmosphères; on

ne dépassait pas une pression de 90 millimètres d'eau au gazogène, et l'on évitait avec soin d'introduire un excès d'air, tout en cherchant à garder une grande hauteur de charbon incandescent. Le gaz produit avait la composition moyenne ci-dessous :

CO	20 à 22 %
H	12 à 16
CH ⁴	6 à 8
CO ²	0 à 4
Az	62 à 50
Pouvoir calorifique.	1.400 calories

La température de la vapeur surchauffée était de 190°; on a reconnu qu'il y avait des inconvénients à commander plus de deux gazogènes par une chaudière.

Les conseils de direction formulés à la suite de ces essais, ont été les suivants :

« Il est bon de charger le combustible toutes les dix minutes et l'on peut, à cet effet, placer dans la salle des gazogènes une horloge sonnante toutes les dix minutes.

On recommande de suivre la marche des appareils en dosant l'acide carbonique produit : la teneur ne doit pas dépasser 6 à 7 0/0; s'il y en avait davantage, il y aurait lieu de diminuer l'afflux d'air ou bien cela prouverait qu'il y a dans la cuve une hauteur insuffisante de charbon.

Après deux jours d'arrêt, on fera bien de vider le contenu du gazomètre sur les toits; le scrubber doit être nettoyé tous les mois. »

Notre expérience personnelle nous a fait constater qu'il est extrêmement utile d'installer sur tout le parcours du gaz, depuis la cuve du gazogène jusqu'au gazomètre, qui recueille et accumule une provision de gaz, une série de manomètres à eau qui permettent d'apprécier à tout moment les pertes de charge subies à la traversée de la cuve du scrubber, des barillets, des épurateurs, etc.; c'est une indication fort utile pour la conduite du feu.

Le coke peut être employé sans difficultés dans les gazogènes de moteurs; on a obtenu ainsi de fort beaux résultats en Allemagne.

Une belle étude de M. E. Meyer (1), sur les gazogènes des stations hydrauliques de Bâle, nous fournit d'intéressantes données sur la production des gaz pauvres au moyen du coke. Cette installation faite par les ateliers de Deutz, se compose de trois gazogènes semblables à ceux que nous décrirons plus loin, de deux petites chaudières débitant de la vapeur surchauffée, de deux épurateurs à la sciure de bois et de quatre scrubbers. Les trois gazogènes sont rangés de front sur une même ligne et ils comprennent entre eux les deux chaudières; chaque épurateur est accouplé aux deux scrubbers.

Le gazogène était chargé de coke, dont la composition était la suivante :

Eau (perdue à 108°)	0,62 0/0
Cendres	9,70
Carbone et combustible	89,68
	<hr/>
	100,00

1. « Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure », tome XXX, 1896.

L'analyse élémentaire de ce coke a donné les résultats ci-dessous :

Carbone	87,62 0/0 en poids.
Hydrogène	0,81
Azote et acide carbonique	0,53
Soufre	0,72
Cendres	9,70
Eau	0,62
	100,00

La formule allemande donnant les pouvoirs calorifiques,

$$Q = 8100 C + 29000 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2500 S - 600 W \quad (4)$$

assigne à ce coke un pouvoir calorifique inférieur de 7.338 calories par kilogramme, vapeur d'eau condensée ; à la bombe Mahler, on a relevé un pouvoir supérieur de 7.247 calories ; le poids de la vapeur d'eau produite étant de 72,9 gr., le pouvoir calorifique inférieur, vapeur d'eau non condensée, ressort à 7.202 calories en moyenne.

Dans un essai commencé à 9^h,40^m du matin, on a recueilli du gaz de composition variable, suivant le tableau ci-dessous, qui témoigne néanmoins d'une marche régulière.

	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	Moyennes
Heures	9,40	10,55	11,59	12,56	2,04	3,15	4,20	8,10	
Gaz : CO ²	6,5	4,8	4,2	4,7	5,0	4,0	4,8	4,6	4,8
CO	26,6	28,2	27,8	26,7	26,6	29,0	28,4	27,8	27,6
CH ⁴	1,3	2,7	2,6	1,8	2,2	1,7	2,0	1,6	2,0
H	6,8	5,9	6,4	8,8	9,1	8,0	5,8	5,1	7,0
O	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0
Az	58,7	59,0	59,0	57,9	57,1	57,3	58,8	60,9	58,6

Le pouvoir calorique inférieur calculé de ce gaz moyen est de 1.190 calories par mètre cube à 0° et 760 millimètres de pression, vapeur d'eau non condensée.

Le calorimètre Junkers a donné 1.202 calories dans les mêmes conditions.

Vapeur d'eau condensée, on trouverait 1.254 calories.

La consommation horaire de coke a été déterminée avec grand soin :

Coke consommé par heure dans le gazogène	102 ^k ,4
— dans la chaudière	11,2
Total	113 ^k ,6
Eau évaporée dans la chaudière	66 ^k ,2
Vapeur produite par kilogramme de coke	6 ^k ,360
Pression de la vapeur engendrée	4 ^k ,33
Température de la surchauffe	234°
Gaz pauvre engendré par kilogr. de coke	4.740 litres.
Vapeur insufflée par kilogr. de coke	0 ^k ,647

Le rapport entre les quantités de charbon brûlées à la chaudière et au gazogène variait du 1/7 au 1/9.

1. S est la quantité de soufre et W l'eau hygroscopique accompagnant le charbon. Le facteur 29.000 montre que Q est le pouvoir inférieur.

Le calcul a démontré à M. Meyer que 54 pour cent seulement de la quantité de vapeur envoyée au gazogène sont dissociés; 46 pour cent sont donc produits en pure perte. Et pourtant la proportion de vapeur fournie dans cet essai par kilogramme de coke (0^k,647) est normale ! Ce résultat ne serait-il pas dû à ce que le mélange d'air et de vapeur surchauffée traverse trop rapidement les couches de carbone incandescent, au contact desquelles l'acide carbonique se réduit et la vapeur se dissocie ? Cette hypothèse a paru plausible à l'ingénieur distingué dont nous rapportons les recherches et il a dès lors cherché à ralentir cette vitesse de passage en employant deux gazogènes pour alimenter les moteurs mis précédemment en expérience. Il a donc institué deux essais comparatifs, faits avec un ou deux gazogènes, pour une même production de gaz. Voici les résultats obtenus :

	MARCHE	
	à un gazogène	à deux gazogènes
Durée de l'essai	3 ^h ,17 ^m	3 ^h ,54 ^m
Consommation horaire de coke dans le gazogène	86 ^k ,0	103 ^k ,5
— d'eau dans la chaudière	52 ^k ,8	65 ^k ,4
Vapeur d'eau insufflée par kilogr. de coke	0,614	0,642
— dissociée par kilog. de coke au gazogène	0,425	0,310
— non dissociée	31 %	52 %
Température des gaz à la sortie du gazogène	650°	530°
Pouvoir calorifique du gaz produit	1196 cal.	1163 cal.
Température de surchauffe de la vapeur	174°	172°

Cet essai a démontré péremptoirement à M. Meyer que son hypothèse était erronée et il y a renoncé : à ce résultat très net de l'épreuve se sont jointes d'ailleurs quelques données fort intéressantes.

Et d'abord, on voit que la consommation de combustible est de 168^k,9 avec deux gazogènes au lieu de 138^k,8 avec un seul appareil ; le travail étant resté le même, on peut conclure à une augmentation de 21,6 0/0 dans la consommation. Il est donc préférable d'employer un gazogène unique que d'en accoupler deux, pour une production donnée de gaz.

Malgré qu'on ait réduit au minimum la quantité de vapeur injectée dans la marche à deux gazogènes, la dépense de ce chef a néanmoins été plus grande ; par contre, il y a eu moins de vapeur dissociée dans le second cas que dans le premier. Le gaz sortait plus chaud des appareils dans le premier essai que dans le second. Il résulte de tout cela qu'il se dissocie d'autant plus de vapeur d'eau que l'allure du fonctionnement est plus chaude ; il y a donc un réel et indiscutable intérêt à marcher à allure chaude et à surchauffer préalablement l'air introduit au gazogène, conformément aux indications de la théorie que nous avons exposée.

M. Meyer a aussi expérimenté longuement, à Zurich, sur des gazogènes, genre Dowson, construits par M. Hirzel, de Leipzig.

On marchait à l'anhracite de Charleroi. La vapeur d'eau était surchauffée et l'air insufflé était préalablement réchauffé par son passage dans l'enveloppe du gazogène.

La pression du gaz à la sortie du gazomètre était de 40 millimètres d'eau. Le pou-

voir calorifique inférieur moyen du gaz produit a été de 1238 calories. Il renfermait 23,5 d'oxyde de carbone et 18,8 d'hydrogène.

M. Meyer a constaté que le pouvoir calorifique du gaz subissait d'énormes variations allant de 1.185 à 1.300 calories, quelquefois même de 1.040 à 1.358, ce qui constitue un écart de plus de 32 pour cent. Dans une journée de travail de dix heures, le gaz est d'ordinaire plus constant le soir que le matin.

C'est après le chargement du gazogène que l'on observe les plus fortes variations : aussitôt après l'introduction du charbon frais le pouvoir baisse légèrement, puis il se relève rapidement pour monter encore quelque temps ; mais il décroît ensuite faiblement et tombe enfin très brusquement. Aussi M. Meyer conseille-t-il de faire les chargements à courts intervalles et avec peu de charbon à la fois ; une alimentation continue aurait, à cet égard, de grands avantages. C'est à l'introduction de charbon frais et à toutes ses conséquences qu'il faut attribuer les oscillations constatées dans le pouvoir calorifique, bien plutôt qu'à l'épaisseur de la couche de charbon dans la cuve du gazogène. Les variations de pression à la chaudière ont assez peu d'influence sur la richesse du gaz ; mais la production du gaz change beaucoup, parce que le souffleur débite plus ou moins d'air et de vapeur. Une forte surchauffe augmente la teneur en hydrogène, sans améliorer beaucoup la richesse du gaz.

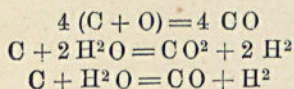
Un excès de vapeur surchauffée conduit à une forte dépense de combustible dans la chaudière sans qu'il y ait compensation par ailleurs ; on peut même constater quelquefois que la vapeur traverse le gazogène sans se condenser et qu'elle arrive alors aux laveurs, qu'elle tend à échauffer en pure perte. Il faut donc éviter avec soin de fournir trop de vapeur, même surchauffée, au gazogène, à moins qu'on ne se propose de recueillir les produits ammoniacaux ; dans ce cas en effet on doit marcher à allure plus froide, pour éviter de décomposer les produits nitreux. Mais la récupération de ces produits ne peut avoir lieu que dans des installations spéciales.

Les essais précédents et les résultats que nous venons de rapporter montrent combien nombreux sont les éléments à envisager dans un essai de fabrication de gaz pauvre en vue d'alimenter des moteurs. C'est ce qui explique les discordances apparentes entre les conclusions déduites de diverses expériences dans lesquelles on n'avait pas tenu compte de tout ce qui peut influencer sur le rendement.

Ce rendement est en somme meilleur que celui des chaudières à vapeur.

Nous allons le démontrer par la théorie et par la pratique.

On peut calculer le rendement théorique d'un gazogène par les réactions chimiques qui se produisent dans la cuve ; ce travail a été fait par les ingénieurs de Deutz auxquels nous empruntons les considérations résumées ci-après.



Rappelons les réactions principales :

La première réaction, donnant du gaz à l'air, dégage 116.000 calories et fournit

89,2 mètres cubes de CO ; il reste comme résidu de l'air employé 178,4 mètres cubes d'azote.

La seconde absorbe 28.200 calories avec production de 22,3 mètres cubes de CO² et 44,6 d'hydrogène.

Cette réaction absorbe également 28.600 calories et donne 22,3 mètres cubes de CO et 22,3 d'hydrogène.

En somme, le gaz de gazogène renferme normalement 22,3 d'acide carbonique, 115,5 d'oxyde de carbone, 66,9 d'hydrogène et 178,4 d'azote, formant un volume total de 379 mètres cubes ; sa composition centésimale est la suivante :

CO	29,4
H	17,6
CO ²	5,9
Az	47,1
	<hr/>
	100,0

6 équivalents de carbone, soit 72 kilogrammes, sont intervenus dans l'opération ; 1 kilogramme donne, par suite, 5,26 mètres cubes de gaz.

Son pouvoir calorifique moyen sera de 1.363 calories par mètre cube à 0° et 760 millimètres.

Sur ces données, nous pourrions calculer le rendement théorique d'un gazogène ; 72 kilogrammes de charbon pourraient dégager :

$$72 \times 8.080 = 581.760 \text{ calories.}$$

or le gaz en donnera :

$$1363 \times 379 = 516.577$$

le rendement théorique est par suite de 88 pour cent.

En réalité, on obtient 379 mètres cubes à 1.320 calories environ ; mais il faut dépenser environ 8 kilogrammes de charbon pour produire la vapeur employée et la dépense de charbon monte à $72 + 8 = 80$ kilogrammes. Le rendement réel est donc égal à :

$$\frac{1.320 \times 379}{80 \times 8.080} = \frac{500.280}{646.400} = 0,774$$

Le rendement générique, égal au quotient du rendement réel par le rendement théorique, est de :

$$\frac{0,774}{0,88} = 0,88 :$$

Ce rendement n'est pas très éloigné de l'unité.

Le gazogène ne pourra donc guère être perfectionné.

Théoriquement, le mètre cube de gaz à 1.363 calories coûterait 180 grammes de charbon ; en réalité, il faut employer généralement 225 grammes pour obtenir 1 mètre cube à 1.320 calories. Le rendement est alors de 80 pour cent.

M. Dowson a quelquefois relevé des résultats meilleurs encore : ainsi, à Chelsea, le mètre cube a été généré par 165 grammes d'anthracite et 33 de coke.

Dans un puissant gazogène de 250 chevaux, le savant ingénieur anglais a même produit 4.800 litres de gaz à 1.552 calories pour un kilogramme d'anthracite et 140 grammes de coke.

Cela ferait donc un rendement de 82 pour cent.

Il est nécessaire de confirmer ces chiffres et de les soumettre à une discussion serrée.

D'après ce qui précède, l'évaluation du rendement d'un gazogène peut se poser en ces termes : étant donnée une consommation déterminée d'un combustible solide, mesurer d'une part la chaleur disponible dans ce combustible et, d'autre part, la chaleur que peut développer par sa combustion le gaz provenant de ce combustible. Le rapport de ces deux quantités définit le rendement réel du gazogène.

L'opération que nous venons de décrire exige une longue série de mesures physiques et chimiques : elles doivent être à la fois simples et exactes. Il faudra peser le combustible, déterminer sa puissance calorifique, évaluer les quantités de vapeur d'eau fournies et le calorique correspondant, recueillir les gaz produits, mesurer leur volume, les analyser et déduire de cette analyse ou chercher directement leur pouvoir calorifique ; on le voit, c'est un travail considérable et qui exige une mise en œuvre d'appareils assez laborieuse et quelquefois coûteuse. Notons d'ailleurs qu'il faut, pour aboutir à de bons résultats, prélever habilement les échantillons de combustible solide dans l'approvisionnement qui en est fait, s'assurer que les cendres produites ne renferment pas de charbon mal brûlé, estimer la teneur en eau hygroscopique, suivre les phénomènes de combustion et de réduction dans la cuve de l'appareil, évaluer les températures, procéder à de fréquentes prises de gaz, vérifier les appareils volumétriques de mesure, etc. On ne pourra établir la valeur du rendement que sur ces nombreuses données, dont il en est quelques-unes qui s'obtiennent péniblement.

Nous allons passer successivement en revue les diverses méthodes qu'il convient d'appliquer pour aboutir à des chiffres précis.

Le pouvoir calorifique du gaz est la première donnée à recueillir.

Il résulte de tous les chiffres que nous venons de citer et des considérations que nous avons exposées que le pouvoir calorifique des gaz pauvres est essentiellement variable. Des nombreuses analyses que j'ai faites à l'aide de ma bombe eudiométrique, je suis autorisé à déduire que le pouvoir *supérieur* (vapeur d'eau condensée) est compris dans les limites de 1.000 à 1.500 calories. Le plus souvent il est compris entre 1.100 et 1.300 calories : mais j'ai trouvé des pouvoirs de 1.400 et le gazogène Gardie sur lequel j'ai fait des essais à Nantes, en 1887, m'a fourni un gaz très voisin de 1.500, produit par de l'anthracite anglais d'excellente qualité.

Étant donné que le gaz change à tout moment de composition et de richesse, il est requis de faire un très grand nombre de prélèvements d'échantillons, au cours d'une expérience : je recueille un même volume toutes les demi-heures, par exemple,

et je mélange ces diverses prises, pour déterminer les pouvoirs moyens; la matinée et la soirée sont généralement disjointes.

La mesure du volume de gaz engendré est une opération beaucoup plus difficile. La meilleure solution du problème est fournie par l'emploi d'un compteur à gaz; j'ai procédé ainsi en plusieurs circonstances; mais on ne trouve pas toujours des compteurs d'un assez fort débit, et il faut alors opérer autrement. On peut se servir, avec une approximation suffisante, de la cloche du gazomètre. Voici de quelle manière devra être dirigée l'expérience; on s'assure d'abord de l'étanchéité de la cloche, en constatant que, valves fermées, elle ne baisse pas, la température et la pression restant constantes; cela fait, on remplit la cloche et l'on ferme le robinet d'amenée du gaz, de telle sorte que le moteur puise tout son gaz dans le gazomètre, dont on observe la chute en fonction du temps. Connaissant la section horizontale et la chute, on calcule aisément le volume consommé en un temps x . Comme la cloche pourrait être inclinée, on s'expose à commettre une légère erreur sur sa section horizontale; on risque d'autre part d'être trompé par une oscillation irrégulière de la cloche, et il est sage de prendre plusieurs repères. Il est souvent facile de mesurer les déplacements de la cloche par le mouvement des 4 contrepoids, qui équilibrent sa masse, et dont les chaînes pendent le long des colonnes de guidage; on y fixe des index et on relève leurs variations de hauteur. La moyenne des quatre lectures donne une expérience très précise et d'une rigueur comparable à celle des compteurs. Les lectures simultanées faites au baromètre, au manomètre à eau et au thermomètre fournissent les données dont on a besoin pour réduire le volume à 0° et 760 millimètres.

La connaissance du pouvoir calorifique moyen du gaz et du volume débité par l'appareil donne la quantité de chaleur sortie du gazogène; il s'agit, pour calculer le rendement, de déterminer aussi le pouvoir calorifique moyen du combustible utilisé et le poids consommé.

La mesure du pouvoir calorifique du combustible constitue une opération assez délicate.

Il n'y a qu'une seule bonne méthode de détermination du pouvoir calorifique des combustibles solides: c'est la méthode du calorimètre. Les meilleurs calorimètres sont ceux créés par M. Berthelot et qui ont servi de type à M. Malher. Toutefois le prix d'achat élevé de ces appareils et leur manœuvre toujours délicate ne mettent pas ces appareils à la disposition de tout le monde, et l'on peut avoir à rechercher d'autres moyens d'appréciation. Les procédés et les formules (1) basés sur l'analyse élémentaire sont tous contestables; toutefois nous ferons peut-être une exception pour le procédé et la formule de M. Goutal. Ce chimiste détermine la quantité C de carbone fixe (carbone cokifiable) et A de produits volatils, et il applique la formule $Q = 8150 C + mA$, dans laquelle m est un paramètre variable, égal à 13.000, si A est compris entre 2 et 15 %, à 10.000 pour une valeur de A variant de 15 à 30 et 9.500 pour A supérieur à 30 ou 35.

1. Nous visons ici les formules de Dulong, de Scheurer-Kestner, de Cornut, de Ser, de l'Association allemande, etc. bien connues de nos lecteurs.

Cette formule donne d'assez bons résultats et nous en recommandons l'emploi quand on n'a pas de calorimètre (1).

Voici un certain nombre de résultats empruntés à des essais que l'on a le droit de considérer comme bien faits.

Houilles sèches à longue flamme.

	Pouvoir calorifique en calories par kilogramme
Houille type (à 76 C, 5 H, 15 O)	7200
— de Decazeville (Bourran)	7486
— d'Anzin (Lagrange)	7642
— de Blanzay (Sainte-Marie)	7866
— d'Anzin (Lambrecht)	8600
— de Nœux (fosse n° 1, C = 83)	8790
— de Douvrin-Lens (C = 91)	8640
— d'Aniche (Ferdinand)	8426
— de Charleroy (Gilly)	8550
— — (Sartes-Moulin)	8430

Anthracites.

Anthracite type (93 C, 2 H, 3,5 O)	7800
— de la Mure (Isère)	7468 à 8216
Houille anthraciteuse de Blanzay	7773
— de Commentry	7850 à 8456
— de la Grand'Combe	7852
— du Creusot	8404
— de Kébao (Tonkin) (C = 93)	8532
Anthracite de Pensylvanie (C = 95)	8256

Lignites.

Lignite de Trifail (Styrie)	6284
— de Vaugirard	5536
— à 70 C et 5 H	6000
Braunkohle du Rhin à 60 0/0 d'eau	1700 à 2400
Lignite de Styrie	3800

Tourbe.

Tourbe de Bohême brute	3774
— pure	5283

1. On peut déterminer assez facilement la teneur A d'un charbon en matières volatiles en le chauffant au rouge vif à l'abri de l'air dans un creuset de platine fermé, sur un fort brûleur de Bunsen; la flamme doit être réductrice et envelopper entièrement le creuset; le couvercle du creuset sera à cheminée pour faciliter le départ et la combustion des gaz. J'opère généralement sur 1 ou 2 grammes de combustible. Le poids de coke résiduel donne A par différence. Pour évaluer la quantité de cendres, on incinère 10 grammes de coke très sec dans un creuset ouvert, placé dans une flamme oxydante; on se sert aussi fort commodément d'un moufle chauffé à blanc. Il faut opérer dans un creuset plat ou très évasé et chauffer graduellement, pour éviter les projections, et remuer souvent à la spatule de platine. L'opération est terminée lorsque l'on ne voit plus de points noirs sur la cendre; s'ils persistaient, on les ferait disparaître en arrosant avec une solution d'azotate d'ammoniaque; on peut enfin humecter avec quelques gouttes d'alcool. Si l'on veut connaître la nature des produits volatils, on emploiera avec succès l'appareil Arduin, construit par la compagnie pour la fabrication des compteurs à gaz: il permet de recueillir et de condenser les gaz, les goudrons et tous les produits de la distillation et d'étudier leur nature.

Cokes.

Coke métallurgique de la Grand'Combe	7010
— de la Ruhr	7057
Coke de Houille de Commentry	7665
— demi-grasse d'Anzin	7787
Coke d'anthracite de Pensylvanie	7528
— de pétrole d'Amérique	8057

M. Bunte a démontré que, en tenant compte des cendres, le pouvoir des cokes métallurgiques allemands de provenances diverses varie de 7.700 à 8.000 calories.

Nous ne donnons évidemment ces chiffres qu'à titre d'indication générale.

Le charbon doit être pesé avec le plus grand soin ; il est de bonne règle de défalquer l'humidité qu'il renferme accidentellement, en le passant à l'étuve, et en l'y maintenant une journée au moins, à une température au plus égale à 50°.

Une expérience de rendement doit durer au moins dix heures (1) ; en effet, c'est la condition indispensable d'une mesure de consommation de charbon pouvant être considérée comme sérieuse. L'essai doit commencer après un chargement de gazogène et se terminer de même, aussitôt une charge faite, le niveau du combustible frais étant dans les deux cas à la même hauteur : dans ces conditions, le combustible se trouve dans le même état, les gaz riches ont distillé de même et le coke formé s'est tassé identiquement, surtout si le décrassage du feu a été opéré peu de temps avant la première et la dernière charge. Il est absolument illusoire de vouloir faire des corrections par le calcul des dimensions de la cuve, lorsque le niveau final n'est pas le niveau initial ; ce genre de compensation est spécieux et fictif et il peut devenir absolument mensonger ; il faut le proscrire de tout essai sérieux.

Les expériences officielles de rendement sont fort rares, parce qu'elles sont longues, ingrates et difficiles, et qu'on trouve rarement des industriels qui puissent accepter le dérangement que leur imposerait fatalement une si sérieuse épreuve. Nous pouvons néanmoins faire connaître quelques résultats.

M. Humphrey a publié l'étude qu'il a faite des gazogènes Mond à Winnington et j'en extrais les données caractéristiques (2).

Composition du charbon employé :

Humidité à 100°	8,60
Carbone	62,69
Matières volatiles	18,29
Cendres	10,42
	100,00
Pouvoir calorifique (supérieur)	6.786 calories.

1. On a publié des essais d'une heure qui n'ont absolument aucune valeur.
 2. « The Mond Gas Producer Plant and its application », par M. Humphrey ; publié dans les « Proceedings of the Institution of civil Engineers », t. CXXIX, 1897 ; appendice I, table I.

Composition du gaz engendré (en volumes) :

Anhydride carbonique	16,00
Oxyde de carbone.	11,00
Hydrogène.	29,00
Carbures.	2,00
Azote	42,00
	100,00
Densité de ce gaz.	0,788
Pouvoir calorifique du gaz sec (vapeur d'eau condensée à 18°)	1.414,3 calories.
Production de gaz par kg. de charbon.	3.749 m ³
Chaleur du gaz : 3.749 × 1.414,3 =	5.302 calories.
Chaleur du charbon	6.786 —
Rendement thermique.	78,1 p. 100.

En tenant compte du charbon retrouvé dans les cendres et les scories du gazogène, M. Humphrey a même évalué le rendement à 84 0/0 : il a sans doute voulu indiquer ainsi le maximum d'effet utile de l'appareil.

Un autre essai fait à Winnington et poursuivi trois journées sans arrêt, a conduit à un rendement de 81 0/0.

Les essais de M. Meyer à Bâle lui ont permis de déterminer le rendement des gazogènes fonctionnant au coke : ils sont encore excellents.

Le savant expérimentateur a publié les chiffres ci-dessous.

Pouvoir calorifique du coke (vapeur d'eau condensée)	7.247 calories.
Coke consommé par heure dans le gazogène.	102,4 kg.
— — dans la chaudière	11,2 —
Eau évaporée dans la chaudière	66,2 —
Pression de la vapeur	4,33 —
Température de la surchauffe.	234°
Gaz pauvre engendré par kg. de coke au gazogène.	4.740 litres.
Pouvoir calorifique du gaz pauvre.	1.254 calories.

Tenant compte de tout le coke consommé dans l'opération, on trouve 4.270 litres de gaz par kilogramme ; les calories correspondantes égalent 5.354 ; d'où un rendement de

$$\frac{5.354}{7.247} = 73,8 \text{ 0/0}$$

M. Meyer, prenant le pouvoir inférieur du coke et du gaz, a établi le bilan thermique de la gazéification sur des bases un peu différentes, dont le détail est extrêmement instructif.

	Calories.
Chaleur disponible.	113,6 × 7202 = 818.100
— du combustible brûlé sous la chaudière	11,2 × 7202 = 80.700
— du combustible employé dans le gazogène	102,4 × 7202 = 737.400
— de la vapeur d'eau formée.	45.400

Pertes de la chaudière	80.700 — 45.400 = 35.300
Chaleur mise en œuvre par la gazéification	737.400 + 45.400 = 782.800
Chaleur retrouvée dans les gaz	583.400
Pertes dans le gazogène	782.400 — 583.400 = 199.400

En somme, on perd :

Dans la chaudière	$\frac{35.300}{818.100} = 4,3 \text{ 0/0}$
Dans le gazogène	$\frac{199.400}{818.100} = 24,4 \text{ 0/0}$

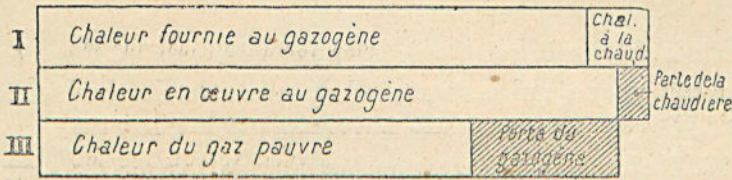


Fig. 26.

Le diagramme de la figure 26, résume ces calculs.

Mes essais faits à Loos, en marche industrielle, avec intercalation de longs arrêts, ont conduit à des résultats moins brillants, mais qui ont un caractère essentiellement pratique (1).

Première journée.

Calories du gaz		1.083.334
— du charbon du gazogène	1.421.412	} 1.724.362
— du coke de la chaudière	302.950	
Rendement thermique		62,8 p. 100

Deuxième journée.

Calories du gaz		1.144.436
— du charbon	1.558.968	} 1.818.118
— du coke	259.150	
Rendement thermique		62,9 p. 100

Ces résultats réels sont ceux que donne une marche courante et continue, sans correction d'aucune sorte, en travail variable, les appareils fonctionnant suivant les besoins de l'industrie à pleine ou demi-charge, avec arrêts momentanés, accidentels ou réglementaires. La portée de nos constatations est considérable à cet égard. A noter que le gazogène a conservé son feu à partir du samedi soir durant 37 heures, en brûlant environ 2,25 kilogrammes de charbon par heure, et que le travail a pu être repris sans difficulté le lundi matin.

Nous sommes autorisé à conclure de ce qui précède que les gazogènes peuvent donner des rendements de 80, même de 84 0/0, en régime d'essais, et qu'on a le droit de compter sur 62,9 0/0 dans l'industrie, alors même que le gazogène

1. Voir ci-dessus, page 172.

est obligé de garder son feu durant de longues heures d'arrêt consécutives et que les conditions du travail imposent au générateur de gaz des allures diverses et incessamment variables.

Ces rendements sont remarquables.

L'utilisation du combustible est meilleure dans les gazogènes que dans les chaudières à vapeur, qui donnent 77 dans certains cas absolument exceptionnels, mais ne dépassent pas 72 dans la plupart des essais et fournissent très souvent 55 en marche industrielle.

On a cherché à améliorer encore le rendement du gazogène.

Voici une tentative qui mérite d'arrêter l'attention de ceux qui s'intéressent à cette question.

On se rappelle la théorie du gazogène : c'est celle du cubilot. Il se forme d'abord de l'anhydride carbonique, qui se trouve réduit au contact du charbon incandescent et qui produit de l'oxyde de carbone par la réaction $\text{CO}^2 + \text{C} = 2\text{CO}$.

En 1890, MM. Biedermann et Harvey ont imaginé de fournir directement CO^2 au gazogène afin de n'avoir pas à brûler du charbon dans la cuve de l'appareil en vue d'obtenir ce gaz. Etant donné que CO^2 soit fourni gratuitement, le procédé breveté Biedermann et Harvey doit donner lieu à une économie notable, ainsi que nous allons le démontrer à la suite de M. Droit (1).

En effet, acceptant le chiffre de 8 calories pour la chaleur dégagée par la combustion complète de 1 gramme de carbone, nous observons que l'équivalent pesant 6 grammes développe 48 calories en donnant CO^2 . Or,

$$\begin{array}{r} \text{C} + \text{O} = \text{CO} \text{ dégage } 14 \text{ calories.} \\ \text{CO} + \text{O} = \text{CO}^2 \quad - \quad 34 \quad - \\ \hline \text{Total. . . } 48 \text{ calories.} \end{array}$$

Le gazogène ordinaire ne débite donc en marche normale, par équivalent de carbone, qu'un seul équivalent de CO , valant 34 calories ; la perte est de $\frac{48 - 34}{48} = 29 \text{ 0/0}$.

Mais cette perte peut être évitée, et l'on réalise, d'autre part, encore un bénéfice en recevant CO^2 tout formé.

Car supposons CO^2 fourni gratuitement ; pour décomposer CO^2 par C et obtenir 2CO , il faut céder 34 calories ; or, la réaction $\text{C} + \text{O} = \text{CO}$ en donne 14 ; il n'y a donc plus que $34 - 14 = 20$ calories à demander à la combustion des deux équivalents de CO produits. Il reste, par suite, $2 \times 34 - 20 = 48$ calories disponibles. Comme on n'a dépensé qu'un équivalent de C , on gagne $48 - 34 = 14$ calories. Le bénéfice est donc égal à $\frac{14}{34} = 41 \text{ 0/0}$.

Il y aurait bien à tenir compte dans ce calcul des chaleurs spécifiques des gaz entrants et sortants, mais ces résultats n'en subsisteraient pas moins.

1. *Revue industrielle*, 15 février 1896.

MM. Siemens, qui exploitent ce brevet, n'ont cependant pas pu réaliser l'économie indiquée ; cela tient à ce que l'on envoyait au gazogène des gaz brûlés renfermant 12 0/0 d'acide carbonique et 88 d'azote. Si ces gaz avaient été assez chauds, l'azote n'aurait pas nui à la réaction à laquelle ils auraient apporté du calorique tout en permettant la décomposition de la vapeur d'eau et en fournissant H et CO ; mais les gaz arrivaient fort refroidis, et les espérances qu'on avait fondées sur les considérations ci-dessus ne se sont pas réalisées.

Il est à craindre que, pour les mêmes causes, le procédé Biedermann et Harvey ne donne pas de bons résultats dans les gazogènes alimentant des moteurs, mais on pourrait peut-être prendre des gaz chauds de l'échappement à leur sortie du cylindre et les réintroduire dans le gazogène, en les additionnant d'air chaud.

On peut apprécier le rendement d'un gazogène en déterminant sa consommation pour une marche à vide du moteur : on trouve qu'elle est d'au moins 35 à 40 0/0 de la consommation à pleine charge, quand on emploie des anthracites bien criblés ; le travail d'insufflation et de vaporisation est compris dans cette évaluation. Cette dépense peut paraître considérable ; mais il faut noter que le moteur consomme déjà 20 0/0 à lui seul pour se mouvoir : c'est en effet ce qu'on observe dans les moteurs alimentés au gaz de ville. La dépense afférente au gazéificateur est donc de 15 à 20 0/0. Ces chiffres s'élèvent quand le combustible est pauvre et chargé d'eau, comme le sont les lignites et les tourbes par exemple : dans ce cas, la consommation à vide est la moitié de la consommation en pleine charge, tout compris.

Nous signalons ces résultats de l'expérience à titre de renseignements utiles.

Une autre donnée intéressante est fournie par l'observation de ce que coûte l'entretien du feu dans un gazogène, le débit du gaz étant nul. J'ai constaté pour des gazogènes Pierson de 0^m,50 de diamètre sur 1^m,30 de hauteur, estimés à 100 mètres cubes, une dépense de 2^{kg},3 par heure : après 36 heures d'arrêt, il a suffi de souffler un quart d'heure pour remettre les moteurs en marche.

Avant de passer à la description des gazogènes les plus connus et les meilleurs nous avons encore à dire quelques mots de l'installation pratique de ces appareils.

Un gazogène se compose, en outre de la cuve où se fait la gazéification du combustible solide, d'un laveur, d'un épurateur, quelquefois d'un exhausteur, de canalisations plus ou moins développées et enfin d'une cloche ou gazomètre.

La prudence conseille de doubler le gazogène proprement dit, afin d'avoir constamment une cuve en réserve, pour parer à tout accident.

Dans les installations importantes, on est souvent obligé de monter une batterie d'appareils, car on ne peut guère dépasser un diamètre de cuve de 2^m,25 et l'on doit considérer une production de 500 mètres cubes à l'heure comme une limite supérieure qu'il est sage de ne pas dépasser. L'accouplement de deux cuves a d'ailleurs l'avantage de constituer par mélange un gaz plus homogène et de composition moins variable. On dispose quelquefois les gazogènes en fosse, mais on préfère généralement les placer sur le sol, avec plancher supérieur de chargement.

Un barillet, placé contre les gazogènes, arrête une partie des goudrons et des poussières et forme une valve hydraulique, empêchant le retour des gaz de la cloche vers la cuve.

Un premier lavage des gaz est effectué par une colonne à coke dite scrubber : c'est un cylindre de métal, bourré de gros morceaux de coke, qui est arrosé par le dessus, et que les gaz traversent de bas en haut.

Un large contact est ainsi assuré entre l'eau et les gaz. On peut remplacer le coke par des galets, des briques concassées, des boules de verre, etc. : on cloisonne quelquefois les scrubbers et on charge les compartiments supérieurs de fragments plus menus.

Le scrubber lave, épure et refroidit les gaz ; on est souvent obligé, pour mieux assurer cette dernière fonction, de lui adjoindre un jeu d'orgue, analogue à celui des usines à gaz. En Espagne, j'ai vu une installation dans laquelle il a même fallu faire couler un filet d'eau fraîche sur les tuyaux de fonte du jeu d'orgues.

Les épurateurs viennent à la suite : quelquefois ce sont de simples caisses à sciure de bois ; d'autres fois, ils sont montés à l'hydrate de chaux et à l'oxyde de fer naturel ou bien à la matière Lamming (chaux et sulfate de fer). La matière épurante est étalée sur un faux fond de bois dans de grandes cuves horizontales avec couvercle à joint hydraulique.

Les tuyauteries seront de grande section, sans étranglements, avec le moins de coudes que possible : des *by-pass* doivent permettre de mettre au besoin un appareil hors circuit pour un moment. Il faut veiller avec soin à ce que les joints soient et restent bien étanches, afin d'éviter toute fuite de gaz : la toxicité et l'explosibilité des gaz pauvres donnent une importance spéciale à cette recommandation, qu'il est inutile de faire valoir.

Voici un phénomène, sur lequel nous devons appeler l'attention : il arrive fréquemment que l'aspiration du moteur dans une tuyauterie trop résistante par excès de longueur ou par défaut de section, y provoque une dépression ; si elle n'est pas étanche, il s'en suivra donc une rentrée d'air, avec formation de mélange tonnant. Il peut en résulter de graves accidents par retour de flamme du côté du moteur.

Quelques explosions survenues dans les conduites d'amenée du gaz et qui se sont même répercutées quelquefois jusqu'à la cloche du gazomètre ont vivement préoccupé les spécialistes ; on se demandait si un gazogène pouvait débiter un gaz explosif, alors qu'un trou se formait dans le feu et qu'une partie de l'air injecté traversait la cuve sans avoir un contact suffisant avec le combustible incandescent. J'ai fait à cet égard un certain nombre d'essais à la suite desquels j'ai conclu que la proportion d'oxygène restait toujours insuffisante pour constituer un mélange tonnant. Les explosions avaient donc pour cause une introduction anormale d'air dans la cloche ou dans les canalisations, soit par une fausse manœuvre, soit par une aspiration d'air produite à travers des joints non étanches.

Ce genre d'accident sera plus fréquent avec des gazogènes à aspiration.

Les cloches ou gazomètres constituent des mélangeurs et des accumulateurs à gaz ;

la réserve de gaz qui y est remisee facilite les mises en train des moteurs. On donnait autrefois aux cloches une grande capacité ; mais on a reconnu qu'on pouvait en réduire sans inconvénient le volume et on tend aujourd'hui à les faire de plus en plus petites. Pour donner un exemple précis, je signalerai l'installation Letombe de Fives-Lille, que j'ai étudiée dans le courant de l'année 1902, et qui a donné de si remarquables résultats ; or, pour un moteur de 300 chevaux, la cloche ne cubait que 15 mètres.

VIII

Monographie des gazogènes.

Il est difficile d'établir une classification rationnelle et complète des gazogènes à gaz pauvre.

Si nous ne considérons que les dispositifs produisant l'introduction dans la cuve du mélange d'air et de vapeur nécessaires à la gazéification, nous pouvons former quatre catégories :

1° Les gazogènes à insufflation par un injecteur à vapeur, avec chaudière spéciale et surchauffeur (genre Dowson).

2° Les gazogènes à insufflation par ventilateur, qui empruntent à un moteur l'énergie d'insufflation et récupèrent sur les chaleurs perdues le calorique de vaporisation de l'eau (genre Lencachez).

3° Les gazogènes soufflés à haute pression (genre Gardie).

4° Les gazogènes à aspiration, accouplés directement au moteur à gaz, dont l'appel détermine le passage de l'air et de la vapeur à travers la cuve (genre Arbos et Bénier).

Mais on pourrait aussi prendre pour base d'une classification les dispositions particulières de la cuve du gazogène : nous distinguerions à ce point de vue les appareils à combustion droite, à combustion renversée et ceux à deux cuves, dont nous ferons deux catégories spéciales.

1° GAZOGÈNES SOUFFLÉS A INJECTEUR

Gazogène Dowson.

Le premier brevet de M. Emerson Dowson est du 10 octobre 1878, mais les appareils actuels reproduisent plutôt les dispositions d'un second brevet pris à la date du 10 juillet 1883 ; l'inventeur a depuis lors perfectionné son œuvre, sans toutefois lui apporter de modifications essentielles.

La cuve à gazéification se compose d'un cylindre vertical A en terre réfractaire, entouré d'une enveloppe de tôle (fig. 27).

Le combustible est porté par la grille *a*; la chambre B est close; c'est là qu'est lancé sans interruption le courant d'air et de vapeur mêlés ensemble qui donneront lieu simultanément aux phénomènes de dissociation, de réduction et de combustion par lesquels le gaz est produit. On charge le combustible par l'ouverture A', fermée par

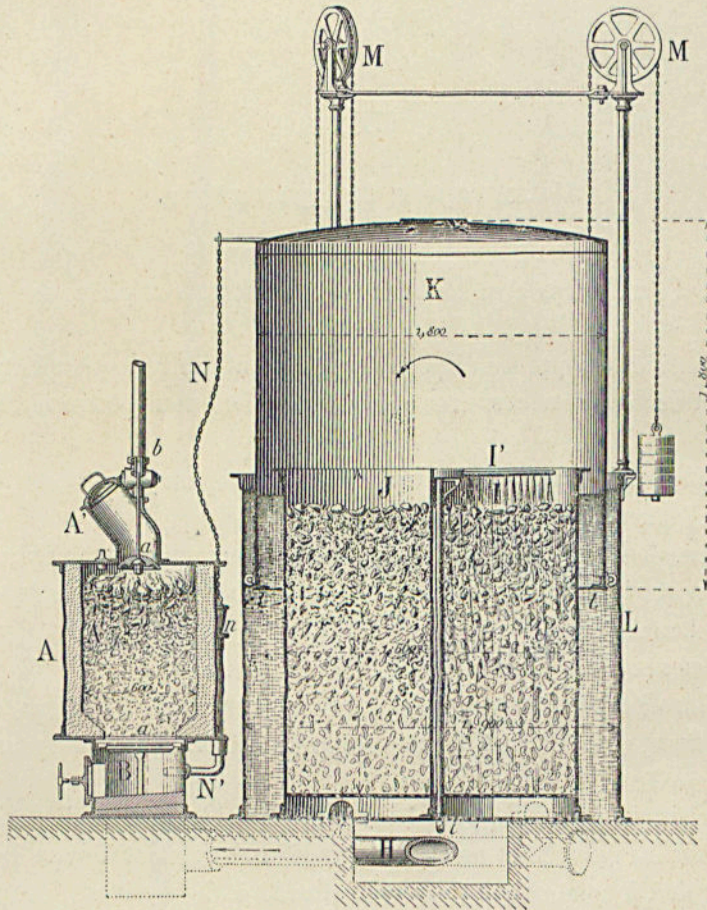


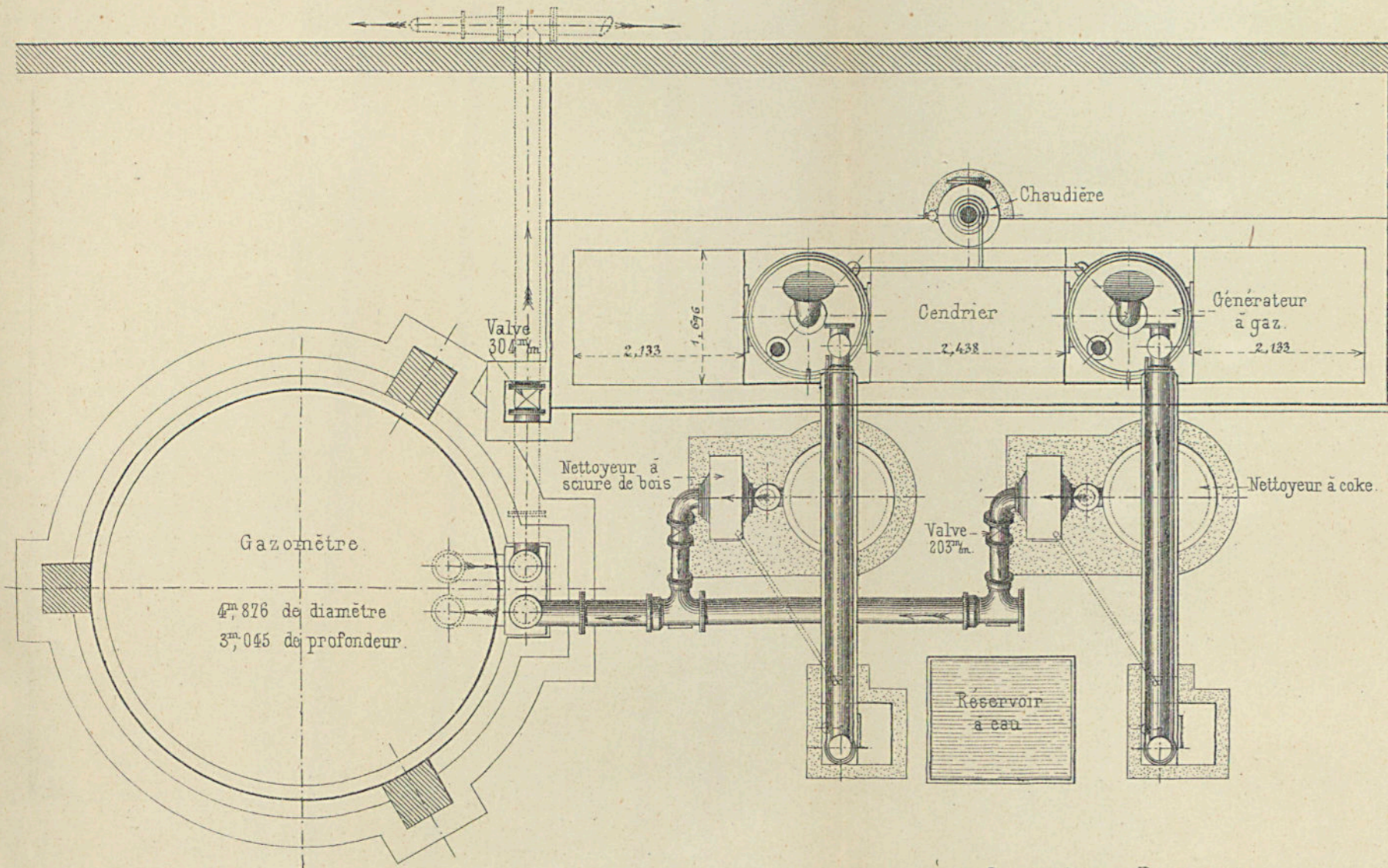
Fig. 27. — Gazogène Dowson.

une trémie ou un clapet *a* qui est appuyé sur son siège par un contrepoids.

La vapeur est empruntée à une petite chaudière à foyer intérieur, munie d'un serpentín de surchauffe; on brûle généralement sur sa grille du coke, mêlé des débris d'antracite restés sur le carreau et des escarbilles recueillies dans le cendrier de la cuve. Quelquefois aussi M. Dowson a employé le gaz pauvre dont il faisait une prise sur le gazomètre. La vapeur est produite sous une pression de 6 à 7 kilogrammes au maximum. Il faut que la chaudière fournisse environ 600 grammes de vapeur par cheval-heure effectif, ce qui correspond à 5 décimètres carrés de surface de chauffe environ.

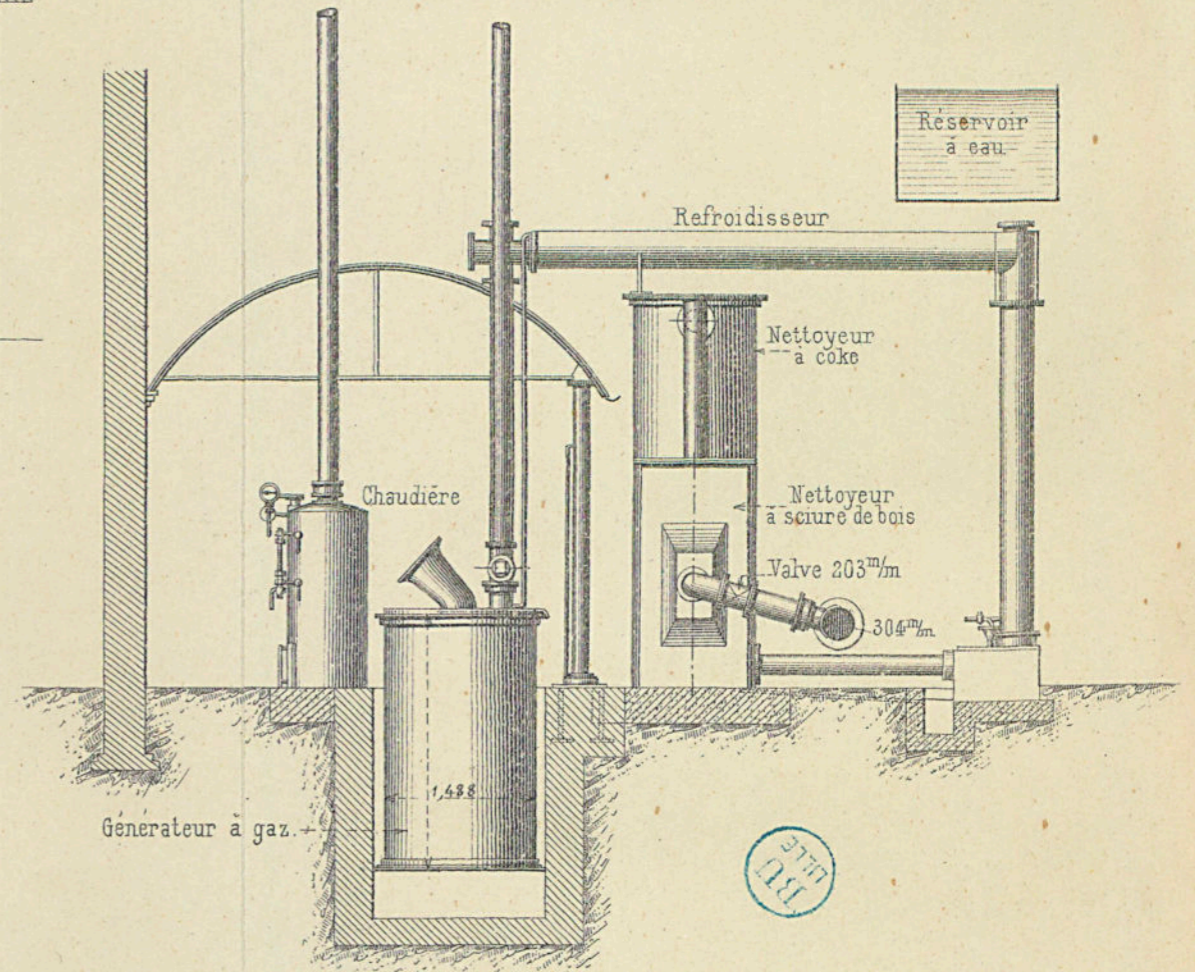
LES MOTEURS A GAZ .

Fig. 29.



Gazogène Dowson

Fig. 30.



Voir page 193

E. BERNARD & C^{ie}, Libraires-Éditeurs. — PARIS

Le vapeur se rend à la cuve en traversant un injecteur du genre Koerting, constitué par un ajutage débouchant dans l'axe d'un tronc de cône concentrique renversé : un robinet permet de régler le débit de vapeur ; on fait varier d'autre part le volume d'air injecté en modifiant la position de l'ajutage dans le cône d'aspiration. C'est un des points faibles du système, attendu que le conducteur du gazogène ne dispose pas des deux éléments air et vapeur avec toute l'indépendance désirable.

Les gaz engendrés dans la cuve, traversent une boîte à clapets, puis les deux chambres d'un barillet, destiné à arrêter les goudrons et autres produits condensables : un tube siphon maintient l'eau à un niveau constant dans ce barillet.

Le courant gazeux arrive ensuite dans un laveur, qu'on peut placer dans la cuve du gazomètre, ainsi que notre figure le fait voir, mais qui en est souvent distinct. Dans les grandes installations, le laveur est précédé d'un jeu d'orgues.

M. Dowson a longtemps employé comme épurateur un caisson de tôle rempli de sciure de bois humide, qui avait la mission complexe de retenir les goudrons et les poussières ; mais ces appareils imposaient un renouvellement fréquent de la sciure et ils avaient d'autre part l'inconvénient de créer souvent des résistances notables, aboutissant quelquefois à une obstruction complète. Le simple scrubber à coke suffit bien souvent pour laver et purifier le gaz ; on lui adjoint un épurateur chimique, quand on veut compléter son action.

On se donnait comme règle, pour fixer la capacité de la cloche du gazomètre, qu'elle devait suffire à entretenir la marche du moteur pendant cinq minutes : mais, c'était un minimum qu'on dépassait presque toujours.

Des tampons de fonte ménagés sur la partie supérieure de la cloche permettent de faire évacuer l'excès de gaz, s'il y a lieu, ou bien le mauvais gaz qui aurait pu se produire accidentellement. L'évacuation des gaz s'impose du reste au bout d'un certain temps par suite de l'accumulation inévitable au fond du gazomètre de l'anhydride carbonique plus dense que les autres gaz.

En rattachant la cloche par une chaîne au robinet d'entrée d'air, on peut faire arrêter automatiquement l'insufflation d'air dans le gazogène aussitôt que la cloche approche de sa position supérieure : cette chaîne N est visible sur notre dessin.

Le dispositif des grands appareils est analogue à celui que nous venons de décrire ; nous donnons sur la figure 29 hors texte le plan d'une belle installation faite à Newtown (Montgomeryshire) pour la *Severn Tweed Co limited*, par M. Dowson, qui a bien voulu nous communiquer ces dessins. La figure 30 montre l'appareil en élévation et permet de juger de la manière dont il convient de grouper les gazogènes : deux gazogènes sont accouplés sur le même gazomètre.

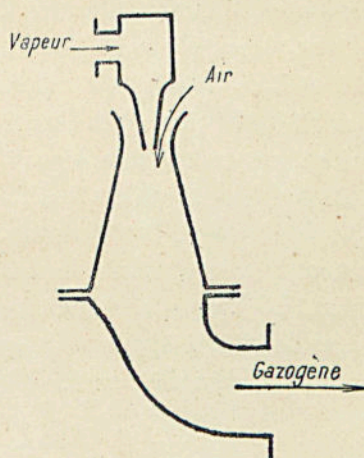


Fig. 28. — Injecteur d'air.

On estime qu'il faut en moyenne 250 grammes d'anhracite par mètre cube de gaz Dowson : en tenant compte de tous les frais de conduite des appareils, réparations, intérêt et amortissement du matériel, etc., le prix du mètre cube ressort à moins d'un centime par mètre cube.

Les plus petits appareils Dowson produisent 23 mètres cubes par heure ; on ne peut guère descendre en dessous.

Plus de mille gazogènes Dowson sont en service en Angleterre et sur le continent.

A la papeterie Spicer de Godalming, la puissance des moteurs Crossley desservis par des Dowson, était de 85 chevaux indiqués en 1885, de 240 en 1889, de 410 en 1892 et elle est maintenant de plus de 800 chevaux. A Halifax, on a monté une installation de 400 chevaux avec des moteurs Tangye ; chez MM. Crossley, la puissance totale des moteurs alimentés au gaz Dowson dépasse 300 chevaux ; elle est de 250 chevaux à Newcastle-on-Tyne, de 300 à Newtown, de 160 à Chelsea, de 240 à Wandsworth, de 240 et 220 aux stations centrales de Morecambe et Leicester, etc., etc. En France, il existe aussi un certain nombre d'installations de gazogènes Dowson, qui ont contribué à l'expansion des moteurs à gaz dans notre pays.

Dans une lecture faite le 27 mars 1899 à la *Cleveland Institution of Engineers* à Middlesbrough, M. Dowson a cité des prix de revient qui témoignent d'un fonctionnement très économique de ses gazogènes. Ainsi un moteur à gaz de 25 chevaux travaillant 50 heures par semaine et 50 semaines par an dépenserait pour 140 Livres de gaz de ville et 66 Livres de gaz Dowson ; le bénéfice annuel serait par suite de 74 Livres, soit de 1850 francs.

Gazogène Fichet et Heurtey.

MM. Fichet et Heurtey ont importé en France un gazogène qui avait fait depuis longtemps ses preuves en Amérique, sous le nom de M. W. J. Taylor ; mais l'œuvre de l'ingénieur américain s'est grandement perfectionnée entre leurs mains et l'appareil que nous allons décrire doit porter leur nom.

Le gazogène Fichet et Heurtey répond à un double objectif, qui est :

1° D'utiliser la chaleur des gaz produits par le gazogène au réchauffement de l'air qui y est introduit ;

2° De faciliter le décrassage de l'appareil.

L'importance de ces deux points est indéniable.

Et d'abord, constatons que, dans les gazogènes de moteurs, la haute température des gaz à leur sortie du foyer est généralement perdue, puisqu'on les refroidit dans les scrubbers avant de les admettre au gazomètre et au moteur : on réalise un bénéfice immédiat en restituant ce calorique au gazogène, qui en a grand besoin pour les réactions qui s'y produisent. Élever la température du foyer, c'est faciliter ces réactions ; enfin, plus cette température est maintenue haute, plus on peut injecter d'eau dans le feu, plus on produit par suite de gaz à l'eau, et mieux on enrichit le gaz. Nous avons développé précédemment toutes ces considérations et nous jugeons inutile

d'y revenir : MM. Fichet et Heurtey, qui ont une sérieuse et ancienne pratique des gazogènes, attachent le plus grand prix à cette récupération du calorique et ils ont fait une étude approfondie de la question avant d'arrêter définitivement les dispositifs qui assurent le résultat cherché.

Le nettoyage des feux est une sujétion du service des gazogènes qu'il importe de faciliter le plus possible; à cet effet, Taylor a inventé une sole tournante; c'est un plateau horizontal en fonte, mobile autour d'un axe vertical et muni en dessous d'une couronne dentée, qui engrène avec un pignon fixé à un arbre horizontal traversant l'enveloppe, et actionné de l'extérieur au moyen d'une paire d'engrenages et d'une manivelle. Au-dessous du plateau mobile est placé un plateau fixe, sur lequel le premier repose par l'intermédiaire d'une couronne de boulets sphériques logés dans une rainure. Cette disposition évite tout ajustage précis, les dilatations sont libres et la rotation du disque supérieur s'effectue à la main sans grand effort.

Le charbon du gazogène, réduit à l'état de cendres et de mâchefers, s'écroule par l'ouverture d'une trémie tronconique et se déverse sur le plateau mobile, en formant un cône d'éboulement dont la grande base est égale au diamètre de ce plateau; il n'y a donc pas de grille, ce qui est un avantage sérieux de ce dispositif. A l'état de repos du plateau, le cône des mâchefers s'étale jusqu'aux bords; dès que l'on fait tourner ce plateau, les mâchefers s'éboulent sur le pourtour et tombent dans le cendrier. En introduisant des ringards par des trous ménagés dans l'enveloppe, on active cette chute, s'il est nécessaire de le faire, et l'on assure la descente régulière des scories. Des regards pratiqués dans l'enveloppe permettent de surveiller la descente et de maintenir la zone de combustion au niveau convenable, de manière à ce que jamais le feu ne descende plus bas que le second rang des regards et n'atteigne les parties métalliques; on est donc certain qu'elles resteront toujours froides et qu'elles ne se détérioreront pas.

Après avoir fait ressortir les caractères spéciaux du gazogène de MM. Fichet et Heurtey, nous pouvons aborder sa description.

Le gazogène proprement dit est formé d'un cylindre vertical en tôle (fig. 31); sa paroi intérieure présente une légère conicité, en vue de faciliter la descente du charbon; elle est revêtue de briques réfractaires. La cuve est entourée d'une enveloppe de sable destinée à diminuer les déperditions de calorique. La trémie de chargement est munie d'un obturateur conique, comme cela se fait toujours, et d'un couvercle à loquet réalisant une fermeture double pour éviter la libre communication de la cuve avec l'atmosphère. Le charbon remplit l'appareil jusqu'à sa partie supérieure; un regard limite la zone d'incandescence, de sorte que la partie inférieure ne renferme que des scories et des cendres. Notre dessin fait voir le détail de la sole tournante, commandée par une manivelle.

A la partie supérieure du gazogène, au-dessus de la voûte, est un plateau de fonte boulonné sur l'enveloppe, qui forme un joint et une fermeture parfaitement étanches conjurant toute déperdition de gaz; pour mieux assurer ce résultat, le plateau porte une nervure circulaire remplie d'eau, qui empêche le métal de trop s'échauffer et qui

maintient par suite les joints en bon état. On remarque d'autre part sur la figure 31, que le garnissage réfractaire de la cuve repose sur des consoles rivées sur l'enveloppe extérieure; c'est cette couronne qui supporte la trémie inférieure.

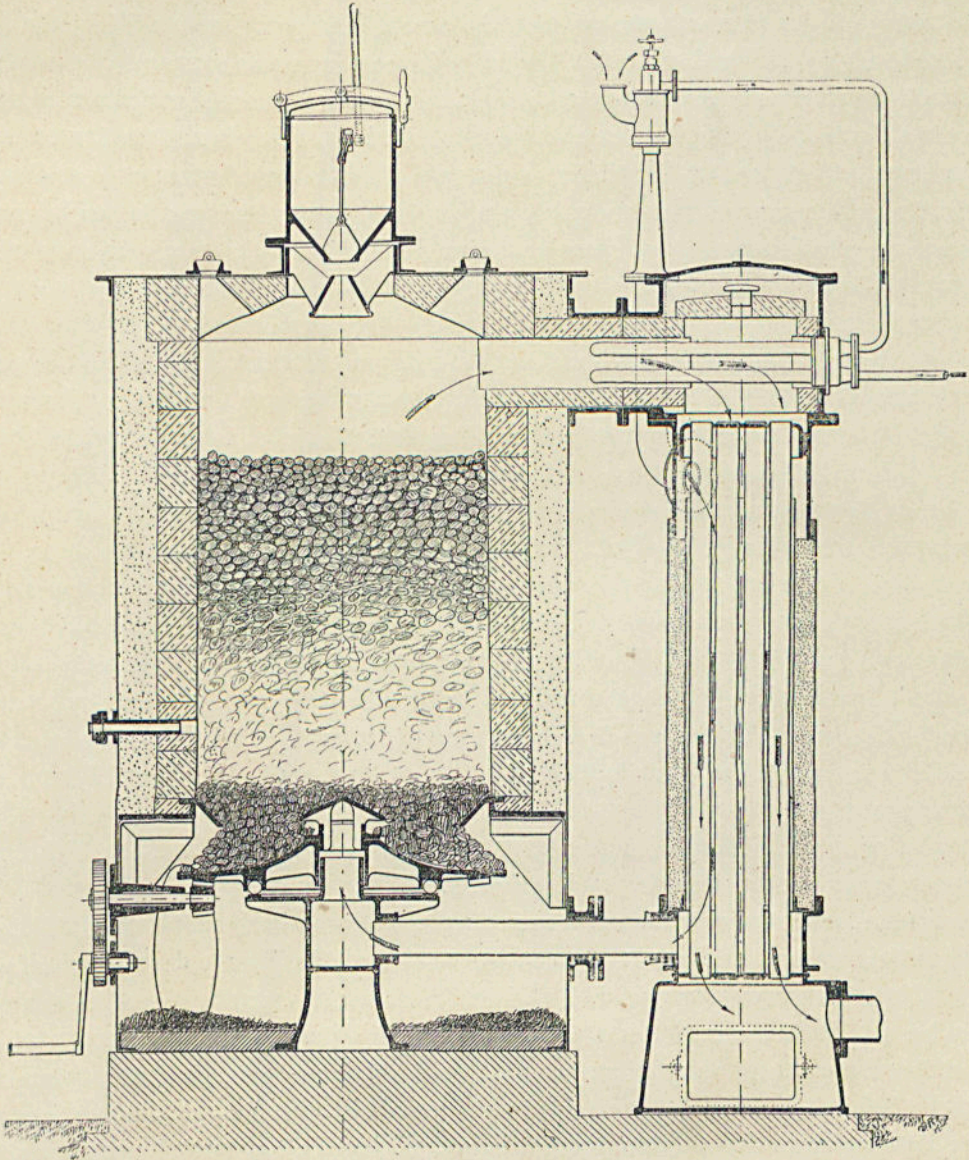


Fig. 31. — Gazogène Fichet et Hurtey.

L'air insufflé arrive au centre du combustible incandescent, et il débouche au niveau même du regard, auquel correspond la limite inférieure du feu : la tuyère est coiffée d'une mitre de protection.

L'insufflation est opérée par un injecteur à vapeur; la vapeur d'eau qui l'alimente est fournie par une petite chaudière spéciale; elle est surchauffée par les tubes qui

sont disposés dans le tuyau de sortie des gaz du gazogène. L'air mélangé de vapeur gagne encore du calorique en traversant un régénérateur tubulaire, parcouru en sens

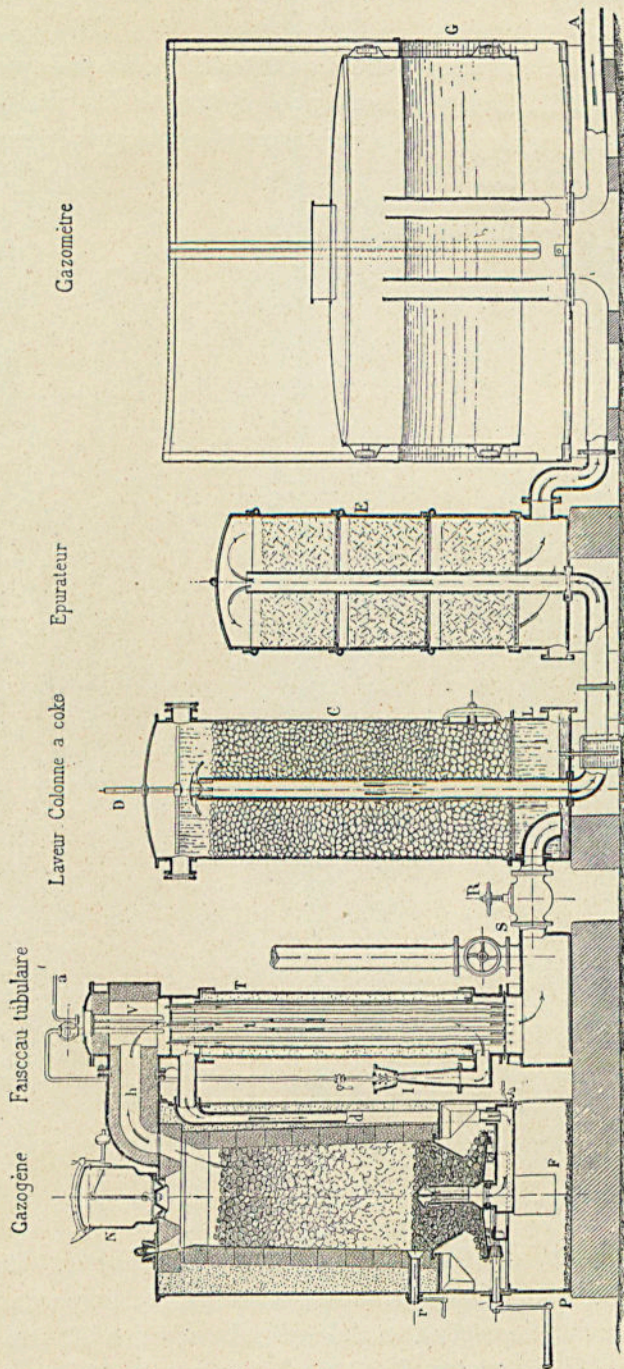


Fig. 32. — Gazogène Fichet et Heurtey.

inverse par les gaz chauds : il suit un conduit ménagé dans la garniture de l'appareil.

Cet ensemble est très bien étudié : il n'est pas inutile de faire observer que le dispositif du souffleur à vapeur permet de faire varier à volonté dans une assez

large mesure, le degré d'humidification, le débit et la pression du mélange insufflé. On doit veiller à ce que la proportion de vapeur soit suffisante pour empêcher le collage et la fusion des mâchefers.

Une critique avait été formulée autrefois contre le premier dispositif de faisceau tubulaire adopté par MM. Fichet et Heurtey : il s'y formait des condensations acides qui corrodait les tubes au pied et permettaient des échanges entre les courants de

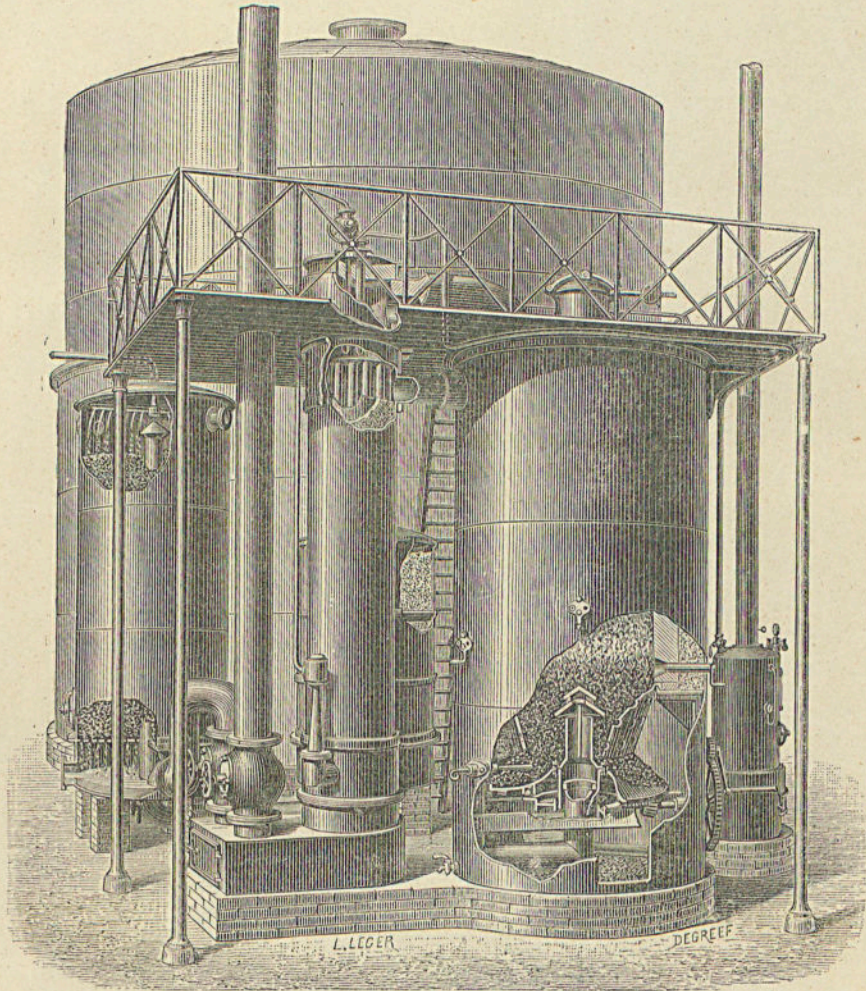


Fig. 33. — Ensemble d'un gazogène Fichet et Heurtey.

gaz et d'air qui se croisaient. Ce défaut a été corrigé en modifiant le sens de la circulation dans l'appareil ; l'air chargé de vapeur entre maintenant par la partie supérieure du faisceau, il le suit en descendant et débouche dans un conduit horizontal qui aboutit au centre de la grille tournante. Les gaz chauds marchent dans le même sens, par l'intérieur des tubes : le chauffage n'est donc plus méthodique, mais cela n'a aucune importance dans l'espèce. La surchauffe des tubes horizontaux du générateur de vapeur s'effectue très bien dans cette nouvelle disposition.

La valve de distribution du gaz ne peut être obstruée par les poussières entraînées attendu que celles-ci se déposent dans la chambre inférieure du réchauffeur. Les gaz traversent du reste encore un premier barboteur à garde d'eau avant de pénétrer dans la colonne à coke. L'arrosage de cette colonne est effectué par un tourniquet hydraulique. Quand il est nécessaire de le faire, les gaz subissent enfin une épuration chimique avant d'arriver au gazomètre.

La figure 32 montre l'ensemble d'une installation : elle est très ramassée. Le gazogène Fichet et Heurtey fonctionne sans surveillance spéciale et on peut le confier à un simple manœuvre. Il serait facile de le pourvoir d'un régulateur automatique, pour régler la production du gaz suivant les besoins de la consommation, mais on peut généralement se passer de cet appareil, et l'on se contente de placer un butoir au sommet du gazomètre, par lequel on commande l'injection de vapeur, de manière à l'arrêter dès que le gazomètre est plein.

Pour mettre l'appareil en marche, on commence par vider dans la trémie de chargement quelques sacs de mâchefer, pour remplir complètement la trémie inférieure jusqu'au niveau du regard : on jette par dessus du bois et des copeaux que l'on allume et qu'on recouvre de quelques morceaux de coke et de charbon ; cette première charge étant bien enflammée, on en ajoute une nouvelle. Il suffit que la porte du bas reste ouverte pour que le tirage naturel entretienne le feu. On commencera ensuite l'insufflation avec le minimum de vapeur, de crainte d'arrêter la combustion.

MM. Fichet et Heurtey construisent des appareils de puissance variable : les diamètres de la cuve croissent avec la consommation.

Diamètres.	Consommation de charbon par 24 heures
1 ^m ,75	1 à 2 tonnes
2,10	1,5 à 3 —
2,50	2,5 à 3 —
2,78	3 à 6 —

La hauteur dépend de la nature du combustible ; elle est de 4 mètres pour les charbons maigres, créant peu de résistance au passage des gaz.

Dans quelques installations, le générateur de vapeur est séparé du gazogène et on le chauffe alors directement par une rampe à gaz alimentée par le gazogène lui-même : on peut estimer la dépense aux 5 centièmes de la production de l'appareil.

De nombreuses applications des gazogènes Fichet et Heurtey ont été faites en France, notamment aux ateliers de la Compagnie du Moteur Niel à Evreux, chez MM. Deberny, à Paris, aux tramways d'Orléans, de Poitiers, de Tunis, etc. ; cette dernière installation a une puissance de 660 chevaux. A l'étranger, nous trouvons aussi ces gazogènes à Barcelone et à Lausanne, aux stations des tramways : les résultats obtenus dans cette ville ont été extrêmement remarquables, ainsi que nous le dirons plus loin.

Les gazogènes Fichet et Heurtey s'accommodent de tous charbons maigres et des coques : la preuve en a été faite au cap Janet où le gaz est fourni à des moteurs Niel ; on avait garanti une consommation de 850 gr. de coke ne contenant pas plus de 10 %

de cendres et 4 % d'humidité par cheval-heure effectif ; les essais faits sous la direction de M. Stapfer ont démontré que la dépense n'atteignait même pas 775 grammes. La figure 34 donne le détail de cette installation : A est le gazogène, B et C les laveurs épurateurs, D le gazomètre, E la poche régulatrice et F le moteur. Les cotes du dessin permettent de juger de la compacité de cet ensemble.

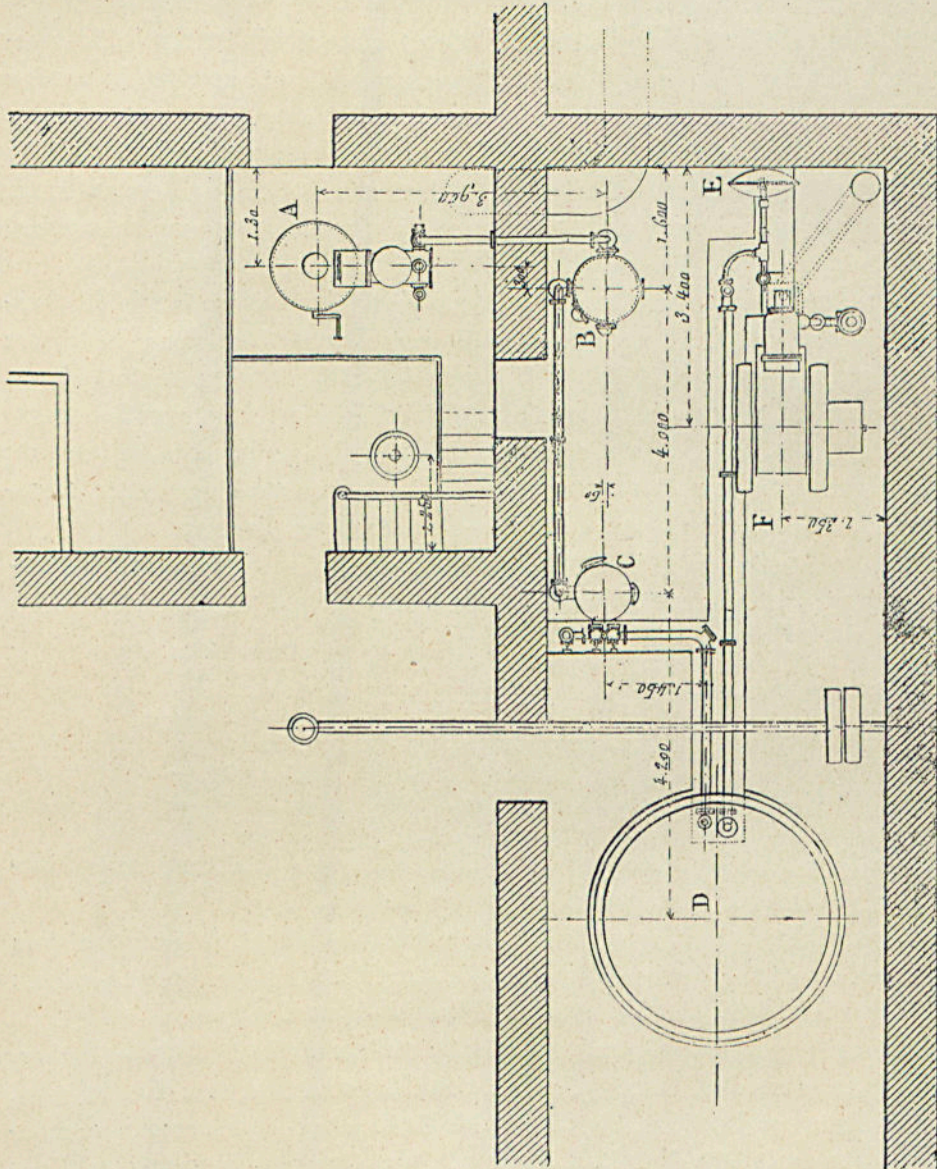


Fig. 34. — Installation d'un gazogène Fichet et Hurtey, au cap Janet.

Citons encore, parmi les installations faites par M. Fichet et Hurtey, celles des *Grusonwerke* de la maison F. Krupp à Magdebourg et de la *Motorfahrzeug und Motorenfabrik Berlin* à Marienfelde, qui sont toutes deux d'une puissance de cent chevaux.

Gazogène Winand.

Le gazogène Taylor a été modifié par M. Winand, en Amérique; voici en quoi consiste ce perfectionnement.

Pour mieux utiliser le calorique de la cuve du gazogène et pour supprimer la chaudière spéciale, M. Winand entoure le gazogène d'une cuve dans laquelle circule de l'eau qui s'échauffe et s'écoule à travers une colonne à coke. Un régulateur spécial règle le débit de l'eau et sa température. L'air soufflé vers le gazogène traverse cette même colonne et, en même temps qu'il s'y échauffe, il se sature de vapeur d'eau. Cette disposition pourrait s'appliquer à n'importe quel gazogène.

Cet appareil est à sole oscillante autour de son axe vertical AB (fig. 35); l'oscillation

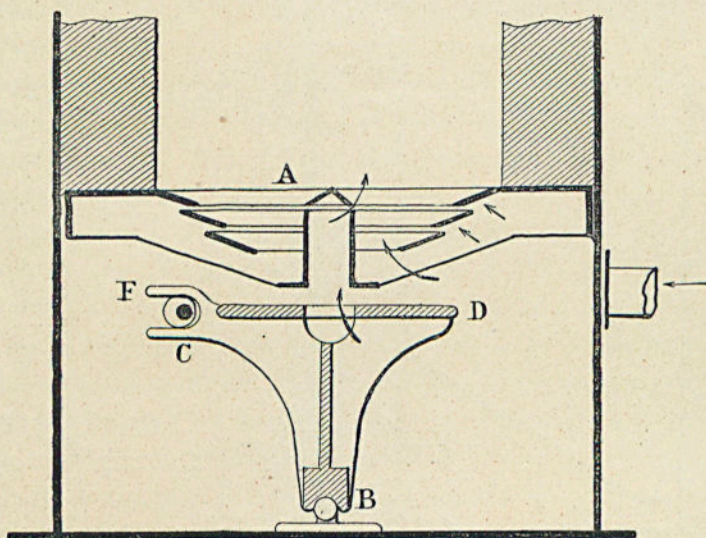


Fig. 35. — Gazogène Winand.

se fait autour de la rotule B, sous l'action d'une came C prise dans une fourche F. On actionne cette came à la main, au moyen d'une manivelle; cette opération se fait au moment du décrassage et elle permet d'incliner le plateau pour faciliter la chute des scories.

On peut employer deux comes et agir sur deux rayons à angle droit du plateau; dans ce cas, le décollage des mâchefers est mieux assuré encore.

Le combustible est soutenu par des couronnes de grilles coniques, entre lesquelles passe l'air et la vapeur de soufflage. L'air est saturé d'abord de vapeur, puis surchauffé, dans un appareil tubulaire, traversé en sens contraire par les gaz chauds du gazogène et par l'air d'alimentation.

Gazogène Kitson.

Cet appareil est pourvu, comme le précédent, d'une sole rotative, à décrassage automatique. Elle est en terre réfractaire et présente la forme d'un cône très surbaissé :

des trous sont percés dans la masse du plateau et livrent passage à l'air d'insufflation. Cette sole reçoit un mouvement hélicoïdal d'un train d'engrenages, de sorte qu'elle tourne sur son axe en s'élevant et en s'abaissant. Quand on l'abaisse, elle livre issue latéralement aux scories et aux cendres qui croulent et tombent dans le cendrier; le décrassage se fait donc fort aisément. Mais on peut craindre qu'il ne se développe dans le mouvement du plateau, des efforts considérables.

L'air est injecté par le haut de l'appareil et par le bas, mais plus généralement par cette voie, et alors le vent traverse la sole. Des valves permettent de régler le souf-

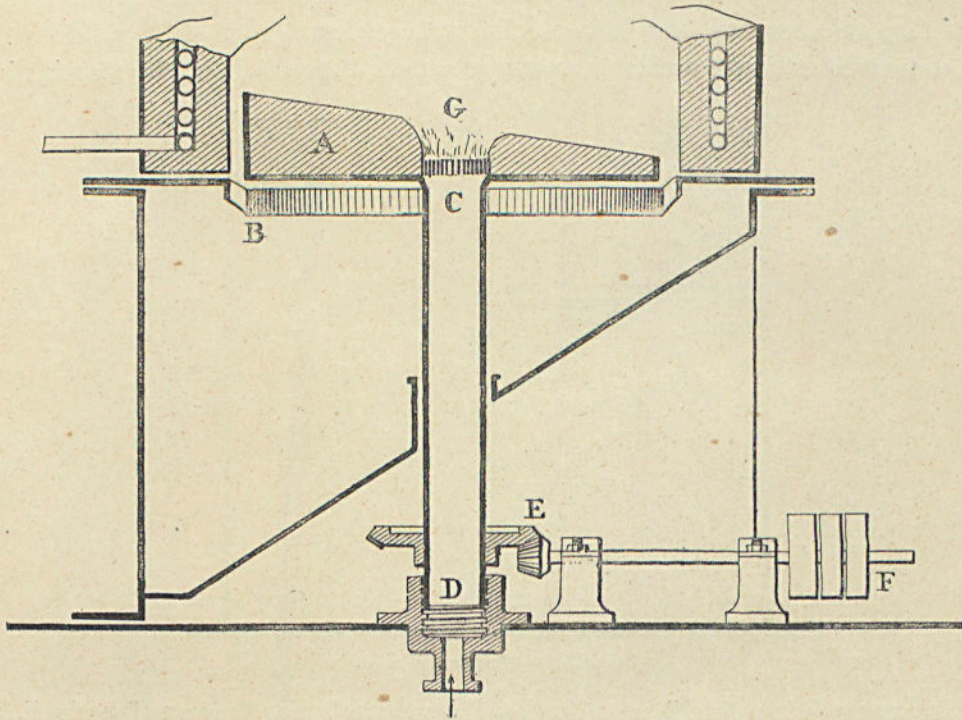


Fig. 36. — Gazogène Kitson et Walker.

flage et de le diriger à volonté par le haut ou par le bas : on peut donc fonctionner à flamme renversée.

Le mouvement de l'air est obtenu par des injecteurs à vapeur, mais M. Kitson emprunte au gazogène lui-même le calorique nécessaire à la production de la vapeur. A cet effet, un double serpentin est logé dans la chemise réfractaire de la cuve; l'un produit la vapeur, l'autre surchauffe cette vapeur; la vapeur formée est collectée dans un récipient accolé au gazogène, sur lequel sont faites les prises des injecteurs. Il est à craindre que des incrustations de calcaire ne bouchent le serpentin.

Pour faciliter la conduite du foyer, l'inventeur de ce gazogène a combiné le soufflage par dessus et par dessous la grille, ainsi que nous venons de l'exposer; on peut ainsi ranimer le feu à volonté et l'activer suivant les besoins; il est même possible de

4. G. Richard. — « Les moteurs à gaz et à pétrole, en 1892 »; page 127, figures 154 à 156.

fabriquer pendant quelque temps du gaz à l'eau pur et, par suite, d'élever beaucoup le pouvoir calorifique du gaz.

MM. Kitson et Walker ont récemment modifié encore leur appareil (1).

Ce nouveau gazogène diffère du précédent en ce qu'il est pourvu d'une sole tournante et montante; ce double mouvement a pour effet d'agiter constamment le combustible et d'empêcher son collage, tout en assurant une évacuation régulière des cendres par l'intervalle compris entre la sole inclinée A et la grille circulaire B.

La sole est portée par un axe creux CD (fig. 36) fileté à sa partie inférieure; cet axe reçoit un mouvement de rotation alternatif dans un sens ou dans l'autre, par l'intermédiaire des roues d'angle E et des poulies F, à renversement automatique de marche, à l'instar des poulies des machines à raboter. Un mouvement dans un sens fait monter la sole en même temps qu'elle tourne; l'autre rotation la fait descendre.

L'air est chauffé dans une gaine qui entoure le tuyau de départ des gaz du gazogène; il est appelé par un injecteur à vapeur et il pénètre dans l'appareil par le tube CD et à travers la grille G. La vapeur est formée aux dépens des chaleurs perdues; la chaudière est constituée par des tubes H noyés dans le parement du gazogène.

Une nouveauté a été réalisée dans cet ingénieux appareil; un dispositif spécial permet d'injecter, avec la vapeur d'eau et l'air, une certaine quantité de pétrole dans le but d'enrichir le gaz produit, si cela était nécessaire.

Le charbon est débité par une trémie circulaire d'un maniement très simple.

La grille G est recouverte d'un tampon d'amiante, pour empêcher les cendres de tomber dans le tuyau CD; tous les mécanismes de l'appareil sont du reste abrités avec soin et leur fonctionnement est assuré. Il importe d'observer que le mouvement de rotation et de descente de la grille est extrêmement lent.

M. Kitson a obtenu de bons rendements avec son gazogène.

Ainsi, en alimentant des moteurs Kœrting d'une puissance de 2 18 chevaux, on est arrivé à développer le cheval-heure effectif par 2.400 litres de gaz, correspondant à une consommation de 566 grammes de charbon ordinaire. Un autre essai, fait avec un moteur Atkinson, aurait donné le cheval par 503 grammes : c'est un résultat intéressant. D'après ces chiffres, il y aurait donc réellement avantage à condenser tous les éléments de la gazéification dans un appareil unique, de manière à réduire au minimum les déperditions de calorifique.

Gazogène Wilson.

Dans ce gazogène (2), dont il est fait usage pour l'alimentation d'un certain nombre de moteurs à gaz, nous voyons un ensemble de dispositions heureuses, qui méritent de fixer notre attention.

La cuve a une forme spéciale, assez différente de celle des autres appareils du même genre; elle est tronconique, avec une conicité plus forte au sommet qu'à mi-

1. G. Richard. — « Les moteurs à gaz en 1894 »; page 89, fig. 212 et 213.

2. Bryan-Doukin. — « A Text-Book, etc. », page 497; 2^e édition.

hauteur; son diamètre est plus grand que d'ordinaire, et sa hauteur est moindre. Ces formes et ces proportions doivent faciliter l'emploi de charbons relativement gras, réduits à l'état de menus et de poussières. Le combustible, versé par la trémie supérieure, distille d'abord; s'il colle, des orifices ménagés autour de cette trémie permettent de ringarder et de le faire descendre; s'il descend trop vite, on peut passer des barres de fer par les ouvertures pratiquées au bas de l'appareil pour constituer une sorte de grille de secours par laquelle on soutient momentanément le charbon.

L'air, soufflé par un injecteur à vapeur, débouche au milieu même du gazogène, sous une faible pression de 20 à 25 millimètres d'eau tout au plus.

Deux portes sont percées à la base de la cuve : on manœuvre par ces portes des hélices en fonte, sur lesquelles le charbon brûlé et les scories reposent d'une part, tandis qu'elles baignent de l'autre dans l'eau du cendrier, qui les maintient froides. La rotation de ces hélices opère l'extraction des résidus de la combustion : le décrassage est automatique.

Pour activer le soufflage, M. Wilson recourt quelquefois au moteur à gaz que fait marcher le gazogène; dans ce cas, ce moteur actionne une pompe auxiliaire, qui refoule de l'air dans un réservoir, d'où il passe à la cuve, en entraînant avec lui de l'eau fournie par un injecteur disposé sur la conduite. Une prise faite sur le cylindre du moteur lui-même permet de mêler à cet air un certain volume de gaz chauds de la décharge. On bénéficie ainsi de leur température; leur acide carbonique se réduira au contact du charbon incandescent et leur vapeur d'eau s'ajoutera à celle de l'injection. L'idée est donc heureuse.

Un grand nombre de ces gazogènes sont en service en Ecosse, où ils utilisent des charbons bitumineux de peu de valeur. D'après M. Stead, le pouvoir du gaz Wilson dépasserait 1335 calories par mètre cube.

Gazogène de Deutz.

Un des principaux objectifs des constructeurs de gazogènes a été de permettre l'emploi des charbons maigres et des cokes; il fallait pour cela que le décrassage des grilles fût rendu plus pratique, que leur accès fût par conséquent facilité et que les charges fussent moins empâtées. Ces conditions paraissent bien réalisées par le gazogène de Deutz, dont on voit le dessin sur la figure ci-contre.

Nous n'insisterons pas sur les éléments de construction les plus connus qu'on retrouve dans ce type : garniture réfractaire, treuil de chargement, grille, cendrier, injecteurs, etc. Signalons seulement ce qui suit :

L'injection de vapeur et d'air se fait par le bas, en dessous de la grille, par trois injecteurs indépendants A qui permettent de faire varier dans une limite plus étendue la quantité d'air et de vapeur fournie au foyer et de mieux gouverner son allure; on arrive ainsi à maintenir constante la proportion d'air et d'eau tout en faisant croître ou décroître leur quantité absolue.

Dans les derniers gazogènes construits à Deutz (1) la cloison qui sépare la trémie du tuyau de départ des gaz se prolonge vers le bas de manière à former un barrage : on remplit de charbon frais toute la partie gauche de la cuve, jusqu'à la trémie, ce qui force les produits de distillation à pénétrer dans la zone chaude et de s'y décomposer, en partie du moins, au contact du charbon incandescent.

De larges portes sont pratiquées au niveau de la grille en vue du décrassage; des tampons de terre réfractaire B protègent les portes et les défendent contre l'ardeur excessive du feu. Le cendrier est lui-même muni de portes C, qu'on tient habituelle-

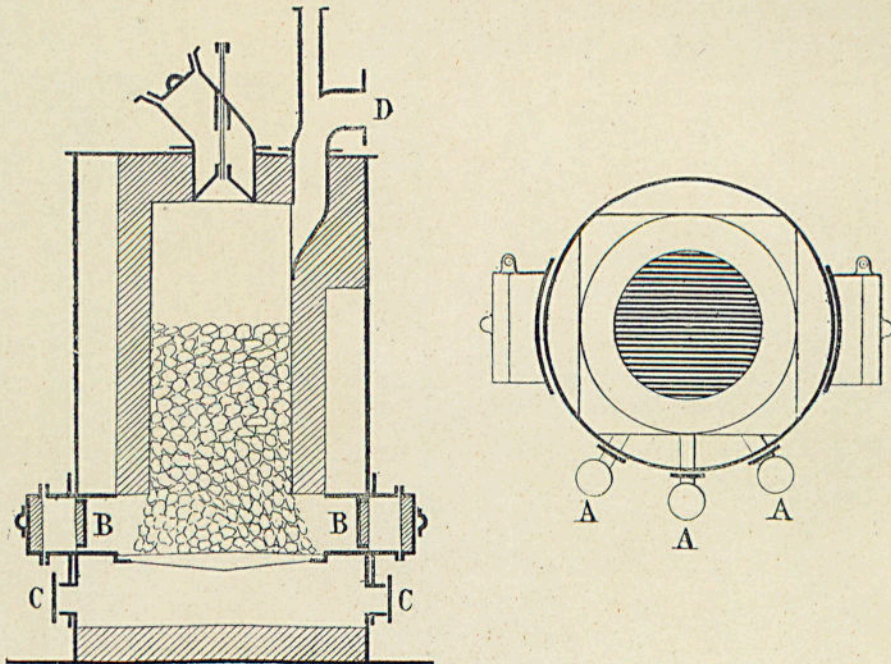


Fig. 37. — Coupes du gazogène de Deutz.

ment fermées, mais qu'il est possible d'ouvrir en marche pour donner rapidement un coup de ringard à la grille, si besoin en est. Le gaz s'échappe par D.

On voit sur la figure 38 une vue d'ensemble d'une installation de gazogène de Deutz : *a* est la chaudière, *b* l'injecteur à triple tuyère, *c* le gazogène lui-même, *g* le barillet, *d* la colonne à coke et *e* le gazomètre.

Le couvercle du gazogène est d'ordinaire muni d'un rebord, permettant de le recouvrir d'une couche d'eau et de le maintenir froid. La vapeur est surchauffée par un serpentín logé à la partie supérieure du foyer intérieur de la chaudière. La cuve du gazogène est fermée par un obturateur conique.

Une des plus brillantes installations faites par la société de Deutz est celle des sta-

1. Adolf Langen. — « Zeitschrift des vereines deutscher ingenieure, 8 nov. 1902 ». Dans ce travail, M. Langen fait d'Ebelmen un allemand; Ebelmen est né à Baume-les-Dames dans le Doubs, en 1814; il est mort en 1882, directeur de la manufacture de Sèvres.

tions hydrauliques de Bâle, dont nous avons déjà parlé, à propos des expériences de M. Meyer. L'ensemble se compose de deux chaudières à surchauffe, de deux épurateurs à sciure de bois et de quatre scrubbers au coke; trois cuves sont mises en batterie sur une même ligne. Elles marchent au coke; les gaz produits sont recueillis dans un gazomètre unique de 50 mètres cubes de capacité.

Les gazogènes ont une section de 0,4225 mètre carré; la hauteur de la charge est de 1,35 mètre; la grille mesure 0,568 mètre carré. Les couvercles sont réfrigérés par

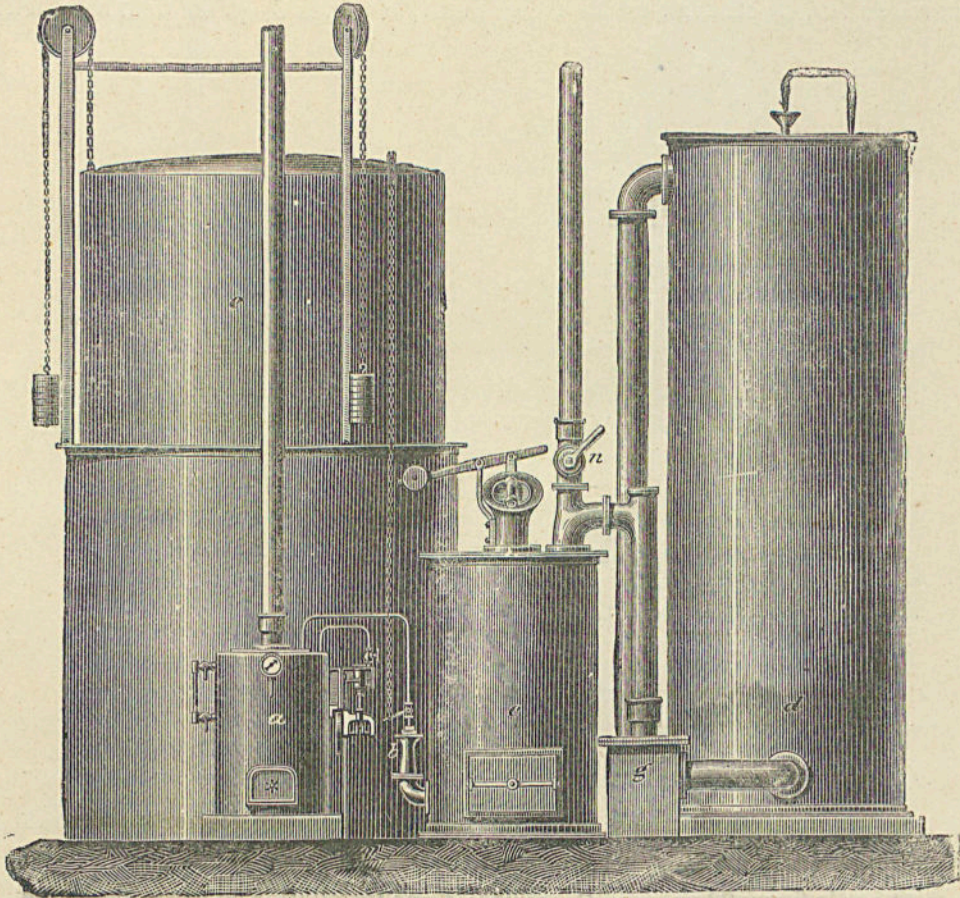


Fig. 38. — Vue d'ensemble du gazogène de Deutz.

une couche d'eau de 2 centimètres d'épaisseur, constamment entretenue par un mince filet de liquide. L'insufflation se fait par un injecteur à vapeur; la vapeur s'échappe par un orifice de 5 millimètres de diamètre, et débouche dans un tronc de cône renversé de 33 millimètres de diamètre au sommet. La surface de chauffe des chaudières est de 5 mètres carrés; la surchauffe se produit dans un serpentin d'une surface de 2,62 mètres carrés.

Un seul gazogène et une chaudière suffisent pour alimenter un moteur Otto à deux cylindres développant chacun 150 chevaux effectifs.

La puissance totale de la station de Bâle atteint aujourd'hui 1.560 chevaux ; c'est une des plus belles qu'on puisse signaler.

La société de Deutz a monté des gazogènes de 620 chevaux pour la station centrale de Giessen et de 800 chevaux pour la station de Munster ; à l'Exposition de Dusseldorf elle exposait une batterie de 1200 chevaux. On nous a dit que plus de 20.000 chevaux sont produits aujourd'hui par les gazogènes soufflés de Deutz.

Gazogène Pierson.

MM. Pierson, représentants de MM. Crossley à Paris, ont cherché à établir un nouveau modèle de gazogène supprimant complètement l'encrassement et l'engorgement

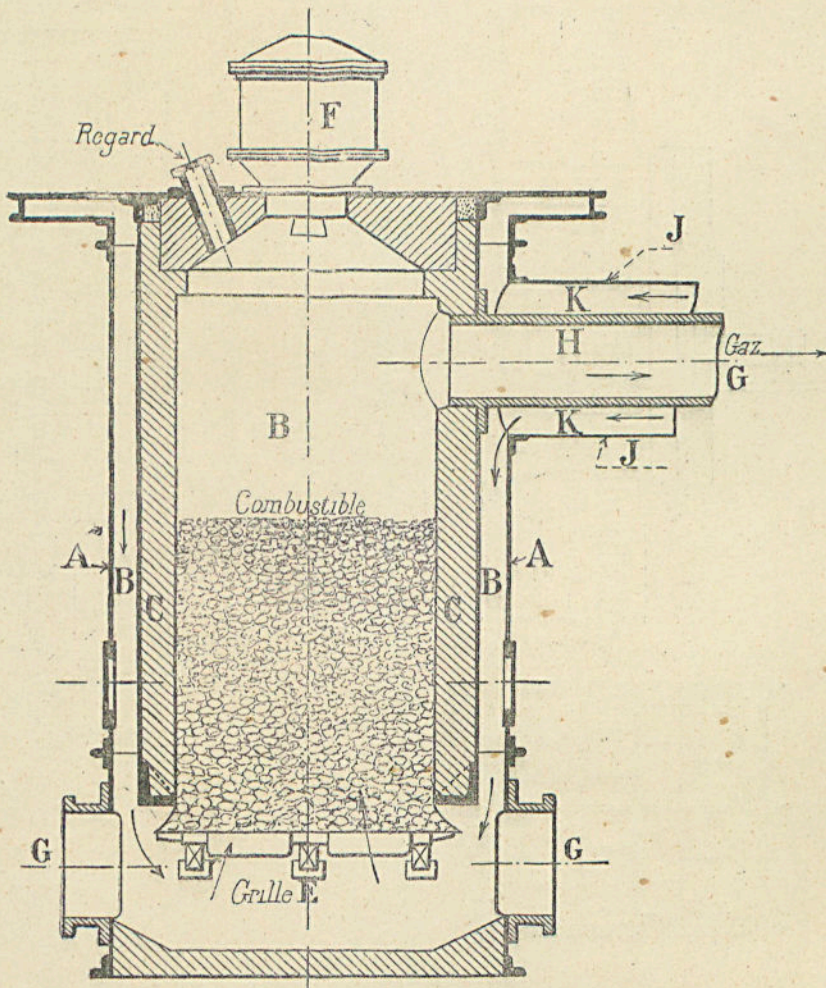
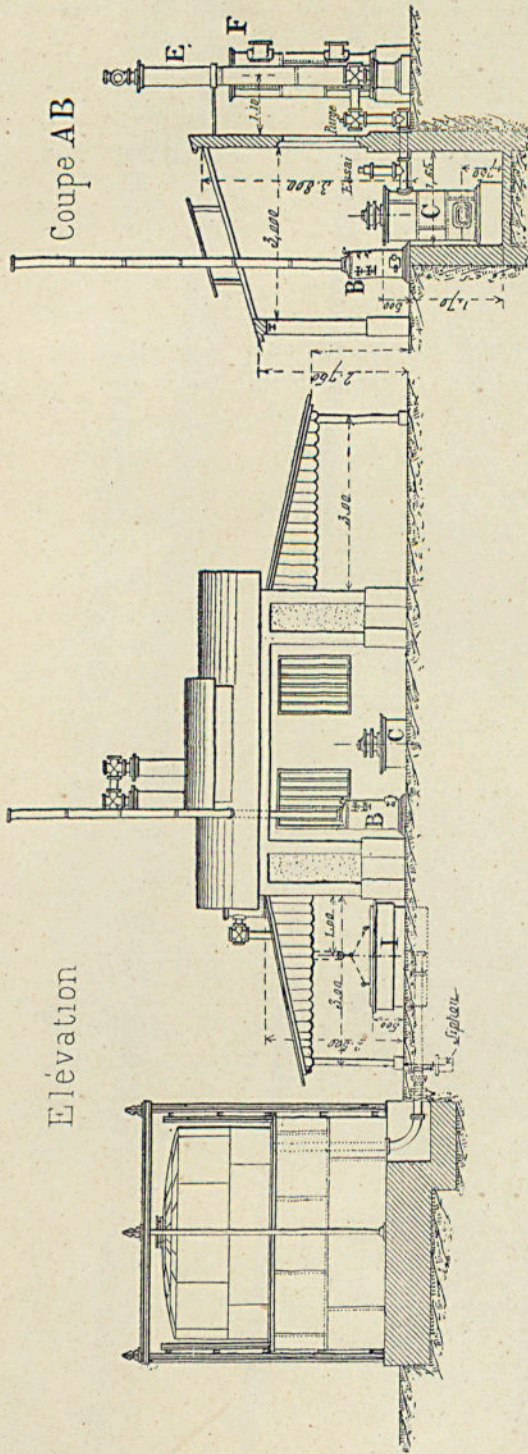
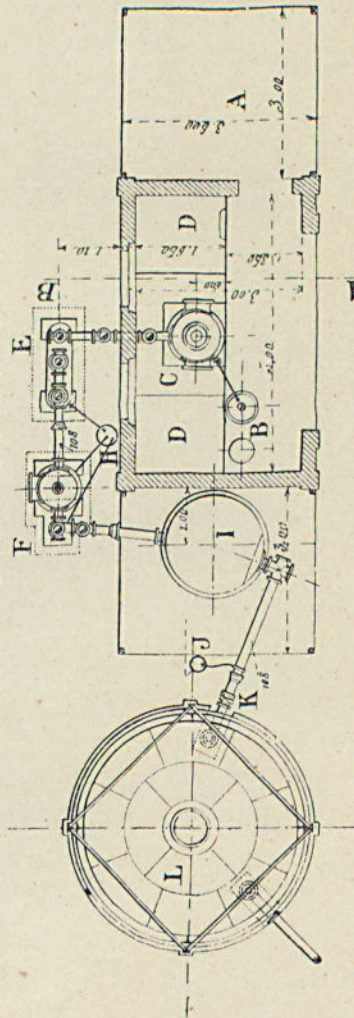


Fig. 39. — Gazogène Pierson.

des organes des moteurs, et permettant l'emploi de tous charbons ; à cet effet, ils ont modifié légèrement la forme de la cuve ; mais ils ont surtout développé largement l'en-



Plan d'ensemble



- A Dépôt de charbon et de coke ;
- B Chaudière ;
- C Gazogène ;
- D Fosses d'accès et de travail ;
- E Condenseur et barillet ;
- F Colonne à coke ;
- H Siphon général ;
- I Epurateur ;
- J Siphon ;
- K Vanne ;
- L Gazomètre .

Fig. 40. — Gazogène Pierson.

semble des appareils de lavage et d'épuration, qui sont quelquefois insuffisants et dont le fonctionnement laisse souvent à désirer. Le condenseur et le barillet présen-

tent d'abord des dimensions bien étudiées assurant le refroidissement parfait des gaz et une condensation rationnelle des goudrons et autres sous-produits condensables. La colonne à coke est aussi combinée en vue de bien laver le gaz, de le débarrasser de ses poussières et de retenir l'ammoniaque. L'épurateur présente de larges surfaces de claies, comparables à celles des usines à gaz de ville; le gazomètre lui-même a un grand volume afin d'emmagasiner du gaz pour une longue période de marche et d'opérer un meilleur mélange des gaz de qualité variable produits par le gazogène. On évite ainsi au conducteur une surveillance trop fatigante et l'on réalise une marche plus régulière du moteur. Enfin les canalisations ont des sections considérables en vue de réduire les pertes de charge et d'empêcher les obstructions.

Des soins particuliers ont été pris pour que le conducteur puisse lire d'un regard sur des manomètres groupés en batterie les pressions développées aux divers points des conduites; des regards pratiqués sur la cuve lui permettent de voir le feu; des flammes lui font connaître la composition du gaz engendré par leur couleur et leur longueur. Tout cela est parfaitement étudié.

L'ensemble que nous venons de décrire est représenté sur la figure 40; le lecteur est prié de se reporter à la légende de notre dessin.

La figure 39 représente en coupe le gazogène proprement dit. A est une double enveloppe démontable par panneaux avec soufflet de dilatation supérieur, permettant la visite intérieure de la chambre de réchauffage de l'air chargé de vapeur; B est cette chambre, dont l'efficacité est certaine, car il passe beaucoup de chaleur à travers la garniture réfractaire C. La cuve est cylindrique: le combustible repose sur la grille E, qu'on décrasse par les doubles portes G. Le tuyau de sortie des gaz H est entouré d'une enveloppe K qui contribue aussi à l'échauffement de l'air et de la vapeur d'injection. En somme, de K en E, les gaz trouvent de larges surfaces au contact desquelles leur température s'élève considérablement et peut atteindre 200°. Peut-être y aurait-il avantage de ceindre le pourtour A d'une seconde enveloppe de tôle pour mieux protéger encore l'appareil contre le rayonnement extérieur.

L'expérience a montré que le gazogène Pierson se prête avantageusement à l'emploi de charbons maigres à haute teneur en matières volatiles et en cendres.

On nettoie la grille toutes les douze heures, l'épurateur tous les huit jours et l'ensemble de l'installation six fois par an; un ouvrier adroit peut décrasser la grille sans avoir jamais à jeter bas les feux, si ce n'est pour les appareils de trop petites dimensions.

MM. Pierson ont installé des gazogènes à la Société nouvelle des Établissements Decauville, chez M. Carnaud, à Douarnenez, à l'Eden-Hôtel à la Turbie-sur-Mer (station électrique de 100 chevaux), chez M. Léonard Danel, imprimeur à Lille, chez MM. Bonnet-Ramel à Lyon, à la Société des Établissements Decauville, à Petit-Bourg, à la Société des Glacières de la Seine, à La Briche, aux usines de MM. de Dion et Bouton, à Puteaux, chez M. Blondel-Rohart à Arras, à la Station des Tramways de Cassel, près Dunkerque, etc., et les prévisions les plus optimistes ont été réalisées. MM. Pierson estiment que 1 kilogramme de combustible anthraciteux ou maigre à

longue flamme donne, avec 750 grammes de vapeur surchauffée, environ 4.000 litres de gaz à 1.250 calories, coûtant au plus 7 centimes, tous frais d'amortissement, d'intérêt et de production compris.

Aux glaciers de La Briche, les gazogènes Pierson sont en service huit mois de l'année, 24 heures par jour, sans arrêt; or, un moteur Crossley de 140 chevaux a été alimenté à ce régime pendant quatre mois et demi consécutifs, soit 2 880 heures de suite, avec une seule interruption de quarante-cinq minutes, provoquée par un raccourcissement de courroie.

Chez M. Danel à Loos, j'ai pu maintenir en feu un gazogène Pierson, du samedi

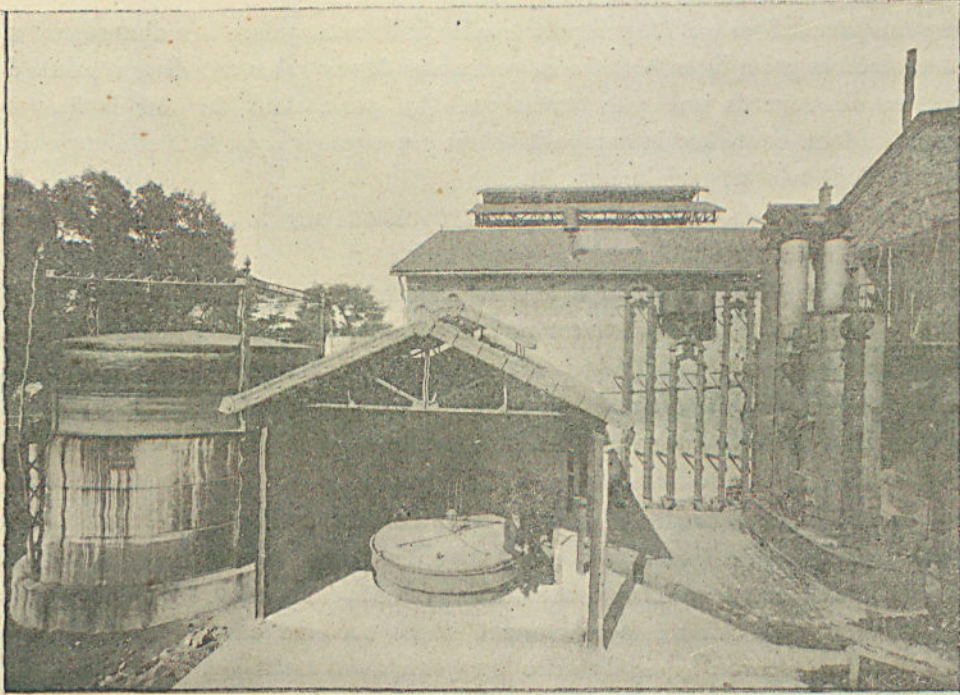


Fig. 41. — Gazogène Pierson des glaciers de la Briche.

soir au lundi matin, avec une consommation minime de combustible, et le lundi matin il a suffi d'un nettoyage des feux pour se remettre en route dans de bonnes conditions.

La station électrique de l'usine à gaz de Tunis est actionnée par quatre moteurs Crossley, possédant une puissance totale de 425 chevaux, alimentés de gaz pauvre, fourni par gazogène Pierson; la fabrication et l'utilisation des gaz pauvres par une compagnie gazière constitue un fait curieux, sur lequel nous devons insister. Le combustible gazéifié est le coke tout-venant de l'usine à gaz; d'autre part, les moteurs sont construits de manière à pouvoir marcher dans de bonnes conditions, soit au gaz de ville, soit au gaz pauvre, et les canalisations sont installées de telle façon que l'on puisse passer d'un gaz à l'autre sans avoir à arrêter les moteurs. On marche générale-

ment au gaz pauvre; le gaz de ville peut alors être considéré comme un auxiliaire de

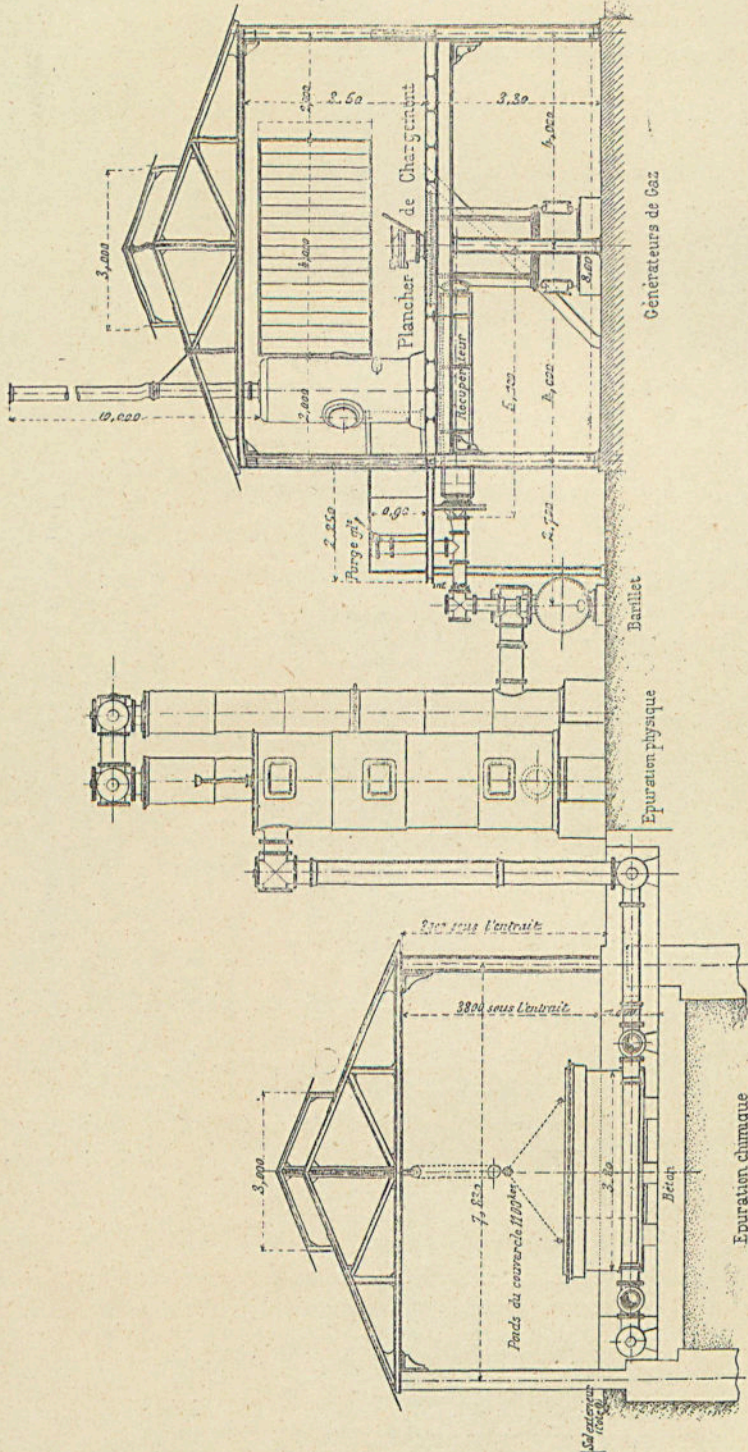


Fig. 42. — Gazogènes Pierson à l'usine à gaz de Tunis.

secours, qu'on utiliserait en cas d'accident au gazogène. L'usine emploie ainsi son

coke. Mais, aux époques où le coke se fait rare, où il est très demandé et par suite de

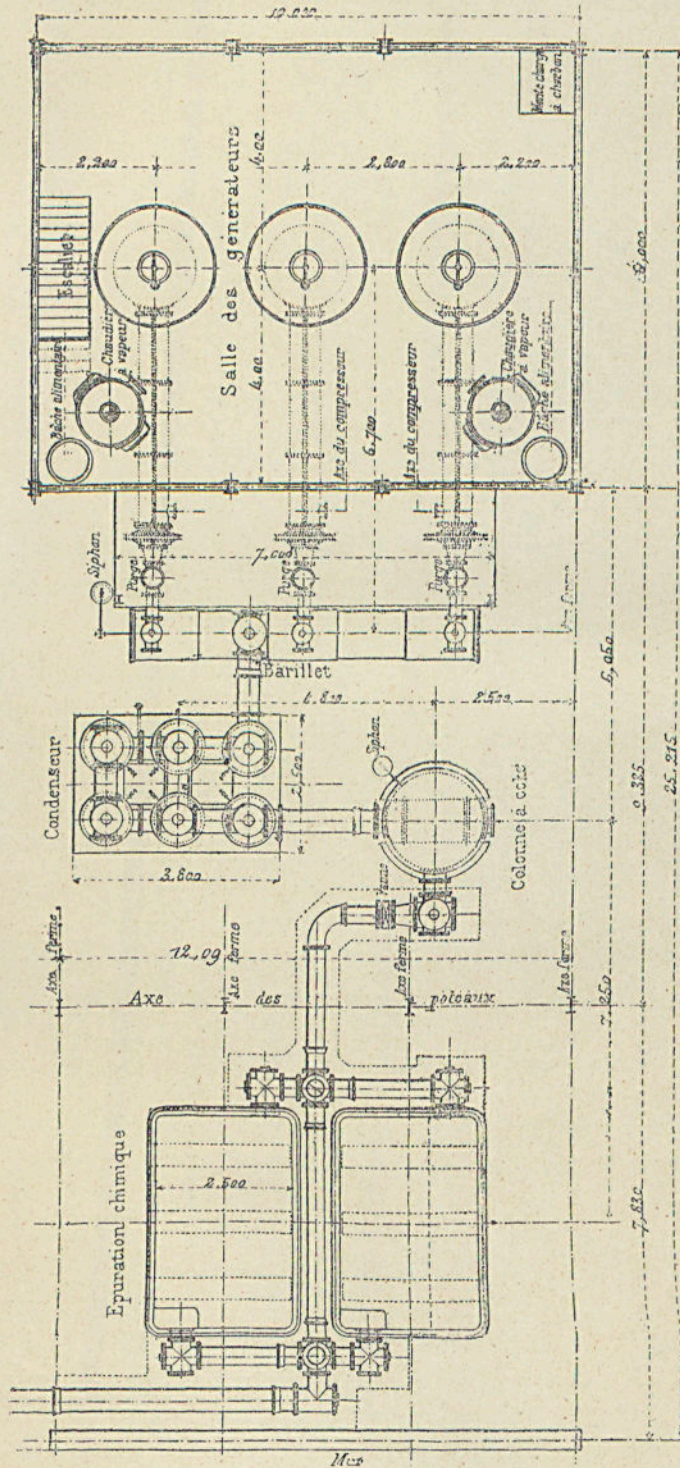


Fig. 43. — Cazogènes Pierson à l'usine à gaz de Tunis.

bonne vente, l'usine a intérêt à consommer son gaz de cornue et à céder son coke à

sa clientèle; sa double installation présente donc pour elle un réel intérêt, pratique et économique.

Le gazogène, monté dans cette usine, se compose de deux petites chaudières de 15 mètres carrés de surface de chauffe, de trois cuves, trois surchauffeurs, un barillet commun, six colonnes à condensation, un scrubber à coke, deux épurateurs-chimiques et un gazomètre de 250 mètres cubes. La disposition d'ensemble de ces appareils se voit sur les figures 42 et 43.

Pour développer 425 chevaux, il faut disposer d'environ 1.100 mètres cubes de gaz par heure; or, chaque cuve peut en fournir aisément 875, ce qui crée une disponibilité largement suffisante pour toutes les circonstances.

Gazogène Tangye

La puissante maison Tangye de Birmingham étudie depuis de longues années la question de la production des gaz pauvres et elle a créé plusieurs types, dont la comparaison est très instructive et dont l'examen témoigne du soin qui a été pris de ne rien laisser au hasard.

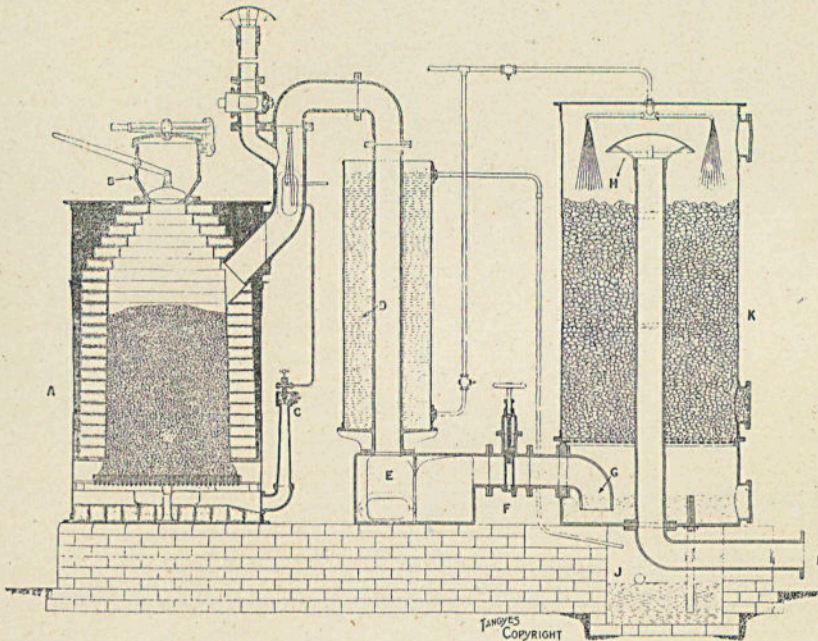


Fig. 44. — Section verticale d'un gazogène Tangye.

Un premier modèle avait été conçu dans le but spécial de produire un gaz de composition régulière et constante; à cet effet, le combustible frais séjournait d'abord, avant de tomber dans la cuve du gazogène, dans une trémie de forme particulière dont la grande capacité dispensait de charger fréquemment et dont la forme obligeait le chauffeur à maintenir toujours le niveau du charbon à une hauteur invariable. Ce

sont là d'excellents moyens pour conserver une allure de marche très régulière et assurer une richesse constante aux produits qui sortent du gazogène.

La trémie était fermée par un seul tampon supérieur qui se manœuvrait à la main à la façon habituelle. Un barrage déflecteur maintenait le combustible, l'empêchait d'encombrer le tuyau de sortie des gaz et forçait les carbures distillés de traverser une couche de combustible incandescent et d'y transformer ses goudrons.

Le modèle auquel la maison Tangye donne aujourd'hui la préférence est celui de la figure 44. La cuve porte à sa partie supérieure une double trémie et un grand intervalle sépare le couvercle de la couche supérieure du combustible.

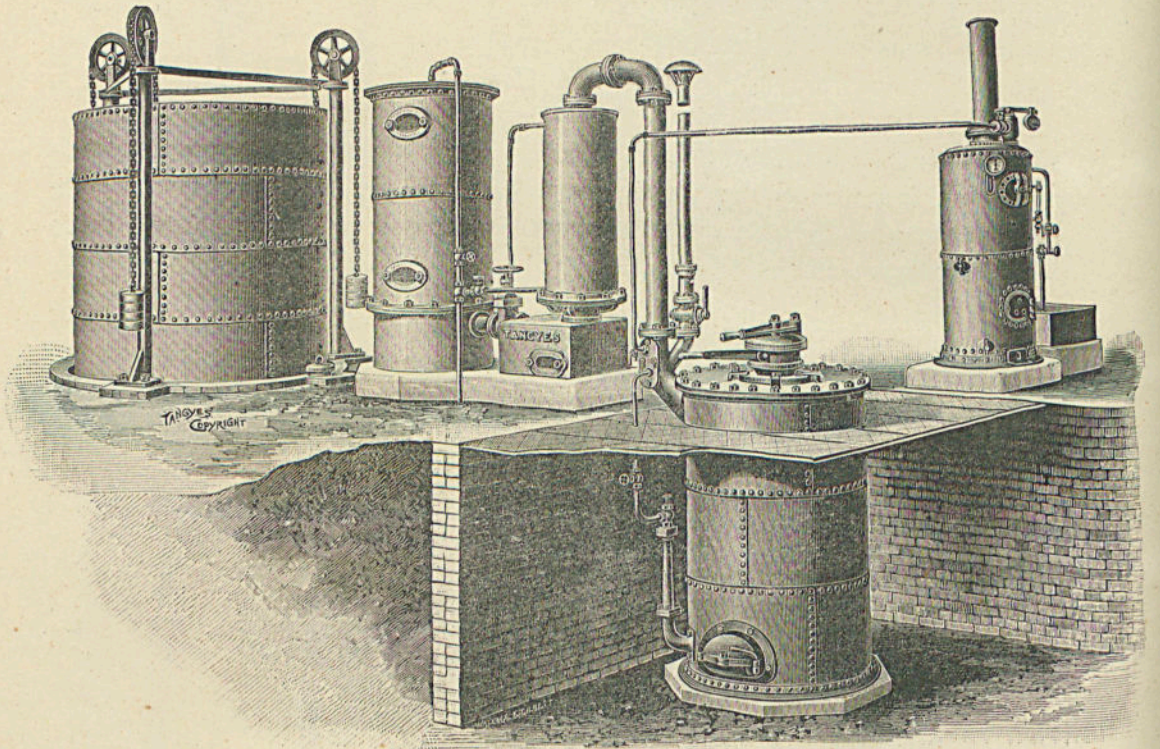


Fig. 45. — Vue en élévation d'un gazogène Tangye.

La vapeur engendrée par une petite chaudière verticale, traverse l'injecteur C et entraîne avec elle l'air nécessaire au fonctionnement de l'appareil : le courant d'air et de vapeur traverse une large grille, sur laquelle le charbon consommé s'étale, en se prêtant aisément à l'extraction des scories et des cendres. La vapeur a été surchauffée dans le conduit de sortie des gaz.

Les gaz traversent de haut en bas un réfrigérant à eau D qui les refroidit, et condense les goudrons, avant qu'ils arrivent au barillet et au scrubber à coke : celui-ci est constamment arrosé par un courant d'eau. Le courant gazeux est finalement évacué vers le gazomètre par le conduit horizontal I.

Les goudrons sont recueillis en E et en G ; la vanne F permet de régler le débit et

au besoin de l'arrêter entièrement en ouvrant le robinet placé sur la cheminée verticale, qui s'élève au-dessus de la cuve. La fosse J recueille l'eau qui se déverse du réfrigérant.

Il est à remarquer qu'on a renoncé à récupérer la chaleur emportée par les gaz chauds : malgré cela, le rendement de ces appareils est bon ; avec du Welsh anthracite, on produit aisément du gaz à 1.500 à 1.600 calories par mètre cube ; on estime à 4.500 mètres la production par tonne d'anthracite.

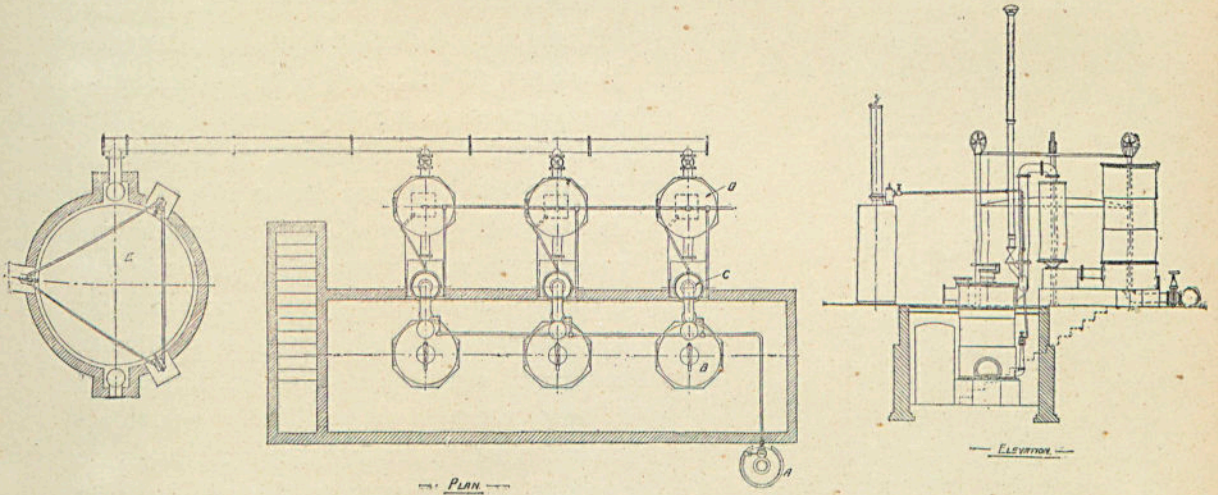


Fig. 46. — Vue en plan et coupe d'un gazogène Tangye.

Un gazogène Tangye a été installé à Berck-sur-Mer, au service des eaux, conformément aux dispositions des figures 45 et 46 qui n'exigent aucun commentaire. On marche au coke d'usine à gaz, et il se produit de fortes quantités de scories fondues et de mâchefers ; le fonctionnement est néanmoins satisfaisant et le cheval-heure indiqué ressort à 411 grammes.

Gazogène Mond.

La plupart des ingénieurs, qui se sont occupés jusqu'ici de gazogènes, ont négligé la récupération des sous-produits ; ils auraient du reste perdu leur temps, attendu que les charbons maigres et secs, nécessités par une bonne marche des appareils habituels, ne laissent pas de coke et ne permettent pas de recueillir les produits ammoniacaux.

Le Docteur Mond a poursuivi de longues et patientes recherches depuis l'année 1879, en vue de faciliter l'emploi de charbons plus ou moins bitumineux, pris-sous forme de menus, et d'en retirer des sous-produits rémunérateurs, permettant d'abaisser le prix de revient du gaz engendré.

Le projet était hérissé de difficultés, car on sait que les charbons les moins gras distillent de grandes quantités de goudrons, qui obstruent les canalisations, empâtent

les soupapes, empêchent l'allumage et finalement arrêtent les moteurs. D'ailleurs, les charbons de ce genre s'agglutinent et se collent, puis forment voûte dans la cuve du gazogène, sans qu'aucun ringard mécanique puisse empêcher cet effet; le passage à travers les couches de combustible offre alors à l'air une résistance insurmontable, l'acide carbonique ne se réduit plus, et bientôt le feu s'éteint. Bref : on ne savait marcher qu'à l'anthracite ou au coke, parfaitement criblé, sans poussières, dont le prix élevé compensait trop souvent la faible consommation. Quant aux produits ammoniacaux, ils étaient décomposés par la température élevée régnant dans l'appareil.

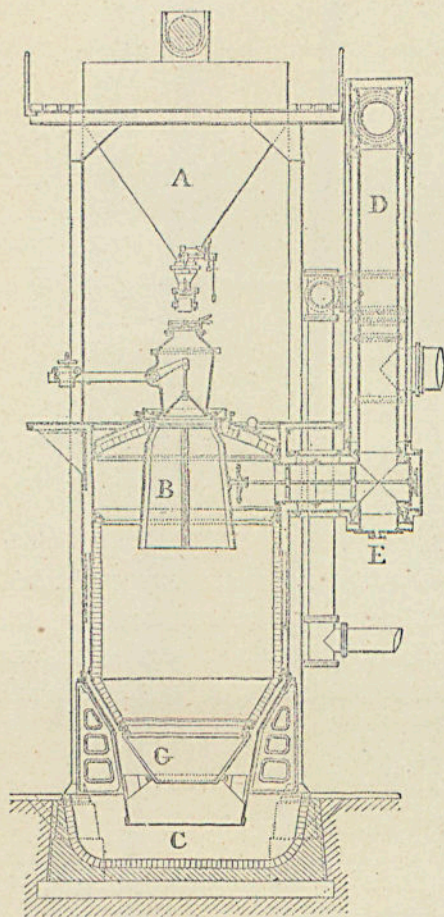


Fig. 47. — Coupe d'un gazogène Mond.

Northwich (Cheshire). Le charbon arrive par wagonnets sur une plateforme supérieure (fig. 47) et il est délivré à la cuve par une trémie AB.

Cette cuve est cylindrique, en tôle de fer à double paroi, revêtue intérieurement d'une chemise réfractaire; la deuxième enveloppe est à dilatation libre. Chargé en grande masse, le charbon remplit non seulement la cuve, mais encore la cloche B qui termine la trémie; il y séjourne et y subit une première distillation, qui produit le

L'allure froide était indiquée avec des charbons aussi gras afin d'éviter la production des mâchefers et des scories fondues.

M. Mond a réalisé son but en abaissant la température de la cuve par un afflux énorme de vapeur d'eau, laquelle est en quantité trop considérable pour pouvoir être dissociée à la traversée du charbon incandescent. L'excès se condense à la sortie des gaz et restitue sa chaleur de vaporisation à l'air qui entre, dont la température est alors suffisante pour empêcher l'extinction du feu. Les gaz chargés de produits ammoniacaux sont reçus dans des appareils spéciaux d'absorption, qui permettent d'en recueillir les 7/10. L'alimentation du combustible s'opère mécaniquement et des dispositions adroites sont prises pour faire tomber les cendres hors du foyer dans le cendrier; on charge d'ailleurs le charbon par grandes quantités, ce qui paraît paradoxal, mais l'inventeur prétend néanmoins obtenir un gaz de qualité très uniforme et de richesse suffisante pour être employé sans difficulté dans les moteurs (1).

Ce gazogène est en service dans l'usine chimique de MM. Brunner, Mond et C^o, à

1. « The Mond Gas-producer Plant and its application », by H. Humphrey; « Proceedings of the Institution of Civil Engineers », tome CXXIX, 1897.

départ des carbures volatils, entraînés par le courant des gaz, prenant le chemin du tuyau vertical de départ D. Ce tuyau est disposé en vue d'un décrassage facile par l'orifice inférieur E: les obstructions peuvent donc être facilement évitées. Une soupape à boulet très ingénieuse permet de ringarder en pleine marche.

L'air, amené sous une forte pression d'au moins 30 centimètres d'eau, se réchauffe en traversant d'abord un jeu d'orgues de tuyaux et finalement l'enveloppe du gazogène et il arrive ainsi très chaud à la grille G. Cette grille est formée de barreaux renversés, dessinant un cône, accrochés par leur partie supérieure à une couronne circulaire, reposant sur un anneau inférieur; ils sont libres et peuvent donc être secoués sans difficulté. Les cendres tombent dans le cendrier C plein d'eau, constituant ainsi

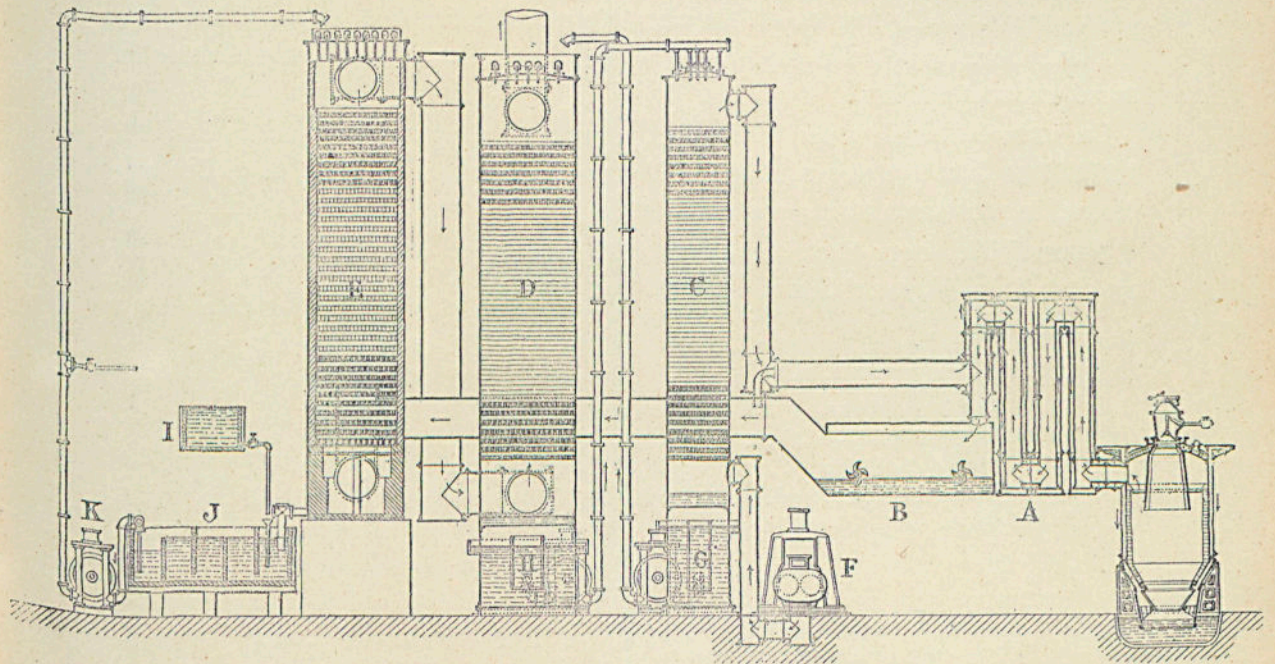


Fig. 48. — Installation complète d'un gazogène Mond.

un appareil à fermeture hydraulique. Ce dispositif a été imaginé en vue de l'emploi d'un combustible menu, que la vapeur traverse en vertu de la haute pression de l'insufflation; la vapeur se diffuse régulièrement à travers la masse. Son long parcours contre des parois chaudes la surchauffe considérablement, mais, ainsi qu'il a été dit, sa quantité empêche la température de s'élever assez pour décomposer les gaz ammoniacaux.

La figure 48 montre la disposition du jeu d'orgues et des laveurs et condenseurs placés à la suite.

Les gaz chauds, venus du gazogène, traversent d'abord les tuyaux A, appelés *regenerators*, puis un laveur B et ils montent ensuite dans la colonne E (*ammonia recovery tower*), arrosée d'acide, par le jeu de la pompe K, qui prélève le liquide acide dans les bacs I et J. Ce liquide est une dissolution d'acide sulfurique à 4 %; I fournit

l'acide nécessaire pour maintenir à ce taux le liquide ayant déjà circulé précédemment dans la tour; le dosage est vérifié en J. Le gaz est conduit ensuite dans la tour D (*gas cooling tower*) arrosée d'eau froide par la pompe G; l'eau chaude ainsi produite est reprise par la pompe H et remontée au sommet de la tour C (*air heating tower*).

Or, voyons maintenant quelle est la voie suivie par l'air à introduire à travers l'enveloppe du gazogène : il est fourni par le ventilateur F, et monte dans la tour C, où il se réchauffe et se sature de vapeur d'eau; de là il passe au jeu d'orgues, et il arrive enfin à l'enveloppe annulaire du gazogène, qu'il traverse avant d'être admis à la grille.

On recueille ainsi 90 livres de sulfate d'ammoniaque par tonne de charbon.

La proportion d'hydrogène est toujours très considérable dans ce gaz; il renferme d'ailleurs beaucoup d'acide carbonique et peu d'oxyde de carbone. Les moteurs s'en accommodent très bien.

Un moteur Crossley de 25 chevaux a consommé, par cheval-heure indiqué, 1.973 litres de ce gaz engendrés par 467 grammes de charbon menu, de qualité médiocre. Le rendement thermique a donc atteint 0,24.

Un essai d'éclairage électrique durant 820 heures, fait en avril 1896, a donné les résultats économiques ci-dessous :

Consommation de charbon	5842 kilogr.
— de gaz	26051 m ³
Ampères moyens	181,0
Volts moyens	100,0
Travail électrique 18,4 kilowats	= 24,5 chev.
— indiqué (ventilateurs compris)	37,7 —
Charbon par kilowatt-heure	0,992 kilogr.

Prix de revient.

Charbon, valeur déduite de l'ammoniaque	50 ^f , 70
Huile, charbon pour lampes, etc.	113, 60
Main-d'œuvre.	65, 50
Total.	229, 20
Prix du kilowatt-heure.	0 ^f , 0386

Ce brillant résultat justifie les dépenses nécessitées par l'installation d'un puissant gazogène.

Il importe du reste d'observer que tout le dispositif de récupération des produits ammoniacaux ne s'impose nullement et que le seul fait de rendre possible l'emploi des charbons gras constitue déjà pour l'appareil Mond un avantage très marqué.

M. J. et O. G. Pierson sont concessionnaires exclusifs en France des gazogènes Mond, ils nous ont fait connaître les derniers perfectionnements apportés par les ingénieurs anglais à leur œuvre.

La figure 49 représente le plus récent modèle de gazogène Mond, dont les dispositions principales ne diffèrent pas de celles que nous venons de décrire, mais qui pré-

sente plusieurs particularités intéressantes. Une grille inclinée A complètement ouverte par le bas en B laisse tomber les cendres dans la cuve en maçonnerie C pleine d'eau formant joint hydraulique; des portes à fermeture instantanée K permettent la visite et le nettoyage de cette grille. La double enveloppe du tuyau de sortie des gaz G est démontable; le mélange est injecté dans la chambre S, avant de passer en M. En marche, on pique le feu par les regards H à fermeture automatique par des boulets sphériques J.

Gazogène Crossley.

La maison Crossley a voulu avoir aussi son gazogène et M. Atkinson a créé un type composite, dans lequel on trouve la grille tournante américaine, l'enveloppe annulaire pour réchauffer l'air primaire chargé de vapeur d'injection et divers autres dispositifs connus, dont l'agencement très ingénieux et la combinaison rationnelle doivent conduire à d'excellents résultats.

Signalons dans cet appareil le joint hydraulique formé par une cuve à eau placée en dessous de la grille, dans laquelle on fait tomber les scories et les cendres. La prise de gaz est centrale et le combustible se charge par deux trémies excentrées; le charbon descend dans la cuve en se chauffant progressivement au contact de la tubulure de prise de gaz et d'une garniture de fonte circulaire qui l'encadre; les carbures qui distillent sont obligés de traverser une couche de charbon voisine de l'incandescence.

Cet appareil est trop nouveau pour que nous puissions donner des renseignements sur son fonctionnement.

Gazogène Bayenthal.

Tous les constructeurs de moteurs à gaz auront bientôt leur gazogène; ils adoptent généralement le type Dowson, qu'ils modifient dans l'un ou l'autre de ses dispositifs. Nous ne nous attarderons pas à les décrire: nous ne croyons devoir signaler celui de la *Köelnische Maschinenbau Actien Gesellschaft* de Bayenthal que parce qu'il a été en service à l'Exposition de Dusseldorf et qu'il a pu y être remarqué par nos lecteurs: il alimentait en effet le puissant moteur de M. von Oechelhaeuser de 785 chevaux indiqués.

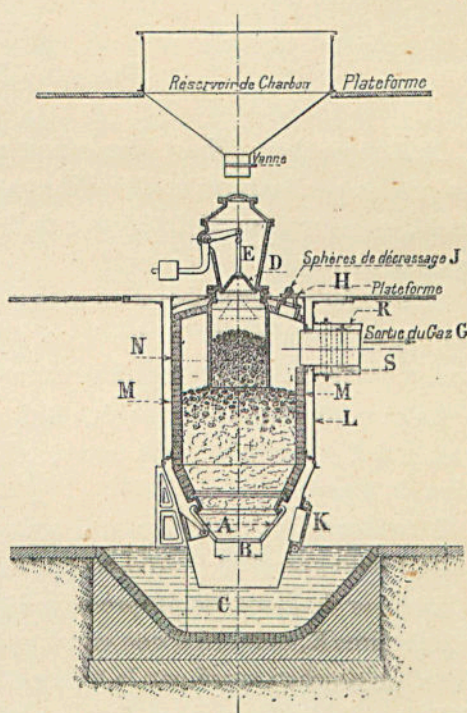


Fig. 49. — Gazogène Mond-Pierson.

2° GAZOGÈNES SOUFLÉS A VENTILATEUR

Gazogène Buire-Lencauchez.

M. Lencauchez, qui est bien connu par ses remarquables études sur les gazogènes et par les perfectionnements qu'il a apportés à leur construction et à leur fonctionnement, ne pouvait se désintéresser de l'application qui en est faite à l'alimentation des moteurs à gaz.

Il a créé (*), en collaboration avec les ingénieurs des Chantiers de la Buire (Lyon), un appareil produisant un gaz de composition bien régulière, et d'une richesse suffisante, parfaitement approprié aux moteurs, qui est devenu un type.

La caractéristique du gazogène Buire-Lencauchez est la suivante : la chaudière à vapeur est supprimée ; c'est une simplification, mais elle est compensée par la sujection du ventilateur.

Nous donnons dans la figure ci-contre (fig. 50) une coupe verticale des divers éléments d'un gazogène Buire-Lencauchez.

Le foyer du gazogène proprement dit A, est constitué par un cylindre en briques réfractaires K, entouré d'une enveloppe de sable L destinée à faire office de calorifuge. Le charbon versé par la trémie N, s'étale sur la grille C; les barreaux obliques DE l'empêchent de tomber dans le cendrier G, tout en laissant filtrer l'air à travers le combustible incandescent.

La saillie K fait l'office d'un barrage ; M. Lencauchez attribue une grande importance à la position et à l'action de cet élément.

Un robinet à eau W fait entrer dans le barreau creux E un mince filet de liquide qui tombe dans le cendrier et s'y vaporise rapidement, par le rayonnement de la grille et du feu qui la recouvre ; la vapeur ainsi formée est entraînée avec l'air insufflé et pénètre dans la cuve du gazogène, où elle se dissocie au contact du carbone au rouge. L'excès d'eau, s'il y en a, est évacué par le siphon J.

L'air est soufflé par un ventilateur spécial, actionné par le moteur : la nécessité de ce ventilateur et de sa commande rachète dans une large mesure l'avantage qui résulte de la suppression de la chaudière.

Le gaz combustible produit s'écoule par le conduit S et entre dans le laveur B, en surmontant la faible résistance du joint hydraulique T destiné à empêcher tout retour vers le gazogène. Il traverse ensuite les grilles V et pénètre dans la colonne à coke B, où il se dépouille de ses poussières et se refroidit au contact de l'eau tombant en pluie par le siphon à bords dentelés Z. Le gaz, ainsi lavé et refroidi, se rend au gazomètre par le tuyau Y, pendant que l'eau s'écoule au dehors par le trop plein U.

1. M. Lencauchez a pris, en 1886, différents brevets pour des gazogènes surmontés de serpentins, servant à la production de la vapeur et à sa surchauffe; ces appareils n'ont pas été construits. Il exposait, en 1889, un autre type qu'il a aussi abandonné par la suite.

Le gazomètre se soulève au fur et à mesure qu'il se remplit. Arrivée au bout de sa course, la cloche agit sur un levier de sonnette, relié par un fil de fer à un clapet placé sur la conduite du vent soufflé par le ventilateur.

Ce clapet se ferme alors et l'air débité par le ventilateur s'échappe dans l'atmosphère ; la production du gaz s'arrête par le fait même pour reprendre aussitôt qu'un abaissement de la cloche aura ouvert de nouveau le clapet. Ce réglage automatique permet de proportionner la génération du gaz au débit du moteur : le gazogène ne fabrique que ce qu'il faut de gaz pour la marche de la machine.

En arrêt, on entr'ouvre d'une quantité déterminée le clapet d'échappement d'air en même temps qu'on serre légèrement la vanne P de sorte qu'elle n'obture pas hermé-

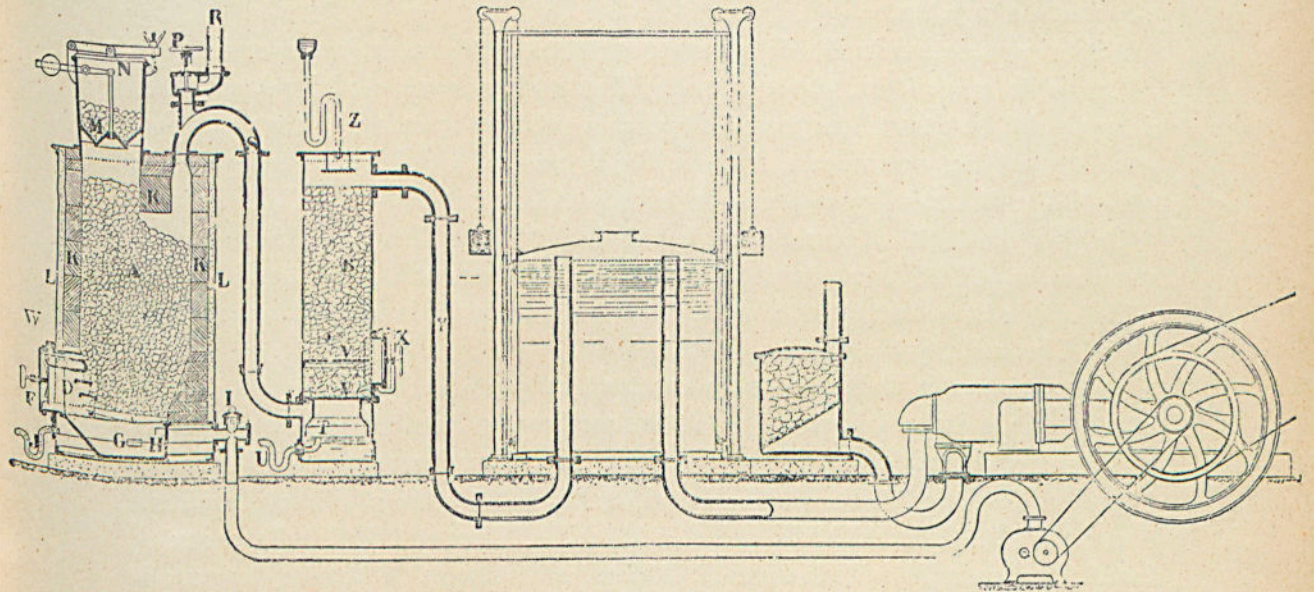


Fig. 50. — Coupe verticale d'un gazogène Buire-Lencauchez.

tiquement son siège : il s'établit ainsi dans le gazogène un faible courant d'air, strictement suffisant pour maintenir l'incandescence du feu, mais rigoureusement limité à ce qu'il faut pour que le gazogène ne s'éteigne pas.

A la reprise du travail, le gazomètre est plein, ce qui permet une mise en marche immédiate : c'est un répit accordé à la production du gaz, répit pendant lequel le ventilateur doit pouvoir ramener le foyer à la température voulue pour son bon fonctionnement.

En marche courante, on charge le gazogène toutes les 3 ou 4 heures, suivant ses dimensions : il suffit de soulever le couvercle N, de remplir la trémie, de la fermer pour faire basculer ensuite le cône M au moyen de son levier à contrepoids, et d'introduire la charge.

Après 24 heures de marche, on ouvre la porte F : on retire les cendres de dessous le foyer et l'on repique le feu entre les barreaux.

L'appareil que nous venons de décrire présente de très sérieuses qualités et il est simple : son entretien est pour ainsi dire nul ; tout au plus peut-on être obligé de faire renouveler à de très longs intervalles le revêtement intérieur de la cuve, et ce n'est pas une dépense considérable, surtout si l'on considère qu'elle se répartit sur un intervalle de 5 à 6 ans.

M. Lencauchez adjoint quelquefois à son gazogène un réchauffeur tubulaire traversé en un sens par les gaz chauds produits par le gazogène, et dans l'autre sens par l'air d'insufflation, de manière à réaliser un chauffage méthodique. Il nous semble que le prix supplémentaire de cet accessoire doit être facilement regagné par l'économie et les facilités qu'il procure, et nous nous étonnons de ne pas le voir employer toujours ; l'échauffement préalable de l'air permet d'augmenter la proportion de la vapeur d'eau injectée.

D'autre part, la surchauffe de la vapeur améliore certainement le rendement.

Une petite lampe à gaz, placée sous la grille à gradins dans le cendrier et alimentée de gaz puisé au gazomètre, permet d'opérer la mise en train sans peine ; elle peut aussi être utilisée quand on a à réchauffer la cuve ou à revivifier le feu après une période d'arrêt. Cette disposition est ingénieuse et fort pratique.

Un gazogène de 60 chevaux consomme au plus 100 litres d'eau par heure pour la vaporisation, et 500 litres pour le lavage. On peut toujours utiliser à cet effet l'eau de réfrigération du moteur, pourvu qu'on dispose d'un bassin de refroidissement dans lequel l'eau soit reprise par une pompe.

La maison Matter de Rouen, qui a construit ce gazogène, conjointement avec les chantiers de la Buire à Lyon, en a fait de nombreuses installations, par lesquelles s'est généralisé l'emploi des charbons français. Rappelons les minoteries Barataud à Marseille, Hurpeau à Sens, Abel Leblanc à Pantin, Potez à Albert, Liet et Lasserre à Montestruc, les filatures Gavelle et Hall à Abbeville, Niaux et Cabrol à Varangeville, les stations centrales de Villeneuve-les-Béziers, d'Etrépagny, le service des eaux de Laval, le couvent des Bénédictins de Solesmes, etc. ; quelques-uns de ces gazogènes ont été mis hors d'emploi, mais c'est par eux surtout qu'a été faite la preuve de l'économie que procurent les gaz pauvres, quand on gazéifie des charbons de Vicoigne et Nœux, d'Anzin, de Charleroi, etc., dont le prix est très inférieur aux anthracites du pays de Galles.

Depuis lors, M. Lencauchez a pris plusieurs nouveaux brevets, et il a imaginé des dispositions ingénieuses qui constituent de sérieux progrès sur ses premiers types.

Signalons un gazogène à prise de gaz centrale par une tubulure pendante, qui s'engage dans la masse du combustible et y pénètre assez profondément pour capter les gaz au-dessous de la zone de distillation, de telle sorte que les carbures sont obligés de prendre contact avec les couches incandescentes. De petites ouvertures, percées dans la tubulure, ouvrent toutefois un passage direct à une partie des produits distillés vers la sortie. La tubulure est dentelée à sa partie inférieure.

M. Lencauchez donne à sa cuve la forme classique des hauts fourneaux ; la partie supérieure, légèrement conique, est rétrécie au gueulard ; la partie inférieure a une

conicité beaucoup plus prononcée et inverse. Une grille à gradins retient le combustible latéralement, alors que des barreaux horizontaux forment le fond. Le premier échelon du gradin est à circulation d'eau, ce qui est une solution un peu vieille et assez précaire du problème de la fusion des grilles ; les barreaux horizontaux sont munis d'une queue, comme les barreaux Perret, qui trempe dans l'eau. L'air, avant d'arriver à la grille, se réchauffe en traversant une chambre garnie de nombreuses ailettes en fonte destinées à multiplier l'étendue des surfaces d'échange et à fournir une température plus élevée.

Le gazogène que nous venons de décrire est dénommé par M. Lencauchez le gazogène *aérhydrique* ; un autre type s'appelle le gazogène à *cendrier et joint hydraulique* ; l'air arrive par le centre du foyer à travers un cône de fonte percé de trous. Les couches incandescentes reposent sur les couches inférieures de cendres et de scories, qui trempent dans un bassin rempli d'eau, constituant le joint hydraulique (1).

M. Lencauchez adjoint à son gazogène un appareil saturateur et réchauffeur qui utilise les chaleurs perdues à l'échauffement des moteurs pour porter à 300° un mélange d'air primaire et de vapeur.

L'œuvre du maître est trop considérable pour que nous entreprenions de l'exposer complètement ici et nous sommes obligés de renvoyer le lecteur aux nombreuses publications de M. Lencauchez sur la matière des gazogènes, qu'il connaît si bien.

Gazogène Letombe.

M. Letombe a cherché à utiliser le mieux possible les chaleurs perdues et régler à volonté l'introduction de la vapeur d'eau indépendamment du volume d'air injecté ; il a été conduit ainsi à supprimer la chaudière spéciale et à se servir d'un ventilateur.

Le vent soufflé par un ventilateur Root entre dans le gazogène par le haut, en *a* (fig. 51) et il circule dans un serpentín qui s'enroule autour de la cuve *f*, formée par une garniture de briques réfractaires. Ce serpentín est noyé dans une couche de sable tassée entre la garniture réfractaire et la chemise de tôle extérieure.

Un filet d'eau, débité par *b*, et réglable à volonté, coule dans la partie supérieure du serpentín et fournit la vapeur nécessaire aux réactions. Cette vapeur est entraînée par le courant d'air et elle se surchauffe dans le serpentín ; elle constitue d'ailleurs un mélange très intime avec l'air. Le fait de pouvoir modérer comme on le veut le débit d'eau constitue, pour le gazogène Letombe, un perfectionnement dont la portée est considérable. Des précautions sont à prendre, il est vrai, pour éviter toute obstruction du serpentín par incrustation de calcaires ou autrement.

La trémie, de forme *cupe and cone*, effectue une bonne répartition du charbon dans la cuve. Celle-ci est cylindrique, mais elle se termine dans le bas par une partie

1. Voir les descriptions et dessins des dernières inventions de M. Lencauchez dans son remarquable travail publié chez Bernard Tignol (1902, Paris), sur la production des gaz des gazogènes, leur épuration et leur emploi par les moteurs à gaz.

incurvée qui fait glisser le charbon incandescent vers une grille verticale placée sur l'avant. La porte est fermée par la plaque *d*, qui masque la grille ; elle permet un complet et facile décrassage.

Les gaz s'échappent par le haut ; *e* est une cheminée d'allumage.

A la suite du gazogène se trouvent les appareils de lavage et d'épuration, constitués par un laveur à barillet *y* et une colonne à coke *h*. Le ventilateur d'insufflation n'est pas figuré sur notre dessin.

Les essais que j'ai effectués en janvier 1902 sur ce gazogène, ont témoigné de ses remarquables qualités et ont fait ressortir l'économie qu'on peut obtenir par une

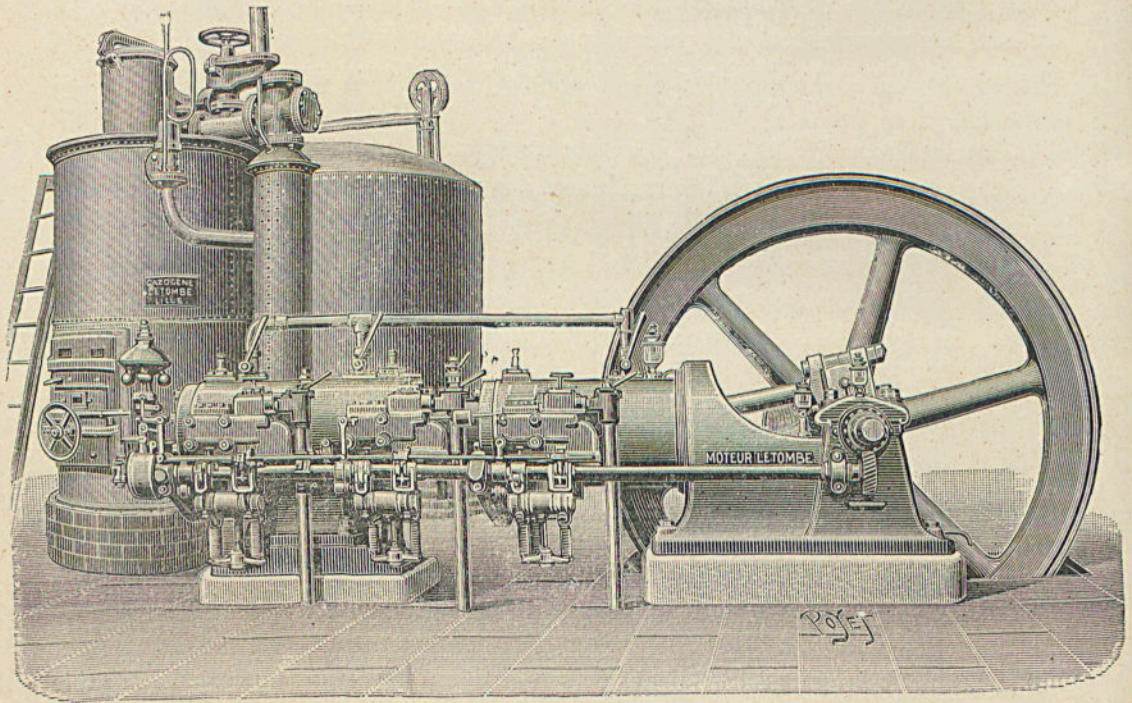


Fig. 51. — Gazogène Letombe.

récupération complète des chaleurs perdues. La suppression d'une chaudière spéciale fait gagner au moins 50 grammes de combustible par cheval-heure effectif, soit par 2,500 litres de gaz.

M. Letombe a pu employer des charbons de nature diverse, dans les meilleures conditions ; la facilité qu'il a de faire varier à volonté et suivant qu'il en est besoin la pression du vent et le débit de vapeur, indépendamment l'un de l'autre, permet de gouverner l'allure du feu et d'éviter les scories fusibles, qui collent et s'agglutinent dans la cuve. Deux gazogènes à grande production ont fonctionné continûment avec du charbon maigre des Alpes, renfermant 53,42 0/0 de carbone fixe et volatil et 44,58 de cendres : ce résultat est remarquable. Les cendres renfermaient 67 de silice, 17 d'alumine, 10 de peroxyde de fer et le reste de chaux, magnésie, etc. ; l'analyse a

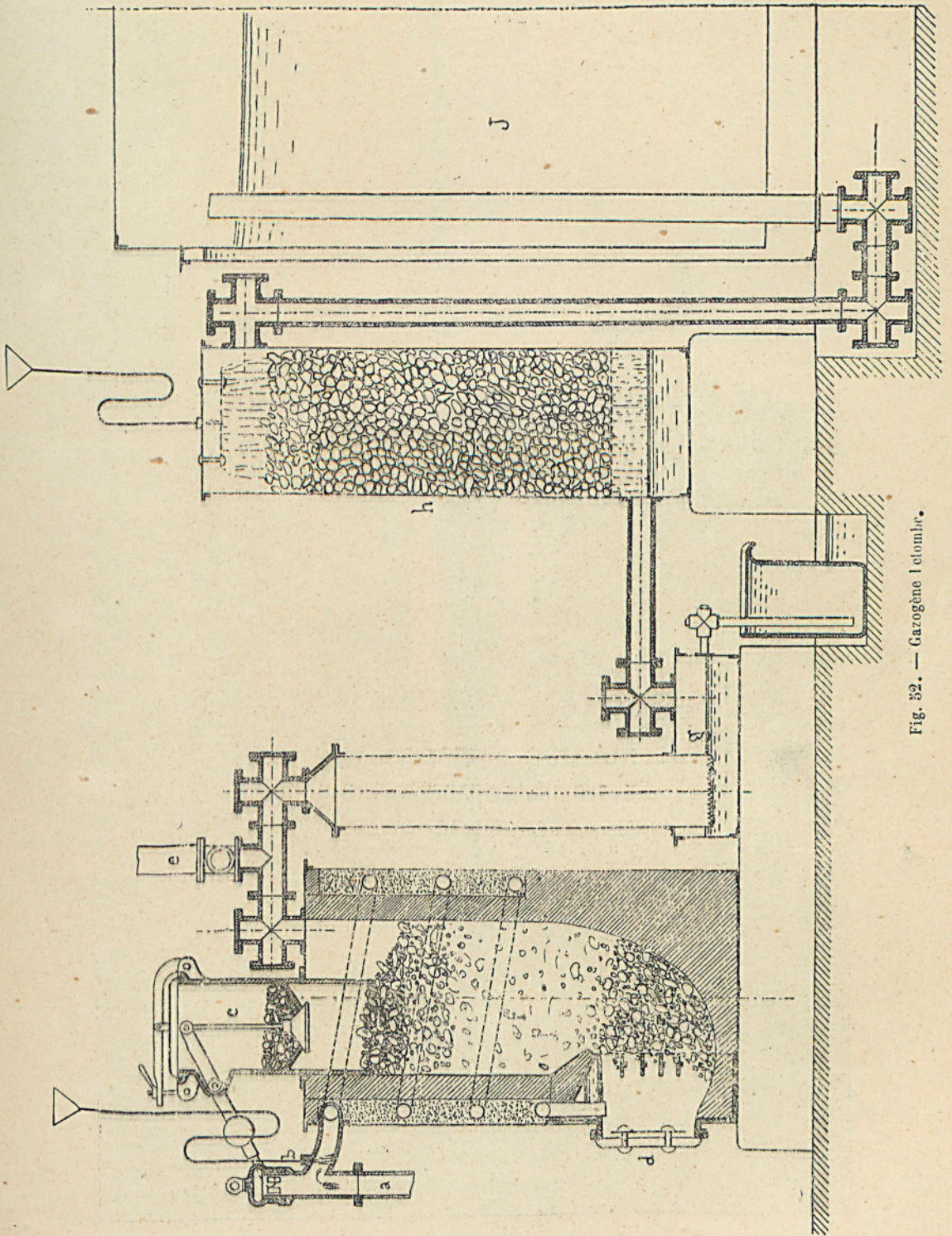


Fig. 52. — Gazogène 1 et ombr.

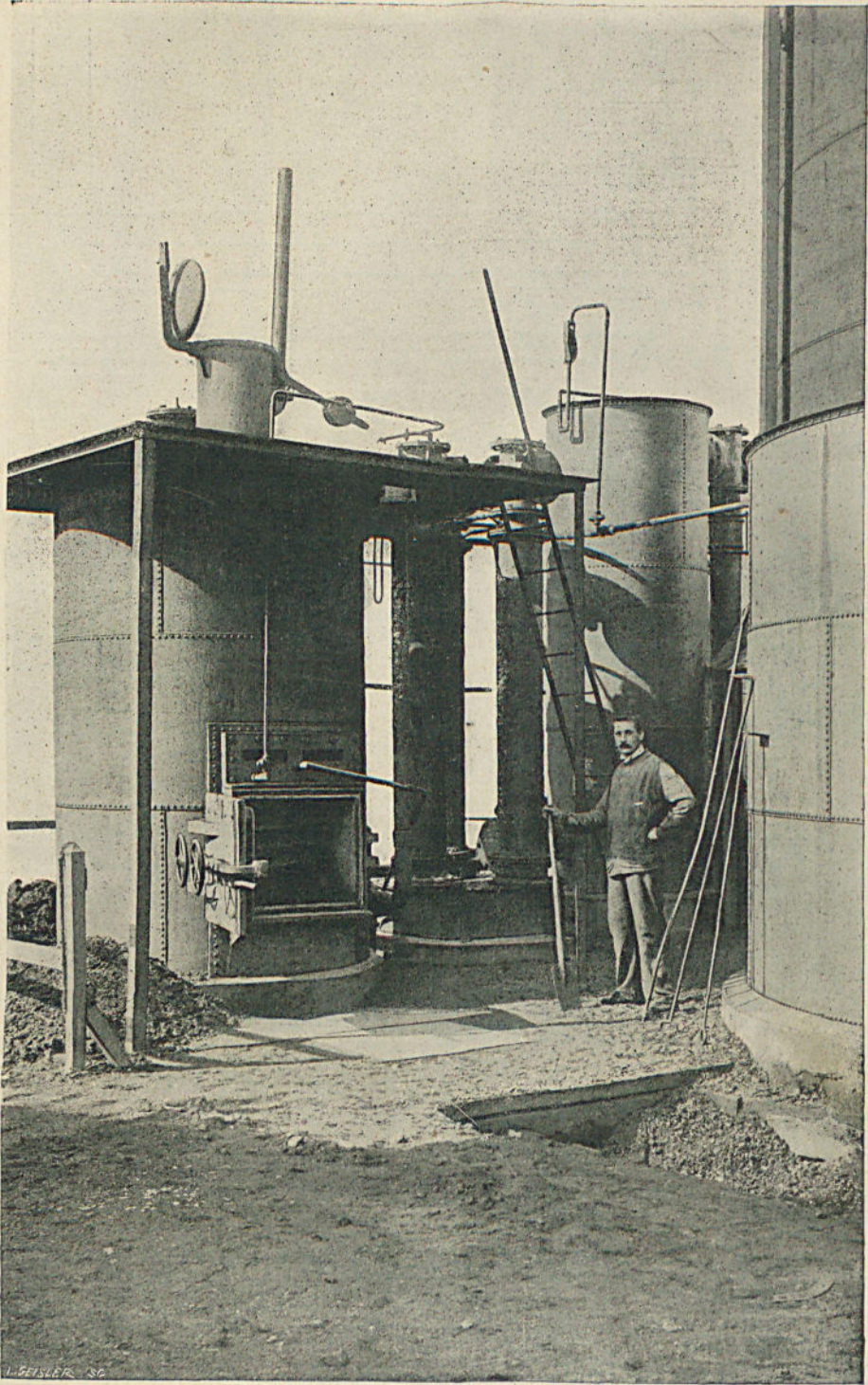


Fig. 53. — Gazogène Letombe.

été faite par M. Guénez, chimiste en chef des douanes. Il eut été intéressant de relever la composition et la richesse du gaz produit.

Dans ses grandes installations, M. Letombe intercale entre la cuve et la cloche un appareil rotatif à moulinet et arrosage d'eau, qui fixe les poussières en les agglutinant

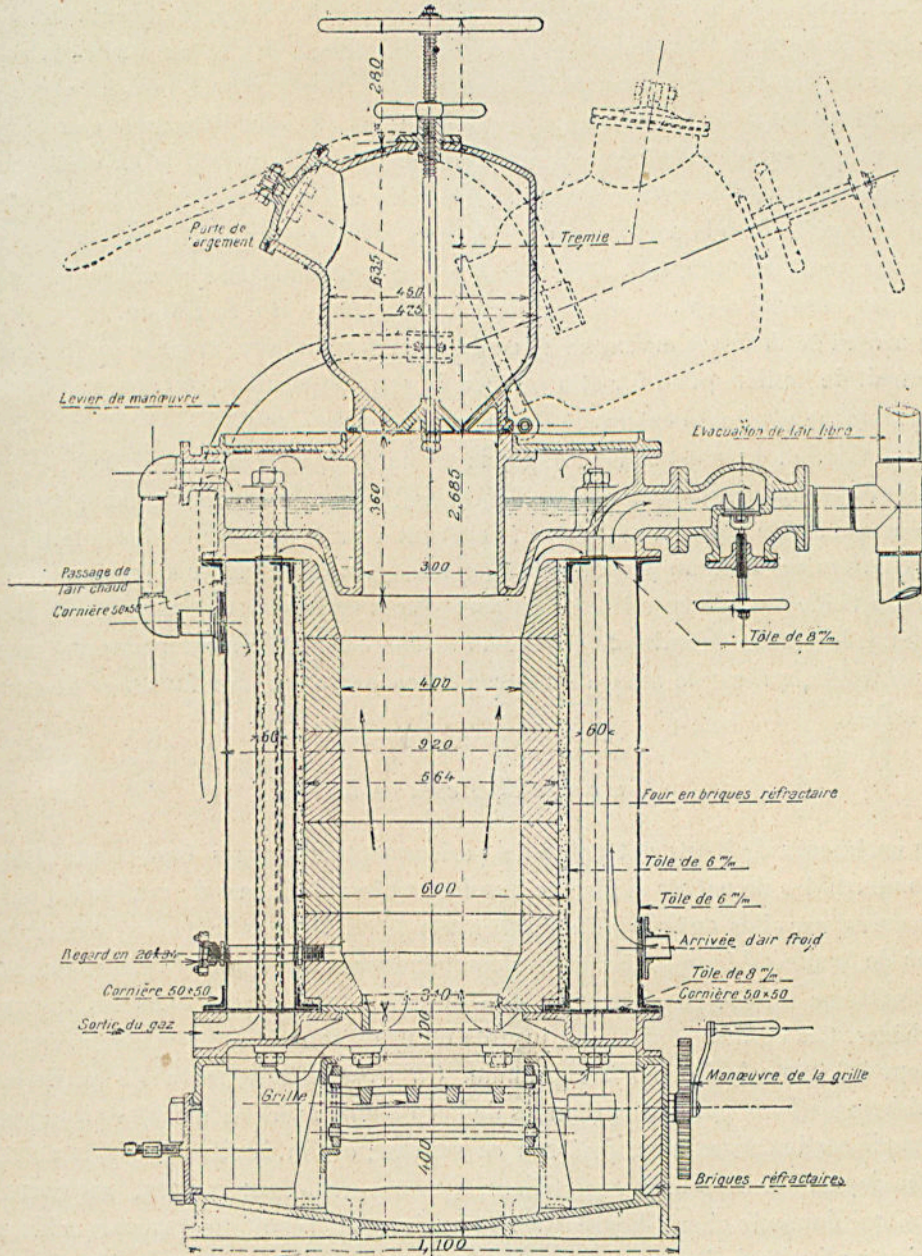


Fig. 54. — Gazogène Duplex.

et régularise le débit du gazéificateur : il joue donc le double rôle d'épurateur centrifuge et d'exhausteur.

Gazogène Duplex.

Cet appareil se compose d'une cuve à double enveloppe, surmontée d'un récipient en fonte rempli d'eau, faisant l'office de chaudière : l'air, envoyé par un ventilateur, traverse l'enveloppe, s'y réchauffe, passe ensuite dans le récipient au contact de l'eau, s'y sature de vapeur, et descend au foyer en traversant des tubes verticaux en fer placés dans l'axe des conduites qui débitent les gaz du gazogène. L'utilisation des chaleurs perdues est donc aussi bonne que possible. La chaudière forme le couvercle de la cuve et elle supporte la trémie de chargement, laquelle reçoit le charbon par un orifice latéral et oscille autour d'une charnière de sa base.

Les gaz, prélevés à la partie supérieure de la cuve, s'engagent dans les conduites verticales, dont il a été question ci-dessus, et entrent dans une chambre circulaire, logée dans le socle, d'où ils vont aux appareils de lavage et d'épuration.

Le niveau de l'eau est maintenu constant dans la chaudière, grâce à un flotteur qui ne fournit de liquide qu'au fur et à mesure de son évaporation, en commandant une petite soupape placée à l'extrémité du tuyau d'amenée d'eau.

L'alimentation d'air est sous la dépendance d'un appareil autorégulateur ; en effet, dès que la production de gaz dépasse la consommation, un diaphragme agit sur une soupape qui dirige dans l'atmosphère le courant d'air débité par le ventilateur.

Le charbon est soutenu par une grille qu'on peut manœuvrer mécaniquement du dehors, à l'aide d'une manivelle, et qui empêche le collage des scories et mâchefers. D'ailleurs, la grande quantité de vapeur d'eau amenée par l'air détermine une marche à allure froide, qui est de nature à assurer la conservation des fontes et des terres réfractaires.

Gazogène de Deutz au lignite.

Les ingénieurs de Deutz ont poursuivi patiemment de longues études sur l'emploi des combustibles de nature si diverse que fournit le sol allemand ; ces études ont été fructueuses, car elles ont abouti à l'utilisation de ces lignites tourbeux, connus sous le nom de *braunkohle*, que l'on trouve en abondance dans les provinces rhénanes, et dont l'extrême misère ne permettait que difficilement l'emploi dans les foyers de chaudières. Ces lignites renferment jusqu'à 60 0/0 d'eau ; leur pouvoir calorifique est inférieur à 2.500 calories par kilogramme. On s'estimait heureux de produire le cheval-heure effectif par 4 kilogrammes de braunkohle avec les machines à vapeur et les chaudières les mieux appropriées à ce service ; or, la Société de Deutz a mis en marche depuis dix mois dans ses ateliers, un moteur à gaz pauvre, marchant au lignite, qui donne le cheval-heure par 1^h,5 environ. Ce résultat est remarquable et le gazogène au lignite de Deutz a été une des curiosités de l'exposition de Düsseldorf.

La Société ne donne pas beaucoup d'explications sur son gazogène et nous ne savons guère que ce que nous avons pu voir ou deviner. La cuve est plus haute que d'habitude et il se pourrait qu'elle fonctionnât à marche renversée. L'insufflation est effec-

tuée à une pression assez élevée de 200 à 700 millimètres d'eau par un ventilateur Root : la résistance opposée au passage des gaz est en effet plus grande qu'avec le charbon criblé ordinaire. Le plus souvent il est inutile d'injecter de la vapeur d'eau. Le nettoyage des gaz s'opère par un séparateur de poussières, un scrubber, des barillets et des collecteurs, placés en série avant la cloche : la multiplication de ces appareils témoigne de la nécessité d'arrêter des poussières abondantes et une grande quantité de goudrons. Mais ces appareils nettoyeurs sont tous d'une simplicité rudimentaire.

Il paraît que la température des gaz à la sortie de la cuve ne dépasse guère 60°. Le combustible donne des résidus pulvérulents d'une extraction facile : l'allure froide à laquelle on fonctionne ne peut donner lieu à la production de mâchefers.

Des précautions sont à prendre, quand on veut dégrasser en marche, parce qu'il se produit des poussières inflammables qui forment une longue trainée de flamme ; c'est sans doute pour cette raison que la cuve est surmontée d'une cheminée allant sur le toit.

Les moteurs alimentés au gaz de lignite fonctionnent régulièrement ; le gaz a en moyenne un pouvoir inférieur de 1.250 calories ; malgré toutes les précautions, il tend à encombrer de goudrons la soupape d'admission, ce qui exige des dispositions spéciales pour la boîte à soupapes.

Les chiffres suivants témoignent de cette bonne marche :

BRAUNKOHLE DU RHIN				
Composition du lignite . . .	C	= 23,86	30,99	29,78
	H	= 1,82	2,10	2,03
	Az + O	= 9,21	11,44	11,98
	S	= 0,29	0,25	0,08
	Cendres	= 4,64	2,57	2,18
	Eau	= 60,18	52,55	53,95
		100,00	100,00	100,00
Pouvoir inférieur du lignite. . .	1870 calories.	2400 calor.	2365 calor.	
Composition du gaz . . .	CO	= 24 %	25 %	27 %
	H	= 12,5 —	15 —	13 —
	CO ²	= 8,5 —	8 —	7,5 —
Pouvoir inférieur du gaz. . .	1100 calories.	1250 calor.	1250 calor.	
Gaz par kilogramme de lignite .	1130 litres.	1560 litres.	1530 litres.	

Les gazogènes à lignite ne sont d'un emploi pratique qu'à partir d'une puissance de 50 chevaux, correspondante à un débit horaire de 150 mètres cubes environ. Je doute qu'ils fournissent souvent un aussi beau rendement que celui qui correspondrait aux chiffres reproduits ci-dessus, d'après des prospectus de réclame distribués à Düsseldorf (1) ; mais on se contenterait à moins. La teneur en eau est quelquefois si grande qu'on voit le liquide sortir par la grille ; il se forme en tout cas dans la cuve une

1. 1.360 litres de gaz à 1.250 calories correspondent à 1.950 calories pour 2.400, du lignite ; le rendement serait donc de 81 0/0.

énorme quantité de vapeur qui va se condenser dans le scrubber ; dans ces conditions, le rendement ne peut être que médiocre.

Mais nous ne voulons diminuer en rien la valeur du gazogène à lignite de Deutz, qui est une création fort remarquable.

Gazogène Pøtter.

Cet appareil, construit par la maison Pøtter de Dortmund, s'est fait remarquer à l'exposition de Dusseldorf, où il alimentait des moteurs à gaz.

La cuve est supportée par une couronne annulaire en fer, constituant une sorte d'entablement reposant sur six colonnes en fonte ; des grilles à gradins forment un creuset à six pans, dont l'axe est traversé par la tuyère apportant au sein du combustible le vent chargé de vapeur d'eau. Une chemise circulaire en tôle, formée de six panneaux amovibles, est suspendue à la couronne et elle trempe dans l'eau d'une cuvette circulaire formant ainsi une chambre close à fermeture hydraulique. On accède aux grilles à gradins en enlevant le panneau correspondant.

Les appareils accessoires de lavage et d'épuration des gaz ne présentent aucune disposition neuve ou originale.

Ces appareils peuvent traiter des combustibles pulvérulents : des regards ménagés dans le couvercle de la cuve, permettent de piquer le feu et de briser les voûtes qui pourraient se former.

De nombreuses installations faites en Allemagne témoignent en faveur de ce gazogène, que nous aurions voulu pouvoir décrire plus complètement.

Gazogène Lafond.

L'inventeur appelle cet appareil un *gazogène-four* à gaz riche ; en effet, nous y voyons une cornue superposée à la cuve du gazogène, et on nous a indiqué un pouvoir de 2,220 calories pour un gaz engendré avec des coquilles de coton, ne renfermant que 22 0/0 d'azote.

La cuve inférieure, de forme analogue à celle des étalages de hauts fourneaux, est surmontée d'une longue et étroite cornue en fonte, dans laquelle on charge le combustible à traiter, par la trémie habituelle. A la jonction de la cuve et de la cornue, se trouve un carneau circulaire qui reçoit d'une part du gaz, pris à la cuve, et de l'autre, un certain volume d'air, amené de l'extérieur ; le gaz brûle dans ce carneau et s'élève dans une cheminée entourant la cornue, qui se trouve ainsi portée à une température élevée. Il résulte de ce dispositif, que le gaz recueilli au sommet de la cornue, est moins chargé d'azote que ne l'est d'ordinaire le gaz de gazogène.

Le gazogène Lafond fonctionne par l'action simultanée d'un ventilateur-souffleur et d'un exhausteur. Le ventilateur insuffle un mélange d'air et de vapeur d'eau sous la grille ; l'exhausteur, placé en aval des laveurs et des épurateurs, extrait les gaz de la

cornue et les envoie au moteur. Ces deux appareils sont solidaires, et le réglage de leur action s'effectue par une variation de vitesse, commandée par les déplacements de la cloche au gazomètre. En montant, cette cloche fait glisser une courroie sur deux longs cônes. La vitesse relative des deux appareils est déterminée suivant la nature du combustible employé.

On a traité avec succès des bois, des tourbes, des lignites, des houilles sèches renfermant une forte proportion de matières volatiles, etc., etc.

M. Ch. Besson, à Lyon, est concessionnaire des brevets Lafond.

Gazogène Hovine et Breuillé.

MM. Hovine et Breuillé ont pris, à la date du 9 juin 1902, un brevet pour un gazogène destiné à utiliser des charbons demi-gras et maigres pris à l'état de tout-venant, sans criblage.

Cet appareil est constitué par une cuve de forme rectangulaire, comme celle des gazogènes Siemens, à laquelle est adjointe une colonne remplie de coke incandescent, que traverse le gaz à sa sortie de la cuve. La gazéification est donc à deux phases, une à combustion plus ou moins complète, l'autre à réduction des hydrocarbures et à leur transformation en gaz permanents. Les deux appareils sont accolés de manière à bénéficier des chaleurs perdues par conductibilité et par rayonnement : on s'est proposé, de plus, d'obtenir une grande facilité de travail et de décrassage.

Les premiers essais effectués sur des charbons à grande volatilité et sur des houilles grasses tout-venant ont été, nous a-t-on dit, réellement intéressants. L'avenir justifiera sans doute cette première indication de la pratique.

3° GAZOGÈNES SOUFLÉS A HAUTE PRESSION

Gazogène Gardie.

M. Gardie a créé un gazogène soufflé à haute pression ; l'air est débité par un compresseur spécial à piston, sous une pression de 6 à 7 kilogrammes, et il est mélangé de vapeur d'eau à une tension égale, très chaude par conséquent. Telle est la note caractéristique de cet ingénieux appareil ; dans les autres producteurs de gaz pauvre, la pression ne dépasse guère 20 à 30 centimètres d'eau : l'écart est donc énorme. L'emploi de ces pressions élevées est rationnel, car on ne peut nier que l'allure d'un appareil soufflé ne soit tout autre, quand la pression est considérable ; l'action de l'oxygène et de l'acide carbonique sur le carbone incandescent est plus énergique, et la combustion plus méthodique. Par contre, le procédé a ses inconvénients : la compression de l'air absorbe beaucoup de travail et complique l'appareil.

Le gazogène Gardie a la forme d'un cubilot : le charbon est soutenu par les *étalages*, et il n'est pas nécessaire de le faire reposer sur une grille, ce qui est une sim-

plification. L'air comprimé, mêlé de vapeur d'eau, débouche dans la cuve par une couronne de tuyères, qu'on voit sur notre dessin de la figure 55. Un regard, ménagé à ce niveau, permet de se rendre compte du degré d'incandescence obtenu.

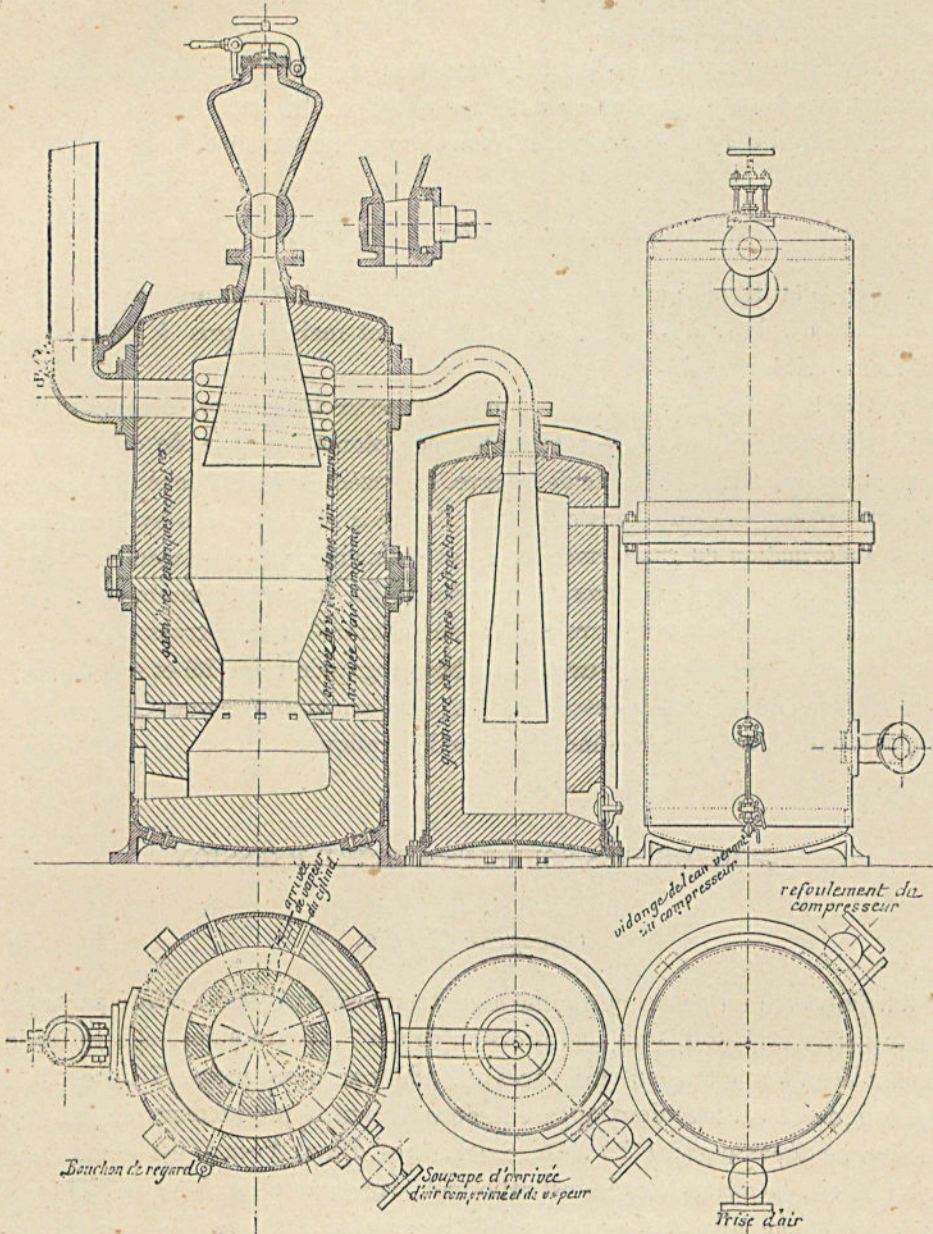


Fig. 55. — Gazogène Gardie.

Le chargement du combustible s'opère par une trémie à deux obturateurs, disposés comme d'habitude : l'obturateur inférieur est constitué par un boisseau de robinet ; l'obturateur supérieur est une simple valve à charnière, appliquée sur son siège par un serre-joint à vis.

La cuve est revêtue d'une épaisse garniture de briques réfractaires.

Les gaz s'échappent par la partie supérieure du cubilot ; ils chauffent d'abord un serpentin traversé par la vapeur d'alimentation, qui se trouve ainsi surchauffée sans qu'il en coûte rien, par l'utilisation des chaleurs perdues. Le courant gazeux débouche ensuite dans un cylindre nettoyeur, de forme absolument rudimentaire, mais d'une efficacité remarquable cependant, car il arrête toutes les poussières. Il se compose simplement d'un tuyau évasé descendant jusqu'aux deux tiers de la hauteur de l'enceinte cylindrique ; l'air revient sur ses pas pour atteindre l'orifice de dégagement, qui est placé à la partie supérieure du cylindre, et il se dépouille de ses impuretés. Cette enceinte est aussi garnie d'un revêtement réfractaire.

Le cylindre vertical, figuré sur la droite du dessin, est un réservoir d'air comprimé, interposé entre le compresseur et le gazogène.

L'air d'injection est chauffé dans un récupérateur, traversé en sens inverse par les gaz de la décharge du moteur ; on réalise ainsi une haute température de gazéification, qui est avantageuse, parce que d'une part elle utilise le calorique perdu et que de plus elle permet d'augmenter la proportion de vapeur d'eau injectée. Le gaz formé renferme, par suite, une forte proportion de gaz à l'eau. L'absence de grille au gazogène supprime les inconvénients qui accompagnent généralement l'emploi de l'air surchauffé.

De fait, le gaz Gardie est relativement riche ; j'ai déterminé à plusieurs reprises son pouvoir calorifique par le procédé de ma bombe eudiométrique et lui ai trouvé de 1.400 à 1.500 calories par mètre cube de gaz, à 0° et 760 millimètres, le combustible employé étant de l'antracite anglais d'excellente qualité. Il ne se produit ni goudron, ni produits ammoniacaux. Ce résultat était à prévoir. Mais ce qui était moins prévu, c'est la faible quantité de scories formées dans la cuve du gazogène après une marche de 24 heures ; malgré la haute température de l'appareil, il se développe peu de mâchefers fusibles et ils se ramassent dans le cendrier sous un

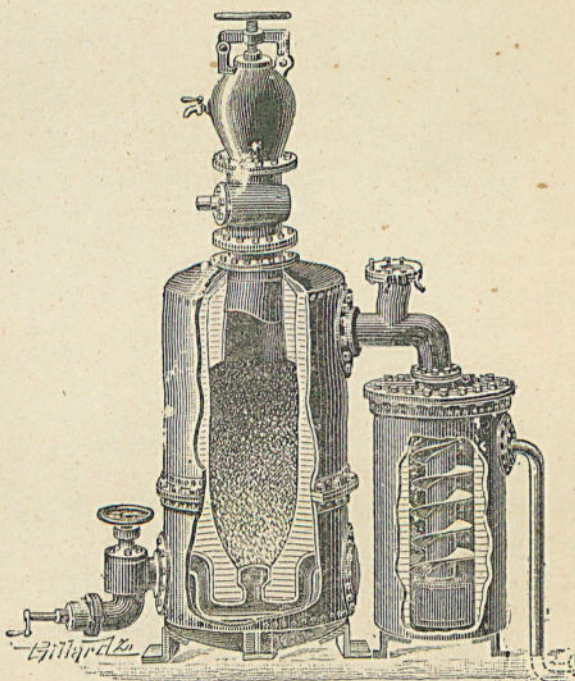


Fig. 56. — Gazogène Gardie.

très faible volume. Le nettoyeur renferme lui-même peu de cendres. Ces heureux résultats ont permis de supprimer les scrubbers, les épurateurs, et les colonnes à coke qu'on dispose généralement entre le gazogène et le moteur ; bien plus, on peut se passer de cloche, ce qui est un perfectionnement notable, car le gazomètre est

toujours encombrant. En le supprimant, on se prive, il est vrai, de la régulation produite par le mélange des gaz de qualité différente qui peuvent être fournis par le

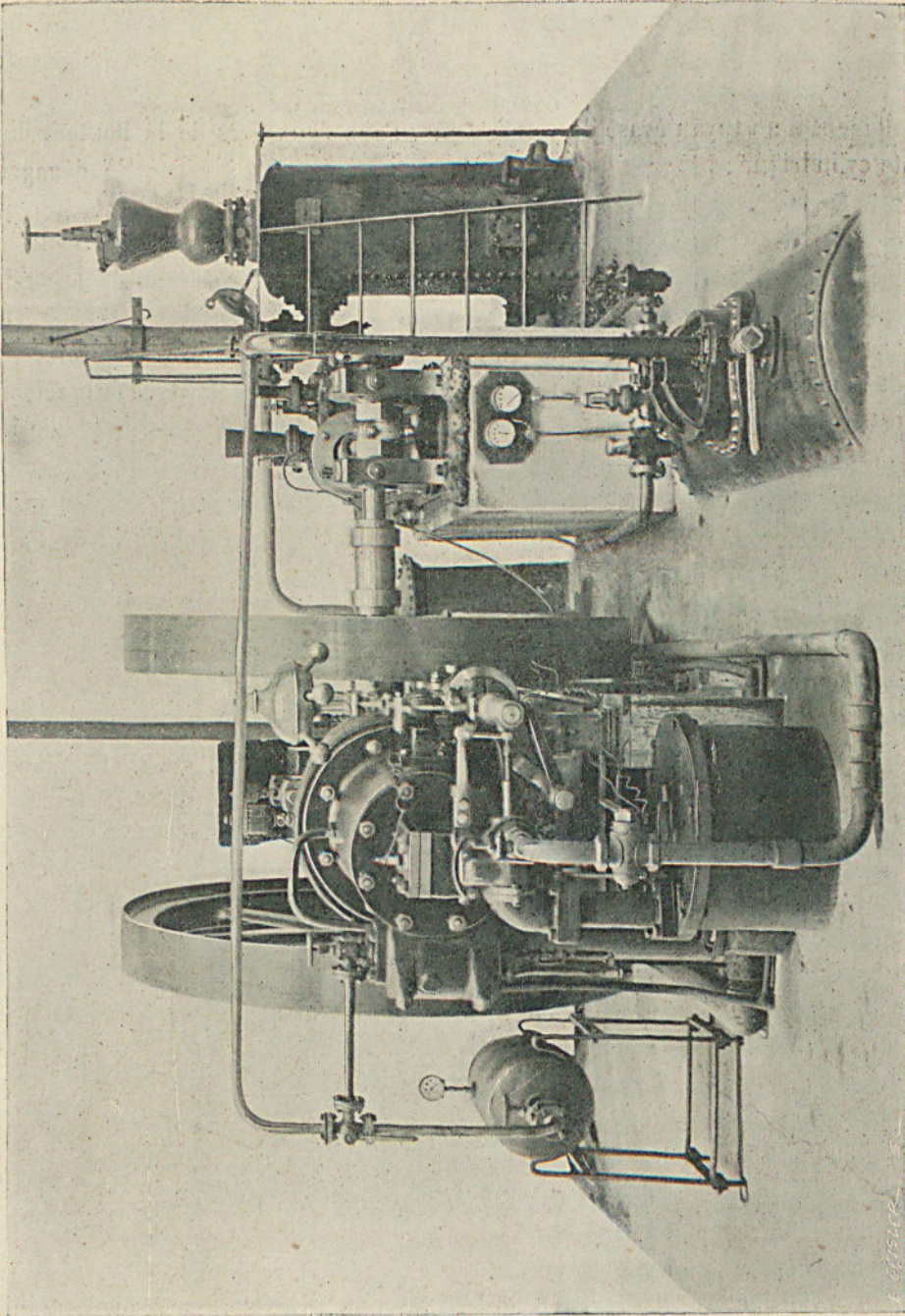


Fig. 57. — Moteur Charon et gazogène Gardio.

gazogène et l'on ne se donne aucune réserve ; mais on peut s'en passer quand on dispose d'un appareil régulier.

La figure 56 montre le gazogène Gardie tel qu'il a été exposé en 1900 à l'annexe de Vincennes.

L'air comprimé débouche dans la cuve du gazogène, après avoir traversé un réservoir distributeur et régulateur; il est servi par une tuyère d'acier, qu'on voit à la partie inférieure de la coupe ci-contre de l'appareil. Un clapet empêche le retour du gaz formé vers le réservoir d'air. L'air est humecté par un pulvérisateur d'eau, dont on règle l'injection par une manette à aiguille.

Les conditions mêmes du fonctionnement du gazogène obligent de lui donner une résistance et une étanchéité plus grandes; il est constitué par une chemise cylindrique en tôle d'acier en deux tronçons qui sont réunis par des brides boulonnées; les gonds supérieur et inférieur, également faits en tôle d'acier, sont rivés au corps cylindrique.

Le revêtement intérieur de la cuve est constitué par des terres réfractaires moulées, formant une capacité cylindrique terminée au bas par une chambre ovoïde, qui permet la descente facile du charbon incandescent. La trémie de chargement est en fonte; elle est fermée à sa partie inférieure par un gros robinet; on l'obture par le haut à l'aide d'un couvercle à vis. La capacité de cette trémie est suffisante pour contenir le combustible nécessaire à deux heures de marche.

Des ouvertures pratiquées dans le revêtement réfractaire facilitent l'enlèvement des escarbilles et du laitier.

Le gazogène Gardie occupe un espace très réduit; il a d'ailleurs le précieux avantage de ne pas exiger de gazomètre. On l'a appliqué à l'alimentation de moteurs à quatre temps; l'accouplement est hybride, étant donné que ces moteurs n'ont pas besoin de gaz comprimé, puisque cette fonction s'effectue dans leur cylindre; malgré cela, il paraît qu'on a obtenu de bons résultats à tous égards, notamment avec des moteurs Charon. Des essais sérieux devraient être faits pour établir rigoureusement la dépense de charbon par cheval-heure effectif.

La figure 57 représente un groupe formé d'un gazogène Gardie avec un moteur Charon.

4° GAZOGÈNES A ASPIRATION

Jacques Arbos, professeur de Barcelone, prenait le 14 novembre 1862 un brevet (1) pour un nouveau moteur à gaz formant un groupe avec son gazogène; il y revendiquait l'idée d'accoupler directement le moteur à un appareil gazéificateur dans lequel la machine puisait son gaz tonnant, mélangé de vapeur d'eau, dont la pression s'ajoutait à celle de l'explosion.

1. Le brevet porte le n° 56.374; il a pour titre: « Un nouveau moteur à gaz avec son gazogène ». La cuve du gazéificateur occupe le centre d'une chaudière à vapeur: elle est munie d'une trémie de chargement à obturateur. L'air et la vapeur étaient admises sous la grille; les gaz appelés au moteur rencontraient sur leur chemin un cylindre réfractaire rempli de coke, maintenu au rouge pour compléter la réduction de CO² et surchauffer la vapeur d'eau. La chaudière était alimentée avec l'eau de circulation de l'enveloppe du cylindre du moteur.

Arbos a pris de nouveaux brevets en 1865 et en 1868, relatifs à la production du gaz à l'eau pur et du gaz à l'eau carburé, et il a témoigné d'une grande initiative et d'une remarquable intuition; plusieurs de ses idées ont été appliquées en ces dernières années, avec un succès dont il lui revient une certaine part.

Arbos est donc le créateur des gazogènes à aspiration ; c'était une remarquable simplification du problème, qui avait pour conséquence de supprimer le gazomètre et les épurateurs chimiques et de proportionner la fabrication du gaz aux besoins du moteur.

Mais la solution était prématurée en 1862, et M. Lencauchez a raconté, dans la réunion du 16 octobre 1891, de la Société des Ingénieurs civils, que, si le moteur Arbos tournait régulièrement à vide, la moindre charge l'arrêtait net. L'invention sommeilla de longues années.

MM. Léon et Edouard Bénier ont relevé l'idée et, après de laborieuses études, ils ont établi un gazogène à aspiration, qui donne de bons résultats quand on l'accouple au moteur Bénier à deux temps et qui pourrait aussi s'adapter à des moteurs à quatre temps.

Gazogène Bénier

Ce gazogène est à aspiration : c'est donc le moteur lui-même qui appelle à chaque coup de piston le mélange d'air et de vapeur qui doit traverser le foyer pour faire le gaz ; le gaz n'est formé qu'au fur et à mesure de la consommation. On supprime ainsi le réservoir intermédiaire ou gazomètre, qui est un accessoire coûteux et encombrant.

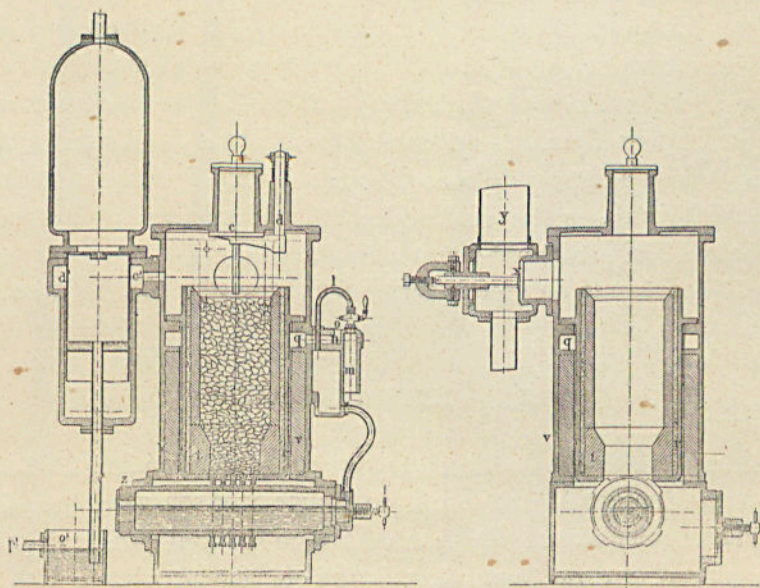


Fig. 58. — Gazogène Bénier à aspiration.

des installations de ce genre : il importe d'observer de plus que la pression du gaz est moindre que l'atmosphère et qu'il n'y a de la sorte aucune possibilité de fuite ; par contre, il peut se produire des rentrées d'air.

Notre figure 58 fait voir par le détail les dispositions principales de cet appareil.

Comme dans tous les gazogènes, le combustible est introduit dans une trémie à obturation double ; une modification a été introduite dans le dessin de la porte infé-

rière, qui est constituée par un tiroir horizontal C, fixé sur un arbre vertical *d*, lequel est manœuvré par une poignée. Un ressort applique le tiroir contre la partie inférieure de la chambre pour assurer l'étanchéité du joint.

La chaudière d'alimentation avait d'abord été supprimée : c'était la grille même du gazogène qui en remplissait l'effice. Cette grille avait la forme circulaire et elle pouvait tourner sur elle-même ; elle était traversée par un faible courant d'eau, suffisant pour maintenir le métal à une température relativement basse, tout en fournissant la vapeur nécessaire au fonctionnement du gazogène. On pouvait marcher plusieurs heures sans arrêt, car il suffisait de faire tourner la grille d'un quart de tour toutes les heures pour opérer le décrassage de la partie inférieure de l'appareil. Ce résultat était assuré mieux encore par un peigne, placé à la partie inférieure, qui venait racler la grille quand on la faisait tourner sur elle-même et détachait les scories adhérentes à la fonte.

Pour obtenir un gaz ayant constamment la même richesse, il est indispensable que la proportion d'air et de vapeur introduite dans le foyer soit maintenue constante ; ce résultat n'est pas toujours obtenu dans les autres gazogènes. La disposition nouvelle adoptée par M. Bénier assure une grande régularité dans le fonctionnement du gazogène, car la vapeur et l'air admis sont toujours en proportion constante, quel que soit le volume total aspiré. L'air et la vapeur sont introduits par aspiration dans une petite boîte *q* où ils se mélangent. L'air entre par les orifices *o* et la vapeur par les trous *n*. Le volume d'air introduit et celui de la vapeur sont proportionnels à la section des orifices *o* et *n*. Mais pour que cette proportion reste invariable, il faut que l'air et la vapeur, avant leur introduction, soient à une pression absolument constante : l'air étant pris à la pression atmosphérique, il faut donc que la vapeur soit prise aussi exactement à la pression atmosphérique. A cet effet, la vapeur est formée dans la chaudière à une pression de quelques centimètres d'eau. Cette vapeur est amenée de la grille par un tuyau recourbé à la partie supérieure d'une chambre de détente *m*, ouverte complètement par une large section à sa partie inférieure. Il s'en suit que la vapeur contenue dans cette chambre *m*, où débouchent les trous *n*, est toujours exactement à la pression atmosphérique.

Il est utile de porter le mélange d'air et de vapeur à la plus haute température possible avant de l'introduire dans le foyer. La disposition nouvelle pour obtenir ce réchauffement est caractérisée par une garniture spéciale de foyer, formée par deux cylindres concentriques laissant entre eux un vide annulaire de quelques millimètres où l'on fait passer le mélange. Le foyer est contenu dans un cylindre *r*, garni de terre réfractaire *t*, ainsi qu'on le voit sur la coupe de droite de la figure 58. Ce premier cylindre *r* est placé dans l'intérieur d'un autre cylindre *u*, garni aussi de terre réfractaire. Le mélange d'air et de vapeur, introduit à la partie supérieure en *q*, traverse l'espace annulaire de haut en bas pour se rendre sous la grille.

Pour laver le gaz, M. Bénier fait entrer les gaz dans l'eau d'un barillet, en lames minces, de manière à augmenter le plus possible le contact entre l'eau et les gaz. Les gaz chauds, venant du gazogène, arrivent dans la partie supérieure d'un cylindre ver-

tical c' , dont la partie inférieure est remplie d'eau ; un tube d' est placé dans ce cylindre c' , en laissant entre les deux cylindres un espace annulaire de 2 à 3 millimètres. La partie inférieure de ce tube d' plonge dans l'eau. Les gaz, arrivant en c' dans le laveur, traversent l'espace annulaire où ils sont amenés dans l'eau, en couche mince, et se rendent dans l'intérieur du cylindre d' . L'eau arrive dans le laveur en courant continu par le tuyau r' et s'écoule par le tuyau m' . La cuvette o' , remplie d'eau, dans laquelle plonge le tube n' , forme joint hydraulique. L'eau qui tombe dans la cuvette o' est évacuée par le tuyau p' .

x et y sont la cheminée d'allumage.

Le gazogène Bénier avait été très habilement conçu, mais l'exécution fut moins parfaite et la pratique imposa d'assez nombreuses modifications, qui ont fait l'objet de brevets ultérieurs. La grille tournante à circulation dut être abandonnée, parce qu'elle se brûlait ; on vaporisa donc l'eau dans un petit générateur tubulaire, placé sur la canalisation de départ des gaz ; la forme de cet appareil fut modifiée à plusieurs reprises, dans le but de fournir plus tôt de la vapeur. Le laveur a pris des formes variées, devant assurer un meilleur et plus large contact entre l'eau et les gaz ; on lui a finalement adjoint un scrubber à coke et une chambre à détente pour recueillir les poussières.

Gazogène Taylor.

Cet appareil, qui dérive directement du gazogène Bénier, est, comme celui-ci, à aspiration directe par le moteur ; les gaz combustibles appelés par le piston traversent une petite chaudière tubulaire, qui fournit la vapeur d'eau nécessaire aux réactions, remontent dans un laveur à coke et redescendent dans une chambre de détente de dimensions très réduites, où ils se dépouillent des poussières qu'ils ont pu entraîner jusque là. L'installation ne comporte pas de gazomètre.

Le dessin de la figure 59 montre la cuve du gazogène et le vaporisateur. La trémie de chargement se voit en A ; elle est fermée à la partie supérieure par un bouchon étanche et à la partie inférieure par un tiroir obturateur, qu'on manœuvre par le levier a . Le charbon tombe dans un cône, entouré par les gaz chauds, dans lequel il s'échauffe et subit un commencement de distillation : il glisse ensuite graduellement dans le corps cylindrique D, où se font les réductions. La grille est supprimée et le combustible s'appuie par un talus sur une plaque de fond : ce dispositif, très simple assurément, a le léger défaut de donner lieu quelquefois à des pertes de combustible. Deux portes permettent de piquer le feu et de retirer les cendres et les escarbilles formées dans le courant de la journée.

Le corps cylindrique est revêtu de plaques réfractaires moulées b , entourées d'un remplissage c de terre fortement tassée : cette protection est suffisamment efficace.

Le vaporisateur F est accolé à la cuve ; la vapeur formée est amenée au foyer par un tuyau que parcourt aussi l'air aspiré : le mélange est donc parfaitement assuré. Il reste à trouver un dispositif permettant de faire varier à volonté la quantité de vapeur à fournir suivant l'allure du feu et les besoins de la consommation.

L'allumage du gazogène exige l'adjonction d'un petit ventilateur, qu'on fait fonctionner à la main en attendant que l'on puisse mettre le moteur en marche ; les gaz brûlés s'échappent alors directement sur le toit par un tuyau vertical faisant l'office de cheminée, qu'on ferme aussitôt que le moteur est en route. En garnissant convenablement le foyer de copeaux de bois sec et de charbon, on arrive à effectuer la mise de feu en un quart d'heure environ.

Ce gazogène marche convenablement quand on l'alimente de bon anthracite criblé, qu'il faut prendre à la pelle à grille, pour ne pas ramasser les poussières et les menus, qui encombreraient le foyer ; il exige d'ailleurs des soins particuliers et ne donne pas une vitesse bien régulière au moteur, dont la puissance et l'allure dépendent de la richesse du gaz qu'il aspire. Cette irrégularité se manifeste surtout au moment où la vapeur d'eau est fournie au foyer, après une demi-heure de fonctionnement ; la composition du gaz change alors subitement et il faut régler l'appareil et le moteur en vue de ces nouvelles conditions de marche.

Le gazogène Taylor a été appliqué à l'alimentation d'un certain nombre de moteurs Otto, Crossley, Niel et Charon, avec succès en plusieurs cas.

On a publié quelques bons essais de consommation auxquels nous reprochons d'avoir été beaucoup trop courts ; un essai de gazogène doit durer au moins six heures et nous prolongeons les expériences durant dix ou douze heures, toutes les fois que cela nous est possible.

Gazogène J.-A. Lencauchez.

M. Lencauchez a établi, en collaboration avec son fils, un nouvel appareil à aspiration, dans lequel il a fait preuve de la parfaite connaissance qu'il possède de ces générateurs de gaz. Son premier souci a été d'utiliser les chaleurs perdues des moteurs, en chauffant le vent par la décharge, et en utilisant l'eau chaude de l'enveloppe du cylindre : cette eau découle sur une série de tablettes superposées à déversoir, logées dans une chambre de saturation que traverse l'air appelé par le moteur à travers la cuve du gazogène.

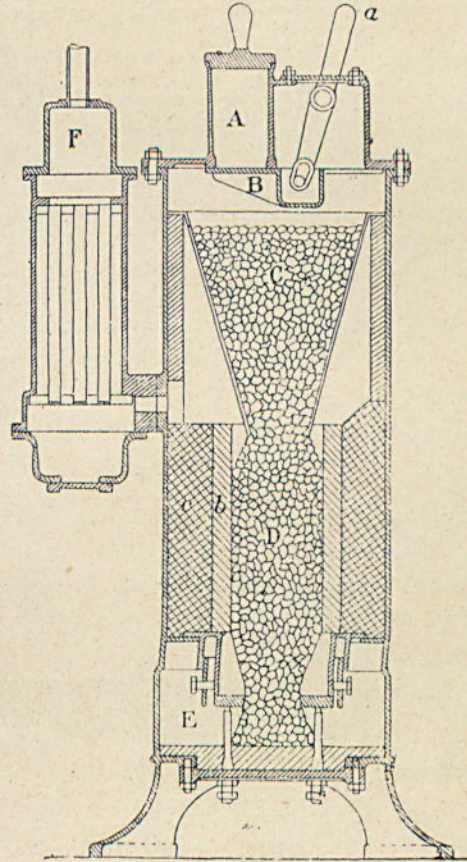


Fig. 59. — Gazogène Taylor.

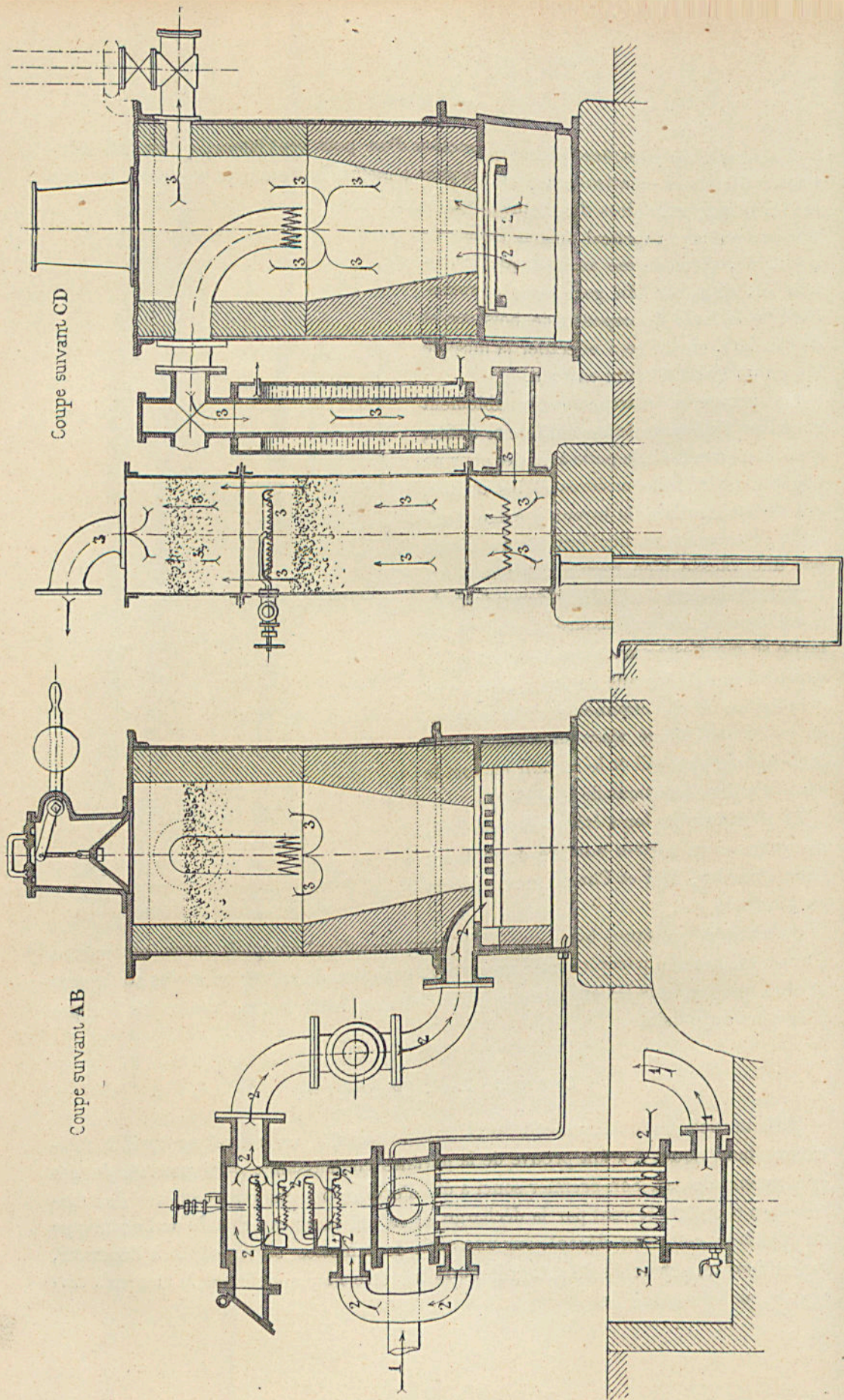


Fig. 60. — Gazogène J.-A. Lemauche à aspiration.

Celle-ci a une forme cylindro-conique, qui se prête bien à la descente du carbone incandescent ; une grille à barreaux espacés ferme le fond. Elle est traversée par le courant d'air chaud saturé de vapeur d'eau.

La trémie de chargement a la forme ordinaire ; mais, comme la prise de gaz est centrale et qu'elle s'effectue par le milieu de la cuve, les premiers produits de la distillation du charbon frais se mêlent forcément au gaz livré par l'appareil.

Le gaz traverse un laveur et une colonne à coke à deux étages, dont la partie inférieure renferme du grésillon arrosé continûment ; le haut est garni de grésillon sec.

La fig. 60 donne tous les détails de la cuve, des réchauffeurs et des laveurs ; les flèches 1 montrent le chemin suivi par les gaz de la décharge du moteur et les flèches 2 celui de l'air primaire appelé par le moteur à travers la cuve ; le parcours du gaz formé porte le numéro 3 et l'on voit comment s'effectue le lavage et l'épuration.

Pour la mise en train du gazogène, un ventilateur à main est nécessaire ; une cheminée évacue la fumée durant la période d'allumage. Aussitôt que le gaz est assez riche, on le dirige vers le moteur, en tournant un robinet à trois voies.

Le réfrigérant compris entre la cuve et le laveur est entouré d'enveloppes calorifuges, ainsi que le saturateur, de manière à perdre le moins de chaleur que possible ; le moteur doit du reste être installé tout contre le gazogène. La conduite qui relie le laveur au moteur demande à être établie avec une légère pente vers le moteur ; elle traverse un récipient en fonte faisant l'office de réserve de gaz, dans lequel le tuyau pénètre verticalement par le haut et se prolonge jusqu'à dix centimètres du fond ; le gaz est pris à la partie supérieure. Ce récipient est pourvu d'un robinet de purge.

Le gazogène est toujours conservé plein de combustible. On emploie à volonté de la houille maigre lavée ou de l'anhracite d'un criblage de 15 à 30 millimètres.

M. Lencachez garantit une consommation de 450 grammes par cheval-heure effectif, pour un moteur consommant 450 litres de gaz à 5250 calories par mètre cube, correction faite à 0° et 760^m/_m de pression. Cette consommation s'entend cendres et humidité déduite et avec une teneur maximum de 5 0/0 de cendres. En général, on compte autant de grammes qu'il y a de litres de gaz, avec une augmentation de 10 0/0, pour le combustible brut, si c'est de l'anhracite ; on augmente de 20 0/0 pour le coke.

Nous ne connaissons pas d'essais confirmant ces données du constructeur, mais sa garantie nous suffit pour admettre ces évaluations.

Gazogène Pierson.

M. J. et O. G. Pierson ont inventé un gazogène à aspiration qui se distingue par d'intéressantes et très heureuses innovations : nous en donnons deux vues (fig. 61 et 61 bis) qui nous permettront d'en décrire tous les dispositifs originaux.

La chaudière C placée à la base de la cuve du gazogène B, entoure le foyer ; le combustible repose sur une base D, ouverte à sa partie inférieure, boulonnée à la

chaudière C de manière à pouvoir être démontée rapidement ; le feu est soutenu

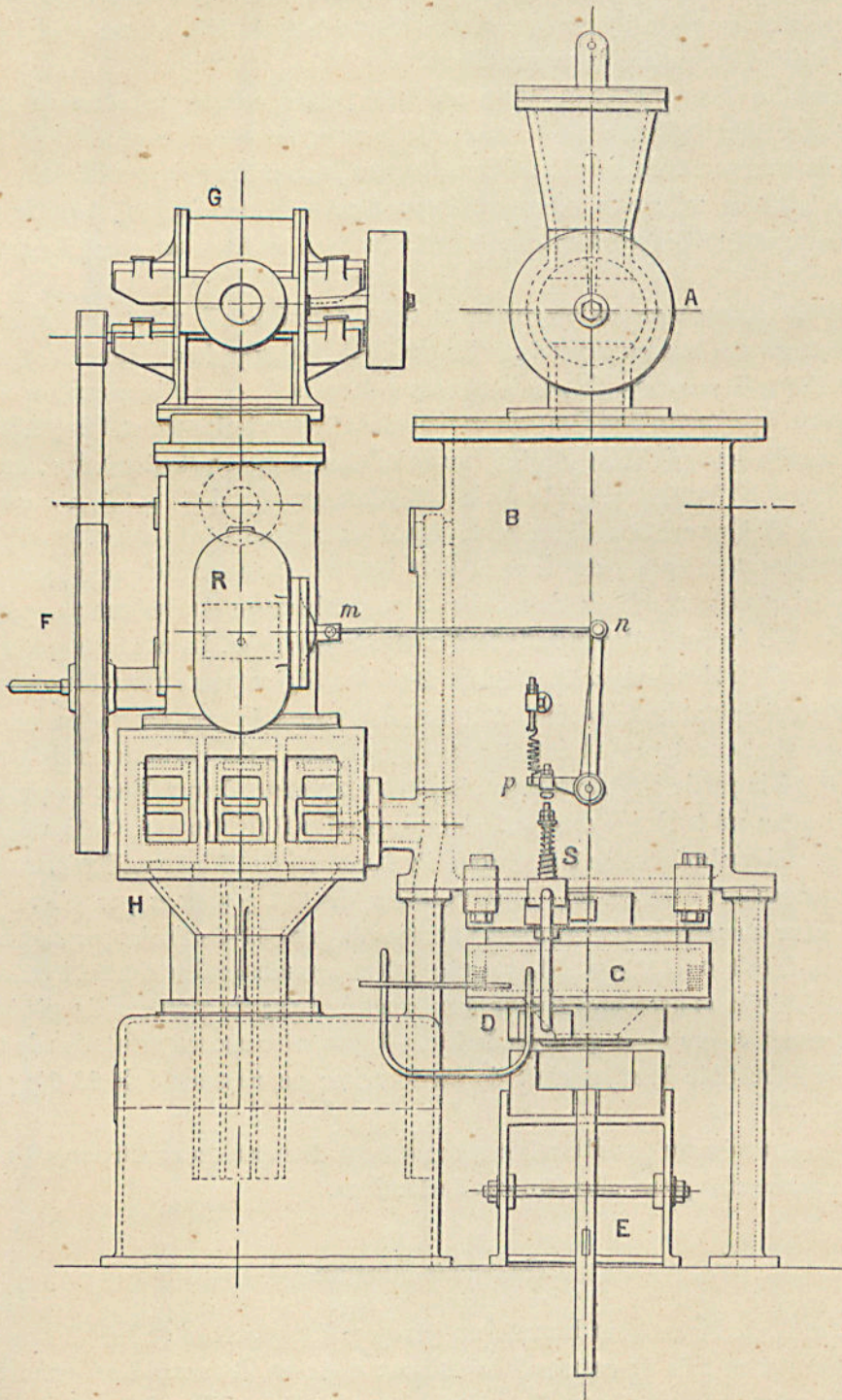


Fig. 61. — Gazogène Pierson à aspiration.

d'ailleurs par une pièce réfractaire portée par un support en fonte traversé par une

sorte de piston E auquel un levier peut donner un mouvement vertical. Si l'orifice vient à s'obstruer en marche par des cendres adhérentes ou des mâchefers, on donne quelques coups de levier, et on débouche ainsi l'ouverture ; la conduite du feu est

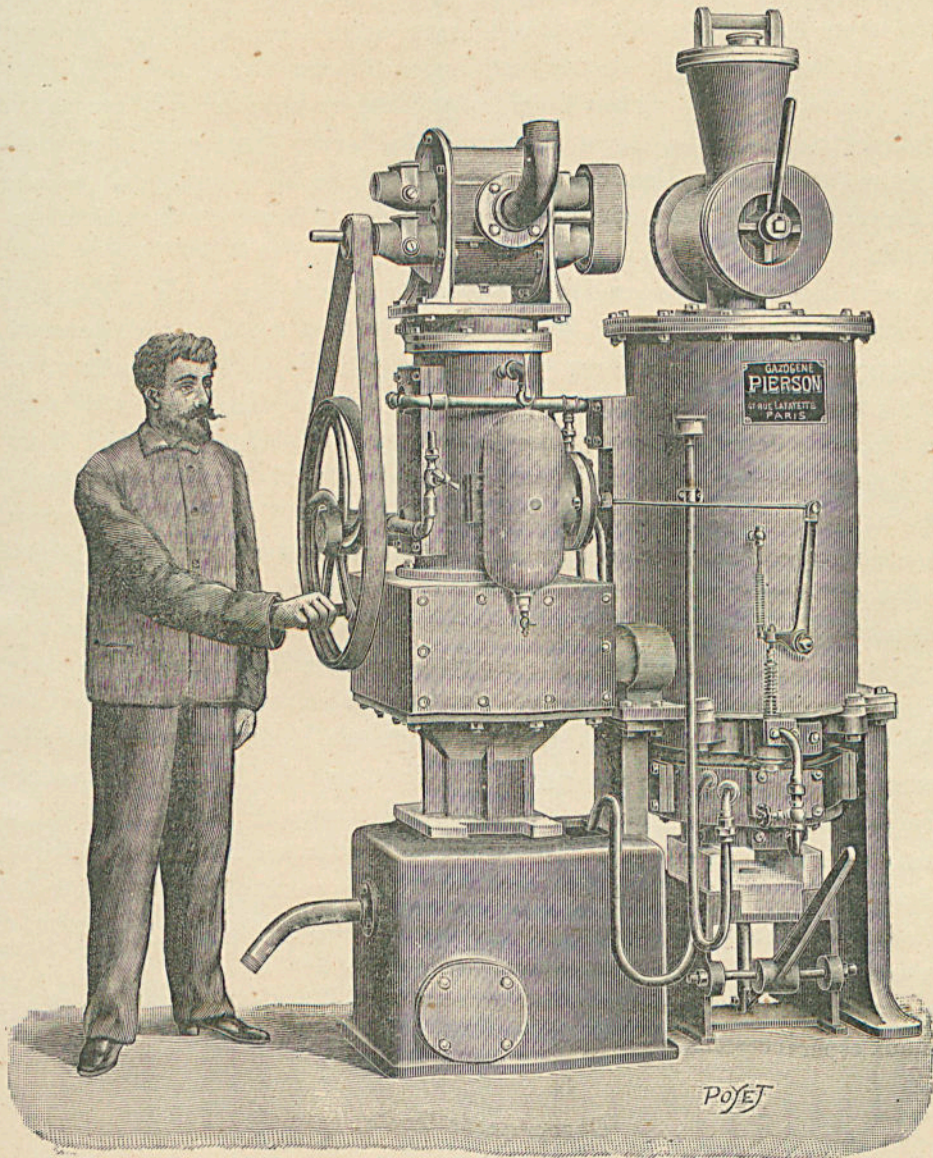


Fig. 61 bis. — Gazogène Pierson à aspiration.

donc facilitée par ce dispositif, qui constitue une première caractéristique du gazogène Pierson.

Le charbon se charge par la trémie A : un réservoir en fonte boulonné à l'intérieur sur le couvercle de la cuve sert de récipient au combustible, qu'on ne charge que trois fois par jour.

L'air aspiré par le moteur pénètre dans la cuve par la base, et traverse le combustible de bas en haut ; la soupape S introduit la vapeur dans le courant. Le gaz formé s'échappe par le côté supérieur de la cuve, redescend au barillet et remonte ensuite dans le laveur H. Ce laveur est divisé en six compartiments dans lesquels l'eau tombe en large nappe étalée ; il se fait ainsi un brassage mécanique du gaz, qui le dépouille de ses poussières ; l'eau les entraîne avec elle, sous forme de boues dans le barillet inférieur. Le laveur H est surmonté d'un séparateur-sécheur, que le gaz parcourt encore deux fois, de bas en haut et de haut en bas, avant d'être conduit au moteur. L'épuration s'effectue bien dans ces appareils qui sont moins compliqués que cela ne paraît de prime abord : cette épuration complète est la deuxième caractéristique de l'appareil.

Mais voici sans doute sa nouveauté la plus saillante et la plus efficace. L'aspiration d'air restant constante, le volume de vapeur introduit est réglé automatiquement et méthodiquement par un mécanisme spécial. C'est qu'en effet, dans la commande des moteurs à quatre temps, réglés par admission de tout ou rien, il est nécessaire de doser la quantité de vapeur suivant que le nombre d'admissions est plus ou moins grand. Dans la marche à vide, il ne faut presque plus de vapeur ; à pleine charge, il en faut davantage. Or, cette variation s'obtient aisément par le jeu de la soupape S, commandée par le levier *p* et le renvoi *mn*. Le mouvement est produit par le gonflement d'un diaphragme souple en cuir, formant la paroi du récipient R ; le séparateur communique avec ce récipient par une valve à ressort, qui s'ouvre quand le moteur aspire ; la dépression qui suit une aspiration répétée fait bomber le diaphragme vers l'intérieur et la soupape à vapeur S s'ouvre ; au contraire, lorsque le moteur peu chargé fait, par exemple, une aspiration sur quatre, la dépression est moindre et le diaphragme moins concave referme la soupape à vapeur. Le débit de vapeur est donc réglé par une sorte de cataracte qui fonctionne à coup sûr et fort simplement.

Comme dans les appareils Taylor et autres, un ventilateur à main est nécessaire pour les mises en route ; on voit, sur la figure 61 *bis*, le conducteur tournant la manivelle de la transmission de mouvement du ventilateur ; la taille de l'homme sert d'échelle au dessin. Ce ventilateur aspire, il ne refoule pas.

Plusieurs gazogènes Pierson sont déjà en service et les résultats obtenus ont répondu aux espérances des inventeurs.

Gazogène de Deutz.

La *Gasmotorenfabrik Deutz* exposait à Dusseldorf un gazogène à aspiration (Saug generator) qui alimentait dans d'excellentes conditions un petit moteur de 16 chevaux. Cet appareil a été décrit par M. Langen et nous empruntons ce qui suit à cette intéressante étude (*).

La cuve du gazogène est représentée par la figure 62 que nous n'avons pas à com-

1. Adolf Langen. — « Sauggenerator Gasanlagen » ; « Zeitschrift der Vereines deutscher Ingenieure », tome XLVI, page 1681 ; 8 novembre, 1902.

menter longuement, parce qu'elle se suffit à elle-même. Le générateur de vapeur est placé sur la cuve du gazogène en C, entre la trémie et les couches incandescentes : l'air à saturer de vapeur lèche la surface de l'eau ; on règle son débit par le robinet R. On ne saurait rien imaginer de plus simple ; M. Langen démontre qu'on ne saurait rien faire de meilleur. Il reproche avec raison aux chaudières à tubes de Bénier, Taylor, etc., de ne pas fournir de vapeur au début de la marche, de s'encrasser rapidement, puisque le faisceau tubulaire est traversé par les gaz du gazogène avant leur épuration, et d'exiger de fréquentes réparations ; l'argument est bon. Par contre, on aurait pu craindre que la vaporisation fût trop faible ; il paraît qu'il n'en est rien.

Ce gazogène est très bien étudié, malgré sa grande simplicité : la trémie A, les terres réfractaires D garnissant la cuve, les portes P permettant l'accès de la grille, les regards et orifices de décrassage J, et tout l'ensemble de l'appareil sont bien conditionnés. Le scrubber, le barillet et le séparateur sont de la forme habituelle.

Des essais, faits par MM. Freytag, Kapeller, Bock et Strauss, ont conduit à de remarquables résultats : ainsi, un moteur de 25 chevaux a consommé 446 grammes d'anthracite par cheval-heure effectif et on est même descendu à 400 grammes pour un moteur de 60 chevaux. Aux ateliers de Deutz, un moteur de 65 chevaux a été mis en observation durant une période de 425

heures, le moteur tournant 17 heures par jour, et il a même fait sur la fin des journées de 23 heures. La dépense totale de combustible, en y comprenant celle qui correspondait aux arrêts, est ressortie à 510 grammes par cheval-heure effectif.

Cette création a valu aux ateliers de Deutz un remarquable succès : elle construit maintenant en moyenne 60 gazogènes par mois ; depuis deux ans qu'elle a entrepris ce genre d'installations, elle a monté 513 moteurs-gazogènes, d'une puissance totale de 15.733 chevaux, soit de 30 chevaux en moyenne ; le maximum est de 300 chevaux (!).

1. Un gazogène de 6 chevaux est tarifé 2.000 francs ; celui de 30 chevaux coûte 3.000 francs, et pour 80 chevaux on ne compte que 4.750 francs ; nous ne donnons ces prix qu'à titre de renseignement d'espèce.

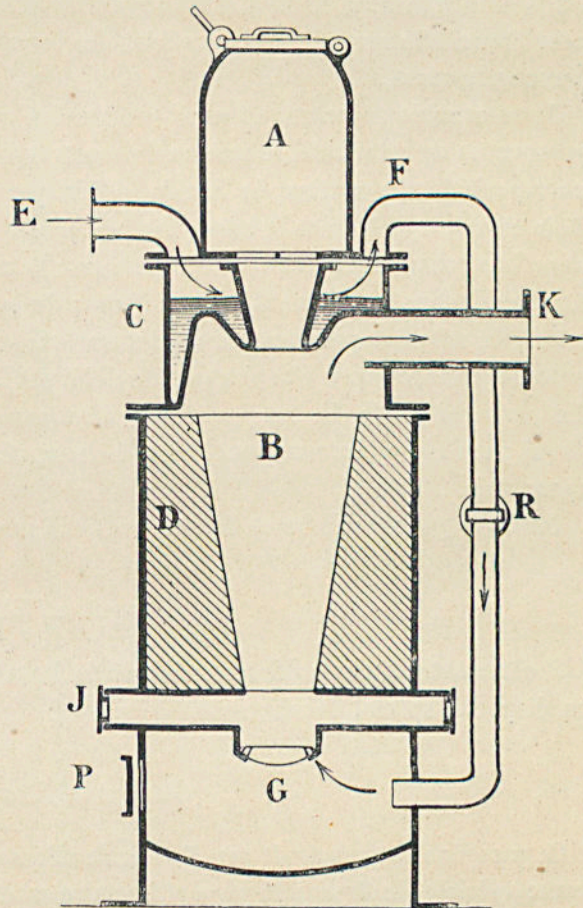


Fig. 62. — Gazogène de Deutz à aspiration.

Les gazogènes à insufflation ont donc trouvé dans l'aspiration un concurrent, contre lequel la lutte sera difficile : aussi tous les constructeurs se lancent-ils dans cette voie nouvelle. Le nom d'Arbos deviendra célèbre à l'égal de celui de Beau de Rochas.

Gazogène Winterthur.

La Société suisse pour la construction de locomotives et de machines, dont le siège est à Winterthur, a établi à son tour un modèle spécial de gazogène à aspiration, pour lequel elle revendique la rusticité des formes, la facilité du service et le minimum d'encombrement.

Je ne connais guère cet appareil que par les gravures peu explicites qui ornent les prospectus de cette célèbre maison de construction. La chaudière est remplacée par un vaporisateur à gouttes ; le liquide, débité par un pointeau, tombe dans le courant d'air chaud, appelé dans la cuve ; cet air prend une température élevée dans un réchauffeur, chauffé par les chaleurs perdues ; le mélange d'air et de vapeur est de plus surchauffé dans un élément logé au-dessus du générateur. La position du pointeau est réglée automatiquement par un flotteur qui se lève sous l'action de la dépression produite dans le tuyau d'aspiration : le débit est faible ou nul, lorsque le moteur fait des passages à vide. Le but poursuivi est rationnel et le moyen employé est peu compliqué ; mais les pointeaux sont sujets à obstruction et le conducteur peut ne pas s'en apercevoir.

On dit le gaz très riche et de composition invariable.

Gazogène Hille.

Il est construit par la *Motorenfabrik* de Dresde ; sa caractéristique est donnée par un dispositif spécial de manœuvre de grille.

Gazogène Rex (1)

Ce gazogène est construit par M. Charles Besson à Lyon. Il est caractérisé par la forme spéciale du foyer : la paroi réfractaire est disposée de telle façon que le combustible cesse de s'y appuyer, lorsqu'il descend dans la partie inférieure où la température est suffisante pour provoquer la fusion des cendres. A cet effet, la zone inférieure est élargie, alors au contraire que la grille est réduite ; la combustion est ainsi localisée au centre. Les scories se déposent et s'étalent sur la grille par superposition ; pour nettoyer le feu on introduit dans une rainure ménagée au-dessus de la porte un certain nombre de lames de fer plat qui supportent la colonne de charbon ; puis on enlève une brique, placée devant la porte, on vide la chambre à scories, on replace la brique et l'on retire les barres de fer : ce décrassage est très facile.

Plusieurs gazogènes Rex fonctionnent dans la région du Rhône et une installation

1. Ce gazogène fonctionne à volonté par insufflation au ventilateur ou par aspiration.

de 240 chevaux a même été faite à la station électrique de Varennes-sur-Allier. On se sert d'anthracite de la Mure, de houille maigre de Communay, de La Chapelle-sur-Dun, d'anthracites de la Péronnière, de Cessous, de Chamborigaud, d'escarbilles de coke des fours, etc.

5° GAZOGÈNES A COMBUSTION RENVERSÉE

En alimentant un gazogène d'air et de vapeur par le haut, le courant entrainera avec lui les produits de distillation à travers les couches de combustible incandescent et ces produits se décomposeront, ainsi que nous l'avons déjà expliqué, en donnant de l'hydrogène, de l'oxyde de carbone et du méthane ; on est donc délivré des goudrons ; l'épuration physique, qui est si ingrate, est remplacée par une épuration thermique dont on croit être plus sûr. L'idée est géniale ; de fait, elle est due à Ebelmen, ainsi que M. Lencauchez l'a démontré (1) et elle est pour ce grand initiateur un nouveau titre de gloire.

Mais, si l'idée est belle, sa réalisation est ardue ; en effet, en soufflant par le haut, on remonte la zone de combustion et la cuve s'encombre des cendres, qui ne peuvent s'évacuer que par le fond ; de plus, l'air perd ses qualités comburantes et une partie du combustible brûle mal par défaut d'oxygène libre ; il en résulte une perte de combustible, car les cendres sont mêlées d'escarbilles ; enfin les gaz sortent de la cuve chargés de poussières, qu'il faut arrêter par des laveurs plus efficaces. En fin de compte, l'opération qu'on entrevoyait si brillante, paraît impraticable pour la plupart des combustibles ; elle n'a guère d'intérêt que pour les combustibles très riches en matières volatiles.

Les difficultés du procédé ont suggéré l'emploi de gazogènes à deux cuves ; dans la première, l'insufflation se fait par le bas ; dans la seconde, les gaz cheminent de haut en bas, et ils se réduiront à la traversée du coke incandescent. En alternant leur service, on maintiendra cette incandescence : mais pour intervertir ainsi la marche, il faut s'imposer une manœuvre de vannes ; on pourrait s'en dispenser en chauffant par l'extérieur la seconde cuve ; mais alors que devient l'économie escomptée ?

On le voit : le problème est difficile à résoudre.

Beaucoup d'inventeurs cherchent néanmoins cette solution : nous allons décrire quelques appareils conçus d'après les théories que nous venons d'exposer.

Gazogène Riché.

M. Riché a eu un double mérite ; et d'abord, il a réussi à fabriquer un bon gaz de moteur avec du bois, des copeaux, de la sciure, des tourbes, de la tannée, voire même des déchets organiques ; d'autre part, il a contribué à ramener l'attention des ingénieurs sur la marche à combustion renversée.

On a discuté longuement pour décider du nom qu'il convenait de donner aux appa-

1. Lencauchez. — « Études sur divers gaz combustibles » ; page 110, Paris, 1902. -

reils Riché ; sont-ce des cornues ou de vrais gazogènes ? La question a peu d'intérêt pour nous. La seule chose qui nous importe c'est de savoir qu'ils fournissent un gaz à 3.000 calories, qui convient bien aux moteurs.

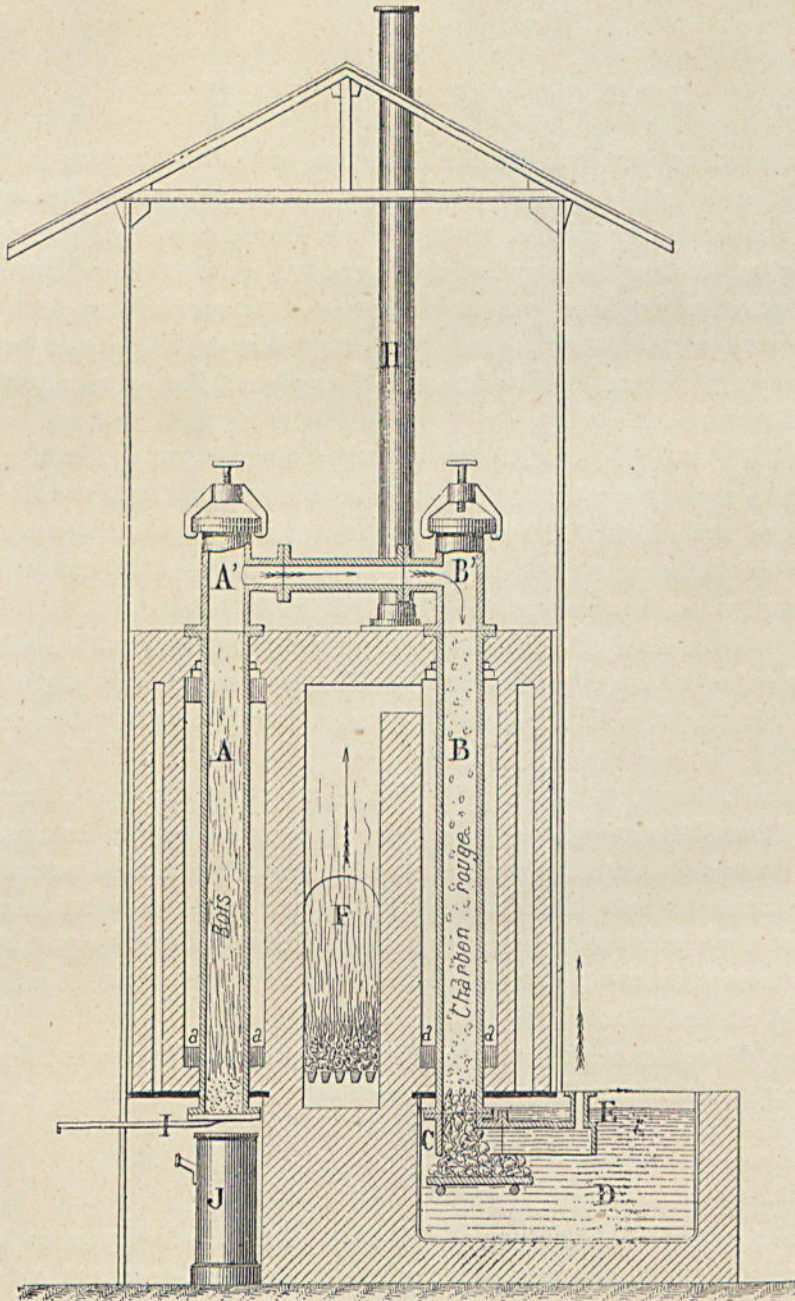


Fig. 63. — Gazogène Riché (au bois).

M. Riché a donné diverses formes à ses producteurs de gaz pour moteurs. Son premier appareil se composait d'une cornue verticale en fonte, cylindrique

dans sa partie supérieure, tronconique au bas ; on en fermait l'ouverture du haut par un couvercle articulé sur charnière et équilibré par un contrepoids. La partie intérieure s'emboîtait dans un réservoir sphérique en fonte destiné à rassembler les gaz qui s'en échappaient par une tubulure latérale pour traverser un barillet et un laveur avant d'entrer dans le gazomètre. Le principe du procédé consistait donc dans une distillation renversée faisant passer les gaz sur une colonne incandescente de charbon de bois, résidu d'opérations précédentes.

Voici dès lors comment fonctionnait l'appareil.

La cornue étant d'abord chargée de charbon de bois, jusqu'aux deux tiers de sa hauteur, on la portait au rouge cerise en faisant du feu dans un foyer latéral ; cela fait, on ouvrait le couvercle supérieur, et l'on achevait de remplir la cornue avec du bois frais ; on fermait ensuite hermétiquement. La distillation se produisait et la vapeur d'eau, les carbures, l'acide pyroligneux, les goudrons, l'acide carbonique, etc., traversaient les braises inférieures et donnaient de l'oxyde de carbone, de l'hydrogène et du méthane. La marche se poursuivait continuellement, si l'on chargeait de temps à autre du bois frais par la partie supérieure ; l'humidité naturelle du bois fournissait la vapeur d'eau nécessaire aux réactions. Les cendres tombaient par le bas dans une cuve à eau formant joint hydraulique et s'y lessivaient en donnant leur potasse.

M. Riché a bientôt perfectionné ce premier dispositif et son appareil a pris une nouvelle forme un peu différente de celle que nous venons de décrire. Il faisait toujours de la distillation renversée, mais deux cornues étaient accouplées dans un même massif de maçonnerie, de manière à mieux utiliser le calorique développé et à assurer un meilleur travail de distillation et de réduction.

La figure 63 représente ce gazogène de M. Riché.

Un foyer central F, dont les fumées s'échappent par la cheminée H, chauffe un massif dans lequel sont engagées deux cornues AA' et BB', reliées par le conduit horizontal A'B' ; on les charge par les têtes amovibles A' et B'. A est la cornue de distillation, B celle de réduction ; cette dernière reçoit le charbon formé dans la première, soutiré par I, étouffé dans le vase clos J. Les produits de la distillation et la vapeur qui les accompagne se transforment en B ainsi que nous venons de l'exposer. Une grille C soutient le charbon ; les cendres tombent dans le barillet D, que traverse le gaz en se dépouillant de ses impuretés et en y subissant un lavage sommaire ; on le recueille par l'ouverture E.

On voit que les gaz formés sont obligés de traverser une longue colonne incandescente formée au cours d'une opération précédente dans la cornue jumelle, annexée à la première.

M. Riché emploie aujourd'hui de préférence des cornues simples, disposées comme le montre la figure 64.

Le bois est introduit par la partie supérieure d'une cornue cylindrique verticale en fonte, chauffée par un foyer spécial : ce bois distille, se carbonise et descend progressivement en produisant une braise incandescente, au contact de laquelle la vapeur d'eau, les carbures et les goudrons se dissocient en donnant un gaz qui renferme en-

viron 28 volumes d'oxyde de carbone, 42 d'hydrogène, 10 de carbures gazeux, 20 d'acide carbonique, d'oxygène, d'azote, etc., dont le pouvoir dépasse 3.000 calories

par mètre cube. C'est donc un gaz relativement riche, qui ne renferme que peu d'azote, et se rapproche davantage du gaz à l'eau que du gaz mixte de gazogène.

On peut disposer autour du foyer central plusieurs couples de cornues. M. Riché a installé des gazogènes à six cornues aux ateliers du chemin de fer de l'Ouest, à Levallois, et à la cartoucherie nationale de Vincennes.

On a monté un certain nombre de gazogènes Riché dans l'Oise, en Normandie, dans les Landes, à Calais, où il se fait un commerce de bois considérable ; à Paris même, la Compagnie des émeris fait 100 chevaux par des moteurs Otto, servis de gaz au bois ; aux glacières de Saint-Gobain, deux moteurs Letombe de 50 chevaux sont alimentés de même, par un gazogène à douze cornues ; aux stations d'électricité de Pierrelatte (Drôme) et de Champagnolle (Jura) des moteurs Tangye sont adjoints de même à des appareils Riché. A Argenteuil, M. Seguin, constructeur du moteur Gnome, alimenté au gaz Riché ses moteurs en essai ; à Malfetta (Italie) 30 cornues

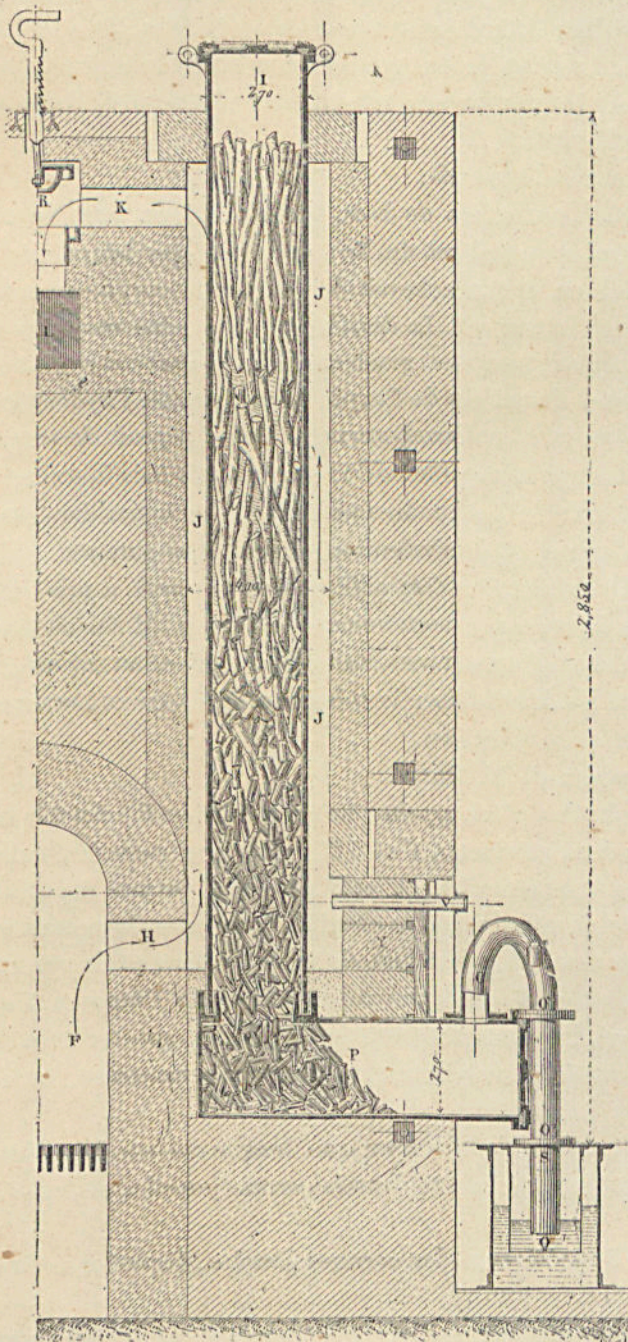


Fig. 64. — Gazogène Riché.

desservent des moteurs développant 375 chevaux ; à Gijon (Espagne) 6 cornues font du gaz pour une station d'électricité de 84 chevaux, etc.

Des études sérieuses ont été poursuivies sur divers gazogènes Riché.

Voici les résultats des expériences faites sur un moteur Charon alimenté au gaz Riché, le 4 novembre 1897, par MM. Bureau, Allaire et Chavanon.

Composition du gaz.	En volume.	En poids.
CO.	29,00	33,40
H	44,20	4,80
C H ⁴	14,47	10,80
CO ²	21,33	51,00
Az et O	Traces	
Pouvoir calorique par mètre cube		2956 cal.
Poids du mètre cube		0 ^k ,824

Un moteur de 290 millimètres de diamètre et 0^m,460 de course, a pu développer 13,5 chevaux effectifs pour 160 tours à la minute.

A Calais, la Société Générale des Industries économiques avait garanti que le gazogène Riché distillerait par 24 heures :

1,400 kilogrammes de bois,
700 — de houille,

et produirait :

200 — de charbon de bois sec,

en même temps qu'il alimenterait un moteur Charon de 50 chevaux. Un essai a constaté l'exécution de ces garanties.

M. Riché a enfin donné une nouvelle forme à ses gazogènes, dont M. Briand a donné la description dans une brochure parue en avril 1902 (1).

Ce gazogène est dit autoréducteur à double combustion ; il permettrait d'utiliser les combustibles de toute nature. Ce combustible, chargé dans un grand cylindre de métal, descend graduellement sur une grille à gradins, où il brûle ; les fumées et vapeurs produites parcourent un conduit horizontal et s'élèvent dans une cuve verticale, chargée de coke ou de charbon de bois, que le foyer entretient au rouge, et qui réduit l'acide carbonique et les carbures. Pour que la température de cette cuve reste assez élevée, il faut la protéger contre le refroidissement et lui restituer le calorique consommé dans les réactions endothermiques qui s'y développent. M. Briand donne quelques résultats d'essais faits avec des déchets de bois renfermant 60 0/0 d'eau. On aurait produit 914 litres de gaz, d'un pouvoir moyen de 1.179 calories, par kilogramme de bois humide ; la consommation de ce bois par cheval-heure effectif n'a pas été éloignée de 3 kilogrammes.

Gazogène Thwaite (2).

Dans les gazogènes à double cuve, du genre du dernier type de gazogène Riché, on peut craindre que la température soit insuffisante dans la seconde cuve pour permettre aux réactions de se développer. On pourrait la réchauffer par inversion de courant ; c'est

1. Gustave Briand. — « Gazogène autoréducteur » ; Paris, Béranger, 1902.

2. Voir Dryan-Donkin, page 205, édition de 1896.

ce qu'a fait d'abord M. Thwaite. Il eut ensuite l'idée, pour échapper à cette sujétion, d'injecter une quantité d'air supplémentaire à la sortie de la première cuve pour rendre aux gaz un peu d'oxygène et provoquer une faible combustion dans la deuxième cuve. Pour mieux assurer cet effet, il fallait garder aux gaz la plus haute température possible ; le carneau qui réunit les deux cuves a donc été garni de terres réfractaires, qui emmagasinent le calorique et empêchent toute déperdition. Le résultat a été heureux.

Plusieurs installations de ce genre ont été faites avec succès en Angleterre, notamment aux environs de Londres.

Gazogène Loomis.

M. Loomis s'était proposé de faire de la combustion renversée pour utiliser certains charbons très gras et particulièrement collants.

Mais son projet échoua d'abord contre un écueil qu'on aurait pu prévoir ; en effet, l'air insufflé par le haut élevait tellement la température de la colonne de combustible que toute la masse s'agglutinait et descendait moins bien que dans un gazogène ordinaire : on se voyait obligé de la briser à coups de ringard et d'y pratiquer des voies d'air, sinon le feu mourait. Après plusieurs années d'essais infructueux toujours déçus, M. Loomis substitua enfin à l'insufflation par le haut, une aspiration par le bas de la cuve du gazogène : de cette façon, le courant d'air traversait mieux la masse et le feu se localisait vers la partie inférieure. Cette nouvelle disposition a permis d'employer des houilles menues de la plus mauvaise qualité : on rapporte qu'un gazogène Loomis a pu être mis en service pendant deux ans, sans qu'on ait eu à l'arrêter pour le nettoyer ou le réparer.

Le gazogène Loomis a la forme d'un large cubilot, revêtu de terre réfractaire, ouvert par le haut, terminé à la partie inférieure par une partie très conique, par laquelle tombe le mâchefer, et jouant le même rôle que les étalages des hauts-fourneaux : il n'y a pas de grille à la base de la cuve. Des ouvertures latérales servent de regards et permettent d'introduire des ringards dans le combustible incandescent : les scories et les cendres tombent dans le cendrier, mais il paraît qu'il se produit peu de mâchefer. Comme l'aspiration a lieu par le bas, le cendrier doit être fermé par des portes bien jointives. Le gaz produit est aspiré à travers une colonne de refroidissement par un extracteur mù par une petite machine à vapeur. Cette colonne de refroidissement est entourée d'une enceinte remplie d'eau, constituant une chaudière ; la chaleur enlevée au gaz est utilisée pour produire de la vapeur, qui alimente la machine motrice et se décharge dans le cubilot pour la production du gaz.

Cet appareil est par suite un gazogène à aspiration et à combustion renversée : il représente donc un type spécial.

Gazogène Zahn.

Je ne connais pas d'application de ce gazogène aux moteurs à gaz, mais je ne serais pas étonné qu'on en ait fait déjà.

Cet appareil (1) est un gazogène à combustion directe et renversée ; le vent est servi également à la cuve par le haut et par le bas, la prise du gaz s'effectuant vers la partie moyenne. La cuve porte au-dessus du niveau de cette prise un rétrécissement, dont l'utilité est douteuse ; elle peut néanmoins avoir pour effet d'empêcher l'incandescence de se développer trop haut. M. Putsch craint qu'on ne soit amené à donner à la cuve une trop grande hauteur : l'inconvénient serait faible.

Avec ce dispositif, on répond à l'objection faite aux combustions renversées, d'amener dans le cendrier du combustible non brûlé.

Gazogène Faugé-Chavanon (2).

C'est la réalisation pratique, mais partielle, du brevet Zahn, avec cette différence que l'on ne donne à la base de la cuve qu'une quantité d'air minime et que la cuve a une forme différente ; elle est presque cylindrique, quoiqu'un peu évasée vers le bas ; mais le creuset est un cône, à la pointe duquel se trouve une pièce hélicoïdale, recevant du dehors un mouvement de rotation, qui entraîne les scories dans une fosse à fermeture hydraulique. La prise de gaz se fait au voisinage du fond.

Ce gazogène est donc à combustion renversée, avec jét d'air complémentaire par le bas : l'inventeur a craint évidemment de développer contre son extracteur de scories une température qui le compromettrait.

Les résultats sont très bons, et il suffit de faire passer les gaz à travers une colonne sèche à coke pour les épurer. Voilà quinze mois que cet appareil alimente un moteur Letombe de 50 chevaux, en marchant au bois. La consommation par kilowatt-heure a été de 3^k,75 de bois, avec récupération de 0^k,42 de charbon de bois. Le gaz avait un pouvoir de 1.000 à 1.100 calories par mètre cube.

Gazogène Duff.

J'appellerais volontiers cet appareil un gazogène à retour ; en effet les gaz et les carbures de distillation, pris au haut de la cuve, redescendent par un conduit latéral à mi-hauteur et sont lancés par un injecteur à vapeur horizontalement en travers de la cuve ; ils traversent donc les couches incandescentes et y subissent un complément de réduction. On espère réaliser ainsi les avantages de la combustion renversée en évitant ses inconvénients pratiques. Une objection se présente toutefois : les gaz suivent-ils réellement le chemin qui leur est tracé, et ce courant transverse est-il conciliable avec le courant ascendant normal ? Ne se produit-il pas un choc entre les deux courants qui trouble le fonctionnement de l'appareil ?

L'expérience seule peut répondre à cette question.

Ce gazogène est construit par MM. Mason de Manchester.

1. Putsch. — « Neuere Gas und Kohlenstaub Feuerungen » ; Berlin, 1899, page 6. Ce gazogène, breveté en Allemagne sous le n° 33.262 m'a été signalé par M. Lencauchez.

2. Brochure sans signature publiée par la Compagnie française des fours à gaz ; Paris, 1902.

Gazogène Deschamps.

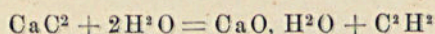
Ce gazogène est à combustion renversée comme les précédents, mais il marche par aspiration; le gaz est appelé par un ventilateur : la prise d'air est centrale et disposée dans l'axe de la trémie de chargement. Le combustible repose à la partie inférieure sur une grille inclinée : des lames, coulissant dans des rotules ménagées dans la plaque surmontant la porte, permettent de faire glisser les scories et le coke vers une cuve formant joint hydraulique. L'air primaire est chauffé par un récupérateur, formé d'un serpentin en tube d'acier doux sans soudure.

IX

Gaz acétylène.

On a beaucoup parlé en ces dernières années du gaz acétylène; doué d'un grand pouvoir calorifique, ce gaz convient excellemment à l'éclairage, et il semble *a priori* qu'il doit pouvoir être appliqué avec non moins de succès à la production de la force motrice. Par malheur, l'acétylène a la réaction brutale et il faudra le dompter avant de l'utiliser dans le cylindre d'un moteur; d'autre part, c'est un endothermique, donc un explosif, d'une puissance considérable, dont le maniement n'est pas sans danger, l'expérience l'a prouvé. Mais ce sont là des difficultés qu'on surmonte.

M. Berthelot avait depuis longtemps fait ressortir l'importance de l'acétylène, mais on ne savait produire ce gaz qu'en faible quantité et par des moyens très coûteux, de telle sorte que ce produit était resté une curiosité de laboratoire. Les travaux de M. Moissan, en France, et de M. Wilson, en Amérique ainsi que les recherches de M. Bullier, modifièrent, tout d'un coup, cet état de choses; sur la fin de 1892, ces savants et habiles chimistes ayant découvert le moyen de réduire l'oxyde de calcium par le charbon dans le four électrique et de produire en grand du carbure du calcium, la fabrication industrielle de l'acétylène devint possible, attendu qu'il suffit de mettre le carbure au contact de l'eau pour donner naissance au gaz. La réaction est la suivante :



D'après cette formule, 1 kilogramme de carbure de calcium décompose 562 grammes d'eau et il se dégage 406 grammes d'acétylène, dont le volume à 0° et 760 millimètres de pression, à l'état sec, est de 340 litres.

Comme le carbure du commerce n'est jamais absolument pur, le volume de gaz engendré n'atteint pas sa valeur théorique; pour les carbures des meilleures marques, on compte sur un rendement moyen de 300 litres au plus. L'acétylène formé est mêlé de gaz ammoniacque, d'hydrogène phosphoré et sulfuré, d'oxyde de carbone,

d'azote, etc., dans une proportion totale d'au plus 2 0/0 ; un simple barbotage dans l'eau retient la majeure partie de ces impuretés.

On peut l'épurer plus complètement en le faisant passer sur du chlorure de calcium refroidi, de l'acide sulfurique et une dissolution de sels de plomb.

L'acétylène est un gaz incolore ; à l'état de pureté, il possède une odeur éthérée, assez agréable, qui est masquée généralement par une odeur alliagée déplaisante, due aux impuretés qui l'accompagnent : il brûle sans aucune odeur, mais à condition que la combustion soit complète.

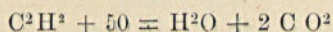
Sa densité est égale à 0,91 ; son poids spécifique est par suite de $0,91 \times 1,293 = 1,169$. Un kilogramme de ce gaz représente donc environ 855 litres.

Il se liquéfie aisément par la pression et le froid ; à 0°, il faut une pression de 27 kilogrammes environ ; à - 85°, la tension du liquide formé est celle de l'atmosphère. M. Villard a indiqué sa température critique à + 37° ; la tension est alors de 70 kilogrammes.

A 0°, la densité du liquide est de 0,451.

L'acétylène gazeux est peu soluble dans l'eau, plus soluble dans l'alcool et l'acétone, tout à fait insoluble dans l'eau saturée de chlorure de sodium.

Brûlé dans un eudiomètre, l'acétylène donne deux fois son volume d'acide carbonique et de la vapeur d'eau ; la réaction se formule ainsi :



Il forme des mélanges tonnants avec l'air ; un mélange de 1 volume d'air avec 1,35 d'acétylène commence à être explosif ; la force explosive s'accroît avec la dilution et elle atteint son maximum, quand il y a 12 volumes d'air pour 1 volume de gaz. Le mélange cesse au contraire d'exploser, lorsqu'il y a 20 volumes d'air.

D'après M. Le Châtelier, la vitesse de propagation de la flamme de ce gaz est de 0^m,18 par seconde pour un mélange de 2,9 0/0 d'air. Pour 8 0/0, la vitesse est de 5 mètres, et à 10 0/0 elle est de 6 mètres, dépassant de beaucoup celle donnée par un mélange de 10 volumes de gaz de houille pour 100 d'air.

La température d'inflammation est voisine de 480° ; elle est donc beaucoup plus basse que celle des autres gaz combustibles qui pour la plupart s'enflamment vers 600° (1). On enflamme très facilement des mélanges explosifs d'acétylène enfermés dans des tubes de verre en chauffant quelques instants ces tubes sur une lampe à alcool ; l'explosion se produit bien avant le ramollissement du verre.

La température de combustion est beaucoup plus élevée que celle des autres gaz ; brûlé avec son volume d'oxygène, l'acétylène donnerait une température d'environ 4.000°, soit 1.000° de plus que la flamme du mélange oxhydrique.

L'acétylène présente donc une grande vitesse de propagation de la flamme, une température très basse d'inflammation, et une température réellement élevée de la combustion.

1. H² + O s'enflamme à 555° et CO + O à 650°.

Il possède ainsi une énergie considérable dans ses explosions, en vertu même de la chaleur rendue disponible dans la réaction.

Son pouvoir calorifique supérieur est de 14.340 calories par mètre cube, à 0° et 76 millimètres, et de 12.200 calories par kilogramme.

Ce gaz peut exploser sans avoir le contact de l'air, car il est endothermique, c'est-à-dire formé avec absorption de chaleur. Toutefois sous de faibles pressions, la décomposition provoquée en un point ne se propage pas ; MM. Berthelot et Vieille ont démontré que ni l'étincelle électrique, ni la présence d'un point en ignition, ni même une amorce au fulminate n'exercent d'action au delà du voisinage de la région soumise directement à l'échauffement ou à la pression brusque, lorsque la pression du gaz n'est guère supérieure à celle de l'atmosphère.

Il en est tout autrement dès que la condensation du gaz s'accroît et, sous des pressions supérieures à deux atmosphères, l'acétylène n'a besoin d'aucun comburant pour présenter les propriétés des mélanges tonnants.

Si l'on excite une décomposition locale par un point en ignition ou par une étincelle, cette décomposition se propage dans toute la masse, instantanément et sans affaiblissement.

Cette explosibilité augmente et atteint son maximum avec l'acétylène liquide, dont les propriétés tonnantes sont comparables à celles du coton-poudre.

Dans une bombe d'acier de 47 centimètres cubes de capacité, chargée avec 18 grammes d'acétylène liquide, on a obtenu l'énorme pression de 5.564 kilogrammes lors de l'explosion ; il a suffi pour cela de faire rougir un fil de platine dans le récipient.

L'explosion ne semble pas devoir être produite par un choc, mais elle peut résulter d'une compression brusque ; il faut donc surveiller l'opération du chargement des réservoirs, ainsi que les phénomènes de compression adiabatique qui accompagnent quelquefois l'ouverture brusque d'un récipient sur un détendeur ou sur un réservoir de petite capacité. On a vu en effet que l'ouverture brusque d'un robinet d'acide carbonique, muni d'un détendeur, y déterminait une élévation de température susceptible de carboniser des copeaux de bois. Avec un récipient d'acétylène, il résulterait une explosion de cette ouverture brusque ; le fait s'est produit et il y eut mort d'hommes dans des circonstances dont les détails sont peu connus, les témoins ayant disparu, mais qui doivent être une leçon et qui inspireront une sage défiance des réservoirs chargés d'acétylène liquéfié.

L'acétylène faiblement comprimé est beaucoup moins dangereux.

L'emménagement de l'acétylène a été facilité par la découverte de MM. Claude et Hess, qui ont réussi à en dissoudre 300 volumes dans un volume d'acétone (1), sous une pression de 12 kilogrammes environ ; à la température de 15° et sous la pression ordinaire, ce liquide n'en dissout que 25 volumes. Dans ces conditions, l'utilisation du gaz est simple ; en effet, il suffit d'ouvrir progressivement un robinet placé à la partie supérieure du récipient contenant la dissolution sous pression et communiquant avec

1. L'acétone, qui se produit en grand dans la fabrication de l'aniline, est un liquide incolore, d'une odeur éthérée, de densité 0,81, bouillant à 56°, brûlant avec une flamme bleue : il est soluble dans l'eau et l'alcool.

les appareils à alimenter pour que le gaz se dégage jusqu'à concurrence des 25 litres correspondants à la pression atmosphérique. Le liquide épuisé de la sorte est alors renvoyé à l'usine de chargement. La dissolution à 12 kilogrammes présente un volume égal à une fois et demie celui du dissolvant.

Il est à remarquer que la solubilité de l'acétylène dans l'acétone diminue de moitié environ, quand la température passe de 15 à 50° ; il en résulte que la pression d'un récipient chargé de solution ne fait que doubler pour une élévation de température de 35°. L'acétylène liquéfié passe au contraire de 24 à 70 kilogrammes de pression, lorsque la température monte de 18°. L'avantage de l'emploi de la solution ressort de ce chiffre ; au lieu d'employer de véritables obus à parois épaisses et résistantes, on peut utiliser au contraire des vases métalliques à parois minces, moins dangereux en cas de rupture, fort légers, permettant par suite d'emmagasiner beaucoup plus de gaz par unité de poids. Ajoutons que la faible dilatation de la solution permet de remplir les tubes beaucoup plus complètement.

La solution, quoi qu'en encore endothermique, ne paraît pas explosible sous l'action de la chaleur, quand sa tension n'est pas grande ; MM. Claude et Hess y ont maintenu indéfiniment un fil de platine rougi par le passage d'un courant, sans qu'une détonation se soit produite.

Ces expériences ont été reprises par MM. Berthelot et Vieille (1), et ces savants ont démontré que la dissolution dans l'acétone diminuait réellement les risques encourus par ceux qui emploient l'acétylène. Voici le résumé de leurs conclusions. L'acétone étant saturé sous une pression de 8 kilogrammes (1.170 grammes d'acétylène dans 7 litres d'acétone), un fil de platine rougi ne peut développer aucune explosion, qu'il soit placé dans la dissolution même ou dans l'atmosphère gazeuse qui la surmonte. Par contre, sous des tensions supérieures à 20 kilogrammes, il se développe des pressions explosives qui peuvent atteindre 5.000 kilogrammes et auxquelles aucun récipient industriel ne saurait résister. Il importe donc de ne pas dépasser les 8 kilogrammes de tension dont l'innocuité a été démontrée par MM. Berthelot et Vieille, et il faut éviter toute élévation de température capable de développer une tension supérieure. Sous cette prudente réserve, la dissolution dans l'acétone donne d'excellents résultats, attendu que ce procédé si simple permet d'emmagasiner cinquante fois plus d'acétylène dans un récipient, sans s'exposer à aucun accident.

La solution peut être utilisée aussi bien quand elle imprègne un corps poreux, tel que l'amiante, la pierre ponce, etc. ; il en résulte des facilités remarquables d'emploi.

Ces résultats feront oublier les essais d'atténuation qui ont été tentés plus récemment pour éviter les explosions, dont on paraissait menacé par l'emploi du gaz acétylène pur : les additions de gaz inertes (acide carbonique ou azote) étaient assurément efficaces, mais elles augmentaient considérablement le volume du gaz combustible sans ôter tout danger et elles donnaient lieu à une manutention laborieuse, que la dissolution dans l'acétone évite absolument.

L'application du gaz acétylène à la production de la force motrice est évidemment

1. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 40 mai 1897.

subordonnée à la solution des problèmes que nous venons d'étudier, car il faut avant tout que l'emmagasinement et l'approvisionnement du produit soit sans danger.

Peu de travaux ont été faits jusqu'ici sur l'emploi de l'acétylène dans les moteurs : la question est évidemment à l'ordre du jour de bien des chercheurs, mais nous sommes encore dans la période de méditation, et il faudra attendre quelque temps pour recueillir les fruits de cette laborieuse incubation.

Le Dr Franck, de Charlottenbourg, a publié, dans le *Journal für Gasbeleuchtung*, un article sur la puissance motrice de l'acétylène qui a bien fait ressortir les grands avantages que pourrait procurer l'emploi de ce gaz : il a établi une comparaison entre les machines à vapeur, utilisant l'énergie potentielle de la houille, et les moteurs à gaz alimentés d'acétylène, obtenu par le carbure de calcium.

En se plaçant dans les meilleures conditions de marche et de fonctionnement, on estime qu'une machine à vapeur de 1.000 chevaux consommerait en 25 jours (pour développer 600.000 chevaux-heure), à raison de 700 grammes par cheval-heure, 420 tonnes de houille occupant un espace d'au moins 420 mètres cubes ; en admettant d'autre part que le carbure du commerce produise 90 0/0 du gaz théoriquement calculé, on serait autorisé à croire qu'il faudrait 180 grammes d'acétylène par cheval-heure, soit en tout 295 tonnes de carbure, occupant un volume d'environ 130 mètres cubes ; en tenant compte de ce que le carbure devrait être renfermé dans des boîtes en métal bien closes, on arriverait donc à évaluer l'encombrement à 150 mètres cubes. Si, bravant toute inquiétude, l'on emmagasinait l'acétylène à l'état liquide dans les tubes en acier on diminuerait l'encombrement ; les 180 grammes par unité donneraient 108 tonnes pour 600.000 chevaux-heure ; à la température moyenne de la coque d'un navire transatlantique, que M. Franck prend égale à 36°, la densité de l'acétylène liquide serait de 0,364, et le volume du liquide atteindrait 280 mètres cubes, tubes non compris. Ces résultats sont curieux, mais ils ne séduiront pour le moment aucun capitaine au long cours (*).

M. Cuiat s'est aussi proposé de dompter l'acétylène et d'utiliser son énergie dans des moteurs ; ses essais ont porté sur une machine de 6 chevaux, dans laquelle on avait le moyen de doser à volonté les proportions de combustible et de comburant et qui détendait fortement les gaz brûlés après l'explosion. Un dispositif particulier permettait de marcher tour à tour au gaz de ville ou au gaz acétylène, afin de mieux comparer les résultats obtenus et de faire une analyse plus fructueuse des phénomènes observés. Ces intéressantes expériences ont été faites à Compiègne, par M. Cuiat avec l'assistance de M. Thomas.

On commença par une série d'essais au gaz de ville ; on releva les consommations ci-dessous :

Marche à vide, consommation totale.	1380 litres
A demi-charge (3 chevaux), consommation par cheval-heure-effectif)	876 —
A pleine charge (5 chevaux) consommation par cheval-heure effectif	516 —

1. Voir *Journal du Gaz et de l'Électricité*, 45 mai 1896.

Le moteur soumis à cette épreuve peut donc être considéré comme un moteur économique. On comprimait à 6^k,2 ; la pression explosive atteignait 17^k,2.

On procéda ensuite aux essais avec l'acétylène, en ayant soin de réduire au minimum la levée de la soupape d'introduction du gaz ; mais l'appréhension qu'on avait des explosions brisantes que donne l'acétylène amena les expérimentateurs à réduire outre mesure la richesse du mélange, qui se trouva ne plus être explosif. Il fallut donc admettre plus de gaz. Les explosions furent d'abord irrégulières ; à des explosions brutales, qui faisaient vibrer toute la masse du moteur, succédaient des ratés, qui amenaient un ralentissement de la marche ; mais c'était une question de réglage. On obtint enfin une marche sans à-coup en formant un mélange de 1 gaz acétylène pour 20 d'air.

Les consommations furent les suivantes :

Marche à vide, consommation totale	470 litres
A demi-charge, consommation par cheval-heure effectif.	302 —
A pleine charge — — — — —	175 —

La consommation d'acétylène paraît donc être trois fois moindre que celle du gaz de ville.

La compression fut de 8 kilogrammes environ, alors qu'elle n'était que de 6,2 avec le gaz de houille ; il faudrait une étude complète du fonctionnement du moteur pour expliquer cette anomalie, que M. Cuinat attribue, nous ne savons pourquoi, à la plus haute température des parois. La pression explosive atteignit 29 kilogrammes, et pourtant, la pression finale à la fin de la détente était moindre dans la marche à l'acétylène que dans la marche au gaz : ce fait est encore paradoxal et devra faire l'objet de nouvelles expériences.

Il fut impossible de dépasser la puissance de 6 chevaux obtenue par le gaz ; à cet égard, il n'y a donc aucun avantage à employer l'acétylène.

Le rendement thermique augmenta sans doute un peu, car 516 litres de gaz de ville à 5.250 calories par mètre cube donnent plus de calories que 175 litres d'acétylène à 14.340 calories ; dans le premier cas on a 2.709 calories, contre 2.510 dans le second. Toutefois ce calcul peut être contesté, car M. Cuinat a négligé de déterminer le pouvoir calorifique du gaz de ville employé.

Mais comme, avec du carbure même à 400 francs, le mètre cube d'acétylène coûte au moins 1 fr. 30 on voit que l'emploi de l'acétylène revient à consommer du gaz à 45 centimes ; son usage est donc loin d'être économique dans les moteurs.

Les expériences Cuinat ont établi du moins que l'on peut se servir d'acétylène et cette démonstration est pleine d'intérêt : elle n'avait pas été faite antérieurement.

M. Ravel, a aussi étudié cette question dès le mois de juin 1896 : il s'est servi d'un générateur Fournier, dans lequel l'eau atteint le carbure par le bas ; le dégagement de gaz y fait monter la cloche d'un gazomètre, et ce mouvement arrête l'afflux d'eau aussitôt que la cloche s'est élevée à une certaine hauteur. La pression du gaz était de 165 millimètres d'eau à la sortie du gazomètre ; le moteur employé était du type Ravel, à deux temps, avec allumage électrique. Les essais ont porté alternativement

sur l'acétylène, le gaz de ville ordinaire et l'air carburé par de l'essence de pétrole ; la comparaison des effets obtenus se faisait ainsi avec une grande facilité et l'on éliminait toutes les causes d'erreur, qui auraient pu fausser le jugement de l'expérimentateur.

M. Ravel avoue qu'il a été d'abord très frappé des détonations violentes produites dans son moteur : on le serait à moins ! Il commença, comme la prudence le conseillait, par vérifier les joints, par serrer les écrous et les boulons et par s'assurer que tout était en bon ordre. Au premier diagramme relevé, le levier de l'indicateur fut brisé par la violence du choc. Les ingénieurs qui ont fait des essais avec l'acétylène trouveront, dans le récit vivant et imagé de M. Ravel, l'histoire de leurs tentatives et de leurs émotions.

Il constata que le graissage habituel du cylindre, tel qu'on le pratique quand on emploie le gaz de ville, doit au moins être doublé avec l'acétylène. D'autre part, le degré du refroidissement du cylindre influe beaucoup plus sur le travail qu'avec l'emploi du gaz de houille et autres. Ce sont des indications précieuses, dont on devra tenir compte dans les essais postérieurs.

Afin d'obtenir des résultats mieux comparables, l'expérimentateur a adopté pour base de ses calculs le nombre de kilogrammètres indiqués produit par un litre d'acétylène consommé par heure.

Nous donnons maintenant la parole à M. Ravel et reproduisons le texte même de son rapport communiqué au Congrès technique du gaz.

Tableau des essais faits avec l'acétylène.

NUMÉRO des diagrammes	TOURS par minute	TRAVAIL indiqué	G A Z par heure	Kilogrammètres par litre de gaz	PROPORTION d'acétylène	OBSERVATIONS
1	364	158.35	728	783	2.77 %	Compression : 3k ^{gr}
2	350	169.70	804	760	3.18 »	id.
3	314	150.60	780	695	3.45 »	id.
4	300	172 »	912	679	4.20 »	id.
5	322	—	936	—	4.00 »	id.
6	320	—	948	—	4.10 »	id.
7	314	167.6	744	811.2	3.30 »	Compression : 2 ^k 25
8	316	188.6	804	844.4	3.50 »	id.

« On voit, d'après ce tableau, que le travail indiqué décroît avec la proportion d'acétylène.

La pression initiale croît avec le dosage, mais l'inspection des diagrammes montre que la chute de pression est immédiate ; l'expansion n'est pas soutenue.

On voit aussi que, lorsque la proportion d'acétylène approche de 5 0/0, les explosions deviennent brisantes, et par suite les vibrations du levier de l'indicateur et aussi de la charge explosive donnent des indications incertaines.

Voulant atténuer les vibrations indiquées par les diagrammes, j'ai augmenté le volume total et la charge au moment du feu ; c'est-à-dire que, le volume des résidus a été augmenté, alors que la compression était diminuée de 0^k,750.

C'est dans ces conditions qu'ont été obtenus les diagrammes n^{os} 1 et 2, ainsi que ceux n^{os} 1 bis et 2 bis, figure 65 ; ces derniers correspondent à un gaz de ville moyen.

Ils témoignent pour l'acétylène d'une expansion plus grande ; aussi le travail est-il notablement augmenté.

On peut conclure de ce tableau qu'un litre d'acétylène produit, sur le piston d'un moteur du type de 2 chevaux, un travail de 860 à 870 kilogrammètres indiqués.

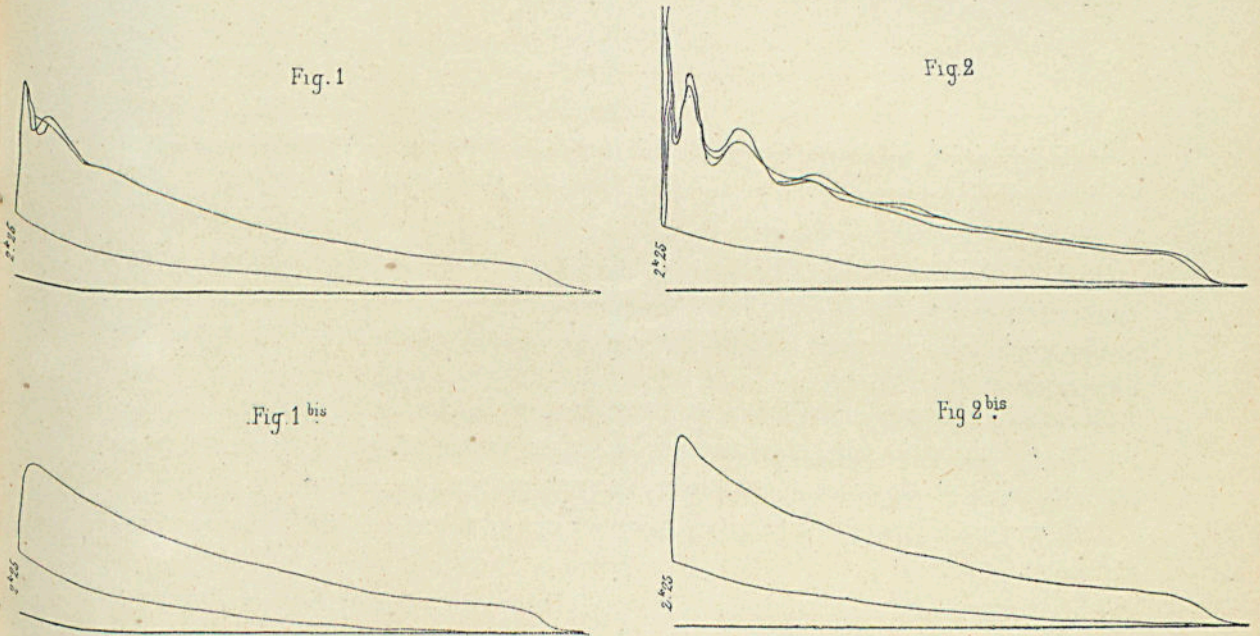


Fig. 65. — Diagrammes comparés à l'acétylène et au gaz de ville.

Pour terme de comparaison, je dois dire que dans le moteur sur lequel ont été faits les essais, la consommation normale est de 948 à 960 litres de gaz de ville par cheval-heure pour 2 chevaux effectifs ; la force motrice moyenne est ainsi de 405 kilogrammètres indiqués par litre de gaz.

Dans ce type de petit moteur, la puissance de l'acétylène serait donc 2 1/10 fois plus grande que celle du gaz de houille.

La consommation par *cheval heure-effectif*, avec un rendement organique de 0,60 serait de :

$$\frac{385\ 700\ \text{kgm. indiqués}}{850} = 453\ \text{litres d'acétylène}$$

à la pression de 160 millimètres d'eau, représentant un volume d'environ 460 litres à la pression atmosphérique, soit en poids 550 grammes.

Dans les puissants moteurs, l'effet utile serait sans doute plus grand, mais la proportion resterait sensiblement la même. »

En résumé, M. Ravel ne croit pas que la grande force explosive de l'acétylène puisse donner tout son effet utile sur les pistons des moteurs à gaz tonnants tels qu'ils sont construits aujourd'hui, car on se trouvera en présence de cette double alternative :

Ou bien le gaz acétylène sera employé à forte dose dans le mélange détonant, et alors il ne donnera que peu de travail utile, vu l'explosion brisante qui se produira. Ou bien l'on diluera l'acétylène dans une très grande masse d'air, mais alors ce gaz ne donnerait pas assez de calorique pour élever suffisamment la pression de la masse gazeuse et lui faire développer, par son expansion, un travail dans des conditions économiques.

Si par contre le gaz acétylène est en excès dans le mélange, il se forme un dépôt de charbon et le cylindre s'encrasse très rapidement.

Le mélange doit donc être formé rigoureusement dans les proportions voulues et c'est une première difficulté; il doit de plus être parfaitement homogène, et cela constitue une autre cause d'échec.

On a remarqué d'autre part qu'il se produit assez fréquemment des explosions dans la chambre de mélange et des retours de flamme vers le générateur de gaz, ce qui ne laisse pas que d'être dangereux, en dépit des toiles métalliques qui barrent les conduites.

On a évité ce grave inconvénient en intercalant sur le chemin du gaz une soupape auxiliaire, actionnée par le moteur, qui ne laisse passer d'acétylène au mélangeur qu'au moment précis de l'admission et se referme aussitôt.

L'allumage électrique est mieux indiqué que tout autre pour les moteurs à acétylène.

En Allemagne, on s'est beaucoup intéressé à l'emploi de l'acétylène pour la force motrice : les ateliers de Deutz ont même vendu à un moment donné des moteurs à acétylène. On comprimait à 12^k,59 un mélange de gaz et d'air au $\frac{1}{30}$ et l'on relevait des pressions explosives de 43^k,6 et des pressions finales à la décharge de 13^k,87. On a parlé de consommation de 215 litres par cheval-heure effectif. M. Lothar Meyer a réussi à abaisser ce chiffre à 160 litres pour un moteur de 10 chevaux.

M. l'abbé Capelle, qui est un spécialiste éminent de l'acétylène (1), a mis en route en 1900, au collège du Caousou de Toulouse un moteur Letombe de 6 chevaux qui marche depuis lors avec régularité et « sans guère dépenser plus qu'un moteur à gaz ordinaire. », ce qui veut dire sans doute que le prix de revient du cheval-heure est le même à peu de chose près par l'acétylène et le gaz de ville. Il reste encore à savoir ce que coûtent l'un et l'autre gaz. On estime d'ordinaire le mètre cube d'acétylène à 1 fr. 30 au minimum.

1. Edouard Capelle. — *L'Éclairage et le chauffage par l'acétylène*; Paris, 1902, page 476.

A l'Exposition de 1900, la Compagnie universelle de l'acétylène faisait tourner un petit moteur Otto dans son compartiment.

Il semble ressortir de ces premiers essais que la consommation d'acétylène est de 1 litre pour 3 de gaz de ville, à puissance égale, les moteurs étant placés respectivement dans les conditions les plus favorables.

M. Capelle signale dans son excellent ouvrage les études faites par M. Lépinay sur l'emploi de la gazoline carburée à l'acétylène : « l'adjonction, dit-il, d'un carburateur à acétylène, ne fonctionnant que lorsque le régulateur le met en marche, permet de régler le carburateur à hydrocarbure en le mettant au point où il fonctionne le mieux avec le maximum d'air, et de régler la marche par l'introduction d'une très petite quantité d'acétylène. Le mélange devient beaucoup plus inflammable, la combustion est plus complète, les gaz d'échappement sont absolument incolores et les clapets du moteur ne s'encrassent jamais. »

Cette carburation serait économique ; ainsi un moteur de 3 chevaux consommant 1.150 grammes d'essence n'en dépense que 700 avec 150 litres d'acétylène. De même avec l'alcool ; un moteur de 100 kilogrammètres n'a consommé par cheval que 220 grammes d'alcool à 90° avec 110 litres d'acétylène.

Ces résultats sont assurément fort intéressants ; mais il faut reconnaître que la gazoline et l'alcool se passent bien du concours de l'acétylène.

Le congrès de 1900 a suggéré de mélanger les gaz pauvres de 3 0/0 d'acétylène pour les enrichir ; on a même proposé de construire des mélangeurs à dosage variable placés sous la dépendance du régulateur, destinés à maintenir le gaz à une richesse constante et des essais ont été faits avec des gazogènes à aspiration. Cette solution hybride n'est pas rationnelle et les gazogènes à aspiration n'en ont pas besoin ; l'adjonction d'un générateur d'acétylène entraînerait d'ailleurs une complication intolérable.

X

Gaz de hauts fourneaux.

La concurrence acharnée que se font les producteurs de fonte leur défend de négliger la moindre source de bénéfices capable d'abaisser leur prix de revient ; ils essaient donc de faire profiter leur industrie de tous les éléments secondaires de rémunération par les sous-produits des hauts fourneaux. Déjà on recueillait dans les usines de l'Écosse, alimentées à la houille, les goudrons et les produits ammoniacaux entraînés par les gaz ; dans les hauts fourneaux à coke du Luxembourg, on arrêtait les chlorures, iodures et sulfates de potassium, sodium et ammonium. Mais il y avait mieux à faire encore.

En effet, l'utilisation des chaleurs perdues des hauts fourneaux promet des bénéfices beaucoup plus considérables.

Autrefois, les gaz s'échappaient librement du gueulard et ils produisaient des flammes immenses dont on n'utilisait pas le calorique ; c'est Fabre-Dufour qui eut l'idée de les diriger dans les foyers des chaudières et de les employer à produire de la vapeur d'eau pour les moteurs et de l'air chaud pour les souffleries. Cette innovation eut les plus heureux résultats ; au lieu de consommer 4 tonnes de coke par tonne de fonte produite, on arrive aujourd'hui à ne plus dépenser que 800 kilogrammes.

Néanmoins, les chaleurs perdues ne sont pas encore utilisées d'une façon satisfaisante, et cela tient surtout à ce que les chaudières chauffées par les gaz ne sont généralement pas établies dans des conditions assez parfaites. M. Lencauchez avait démontré, dès 1874, que les hauts fourneaux donnaient une disponibilité de gaz combustibles plus que suffisante pour alimenter toutes les machines à vapeur d'un établissement métallurgique complet ; or, on est bien loin de ce résultat dans la pratique.

Dans un excellent travail publié dans les *Annales des Mines de Belgique*, M. Hubert a fait le compte exact des chaleurs des hauts fourneaux qu'on peut utiliser pour des services extérieurs : nous lui empruntons les calculs qui suivent (1).

La tonne de coke renferme 850 kilos de carbone dont 37^k,5 restent dans la fonte, le reste, soit 812^k,5 se combinant à l'oxygène, pour former de l'anhydride carbonique et de l'oxyde de carbone. Cette combustion incomplète dégage la chaleur nécessaire aux réactions qui ont lieu dans la cuve du fourneau ; mais la production de l'oxyde de carbone constitue l'imperfection de l'opération. On constate généralement qu'il y a environ 5/10 de CO² pour 1 de CO dans les gaz sortis du gueulard ; d'après cela, les poids équivalents de C, O, CO et CO² étant respectivement 12, 16, 28 et 44, nous trouvons pour x kilogrammes de carbone, des poids de

$$\text{CO}^2. \quad . \quad . \quad \text{égaux à } x \frac{44}{12}$$

et de

$$\text{CO} . \quad . \quad . \quad - \quad (812,5 - x) \frac{28}{12};$$

nous avons donc, en tenant compte de ce que le lit de fusion donne 187^k,20 de CO² par tonne de fonte,

$$\frac{x \frac{44}{12} + 187,20}{\frac{(812,5 - x) 28}{12}} = 0,5$$

On en déduit :

$$x = 157^k,4$$

Le poids d'oxygène entré en combinaison avec le carbone est égal à

$$\frac{157,4 \times 32}{12} + \frac{655,1 \times 16}{12} = 1293^k,20$$

1. « De l'utilisation des gaz de hauts fourneaux pour la production de la force motrice » ; *Annales des Mines*, tome II, 1897.

Or, M. Hubert compte que les oxydes ont cédé 430^k,5 d'oxygène. Le reste, soit 862^k,7 a été fourni par l'air soufflé ; il a fallu injecter à cet effet 3.626 kilogrammes d'air.

Ces éléments permettent de calculer la composition et le poids total des gaz dégagés par tonne de fonte produite.

On trouve :

Azote		2757 ^k ,4	
CO ²	} Provenant de la combustion du carbone . .	577 ,1	
		— de la décomposition des carbonates	182 ,2
		— de l'air insufflé	7 ,9
CO		1534 ,4	
H provenant de l'humidité de l'air		3 ,0	
H ² O non décomposée		388 ,0	
		<hr/> 5450 ,0	

L'addition de houille crue ajoute un peu de carbures par distillation.

En somme, la composition du gaz serait donc celle qui suit :

Az	50,12 en poids
CO ²	13,95
CO	27,90
H et carbures	1,02
H ² O	7,01
	<hr/> 100,00

Le kilogramme de ce gaz donnerait environ 820 calories.

Son poids spécifique à 0° et 760 millimètres atteindrait 1^k,322 par mètre cube.

Le pouvoir supérieur par mètre cube à 0° et 760 millimètres serait par suite égal à 1.166 calories, vapeur d'eau condensée.

Il serait de 1.094 calories à 15° avec 1 0/10 d'humidité.

Mais les hauts fourneaux ne donnent pas toujours un si heureux résultat ; en reprenant ces calculs pour 7/10 de CO² sur 1 de CO, on trouve un pouvoir de 982 calories par mètre cube à 15° et de 1.041 calories à 0° et 760 millimètres.

C'est donc une moyenne de 1.100 calories.

Le pouvoir inférieur serait un peu moindre, mais la différence ne serait pas considérable, vu la faible teneur des gaz de hauts fourneaux en hydrogène et en méthane.

Ces résultats du calcul devaient être vérifiés par l'expérience.

La société Cockerill de Seraing m'a fait l'honneur de m'envoyer en juillet, 1895, un certain nombre d'échantillons de gaz pour que j'en détermine le pouvoir calorifique par le procédé de ma bombe eudiométrique.

Or, j'ai obtenu les résultats suivants :

Fourneau n° 6	Echantillon A	Pouvoir : 990 calories
—	— B	— 964 —
—	— C	— 949 —
Fourneau n° 1	Echantillon A'	Pouvoir : 968 calories
—	— B'	— 970 —

Fourneau n° 2	Echantillon A''	Pouvoir: 1022 calories
—	— B''	— 1012 —
Fourneau n° 3	Echantillon A'''	Pouvoir: 991 calories
—	— B'''	— 961 —

Ce dernier fourneau marchait à l'allure extra-chaude.

Un prélèvement fait au collecteur des chaudières a fourni les trois échantillons ci-dessous :

Collecteur	Echantillon D	Pouvoir: 1084
—	— E	— 1032
—	— F	— 1020

Ces prises avaient été effectuées à quelques heures d'intervalle.

Elles indiquaient dans l'ensemble un pouvoir moyen de 1.000 calories ; ce résultat confirmait les conclusions du calcul de M. Hubert; il prouvait que les hauts fourneaux marchaient dans de bonnes conditions.

J'ai été amené depuis lors à faire un grand nombre de déterminations de pouvoir de gaz de hauts fourneaux de toute provenance ; les écarts sont considérables, mais les chiffres oscillent autour d'une moyenne, qu'on peut établir.

J'extraits de mon carnet d'expériences les résultats ci-dessous.

Les pouvoirs sont mesurés à l'aide de ma bombe, sous volume constant et rapportés au mètre cube à 0° et 760 millimètres de pression, vapeur d'eau condensée à 15° environ. La combustion est garantie complète.

Pouvoir calorifique des gaz des hauts-fourneaux.

BELGIQUE

A .	1.001, 978, 993, 999, 937	Moyenne : 981
B .	1.000, 939, 1.036, 1.027, 1.045, 1.059, 1.026, 992, 999, 1.051, 982, 906, 883, 975, 925, 898, 901, 860, 970, 928	— 959
C .	986, 999, 995, 977, 965	— 984
D .	989, 993, 987, 1.003, 1.021	— 999
E .	852	— 852

LUXEMBOURG

F .	935	935
G .	1.098, 1.204, 1.053, 1.023, 1.046, 922	Moyenne : 1 057
H .	1.046	1.046
I .	1.045, 1.047, 1.024, 1.024, 1.027, 1.019, 988, 980, 1.013, 958, 1.020, 959, 989	Moyenne : 1.006

ALLEMAGNE

J .	1.013, 1.012, 995, 981, 980, 1.011	Moyenne : 998
K .	768, 1.001, 813, 885	— 867
L .	927, 963, 1.047, 977, 958	— 947
M .	1.007, 1.017	— 1.012
N .	961, 927	— 944
O .	1.003, 1.043	— 1.023
P .	1.033, 912	— 972
Q .	944, 1.013, 1.064, 1.074	— 1.024

ANGLETERRE

R . 981 981

FRANCE

S .	1.005.	Moyenne : 1.005
T .	990, 895, 951, 1.018, 966, 926	— 974
U .	1.060, 974	— 1.017
V .	929, 1.011	— 970
X .	1.032, 997, 1.058, 976, 1.037, 1.041, 1.020, 968, 1.020, 1.045, 1.015, 977, 1.086, 1.029, 1.044, 1.037, 1.030, 1.063, 1.015, 1.010 .	— 1.025

ESPAGNE

Y . 875 — 875

Les nombreuses analyses qui précèdent donnent une moyenne générale, qui a l'autorité d'une enquête fort étendue, puisqu'elle porte sur 24 hauts fourneaux différents, travaillant des minerais de nature fort diverse. Les chiffres donnés par ma bombe sont un peu supérieurs à ceux que l'on obtient par les calorimètres à combustion de Hartley et de Junkers, parce qu'ils correspondent sans doute à une combustion plus complète, que ces appareils n'assurent pas aussi rigoureusement, surtout quand les gaz sont très pauvres. Mes chiffres sont d'ailleurs encore plus faibles que ceux que M. Hubert a calculés théoriquement et ils ne doivent donc pas être considérés comme trop forts.

Je crois pouvoir estimer le pouvoir moyen des gaz de hauts fourneaux à 980 calories par mètre cube, à 0° et 760 millimètres de pression, vapeur d'eau condensée ; c'est donc le pouvoir *supérieur*. Il s'élève accidentellement quelquefois à 1.050 calories et plus, à certaines allures des fourneaux, alors que le laitier devient plus acide ; il tombe rarement au-dessous de 850. Sa variabilité ressort des chiffres reproduits ci-dessus : pour un même haut fourneau, nous le voyons passer de 860 à 1.059, comme cela se constate pour le fourneau B, dont j'ai eu à apprécier de nombreux échantillons.

La composition réelle des gaz de hauts fourneaux se rapproche beaucoup de celle que M. Hubert a pris pour base de ses calculs.

M. Ledebur donne le résultat moyen de nombreuses analyses effectuées par lui (1).

	En volume	En poids
CO	24	24
CO ²	12	17
Az	60	58
H.	2	0, 2
CH ⁴	2	0, 8
	100	100, 0

Il estime le pouvoir inférieur de ce gaz à 950 calories et son poids spécifique à 1.300 grammes par mètre cube ; un kilogramme de charbon brûlé dans le haut fourneau

1. Ledebur. — « Le Chauffage au gaz, traduction Krawtsoff », page 16 ; Paris, 1893.

engendrerait 9 mètres cubes de ce gaz; un fourneau de 100 tonnes fournirait environ 400.000 mètres cubes par jour.

A Wishaw, où les fourneaux sont chargés à l'anthracite et marchent à allure spéciale, le gaz avait une composition exceptionnellè, qu'il est utile de faire connaître.

H	4,55
CO	25,83
CH ⁴	3,45
CO ²	6,21
Az	59,96
	<hr/>
	100,00

M. Von Eichelhaeuser a déterminé la composition moyenne du gaz de Hørde, en Westphalie, qui serait la suivante :

CO ²	8 à 9 %
CO	31 à 33
H.	2 à 3

Le pouvoir calorifique inférieur de ce gaz est de 960 calories par mètre cube :

D'après Bryan Donkin, le pourcentage des gaz combustibles (CO, H et CH⁴) varierait de 24 à 34 0/0 : je pense que l'on trouve plus rarement 24 que 34.

M. Lürmann a donné la composition que voici pour un fourneau consommant 1.100 kilogrammes de coke par tonne de fonte : cet élément est, en effet, important à considérer.

	En volume
CO	27,5
CO ²	10,0
Az	54,5
H.	3,0
H ² O	5,0
	<hr/>
	100,0

Un gaz d'un fourneau Luxembourgeois m'a donné la composition suivante :

	En volume
CO	25,83
CO ²	11,72
Az	57,50
H	4,55
CH ⁴	0,15
O.	0,25
	<hr/>
	100,00

D'après le calcul, son pouvoir devait être de 937 calories; or, je n'ai trouvé, par ma bombe, que 922 calories, ce qui démontre une fois de plus qu'elle ne donne pas de résultats erronés par excès, comme on aurait pu le craindre, en comparant les pouvoirs à la bombe avec ceux que donne le calorimètre Junkers.

A noter la teneur de ces gaz en hydrogène ; ce gaz est en faible proportion, mais néanmoins en quantité appréciable, contrairement à l'opinion de quelques ingénieurs.

L'allumage de gaz aussi pauvres se ferait mal dans les moteurs, quand on mélange un volume de gaz avec 0,8 d'air, si l'on ne prenait la précaution de comprimer fortement le mélange dans le moteur. Il faut monter au moins à 8 kilogrammes pour ne pas s'exposer à des ratés, et il est sage de ne pas se tenir en dessous de 10, si l'on veut obtenir un bon rendement. La pratique a montré le bien fondé de ces prescriptions : la pression explosive ne dépasse pas, malgré ces fortes pressions préalables, les limites que la prudence invite à ne pas franchir dans les puissants moteurs, ainsi qu'en témoignent les diagrammes que nous donnerons plus loin.

L'expérience a démontré que le moteur à gaz n'avait que de légères modifications à subir pour se prêter à l'emploi des gaz de hauts fourneaux.

Il faut d'abord augmenter la section des soupapes d'admission du gaz et des conduits qui y aboutissent ; c'est une conséquence de la pauvreté relative du mélange, et nous n'avons pas besoin d'insister sur ce point. La nécessité d'évacuer hors du cylindre les poussières qui pourraient s'y accumuler exige d'autre part des formes spéciales de culasse, étudiées dans ce but, et des sections très larges des soupapes ainsi que des conduites d'échappement : il faut éviter les angles et les recoins, dans lesquels les remouls produiraient aisément un dépôt de matières solides. Le degré élevé de compression pratiqué avec les gaz de hauts fourneaux a pour résultat de faire croître les températures des gaz explosés et brûlés ; il est donc indiqué de refroidir, par une réfrigération efficace, les culasses du cylindre et ses soupapes ; dans les puissants moteurs, on a même reconnu l'utilité d'une réfrigération du piston. Ces divers moyens empêchent les allumages prématurés, dont on ne saurait trop se défier, quand on aborde les grandes puissances.

L'allumage doit être étudié avec le plus grand soin ; l'emploi des tubes incandescents n'est pas absolument contre-indiqué, mais on peut craindre que les poussières ne s'introduisent dans l'intérieur de ces tubes, à faible diamètre, et ne permettent plus la mise de feu ; aussi la plupart des constructeurs y ont-ils renoncé, pour donner la préférence aux bougies électriques. Mais elles ne sont pas non plus entièrement à l'abri des poussières, ce qui a amené à en employer deux, qui collaborent normalement au même objet et constituent une garantie de marche ; au cas où l'une d'elles viendrait à manquer, l'autre lui servirait de doublure et éviterait un arrêt.

Les appareils de mise en marche s'imposent pour les moteurs de hauts fourneaux ; mais il n'y a pas eu à inventer, ni à innover, car il existait de nombreux et excellents types de *self-starter*, qu'il n'y a eu qu'à adapter à leur emploi avec des gaz plus pauvres.

Les moteurs à gaz se sont donc prêtés fort bien au nouveau service qu'on leur imposait, et ils ont fait preuve dans l'espèce d'une remarquable endurance. Ils ont du reste démontré tout de suite aux plus incrédules les avantages qu'ils pouvaient procurer.

Sur l'initiative de M. Thwaite, assisté de M. Gardner, de l'Institut du fer de Londres,

des installations ont d'abord été faites à Frondingham, près de Doncaster, et à Wishaw, dans le voisinage de Glasgow, installations modestes, il est vrai, puisqu'il ne s'agissait que de moteurs de 12 chevaux, mais auxquelles nous attachons une grande importance, car elles ont suffi pour faire la preuve qui manquait de la possibilité d'une marche continue. De simples laveurs-épurateurs furent placés sur le chemin des gaz (1).

Aux usines de Wishaw, le succès ne fut pas moindre ; des scrubbers à coke et des filtres secs arrêtèrent suffisamment bien les poussières. On utilisa un moteur Otto et un Acmé, de 300 millimètres de diamètre de cylindre et 0^m,50 de course de piston.

Ce moteur actionnait une dynamo Elwell-Parker, et il suffisait pour 10 arcs de 2.000 bougies, 72 lampes de 16 bougies, 11 de 32 et une de 50.

En faisant un essai, alors que le moteur développait seulement 16,65 chevaux électriques, on observa qu'il consommait 3.205 litres par cheval-heure produit.

La marche du moteur était si parfaite qu'on put fournir de la lumière aux rues avoisinant l'usine ; aujourd'hui l'établissement s'éclaire entièrement par l'installation des moteurs et des dynamos que nous venons de décrire.

M. Galbraith, directeur des hauts fourneaux de Wishaw, estime que la production du cheval-heure électrique correspond à une consommation de 571 grammes de houille dans le haut fourneau.

A Seraing, sur l'initiative de M. Bailly et de M. Kraft, ingénieurs aux ateliers de construction de la Société Cockerill, et avec le concours de Delamare-Deboutteville, un premier brevet a été pris à la date du 15 mai 1895 : on installa la même année un moteur Simplex de 4 chevaux, de 194 millimètres de diamètre et 0^m,350 de course, faisant 200 tours à la minute. Il fut mis en route le 20 décembre 1895, et fonctionna dix-huit mois, en actionnant quelques machines-outils et en fournissant un travail journalier de 16 heures en moyenne (2). La pratique montra là aussi l'avantage qui ressortait d'une forte compression préalable ; des modifications heureuses permirent d'ailleurs de doubler la puissance de la machine. Dans ces conditions, la marche du Simplex a été excellente, et sa régularité a été remarquable, malgré les variations de pression qui se produisent dans la conduite suivant les conditions du travail des fourneaux, et qui vont de 0 à 80 millimètres d'eau. Le moteur a marché un jour sous une dépression de 200 millimètres résultant du calage accidentel du compteur.

On estima la consommation de ce petit moteur à 5.300 litres par cheval-heure effectif ; il fallait d'autre part 1.400 litres d'eau pour le lavage des gaz. Mais on parvint rapidement à diminuer ces consommations. M. Greiner se décida donc à demander à Delamare-Deboutteville les plans d'un moteur de 150 chevaux. Les dessins furent terminés dans les premiers mois de l'année 1897, et l'exécution fut poussée activement : le 11 avril 1898, le moteur tournait et actionnait un compresseur d'air François.

Ce moteur avait 800 millimètres de diamètre, 1 mètre de course et il tournait à la

1. La *Revue de Mécanique* a donné la description complète des appareils Thwaito, tome I, page 669 ; 1897.

2. « De l'emploi des gaz de hauts fourneaux comme moteurs ». Communication faite par M. Greiner, directeur général de la Société Cockerill à l'*Iron and Steel Institute*, en mai 1898.

vitesse de 100 tours par minute ; le volant avait 4 mètres de diamètre et il pesait 15 tonnes ; l'arbre était connecté directement avec celui du compresseur.

Ce moteur a développé 181^{chx},82 en consommant 3.329 litres de gaz ayant un pouvoir moyen de 981 calories ; tel est le résultat des essais de 24 heures que j'ai faits sur cette machine à la date des 19 et 20 juillet 1898. Le rendement thermique net, rapporté au travail effectif disponible sur l'arbre du moteur, était très voisin de 20 0/0 (1) ; le rendement organique a été trouvé égal à 0,85. La régularité du fonctionnement a été remarquable, ainsi qu'en a témoigné la courbe relevée sur le cinémographe enregistreur. J'ai résumé alors dans les conclusions suivantes le résultat qui se dégageait de ces essais de 24 heures. « En somme, la société Cockerill possède un moteur de 200 chevaux qui lui donne le cheval-heure effectif par 3 mètres cubes et demi environ de gaz de ses hauts fourneaux, en consommant par heure et par cheval près de 100 litres d'eau et moins de 18 grammes d'huile et de graisse ; sa marche est aussi régulière que celle d'une machine à vapeur, et les poussières du gaz ne nuisent en rien à son fonctionnement. » Ce jugement a été confirmé par la suite : le même moteur marche, en effet, depuis cinq ans sans arrêt, en actionnant dans les meilleures conditions une génératrice appliquée à un transport d'énergie ; cette épreuve vaut mieux encore qu'un essai de vingt-quatre heures.

Ce premier succès a fait concevoir le projet du moteur de 600 chevaux, qui a été exposé à Paris en 1900 et qui a excité une si grande admiration.

D'autres constructeurs s'engageaient dans la même voie et on installait de toutes parts des moteurs.

A Differdange, j'ai expérimenté sur un moteur Otto, construit par la *Berlin-Anhalt'schen Maschinenbau Actien Gesellschaft*, dont le cylindre avait 431 millimètres de diamètre, 0^m,700 de course, et qui a développé 64^{ch},45 par 160,6 tours à la minute ; or, il a consommé 2.825 litres de gaz par cheval-heure effectif (le volume étant réduit à 0° et 760 millimètres) pour un pouvoir du gaz de 1.046 calories par mètre cube.

M. le professeur Meyer, ayant répété ces essais sur le même moteur, a observé une consommation moyenne de 2.740 à 2.810 litres pour un travail compris entre 64 et 67 chevaux effectifs. Mes résultats se sont donc trouvés absolument d'accord avec ceux de mon savant et distingué collègue. Dans les deux essais, le travail effectif a été déterminé indirectement en le déduisant du travail électrique mesuré au tableau d'une génératrice Schuckert, dont a estimé approximativement le rendement à 87 0/0 : mes expériences ont fait ressortir la consommation par kilowatt-heure à environ 4.400 litres, et ce chiffre est à retenir, car il se créera autour des hauts-fourneaux de nombreuses stations centrales d'électricité. M. Meyer a évalué comme suit la répartition des calories fournies au même moteur :

Travail indiqué.	30,2 p. 100
Chaleur emportée par l'eau de réfrigération	24,3 —
— par les gaz de la décharge.	45,5 —

1. Les résultats de cet essai ont été publiés dans le numéro d'août 1898 de la *Revue Universelle des Mines*, t. XLIII, 3^e série, p. 143.

Le rendement thermique indiqué aurait donc été égal à 30,2 pour cent.

Mais M. Meyer avait adopté le pouvoir assigné au gaz par le calorimètre Junkers lequel avait été plus faible, comme toujours, que celui que j'ai cru devoir lui attribuer à la suite de mes expériences de laboratoire faites à l'aide de ma bombe ; je trouve d'ailleurs préférable d'estimer le rendement thermique en travail effectif plutôt qu'en travail indiqué. Or, 2.825 litres de gaz à 1.046 calories équivalent à 2.955 calories par cheval-heure effectif, d'où un rendement thermique effectif de 21,5 0/0 ; ce résultat est très intéressant à relever, parce qu'il permet d'apprécier les services que peuvent rendre de petits moteurs à gaz, quand on les alimente de gaz de hauts fourneaux. Notons, du reste, que ce moteur ne présentait aucun dispositif particulier, si ce n'est un agrandissement de section des soupapes ; il a pu marcher avec du gaz qui n'avait subi aucune épuration spéciale.

A Hørde, en Westphalie, on a aussi débuté par un petit moteur, puis on a construit deux moteurs von Echelhaeuser de 300 chevaux, de 480 millimètres de diamètre, 0^m,800 de course, 135 tours, à double piston dont on a formé un moteur de 600 chevaux qui a consommé 3.170 litres de gaz à 961 calories (pouvoir inférieur).

Le succès couronnait donc partout les tentatives les plus audacieuses.

Il est vrai de dire qu'on se fit illusion quelque temps sur l'innocuité des poussières, qu'on arrêtait souvent par les procédés les plus sommaires, et dont on ne pouvait quelquefois se débarrasser à aucun prix.

On avait créé de nombreux appareils d'épuration dès 1896 ; les épurateurs Thwaite et Gardner, ceux des fils de Ch. Munier de M. Lencachez, etc., donnèrent en plusieurs points d'excellents résultats, et conduisirent ailleurs à des mécomptes. L'appareil Theissen, sorte de ventilateur à chicanes, fut un premier progrès : mais il ne fouettait pas encore assez vigoureusement les gaz dans l'eau. L'expérience a démontré en effet que tous les appareils à rupture de courant au contact de nappes d'eau ne sont pas efficaces, si les poussières ne sont pas mouillées : c'est la condition *sine qua non* du succès. La poussière n'est fixée, que lorsqu'elle a été imprégnée d'eau ; or, le meilleur moyen à employer pour obtenir ce résultat consiste à recourir à un ventilateur à grande vitesse, à injection d'eau. L'eau entre par les ouïes, avec les gaz et elle est projetée avec les poussières contre les parois du tambour, où elle forme une boue, qui s'écoule par un siphon. Le procédé est simple et très efficace. De nombreux inventeurs en réclament la priorité ; (1) nous ne nous prononcerons pas sur leurs titres, et demanderons seulement qu'on n'oublie pas l'intervention d'un hasard heureux, qu'il a fallu connaître, interpréter et apprécier avec promptitude. Les ventilateurs donnent à Differdange au plus 2 décigrammes de poussière par mètre cube ;

(1) Otto Braun de Berlin avait déjà fait breveter en 1875 un appareil de purification des gaz dans lequel il superposait l'action de l'eau à celle de la force centrifuge pour fixer les poussières sous forme de boues. Frantz Windhausen a aussi proposé un appareil de ce genre en 1884. Un Écossais du nom de James Patterson est revenu ensuite franchement au ventilateur à injection d'eau, et son brevet américain porte la date du 1^{er} décembre 1896 : la spécification est intitulée *Apparatus for treating fire-gases*. James Woolford de Londres s'est enfin couvert par un brevet, en 1898, pour un procédé analogue servant à extraire les poussières de métaux précieux par l'emploi des ventilateurs mouillés.

même résultat à Dudelange, où le ventilateur absorbe 8 à 10 chevaux pour un moteur à quatre cylindres de 1.400 chevaux ; à Micheville, le ventilateur a supplanté des filtres qui ne donnaient pas satisfaction.

Aujourd'hui la difficulté née des poussières paraît surmontée. En accélérant la marche des appareils Theissen, on peut en obtenir d'aussi bons résultats qu'avec les ventilateurs.

A Duisbourg-Hochfeld, la maison Kœrting de Hanovre a installé un de ses éjecteurs pour brasser les poussières dans l'eau et elle traite ainsi avec succès des gaz qui entraînent jusqu'à 20 grammes de poussières par mètre cube ; à l'entrée des moteurs il n'y a plus que quelques centigrammes par mètre cube, grâce à l'intervention finale de filtres à sciure de bois.

L'utilisation directe des gaz de hauts fourneaux constitue un grand progrès sur l'emploi des gaz sous les chaudières.

En estimant à 3 mètres cubes environ la consommation d'un moteur par cheval-heure effectif, on voit qu'un haut fourneau de 100 tonnes, qui envoyait généralement 8.000 mètres cubes de gaz par heure à ses chaudières, aura une disponibilité de plus de 2.600 chevaux effectifs quand il utilisera directement ses gaz par des moteurs ; en comptant que le service du vent et des accessoires du fourneau absorbe 600 chevaux, il restera 2.000 chevaux pour les industries annexes.

La conclusion était immédiate et elle s'imposait : il fallait, sans tarder, remplacer par des moteurs à gaz les machines à vapeur de tout genre qui actionnaient les machines soufflantes et les autres mécanismes installés auprès des hauts fourneaux.

C'est la Société Cockerill qui a été le plus hardiment de l'avant et le chiffre de commandes qu'elle a rapidement inscrit sur son carnet en témoigne éloquemment.

Ne pouvant suffire à ses commandes, M. Greiner a cédé des licences de construction aux Ateliers du Creusot et à la maison Cail pour la France ; à la Société alsacienne de Constructions mécaniques, et à la *Mærkische Maschinenbau Anstalt*, dont le siège est à Wetter sur la Ruhr, pour l'Allemagne ; à la Société Breitfeld Danek, de Prague, pour l'Autriche ; à MM. Richardson-Westgarth et C^o à Middlesborough, pour l'Angleterre. Plus de 45.000 chevaux effectifs ont été commandés jusqu'ici à la Société Cockerill et à ses concessionnaires en 78 moteurs de 200 à 1.200 chevaux.

M. Von Echelhaeuser, dont le moteur de 600 chevaux fonctionne à Hörde depuis le 12 mai 1898, n'est pas resté en arrière.

Les nombreuses commandes qu'il a reçues seront exécutées par la *Deutsche Kraftgas-Gesellschaft* de Berlin, formée par le groupement de la maison Siemens et Halske et de l'*Union Electricitaets Gesellschaft (Løwe)* et par les ateliers Borsig et de Bayenthal. D'après les renseignements qui m'ont été fournis, on a mis en service un moteur de 500 chevaux connecté directement avec une machine soufflante, débitant 500 mètres cubes d'air à l'heure sous une demi-atmosphère de pression, et six machines jumelles de 1.000 chevaux destinées à un transport d'énergie sous 1.000

volts entre un haut fourneau et des laminoirs distants de 6 kilomètres. Plus de 20.000 chevaux sont construits ou bien commandés (1).

La compagnie allemande des moteurs Otto à Deutz et la compagnie française des Moteurs à gaz et des constructions mécaniques à Paris ont aussi construit un grand nombre de moteurs à gaz pour les hauts fourneaux et elles ont actuellement près de 12.000 chevaux en service et le double en commande.

Le moteur Kœrting à deux temps, entré tardivement dans cette voie, regagne le temps perdu : il existe déjà des machines de 1.000 chevaux de ce type, et on nous a dit qu'en outre de 22.000 chevaux destinés aux fourneaux d'Europe une commande de 42.000 chevaux a été faite par les métallurgistes américains.

Les moteurs Crossley, Letombe, Premier, Stockport, Soëst, Nurremberg, etc., se sont aussi installés au pied des hauts fourneaux et ils ne donnent pas de moindres résultats que leurs devanciers.

En somme, l'utilisation des gaz de hauts fourneaux ouvre aux moteurs à gaz une nouvelle et très brillante voie, dans laquelle ils auront l'occasion de démontrer la supériorité de leur rendement thermique, dont personne ne pouvait plus douter, et leurs qualités dynamiques et cinématiques, dont la preuve n'avait pas sans doute été faite assez victorieusement pour échapper aux critiques de leurs détracteurs.

1. Les ateliers belges de Haine-Saint-Pierre sont aussi concessionnaires des brevets Von Oechelhaeuser.

CHAPITRE CINQUIÈME

THÉORIE GÉNÉRIQUE DES MOTEURS A GAZ

Hirn a démontré la nécessité qu'il y a de distinguer entre la théorie *générique* et la théorie *expérimentale* des moteurs (1) : la première, entièrement basée sur des considérations empruntées à la thermodynamique, doit précéder la seconde ; mais, si elle éclaire d'un grand jour l'étude des phénomènes de conversion de la chaleur en travail, si, d'autre part, elle se prête fort bien à la comparaison des divers cycles théoriques, elle ne saurait suffire à l'analyse exacte du fonctionnement réel des moteurs, parce qu'elle ne tient aucun compte des échanges de chaleur entre les gaz et les parois, non plus que de toutes les actions physiques et chimiques se succédant dans les diverses périodes du cycle, qui ne peuvent être exprimées dans les équations générales du rendement.

Elle repose d'ailleurs sur un grand nombre de fictions, qui ne constituent que des approximations grossières ou des hypothèses plus ou moins justifiées ; aussi les formules auxquelles elle conduit n'ont-elles d'intérêt que pour la discussion de la valeur relative des divers types de moteurs.

Quelques auteurs ont essayé de serrer la vérité de plus près en supprimant certaines de ces fictions ; mais ils ont subi la nécessité d'en conserver d'autres et les résultats obtenus n'ont pas toujours correspondu à l'effort qu'ils avaient coûté ; la complication des calculs, auxquels on est alors conduit, constitue d'ailleurs un obstacle à la diffusion et à la vulgarisation de la théorie.

Nous ne les suivrons pas dans cette voie ingrate et, restant fidèle à la méthode que nous avons adoptée dans nos premiers travaux sur les moteurs, nous demanderons seulement à la théorie générique de nous donner des formules simples, permettant de mettre en parallèle les divers cycles adoptés et de faire ressortir les avantages de certaines manières de faire. Nous estimons qu'on ne peut espérer davantage de ce genre de théorie.

1. L'illustre maître s'exprime en ces termes dans son *Exposition de la Théorie Mécanique de la Chaleur*, t. II, page 46, 3^e édition, 1875 :

« J'ai appelé théorie générique celle qu'on édifie en quelque sorte en dehors d'un moteur, c'est-à-dire sans tenir compte des propriétés physiques des pièces de l'organisme et de leur action sur le corps qui, soumis à la chaleur, donne le travail... Chacun sent à première vue qu'une pareille théorie ne saurait répondre à la vérité absolue. » C'est pourquoi Hirn s'attacha à faire prévaloir sur les anciennes théories, admises parce qu'elles reposaient sur certains calculs, celles qu'il croyait devoir développer et défendre comme vraies, parce qu'elles ressortaient d'expériences indiscutables : il fut amené ainsi à mettre en lumière l'action des parois, qui est prépondérante dans la machine à vapeur et dans le moteur à gaz, et dont la considération s'impose à toute étude rationnelle de ces machines.

I

Définition des quatre types théoriques.

Notre premier soin doit être de définir plus rigoureusement que nous ne l'avons fait jusqu'ici les cycles des quatre types de moteurs à gaz avant d'aborder leur étude.

Cette définition, qui a pour unique objet de permettre de classer les types principaux et de les comparer entre eux, est essentiellement théorique, nous allons dire schématique.

Dans les machines à explosion, sans compression, le piston aspire le mélange tonnant sous la pression constante de l'atmosphère : la communication étant interceptée avec l'extérieur, le gaz est enflammé et il détone. Nous admettrons que cette explosion est instantanée, et qu'elle s'effectue à volume constant : c'est une hypothèse, attendu que les mélanges tonnants formés de gaz d'éclairage et d'air ne produisent jamais d'onde explosive ; nous accepterons néanmoins cette donnée dans notre étude comparative des divers types, afin de pouvoir les soumettre au calcul. Supposons que les gaz de la combustion se détendent ensuite suivant une adiabatique, en produisant du travail, et qu'ils sont enfin refroidis sous pression constante, avant d'être rejetés dans l'atmosphère durant la période de retour du piston.

La série des transformations physiques, subies par le fluide, est représentée par le diagramme ABCDA de la figure 66 ; la détente a été supposée complète, et l'adiabatique ramène le gaz de la pression explosive P à la pression H de l'atmosphère. Nous appellerons T la température explosive, t' celle des produits de la combustion à fin de course, en D, et t la température ambiante, qui est aussi la température initiale du mélange. Il est évident que t' est plus grand que t . Qu'il soit entendu enfin, une fois pour toutes, que toutes les températures T, t et t' seront exprimées en valeur absolue, sauf indication contraire.

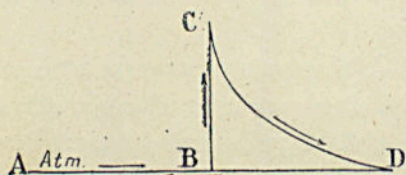


Fig. 66.

Dans le second type, avec compression préalable à l'explosion, le mélange est aspiré par une pompe auxiliaire, ou par le piston moteur lui-même, sous la pression constante de l'atmosphère ; puis il est comprimé, suivant une adiabatique, dans un réservoir intermédiaire ou dans le cylindre de travail même. L'inflammation ayant eu lieu, le gaz s'échauffe instantanément, nous le supposons encore, sous volume constant, et la pression atteint son maximum P : le piston est refoulé comme précédemment, en produisant du travail, et, après détente complète, les gaz sont refroidis et expulsés sous pression constante.

Le chemin parcouru est le suivant : ACDE — EDFBA (fig. 67). Pour se rendre compte de la portion DED, il faut concevoir que le piston du cylindre moteur commence son

mouvement de progression au moment où le piston de la pompe de compression est arrivé en D ; ED et DE sont donc deux chemins parcourus par les deux pistons, si nous admettons qu'il y ait un cylindre de compression distinct du cylindre moteur. Dans ce cas, nous superposerions donc deux diagrammes : ACDE serait le diagramme de compression, EDFBA, le diagramme moteur. Mais on peut effectuer la compression dans le cylindre même de travail, et c'est ce qui a été fait dans la plupart des moteurs : un espace nuisible considérable, égal en volume aux $\frac{4}{10}$ du volume total du cylindre, tient lieu dans ces machines de réservoir intermédiaire. Cette simplification d'organe a pour effet de ne permettre qu'une explosion par deux tours de manivelle ; mais le cycle n'est point modifié essentiellement ; le diagramme lui-même reste le même, sauf les deux lignes DE et ED qui disparaissent.

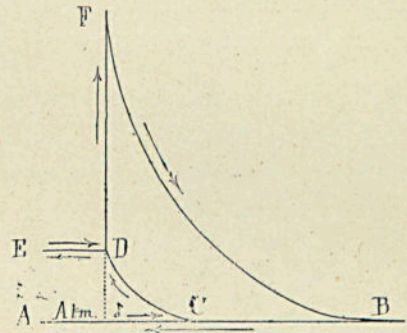


Fig. 67.

Nous tenons à faire observer expressément, que nous considérons ici une course de compression moindre que la course de détente et que d'autre part nous opérons une détente complète jusqu'à la pression de l'atmosphère (*).

Le cycle des moteurs à combustion ne diffère du précédent que par la manière dont s'effectue l'échauffement du gaz : au lieu d'opérer à volume constant, Siemens, Brayton, Simon et Gardie conservent la pression constante. Le mélange combustible passe sur un brûleur, au contact duquel il s'enflamme progressivement ; à une explosion se trouve donc substituée une combustion graduelle et continue. Le cycle se complète comme ci-dessus ; son diagramme, représenté par la figure 68, est ACDE — EFBA ; DF est parallèle à l'axe des volumes. Mêmes remarques que ci-dessus pour la portion ED, décrite simultanément par les deux pistons de travail et de compression.

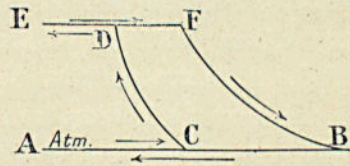


Fig. 68.

Nous appellerons encore l'attention sur ce que les courbes de compression et de détente sont des adiabatiques qui vont, la première de la pression atmosphérique à la pression de compression et la seconde de la pression de compression à la pression atmosphérique, celle-ci fournissant donc une détente parfaite.

Les machines atmosphériques sont appelées ainsi, parce que le travail moteur est effectué par la pression de l'atmosphère. Le cycle de ces machines peut être rapproché de celui du premier type ; le mélange tonnant étant introduit dans le cylindre, sous la pression de l'atmosphère, fait explosion en développant une pression considérable ; le piston, qui est libre dans son ascension, est vivement refoulé et, en vertu de sa

4. C'est ainsi que nous avons posé la question dans nos « Études sur les moteurs à gaz tonnant », en 1883 ; nous n'avons aucune raison d'abandonner cette manière de traiter le problème.

vitesse acquise, il détend adiabatiquement les produits de la combustion jusqu'à une pression moindre que la pression initiale. Leur force élastique diminue encore par refroidissement, suivant DE, sous pression constante, au contact du réfrigérant. Puis la pression atmosphérique, agissant sur la face supérieure du piston, le ramène en arrière, en développant un travail utilisable, et en comprimant les gaz suivant l'adi-

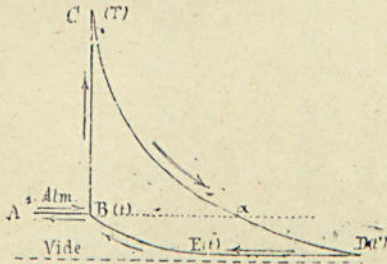


Fig. 69.

batique ED 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 dans sa marche rétrograde ; dans le diagramme de la figure 69, c'est donc la partie EB qui est motrice ; AB correspond à l'aspiration du mélange tonnant.

Au lieu du diagramme ABCDEBA, on pourrait considérer ABCDBA ; c'est le précédent, dans lequel le refroidissement DE est supprimé. Alors DB serait une ligne isothermique. Nous étudierons ces deux formes du cycle des moteurs du quatrième groupé.

Les cycles que nous venons de décrire reproduisent bien la suite des opérations qui s'effectuent périodiquement dans le cylindre des moteurs à gaz tonnant : répétons toutefois que les contours figurés ci-dessus sont théoriques et fictifs dans leur correction et leur régularité. Ainsi nous avons tracé des courbes adiabatiques, alors même que nous avons démontré plus haut qu'elles sont irréalisables ; nous avons admis que les gaz cédaient leur calorique au réfrigérant sous pression constante, ce qui suppose aux parois une conductibilité qu'elles ne possèdent pas ; enfin, nous avons représenté par des parallèles aux axes des pressions les lignes qui correspondent à l'explosion, comme si l'explosion était instantanée. Tout en nous efforçant de serrer de très près la réalité des faits, nous n'avons donc tracé que des cycles théoriques. Les cycles réels des moteurs présenteront évidemment pas rapport à nos cycles hypothétiques des imperfections dont nous devons évaluer l'importance ; nos coefficients économiques théoriques n'auront donc qu'une valeur relative, et les résultats de nos calculs ne devront être admis que comme des éléments de comparaison des divers types de moteurs entre eux. Mais du moins le parallèle que nous établirons de la sorte sera-t-il d'une grande utilité pratique.

On a le droit de se demander si la série des transformations subies par le mélange tonnant constitue un cycle fermé, alors que ce mélange éprouve dans le cours de l'opération une modification profonde dans sa composition chimique. En effet, dira-t-on, après avoir admis dans le cylindre de l'hydrogène, de l'oxyde de carbone, des carbures divers et de l'air, vous restituez à l'atmosphère de l'acide carbonique et de la vapeur d'eau presque entièrement condensée ; comment pouvez-vous dire que l'état final soit identique à l'état initial, et que, par suite, il y ait là un cycle et un cycle fermé ?

Ce n'est évidemment qu'une approximation ; si l'on veut s'en tenir à la rigueur stricte du concept d'un cycle fermé, nous déclarons que ce cycle n'existe pas dans

l'espèce ; c'est le cas, indiqué plus haut, d'une courbe fermée qui ne correspond pas à un retour complet à l'état initial ; le cycle ne se ferme que sur le papier.

Mais cette approximation est suffisante pour que nous nous en contentions.

Et d'abord, elle peut se défendre ; en effet, nous avons déjà dit que la masse des gaz est la même du début des opérations jusqu'à la fin (1) ; si l'on admettait l'exactitude de la loi de Wœstynne (2) la quantité de chaleur serait indépendante de la variation chimique qui intervient au cours de l'opération, lors de la combustion du mélange tonnant, et cette variation dans l'arrangement moléculaire des éléments n'influerait pas sensiblement sur les phénomènes physiques qui sont représentés par les équations. Il y a une condensation, c'est vrai, résultant des combinaisons nouvelles qui correspondent à la combustion, mais elle est faible puisqu'elle n'atteint pas $\frac{5}{100}$ du volume primitif, dans les cas les plus déforables à notre manière de voir. D'ailleurs, on doit admettre que son influence s'exerce de même dans les divers types de moteurs ; le travail de comparaison que nous entreprenons peut donc être fait par la considération des cycles, alors même qu'elle n'est qu'approximative.

Mais voici un autre argument. Peut-on se targuer d'une rigueur mathématique dans des calculs qui reposent sur un grand nombre de fictions et d'hypothèses telles que la constance des chaleurs spécifiques, l'adiabaticité des compressions et des détente, la constance de γ des courbes $p\gamma$, la réalité des transformations à volume constant et à pression constante, et qui ne tiennent aucun compte de l'action si énergique des parois ? Il est évident que non (3). La rigueur affectée par quelques auteurs est donc spécieuse.

Si l'on désire absolument éviter l'objection fondée sur la nature des opérations dont la suite ne constitue pas rigoureusement un cycle, on peut se borner à considérer les phases de compression et de détente et leur appliquer le principe de l'équivalence, en écrivant que le travail effectué entre deux états a et b est égal à $J(U_a - U_b)$, U_a et U_b étant les chaleurs internes correspondantes aux deux états. Mais cette manière de faire est beaucoup moins facile à suivre. D'ailleurs, lorsqu'il n'y a

1. Cette proposition est rigoureuse : la masse des gaz qui parcourent le cycle se compose de celle des gaz brûlés, confinés dans les espaces morts, à laquelle s'ajoute une certaine quantité de mélange tonnant, puisé dans les conduites de gaz et dans l'atmosphère, à la pression et à la température extérieure. Ce sont ces mêmes gaz que le piston expulse du cylindre sous la pression de l'atmosphère, et qui y reprennent la température extérieure. L'atmosphère joue ici le rôle de réfrigérant comme dans les machines à vapeur à échappement libre. Les conduites d'air et de gaz, le cylindre et l'atmosphère constituent le système dans lequel s'effectue la série des opérations qui se répète périodiquement, et forme ce que nous appelons le cycle du moteur.

2. Voici l'énoncé de la loi de Wœstynne : « La quantité de chaleur nécessaire pour élever de un degré la température du poids atomique d'un corps composé, est égale à la somme des quantités de chaleur nécessaires pour élever de un degré la température des atomes du composé ». Cela revient à dire que les corps simples conservent dans leurs combinaisons la chaleur spécifique qu'ils possèdent à l'état libre. Cette loi se vérifie dans un certain nombre de réactions ; mais elle ne constitue en général qu'une approximation.

3. Rappelons à ce propos ce que J. Bertrand disait de l'hypothèse admise par Poncelet, d'une détente de la vapeur saturée s'effectuant suivant la loi de Mariotte : « L'erreur commise est évidente ; elle ne paraît cependant pas l'être beaucoup plus que celle qui résulte des théories dans lesquelles, à des principes beaucoup plus exacts, sont associées des hypothèses aussi éloignées de la vérité que l'imperméabilité des parois du cylindre à la chaleur ». Bertrand, « Thermodynamique », page 264.

pas de malentendu dans la position de la question, on constate que ces calculs, effectués en appliquant strictement le principe de l'équivalence, aboutissent aux mêmes résultats que les nôtres, et ne font ressortir aucun fait nouveau, que nous n'ayons signalé dès le début de nos études. Nous n'avons donc aucune raison de renier la méthode que nous avons adoptée dans nos premières recherches et nous y resterons fidèle. On nous permettra de faire observer que nos formules de 1883 ont suffi pour établir une théorie générique, qui n'a pas été inféconde, et qui a reçu de la sorte une confirmation *a posteriori*, dont nous avons le droit de revendiquer le bénéfice.

Cette théorie a permis une analyse suffisante des opérations qui se suivent dans le cylindre des moteurs; c'est l'objet principal des spéculations de ce genre.

En réalité, ces considérations nous conduisent à assimiler les moteurs à gaz combustibles à des moteurs à air chaud.

Cette mise en parallèle demande à être discutée et approfondie.

Existe-t-il une différence essentielle entre les deux genres de moteurs, qui nous défende de les traiter par des procédés de calcul identiques.

Ce n'est point notre avis, et ce n'était pas celui de Lenoir et de Hirn, qui appelèrent d'abord le moteur à gaz un moteur à *air dilaté*.

La différence qui existe entre un moteur à gaz tonnant et une machine à air chaud est devenue négligeable théoriquement depuis que l'on construit des machines à foyer intérieur, telles que celle de Buckett, de Woodburg, de Brown, etc. Dans ces machines, le charbon est brûlé dans un foyer clos, alimenté d'air sous forte pression par un compresseur; la haute température du foyer élève celle de l'air qui le traverse et le cylindre moteur reçoit donc un mélange d'azote et de gaz brûlés, qui actualisera l'énergie correspondante au calorique qu'il possède en se détendant derrière le piston, jusqu'à la pression atmosphérique. Le fonctionnement des machines à air chaud est par suite le suivant: on comprime préalablement de l'air pur, on élève sa température et, par suite, aussi sa pression en le chauffant par un combustible *solide*, puis on détend les gaz brûlés, de composition complexe dans un cylindre moteur. Le calcul et l'expérience sont d'accord pour démontrer qu'il y a un avantage considérable à travailler avec de l'air possédant une tension aussi considérable que possible. Or, nous retrouvons la suite complète de ces opérations dans les moteurs à gaz; voici en effet quel est le fonctionnement de ces moteurs. On y comprime préalablement de l'air, on élève sa température et, par suite, aussi sa pression en le chauffant, *dans le cylindre même, par un combustible gazeux*, puis on détend les produits de la combustion. Le foyer est transporté au cœur même du cylindre, au lieu d'être disposé à côté de lui; c'est la seule différence; de plus, au lieu d'être solide, le combustible est gazeux, ce qui vaut infiniment mieux. L'échauffement peut avoir lieu aussi bien dans les machines à air chaud proprement dites que dans les moteurs à gaz à volume constant, sous forme explosive, ou bien à pression constante, par simple combustion; dans les deux genres de moteurs la théorie et l'expérience sont d'accord pour démontrer l'avantage des fortes compressions et des longues détentes; le moteur à gaz est donc bien réellement un moteur à air dilaté, c'est-à-dire un moteur à air.

Tous les moteurs à gaz tonnant, à explosion ou à combustion, rentrent par suite dans la catégorie des machines à air chaud et la considération des cycles est aussi légitime pour les uns que pour les autres (1).

Nous n'en ferons d'ailleurs usage que pour comparer les divers types de moteurs dans leur espèce et pour apprécier leur perfection relative par le rapprochement de leurs rendements théoriques.

II

Rendements théoriques comparés des quatre types.

Les cycles théoriques, que nous avons décrits, sont formés uniquement d'adiabatiques et de lignes parallèles aux axes des volumes et des pressions : il est possible par suite de calculer le rendement théorique de chaque groupe.

Les formes de ces cycles se simplifient beaucoup, lorsqu'on néglige les portions d'égale course qui se correspondent dans la période préliminaire d'aspiration et dans les périodes de compression et d'expulsion : ces lignes qui se superposent, parallèlement à l'axe des volumes, sont en quelque sorte étrangères au cycle, attendu que la période de compression ou d'expulsion restitue intégralement le calorique absorbé dans l'aspiration : les deux travaux sont, en effet, équivalents.

Nous n'avons donc qu'à évaluer la chaleur Q empruntée au foyer, c'est-à-dire fournie au gaz par sa combustion, et à en retrancher la chaleur q restituée au réfrigérant (ou jetée dans l'atmosphère dans la réalité pratique), pour calculer ρ , le coefficient de rendement ; nous avons en effet :

$$\rho = \frac{Q - q}{Q}.$$

Les notations que nous emploierons seront identiques pour les quatre types.

Nous appellerons :

t la température initiale du mélange ;

T la température maximum d'explosion ou de combustion ;

θ la température du gaz à la fin de la compression préalable ;

t' la température à la fin de la détente.

Eufin, dans les machines atmosphériques, nous désignerons par t'' la température à laquelle, après la détente, l'on abaisse les gaz avant que l'atmosphère ne vienne les comprimer pour les ramener à leur état initial.

Les températures dont il s'agit sont évidemment exprimées en valeur absolue.

1. Bryan-Donkin a confondu dans un même ouvrage l'étude des moteurs à gaz et à air « Gas, oil and air Engines », et M. Vermand n'a pas voulu s'occuper, dans son ouvrage sur les moteurs, des moteurs à combustion, parce qu'il les considère comme des moteurs à air chaud.

Les pressions seront désignées par des lettres dont l'analogie sera facile à saisir ; ainsi nous écrirons :

P la pression explosive maximum ;

H la pression atmosphérique initiale ;

π la pression de la compression préalable ;

h' et h'' les pressions correspondantes aux températures t' et t'' , dans les machines atmosphériques.

Voici, dès lors, les calculs relatifs aux divers groupes en supposant que nous opérons sur l'unité de poids du mélange tonnant (1).

Machines à explosion, sans compression.

(1^{er} Type.)

Le mélange de gaz, pris à la température de l'air extérieur t , est porté par l'explosion à la température T ; l'opération se fait sous volume constant ; la chaleur dégagée est donc égale à $c (T-t)$, en appelant c la chaleur spécifique moyenne des gaz à volume constant. Cette chaleur doit être considérée comme empruntée au foyer ; c'est donc la chaleur que nous avons appelée, Q et nous avons :

$$Q = c (T-t).$$

Les gaz brûlés se détendent ensuite sans perte ni gain, en fournissant eux-mêmes toute la chaleur transformée en travail le long de l'adiabatique de détente. Nous n'avons donc à inscrire aucun apport de chaleur. Les gaz passent ainsi de la température T à t' .

Cela fait, ils sont refroidis au contact du réfrigérant, de t' à t , sous pression constante ; leur chaleur spécifique est donc C , et il faut leur soustraire une quantité de chaleur $C (t'-t)$; c'est précisément la valeur de q .

Nous avons donc :

$$\rho = \frac{Q-q}{Q} = \frac{c(T-t) - C(t'-t)}{c(T-t)}.$$

On remarquera que c et C sont les chaleurs spécifiques des gaz brûlés : nous admettrons provisoirement que ce sont des valeurs constantes.

En tenant compte de ce que $\frac{C}{c} = \gamma$, on peut écrire :

$$\rho = 1 - \gamma \frac{t'-t}{T-t}.$$

Machines à explosion avec compression

II^e type.

La compression ayant porté la température du mélange à la valeur θ , nous avons d'abord :

$$Q = c (T-\theta).$$

1. Nous avons publié ces calculs pour la première fois dans nos « Études sur les Moteurs à gaz tonnants », en 1883.

Pour la décharge, nous écrirons comme ci-dessus :

$$q = C (t' - t),$$

Il vient donc :

$$\rho = \frac{c (T - \theta) - C (t' - t)}{c C (T - \theta)} = 1 - \gamma \frac{t' - t}{T - \theta}.$$

Machines à combustion avec compression

III^e type.

Le passage de la température θ à T s'opère dans ce cas à pression constante :

$$Q = C (T - \theta),$$

La décharge nous donne encore :

$$q = C (t' - t),$$

D'où :

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

Machines atmosphériques.

IV^e type.

Nous avons d'abord comme pour le premier type :

$$Q = c (T - t),$$

Après détente, les gaz sont encore refroidis de t' à t'' :

$$q = c (t' - t''),$$

$$\rho = 1 - \frac{t' - t''}{T - t}$$

Les coefficients économiques des quatre groupes ont donc les valeurs suivantes :

- | | |
|------|--|
| I | $\rho = 1 - \gamma \frac{t' - t}{T - t},$ |
| II. | $\rho = 1 - \gamma \frac{t' - t}{T - \theta},$ |
| III. | $\rho = 1 - \frac{t' - t}{T - \theta},$ |
| IV. | $\rho = 1 - \frac{t' - t''}{T - t},$ |

Ces formules, qui sont parfaitement symétriques, expriment la valeur théorique des divers types de moteurs à gaz et se prêtent fort bien à leur comparaison :

Mais il faut calculer les valeurs de t' , t et θ dans ces diverses formules.

Premier type.

Les pressions et les températures sont reliées par les formules

$$\frac{P}{H} = \frac{T}{t} \quad \text{et} \quad \frac{T}{t} = \left(\frac{P}{H}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}.$$

Ces équations ont été démontrées ci-dessus sous les numéros 12 et 16 (1); elles donnent :

$$\frac{t'}{t} = \left(\frac{P}{H}\right)^{1 - \frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{P}{H}\right)^{\frac{1}{\gamma}} = \left(\frac{T}{t}\right)^{\frac{1}{\gamma}}$$

Deuxième type.

Nous aurons encore, comme ci-dessus,

$$\frac{\theta}{t} = \left(\frac{\pi}{H}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad \text{et} \quad \frac{T}{\theta} = \frac{P}{\pi}$$

de plus :

$$\frac{t'}{T} = \left(\frac{H}{P}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}.$$

Nous en déduisons :

$$\frac{t' \theta}{t T} = \left(\frac{\pi}{P}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{\theta}{T}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}};$$

d'où :

$$\frac{t'}{t} = \left(\frac{\theta}{T}\right)^{-\frac{1}{\gamma}} = \left(\frac{T}{\theta}\right)^{\frac{1}{\gamma}}.$$

Le degré de compression est caractérisé par la valeur du rapport $\frac{\pi}{H} = \eta$; c'est le rapport des pressions et non pas des volumes.

Appelant V le volume total du cylindre et v celui de la chambre de compression, on a :

$$\eta = \frac{\pi}{H} = \left(\frac{V}{v}\right)^{\gamma} \quad \text{et} \quad \frac{V}{v} = \left(\frac{\pi}{H}\right)^{\frac{1}{\gamma}}$$

Troisième type.

Les températures et les pressions sont encore reliées par les formules suivantes :

$$\frac{\theta}{t} = \left(\frac{\pi}{H}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad \text{et} \quad \frac{t'}{T} = \left(\frac{H}{P}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}},$$

d'où :

$$\frac{\theta}{t} = \frac{T}{t'} \quad \text{et} \quad \frac{t' - t}{t} = \frac{T - \theta}{\theta}.$$

1. Voir pages 68 et 70.

La valeur ρ du coefficient économique peut donc s'écrire :

$$\rho = 1 - \frac{(T - \theta) t}{\theta (T - \theta)} = 1 - \frac{t}{\theta}$$

Le cycle du troisième type est celui de la machine à air de Joule : son coefficient économique présente cette particularité d'être indépendant de T, puisque nous avons trouvé $\rho = 1 - \frac{t}{\theta}$. Le rendement du cycle de Carnot serait égal à $1 - \frac{t}{T}$; si donc on faisait tendre θ vers T, on approcherait de réaliser le rendement maximum par le cycle du troisième type; mais la chaleur prise au foyer deviendrait nulle en même temps, et le travail du moteur serait réduit à zéro.

Le calcul démontre que le travail est maximum lorsque

$$\theta = \sqrt{tT};$$

alors :

$$\theta = t' = \frac{tT}{\theta}$$

Quatrième type.

$$\frac{T}{t} = \frac{P}{H}$$

La détente étant égale à la compression finale, nous avons aussi :

$$\frac{T}{t} = \frac{t}{t''},$$

d'où :

$$\frac{T}{t} = \frac{t'}{t''} \text{ et } \rho = 1 - \frac{t''}{t}$$

Calculons maintenant les rendements des quatre types par ces valeurs de t' , t , θ et T, en faisant usage des données établies précédemment, pour le gaz de ville, pages 107 à 109; nous prions le lecteur de vouloir bien s'y reporter.

Considérons d'abord les moteurs à explosion sans compression. Supposons la température initiale égale à 15° C ou 288° absolus : le mélange tonnant étant formé de 1 volume de gaz avec 10 volumes d'air, la température d'explosion T atteindra 1800° absolus (il ne sera plus question d'autres températures) et P deviendra égal à 6^{atm.},5.

De plus, nous aurons :

$$t' = t \left(\frac{T}{t} \right)^{\frac{1}{\gamma}} = 1182^{\circ} \quad (1)$$

Il vient enfin :

$$\rho = 1 - \gamma \frac{t' - t}{T - t} = 0,23$$

1. J'adopte pour γ la valeur moyenne 1,30 trouvée ci-dessus; nous aurons donc

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

Pour la seconde classe de moteurs à explosion avec compression préalable, nous n'avons qu'à fixer la valeur π de la pression initiale pour que toutes les autres données en découlent immédiatement.

Posons

$$\pi = 3 \text{ atmosphères.}$$

Il vient :

$$\theta = t \left(\frac{\pi}{H} \right)^{0,23} = 371^\circ = 288^\circ + 83^\circ$$

La détonation, qui suit immédiatement la compression, augmente la température du même nombre de degrés, quelle que soit la pression du mélange : nous avons donc $T - \theta = T - t$.

La compression avait élevé θ à 83° ; T est donc égal à $1.800 + 83 = 1.883^\circ$.

Or,

$$t' = t \left(\frac{T}{\theta} \right)^{\frac{1}{\gamma}} = 1007^\circ$$

Et

$$\frac{P}{\pi} = \frac{T}{\theta} = 5,081 ; \text{ d'où } P = 15^{\text{atm}},24,$$

La température t' est moindre que celle que nous avons calculée pour le premier type, parce que la détente est plus longue : c'était prévu du reste.

La valeur de ρ est donc égale à

$$1 - \gamma \frac{t' - t}{T - \theta} = 0,38$$

Voyons ce que devient ce rendement ρ quand la compression augmente.

Nous ferons tour à tour π égal à 5 et 10 atmosphères (1).

$\pi = 5 \text{ atm.}$ $\theta = 417^\circ$ $T = 1800 + 129 = 1929^\circ$ $P = 23^{\text{k}},15$ $t' = 937^\circ$ $\rho = 1 - 1,30 \frac{937 - 288}{1929 - 417}$ $= 0,44$	$\pi = 10 \text{ atm.}$ $\theta = 489^\circ$ $T = 1800 + 201 = 2001^\circ$ $P = 40,96$ $t' = 853^\circ$ $\rho = 1 - 1,30 \frac{853 - 288}{2001 - 489}$ $= 0,52$
---	---

1. Il est intéressant de calculer les valeurs du rapport $\frac{V}{v}$ correspondantes à celles du rapport γ .

On a :

$$\frac{\pi}{H} = \gamma = \left(\frac{V}{v} \right)^\gamma, \text{ d'où } \frac{V}{v} = \gamma^{\frac{1}{\gamma}}$$

Il vient :

$$\begin{array}{l} \gamma = \quad 3 \quad \quad 5 \quad \quad 10 \\ \frac{V}{v} = \quad 2,555 \quad 3,453 \quad 5,890 \end{array}$$

Il ressort de nos calculs que la compression a pour conséquence un accroissement considérable du rendement théorique. Mais les gaz atteignent une pression explosive de plus en plus grande et ils s'échappent, même après détente complète, à une température élevée.

Ces calculs ne s'appliquent qu'à des moteurs, réalisant l'hypothèse que nous avons faite, d'une course de compression moindre que la courbe de détente, rendant donc possible une détente complète : ils ne sauraient convenir à l'étude du moteur Otto, dans lequel la détente est nécessairement incomplète, et dont l'étude ne sera faite qu'ultérieurement.

Par contre, rentrent dans notre groupe et dans le second type les moteurs qu'on a appelés à *dépression*, dont le cycle a été imaginé par Niel; cet habile inventeur coupait l'admission avant que le piston ne fût à bout de course, de telle sorte qu'il se produisait un vide relatif dans le cylindre, jusqu'à ce que le piston revint occuper la même position. A une très courte détente adiabatique succédait ainsi une compression identique, qui remettait les choses en l'état et ne produisait aucun effet sur le rendement du cycle (1). Mais on voit aisément que cet artifice équivalait à une réduction de la course d'aspiration et de compression.

Passons aux moteurs du troisième groupe, à compression préalable.

Nous pouvons conserver la même pression initiale : effectuons, sur cette donnée, les calculs indiqués par nos formules. La valeur de θ sera la même que ci-dessus, mais T sera égal à $1460 + 83 = 1543^{\circ}$. Il reste à calculer t' .

$$t' = t \frac{T}{\theta} = 1196^{\circ}$$

Par suite,

$$\rho = 1 - \frac{t' - t}{T - \theta} = 0,23$$

Ce rendement n'est pas supérieur à celui des moteurs de la première catégorie. Mais hâtons-nous de constater qu'il suffirait d'augmenter la compression préalable pour faire reconquérir aux moteurs de la troisième famille leurs avantages : au contraire, les moteurs du premier groupe ne sont susceptibles d'aucune amélioration théorique. C'est là une supériorité réelle. Faisons, par exemple, π égal à 5 ou 10 atmosphères, nous voyons aussitôt le rendement s'élever. Voici les données qui ressortent de cette nouvelle hypothèse :

$\pi = 5$ atm.	$\pi = 10$ atm.
$\theta = 417^{\circ}$	$\theta = 489$ »
$T = 1587^{\circ}$	$T = 1658^{\circ}$
$t' = 1091^{\circ}$	$t' = 970^{\circ}$
$\rho = 0,31$	$\rho = 0,41$

Mais on pourrait comprimer bien davantage encore, puisque la combustion n'élève

1. Nous ne tenons aucun compte ici de l'action des parois, que la théorie générale ne connaît pas.

pas la tension des gaz; M. Diesel a fait l'hypothèse d'une compression à 250 atmosphères; dans ce cas absolument fictif nous aurions :

$$\theta = t \times (250)^{0.23} = t \times 3,56$$

et

$$\rho = 1 - \frac{t}{\theta} = 1 - \frac{1}{3,56} = 0,719$$

Ne comprimons qu'à 35 atmosphères : on trouverait encore que ρ serait égal à 0,557.

Nous reviendrons longuement sur cette question en faisant la monographie de la remarquable invention de M. Diesel.

Nous nous bornerons à rappeler ici qu'à la limite, quand T est très voisin de θ , le rendement de notre cycle tendra à devenir égal au rendement limite du cycle de Carnot. Observons encore que le rendement est indépendant en valeur absolue de T, qui ne figure pas dans notre formule. Disons enfin que le travail développé croît avec la valeur de T, donc avec la durée de la combustion.

Ces conditions sont éminemment favorables aux applications pratiques du cycle que nous venons de décrire. En effet, nous voyons d'abord que la puissance d'un moteur se règle aisément par la durée de la combustion, de laquelle dépend la quantité de

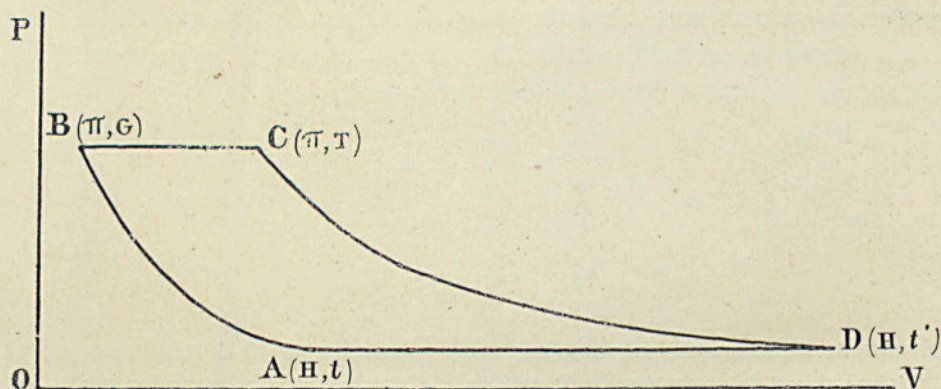


Fig. 70

chaleur cédée dans la phase correspondante; c'est la longueur de la droite BC du diagramme (fig. 70) qui fait le travail. Mais le rendement est indépendant de T; il sera donc le même, quelle que soit la longueur de cette droite BC, à pleine charge ou à demi-charge, propriété précieuse à laquelle les praticiens attachent le plus grand prix. Un tel moteur pourrait avoir d'ailleurs des dimensions relativement exigües, attendu que l'aire du diagramme devient facilement aussi grande que celle du diagramme des moteurs à explosion. La douceur de sa marche serait du reste remarquable, vu que la pression reste constante comme dans les machines à vapeur, durant toute la phase d'admission, sans qu'il se produise ces à-coups formidables, qui rendent si difficile la construction des moteurs à explosion à grande compression. Le cycle théorique de ces machines est enfin exactement réalisable, ainsi que l'a péremptoirement démontré

Gardie, dont le diagramme est identique à celui de la figure 70, et en tout assimilable à celui des meilleures machines à vapeur.

Les considérations que nous venons de développer montrent que notre théorie nous fournit le moyen de mettre en lumière la valeur relative des divers types de moteurs en calculant leur rendement dans des cas déterminés. Mais nous établirons un parallèle entre eux d'une manière plus générale, en déterminant leur rendement générique, c'est-à-dire en établissant le rapport qui existe entre le coefficient économique obtenu ci-dessus et le coefficient du cycle de Carnot pour les mêmes limites de température. Le rendement générique caractérise admirablement un moteur, car il permet de comparer deux cycles alors même qu'ils sont limités par des températures différentes, tels que ceux à explosion et à combustion du deuxième et du troisième type.

Le rendement générique du premier type est égal à

$$\rho_1 = \frac{0,23}{1 - \frac{288}{1802}} = 0,28.$$

Calculant de même celui du second type, nous trouvons, pour ρ_1 , les valeurs 0,45 quand la compression est de 3 atmosphères; 0,51 et 0,60 quand elle atteint 5 et 10 atmosphères. Le coefficient générique du troisième type prend les valeurs 0,28, 0,38 et 0,49 dans ces trois cas. Mais sa valeur croît avec la compression, et elle pourrait même approcher de l'unité, quand le travail tend vers zéro, ainsi que nous l'avons prouvé ci-dessus. C'est un cas limite, qui n'a qu'un intérêt théorique.

Dans les conditions habituelles des moteurs, pour des compressions de 3 à 10 atmosphères, celui qui réalise les conditions théoriques les plus parfaites est le moteur du second type à explosion avec compression préalable; la combustion graduelle qui a lieu dans le troisième le cède manifestement à la détonation instantanée.

Mais les distances se rapprochent entre ces deux types au fur et à mesure que la pression π augmente, et l'on n'est pas si vite arrêté dans cette voie pour les moteurs à combustion que pour les moteurs à explosion, dont la pression explosive P devient très considérable et crée d'énormes difficultés pratiques.

La démonstration théorique de ce double fait avait déjà été donné dans mes *Etudes sur les moteurs à gaz tonnants*.

Mais nous ne nous sommes point encore occupés des machines atmosphériques: elles nous conduiront à des rendements supérieurs aux précédents.

Nous avons trouvé pour ces moteurs une valeur du coefficient économique égale à

$$\rho = 1 - \frac{t' - t''}{T - t} = 1 - \frac{t''}{t}$$

Cette formule est relative au cycle formé de deux adiabatiques et de deux parallèles aux axes des pressions:

Supposons que la température t'' du réfrigérant fût égale à 288°, c'est-à-dire égale à la température du milieu ambiant; le gaz, détendu de T à t' , serait donc refroidi de

t' à t'' , soit à 288° : puis commencerait une compression adiabatique qui ramènerait le gaz à la pression de l'atmosphère en élevant sa température à t , température initiale du cycle. Cette série d'opérations serait possible : elle conduirait à une valeur de ρ égale à 0,50 si nous faisons t égal à 576° . Le cycle de Carnot donnerait $\rho = 1 - \frac{288}{1.802}$ soit 0,85 : le rendement générique des moteurs atmosphériques serait donc égal à 0,58. C'est le plus élevé de tous, attendu qu'il n'exige point de compression.

Telles sont les conclusions de notre étude.

Résumons dans un Tableau synoptique tous les résultats de ces calculs : ce sera une première base pour le parallèle que nous cherchons à établir entre les divers types de moteurs à gaz. Les quatre groupes seront représentés par les chiffres romains correspondants à leur rang ; ρ sera le coefficient propre et ρ_1 le coefficient générique.

	t	π	θ	T	P	t'	ρ	ρ_1
	degrés	atm.	degrés	degrés	atm.	degrés		
I	288	—	—	1800	6,5	1182	0,23	0,28
II	288	3	371	1883	19,5	1007	0,38	0,45
	288	5	417	1929	23,15	937	0,44	0,51
III	288	10	489	2001	40,96	853	0,52	0,60
	288	3	371	1535	3	1191	0,23	0,28
IV	288	5	417	1581	5	1091	0,31	0,38
	288	10	489	1653	10	970	0,41	0,49
	576	--	—	1802	6,5	1182	0,50	0,58

L'excellence des machines atmosphériques ressort tout d'abord de ce Tableau : les moteurs à compression préalable du second type les serrent de près, il est vrai ; les moteurs primitifs à explosion sans compression sont les moins parfaits, et leur abandon est justifié.

A un autre point de vue, non moins général nous constatons la grande influence sur le rendement de la *compression* et de la *détente* ; ce sont les *facteurs principaux* de l'amélioration du rendement des moteurs.

Si la combustion graduelle, sous pression constante, est moins avantageuse spécifiquement que la combustion explosive sous volume constant, elle a par contre l'avantage de se prêter plus facilement aux hautes compressions : les moteurs du troisième type pourraient dès lors, dans certaines conditions, le disputer à ceux du second.

Donnons à ces résultats une forme plus concrète encore en déterminant les consommations de gaz correspondantes à ces diverses conditions de marche de nos quatre types de moteurs : prenons un gaz de ville moyen, à 5.250 calories par mètre cube à 0° et 760 millimètres, et évaluons la dépense par 270.000 kilogrammètres développés sur le piston.

Consommations théoriques

	Compression.	Consommation en litres.
Premier type	Nulle	526
Second type	{ 3 atmosphères	318
	{ 5 —	275
	{ 10 —	232
Troisième type	{ 3 atmosphères	526
	{ 5 —	390
	{ 10 —	295
Quatrième type.	{ 35 —	217
	Nulle.	242

III

Etude du Cycle Beau de Rochas-Otto à détente incomplète.

Le cycle, imaginé par Beau de Rochas, et appliqué par Otto, ne réalise pas notre concept du second type, attendu que la course de compression est égale à la course de détente, d'où il résulte que cette détente est nécessairement incomplète : le cycle Otto est donc inférieur à notre type.

Le diagramme du cycle Otto diffère par suite essentiellement de celui que nous avons étudié plus haut ; il est représenté sur la figure 71.

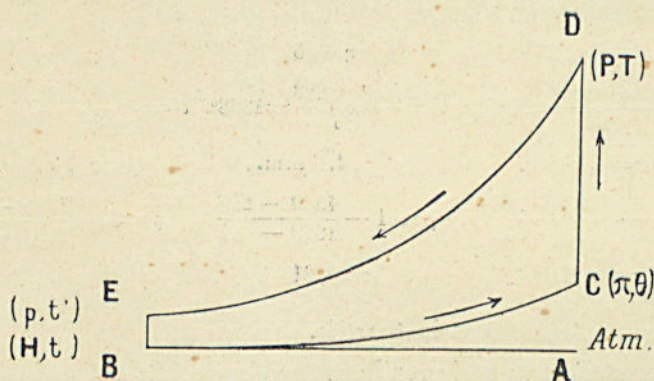


Fig. 71.

La compression et la détente s'effectuent dans un seul cylindre ; le mélange tonnant est d'abord aspiré à la pression atmosphérique H, suivant AB, puis comprimé adiabatiquement de B en C, de la pression atmosphérique à la pression π . L'explosion qui a lieu à volume constant, porte la pression de π à P et la température de θ à T.

La détente adiabatique suit immédiatement l'explosion, que nous supposons instantanée ; elle ramène les gaz brûlés de la pression P à p, de sa température T à t'' et elle s'arrête en E ; pour fermer la série d'opérations, il faut ensuite refroidir les gaz de t'' à t, sous volume constant.

Les gaz sont enfin expulsés du cylindre et renvoyés dans l'atmosphère.

Nous avons donc :

$$\begin{aligned} Q &= c (T - \theta) \\ q &= c (t'' - t) \\ \rho &= \frac{c (T - \theta) - c (t'' - t)}{c (T - \theta)} = 1 - \frac{t'' - t}{T - \theta} \end{aligned}$$

La formule n'est donc plus celle que nous avons trouvée pour le deuxième type.

Calculons les valeurs de ρ sur les mêmes données que ci-dessus, en faisant varier le rapport de compression η , que nous prendrons successivement égal à 3, à 5 et à 10.

Rappelons d'abord que nous avons, en appelant v le volume de la chambre de compression et V celui du cylindre :

$$\begin{aligned} \frac{\pi}{H} &= \left(\frac{V}{v}\right)^\gamma = \frac{P}{p} \\ \theta &= \left(\frac{\pi}{H}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{P}{p}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \frac{T}{t''}; \end{aligned}$$

D'où :

$$t'' = \frac{T}{\theta} t.$$

Tous calculs faits il vient :

$\eta = 3$	$\eta = 5$	$\eta = 10$
$t'' = \frac{1883 \times 288}{371} = 1463^\circ$	$t'' = \frac{1929 \times 288}{417} = 1333^\circ$	$t'' = \frac{2001 \times 288}{489} = 1180^\circ$
$p = 6,5 \text{ atm.}$	$p = 4,6 \text{ atm.}$	$p = 4,1 \text{ atm.}$
$\rho = 1 - \frac{1463 - 288}{1883 - 371}$	$\rho = 1 - \frac{1339 - 288}{1929 - 417}$	$\rho = 1 - \frac{1180 - 288}{2001 - 489}$
$= 0,23$	$= 0,31$	$= 0,412$

Ces chiffres sont extrêmement instructifs.

Et d'abord, ils montrent que le rendement du cycle Otto est moins élevé que celui du cycle que nous avons pris comme type des moteurs à explosion et compression ; c'était à prévoir.

Pour une compression à 3 kilogrammes, la différence est grande, puisque le rendement tombe de 0,45 à 0,23.

L'écart diminue et il est presque comblé à 10 kilogrammes (1) : l'augmentation de compression est donc doublement utile pour les moteurs du genre Otto, puisque non seulement elle améliore leur rendement, mais encore parce qu'elle tend à les mettre de pair avec les meilleurs moteurs du type.

1. Voir le tableau de la page 290

Nous avons rapproché dans la figure 72 les trois diagrammes correspondants aux compressions à 3, à 5 et 10 atmosphères: leur forme est différente. La pression finale p quoique toujours grande, diminue néanmoins à mesure que la compression augmente

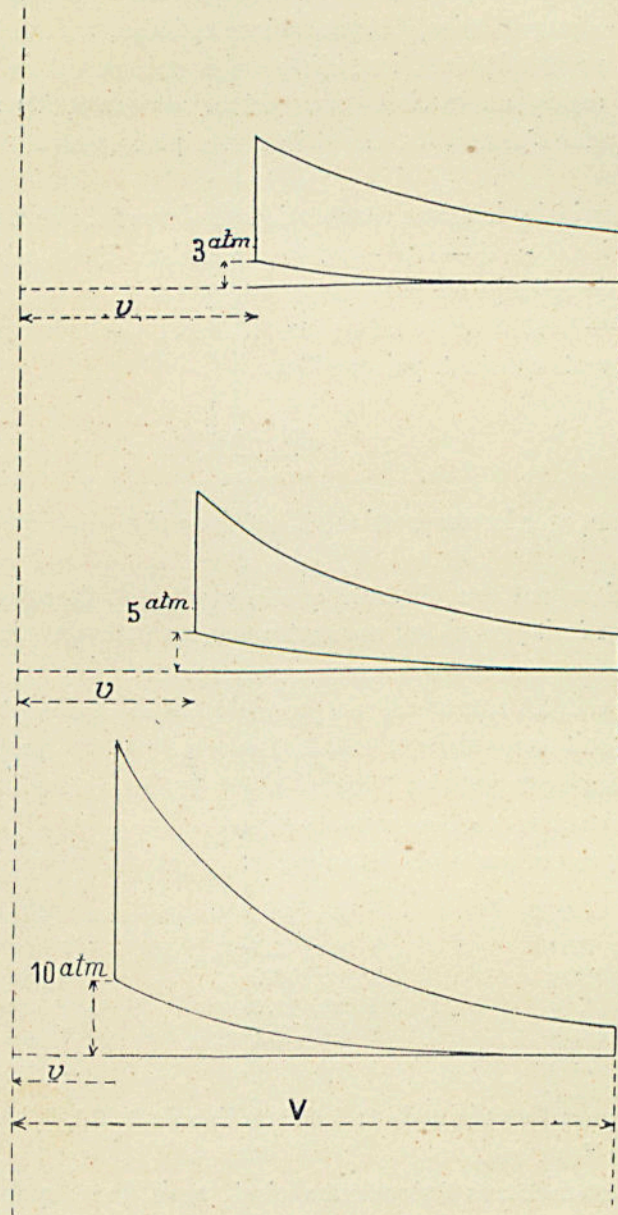


Fig. 72.

et, en même temps, la température t'' baisse, de sorte que les gaz s'échappent du cylindre à une température moindre. C'est la cause principale de l'amélioration du rendement.

L'examen de ces diagrammes nous fournit la solution d'un problème, qui a long-

temps excité la curiosité des ingénieurs : la pratique avait démontré qu'on obtenait plus de travail d'un moteur donné en réduisant le volume de sa chambre de combustion, donc en augmentant la compression préalable.

Or, on ne voit pas *a priori*, comment il se fait que, toutes choses égales d'ailleurs et pour une même charge admise, dans un même cylindre, une augmentation de la compression ait pour conséquence immédiate un accroissement de puissance. Mais nos diagrammes expliquent la chose sans peine, attendu qu'ils démontrent que leur pression moyenne s'accroît au fur et à mesure que la compression devient plus forte.

Mais on peut aussi faire la même constatation en observant que le travail développé est proportionnel à $c(T - \theta) - C(t'' - t)$. Or, la chaleur développée par l'explosion d'un kilogramme de mélange est la même, quelle que soit la compression ; l'élévation de température $T - \theta$ est donc la même aussi. Mais $t'' - t$ diminue, quand θ augmente alors que t reste constant, puisque l'on a

$$\frac{t'' - t}{t} = \left(\frac{T - \theta}{\theta} \right)^{\frac{1}{\gamma}};$$

Si $t'' - t$ diminue, avec la compression, il est donc démontré que le travail augmente.

Quelques praticiens ont cru observer que le rendement thermique était d'autant meilleur que le gaz était plus riche ; soumettons encore cette question au contrôle de notre théorie.

Refaisons pour cela les mêmes calculs que ci-dessus en supposant que le mélange admis au cylindre soit moins riche et prenons, par exemple, une proportion qui donne une température sans compression T égale à 1650° absolus au lieu de 1800° , que nous avons prise précédemment comme point de départ.

Les résultats du calcul sont alors les suivants :

	$n = 3$	$n = 5$	$n = 10$
θ	$= 371^{\circ}$	$= 417^{\circ}$	$= 489^{\circ}$
T	$= 1733^{\circ}$	$= 1779^{\circ}$	$= 1851^{\circ}$
P	$= 14,00$	$= 21,32$	$= 37,85$
t'	$= 1345^{\circ}$	$= 1229^{\circ}$	$= 1090^{\circ}$
ρ	$= 0,223$	$= 0,309$	$= 0,412$

Nous trouvons pour les valeurs de ρ : $0,223$ au lieu de $0,230$, $0,309$ au lieu de $0,310$ et $0,412$ dans les deux cas.

Le rendement est donc très légèrement abaissé, mais d'une quantité assurément négligeable.

Or, dans un certain nombre de moteurs du genre Otto, on règle la vitesse en modifiant le dosage du mélange tonnant ; la chaleur dégagée dans l'explosion diminuant, le travail produit sur le piston subit une diminution proportionnelle et l'équilibre s'établit entre le travail moteur et le travail résistant. A demi-charge, on marche avec un mélange pauvre ; à pleine charge avec un mélange riche. Mais il résulte de notre

calcul que le rendement ne change pas sensiblement ; la consommation par cheval-heure développé sur le piston moteur (c'est-à-dire par cheval-heure indiqué) ne devrait donc pas varier non plus, en théorie ; nous verrons qu'il n'en est pas ainsi en pratique et nous expliquerons le fait par notre théorie expérimentale.

Un grand nombre de moteurs sont réglés par admission de *tout ou rien* ; la teneur du mélange reste alors constante ; des passages à vide, c'est-à-dire sans production de travail, réduisent le travail moteur, quand la vitesse tend à s'exagérer. Le rendement théorique n'est évidemment pas modifié de la sorte, puisque chaque cycle individuel ne subit aucune modification.

Telles sont les conclusions de la théorie générique ; elles devront être soumises au contrôle de la théorie expérimentale.

IV

Etude des Cycles à compression et admission variable (Charon)

Revenons à notre second type tel que nous l'avons défini, avec course de compression moindre que la course de détente.

L'admission s'effectuant dans le premier temps, suivant AC (voir fig. 67, page 277) qui est la course variable, il est évident que les variations de compression sont liées aux variations d'admission.

On peut soumettre au calcul ce cas très intéressant (1).

Nous gardons les mêmes notations que ci-dessus ; rappelons que la valeur $T - \theta$ est indépendante de θ ; représentons cette différence constante (constante par un mélange donné), par δ .

Nous aurons, pour le rendement du cycle,

$$\rho = 1 - \gamma \frac{t' - t}{\delta}$$

Exprimons les volumes de la masse gazeuse, évoluant dans le cycle, en fonction du volume de la chambre de compression pris pour unité : le volume du mélange au moment où la compression commence sera v ; V représentera le volume total à la fin de la détente (fig. 73).

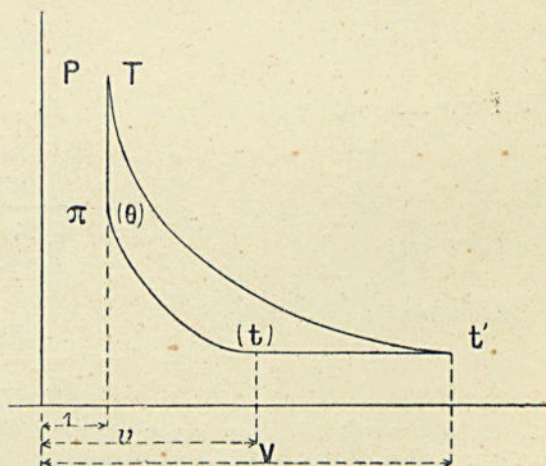


Fig. 73.

1. La théorie ci-dessous a été donnée pour la première fois par M. Letombe.

Nous pouvons écrire :

$$\frac{t'}{t} = \frac{V}{v}$$

$$\frac{t' - t}{t} = \frac{V - v}{v}$$

$$t' - t = t \frac{V - v}{v}$$

On a aussi :

$$\frac{\pi}{\bar{1}} = \left(\frac{v}{\bar{1}}\right)^\gamma \text{ et } \pi = v^\gamma$$

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

$$0 = tv^{\gamma - 1}$$

De même, par les mêmes moyens :

$$P = V^\gamma$$

Mais :

$$\frac{P}{\pi} = \frac{T}{\theta}$$

$$P = \pi \frac{T}{\theta} = \pi \frac{\theta + \delta}{\theta} = \pi \left(1 + \frac{\delta}{\theta}\right)$$

Il vient finalement :

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

d'où

$$\delta = (V^\gamma - v^\gamma) \frac{v}{t}$$

Portons cette valeur dans l'expression de ρ et remplaçons-y $t' - t$ par $t \frac{V - v}{v}$.

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

On obtient en simplifiant :

$$\rho = 1 - \gamma \frac{V - v}{V^\gamma - v^\gamma} \quad (1)$$

1. Cette notation présente l'avantage de ne renfermer que des données connues des constructeurs. Quand on l'applique aux cycles Otto à détente incomplète, limités au volume de la compression V , on trouve :

$$\rho = 1 - \frac{t' - t}{1 - \theta} = 1 - \frac{t}{\theta} \text{ car } \frac{T}{\theta} = \frac{t'}{t} \text{ et } \frac{T - \theta}{\theta} = \frac{t' - t}{t}$$

$$\text{Or } \frac{t}{\theta} = \frac{V}{v^\gamma}$$

$$\text{Donc : } \rho = 1 - \frac{V}{v^\gamma}$$

V et v sont connus ; on calcule V^γ et v^γ , mais on peut aussi en relever la valeur sur les diagrammes d'une machine en marche, puisque $P = V^\gamma$ et $\pi = v^\gamma$.

Il faut observer qu'en augmentant le volume admis v on comprime davantage.

Faisons varier v et prenons la dérivée de ρ par rapport à cette grandeur prise comme variable ; il vient

$$\frac{d\rho}{dv} = \frac{\gamma}{\gamma v^{\gamma-1}} = v^{1-\gamma}$$

ρ décroît donc avec v , ce qui démontre que le rendement du cycle diminue en même temps que la compression ; on peut dire aussi qu'il diminue avec l'admission et par suite avec le travail produit.

La compression variable paraît avoir été inventée par Charon, qui n'était pas un théoricien, mais un praticien ingénieux. On lui avait signalé le point faible du cycle Otto, qui est sa détente incomplète, et il avait cherché à réaliser les conditions de notre second type, à course réduite de compression ; il y arrivait en laissant échapper du cylindre une partie du mélange comprimé, qu'il remisait dans un serpentin afin de pouvoir l'utiliser au coup suivant ; c'était une trouvaille. Il fut amené naturellement à régler la marche de son moteur en faisant varier la quantité de mélange remisé ; il en résultait une compression variable : on pourrait dire que son cycle était à *décompression*. La composition du mélange restait constante.

La haute compression avec longue détente pratiquée dans le moteur Charon lui assurait un rendement excellent à pleine charge ; mais il valait beaucoup moins à demi-charge par le fait même de la décompression. Le rendement devait fléchir en effet au fur à mesure que la compression diminuait, car la prolongation de la détente ne pouvait compenser cet inconvénient. Mais, quel que fut le régime de marche, le cycle Charon gardait le bénéfice résultant d'une course de compression moindre que la course de détente, dont l'effet direct était de diminuer la température des gaz de l'échappement. J'ai fait ressortir cet avantage du moteur Charon lors de mes premiers essais de mars 1889.

V

Etude du cycle à admission variable et surcompression (Letombe)

M. Letombe paraît s'être formé à l'école de Charon ; mais instruit par l'expérience et guidé par son grand savoir théorique et technique, il a su éviter la décompression, qui était la tare du cycle Charon, et il a eu le mérite de la remplacer par une surcompression, qui constitue la caractéristique remarquable de son invention.

Voici les conséquences de cette transformation du cycle : Charon, nous venons de le dire, réglait la vitesse de son moteur en réduisant l'admission, donc la compression,

ce qui faisait baisser le rendement. Au contraire Letombe règle par une augmentation de compression, qui améliore le rendement : alors donc que Charon dépensait plus à demi-charge, Letombe devrait dépenser moins : tel est le résultat théorique très intéressant de cette manière de procéder.

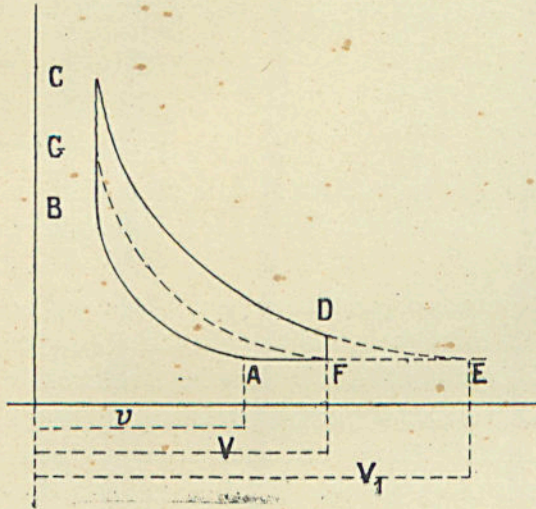


Fig. 74.

Mais, pour faire de la surcompression, Letombe a dû augmenter le volume de l'admission ; le travail augmenterait donc au lieu de décroître, et l'effet de l'opération serait contraire au but poursuivi, si la surcompression n'était accompagnée d'un appauvrissement simultané du mélange : on évite d'ailleurs ainsi les allumages prématurés et les pressions explosives exagérées. Or, j'ai démontré précédemment ⁽¹⁾ que les réductions du titre du mélange ne modifient pas sensiblement le rendement ; la méthode de

règlage adoptée par M. Letombe est donc très rationnelle ⁽²⁾.

M. Letombe a donné une théorie de son cycle ⁽³⁾ : nous l'exposerons succinctement de la manière qui suit :

Le cycle Letombe, ABCDFA, peut être décomposé en deux autres, ABGFA et FGCDF, le premier à détente complète, le second à détente incomplète.

Or, on sait que le rendement d'un cycle est égal à la somme des rendements des cycles élémentaires qui le composent, rendements évalués en tenant compte de la quantité proportionnelle de chaleur mise en œuvre pour chacun d'eux.

Ainsi, si les rendements des deux cycles élémentaires sont ρ' et ρ'' et que les quantités de chaleur disponibles dans chacun d'eux soient $\alpha'Q$ et $\alpha''Q$, on aura :

$$\rho = \alpha' \rho' + \alpha'' \rho''$$

Dans le cas proposé,

$$\rho' = 1 - \gamma \frac{V - v}{V^\gamma - v^\gamma}$$

et

$$\rho'' = 1 - \frac{V}{V^\gamma}$$

Il vient donc :

$$\begin{aligned} \rho &= \alpha' \left(1 - \gamma \frac{V - v}{V^\gamma - v^\gamma} \right) + \alpha'' \left(1 - \frac{V}{V^\gamma} \right) \\ &= 1 - \alpha' \gamma \frac{V - v}{V^\gamma - v^\gamma} - \alpha'' \frac{V}{V^\gamma} \end{aligned}$$

1. *Vidi supra* : page (294).

2. Nous supposons qu'il ne se produise pas de ratés d'allumage.

3. « Congrès de Mécanique appliquée de 1900 » ; tomo III, page 453.

Mais les quantités de chaleur apportées dans le cycle sont proportionnelles à BG et à GC ; on peut donc écrire :

$$\alpha' = \frac{V_1^\gamma - v^\gamma}{V_1^\gamma - v^\gamma} \quad \text{et} \quad \alpha'' = \frac{V_1^\gamma - V^\gamma}{V_1^\gamma - v^\gamma}$$

D'où finalement, simplifications faites :

$$\rho = 1 - \left(\gamma \frac{V - v}{V_1^\gamma - v^\gamma} + \frac{V_1^\gamma - V^\gamma}{V_1^\gamma - v^\gamma} \cdot \frac{V}{V^\gamma} \right)$$

Cette formule est longue et elle manque peut-être d'élégance ; mais elle fait ressortir clairement le bénéfice de la surcompression, car il suffit d'y faire $v = V$ pour voir que ρ augmente, *c. q. f. d.*

Le diagramme montre d'ailleurs aux yeux, comment la surcompression en diminue la surface et comment décroît par suite la puissance du moteur ; le diagramme s'élève par le bas, la courbe CD restant invariable.

VII

Etude du Cycle Diesel

Ce cycle a été conçu par l'inventeur, en 1893, avec l'espoir de réaliser, dit-il, un « *moteur thermique rationnel* destiné à supplanter la machine à vapeur et les autres machines à feu connues aujourd'hui » (1).

Pour arriver à ce résultat, le savant allemand a cherché à se rapprocher le plus possible des conditions du cycle de Carnot en fournissant le calorique, non plus à pression constante, comme nous le faisons dans le moteur classique à combustion, mais à température constante. En d'autres termes, la ligne parallèle à l'axe des volumes est remplacée par une hyperbole équilatère isothermique. M. Diesel se trouve conduit ainsi à formuler ce principe que le *combustible doit être introduit dans le cycle graduellement, de façon à ce que la chaleur développée par sa combustion se transforme en travail au fur et à mesure de sa production.*

Cette opération, ainsi faite, correspond à la définition même d'une détente isothermique. L'opération est celle-là même que Carnot a indiquée pour la phase en cession de calorique par le foyer.

Cette détente isothermique effectuée au contact du foyer a une autre conséquence ; c'est que la température maximum du cycle doit être atteinte à la fin de la compression adiabatique constituant la première phase du cycle. M. Diesel trouve l'occasion

1. « *Theorie und Construction eines rationnelles Waerme Motors zum Ersatz der Dampfmaschinen und der heute bekannten Verbrennungs Motoren* » ; Berlin, 1893.

de formuler un autre principe qui est le suivant : *la température de combustion ne doit pas se produire par et pendant la combustion, mais avant elle et indépendamment d'elle, uniquement par une ignition mécanique.* Cette formule est aussi implicitement renfermée dans les conditions même du cycle de Carnot; Carnot suppose, en effet, que c'est la compression adiabatique qui amène le gaz à la température constante de la détente isothermique.

Mais du moment que la compression adiabatique développait la température maximum, il devenait impossible de soumettre le mélange tonnant à cette compression, car il eût fait explosion dans le cylindre compresseur. Il fallait donc ne comprimer ainsi que de l'air pur et y introduire le gaz combustible seulement après

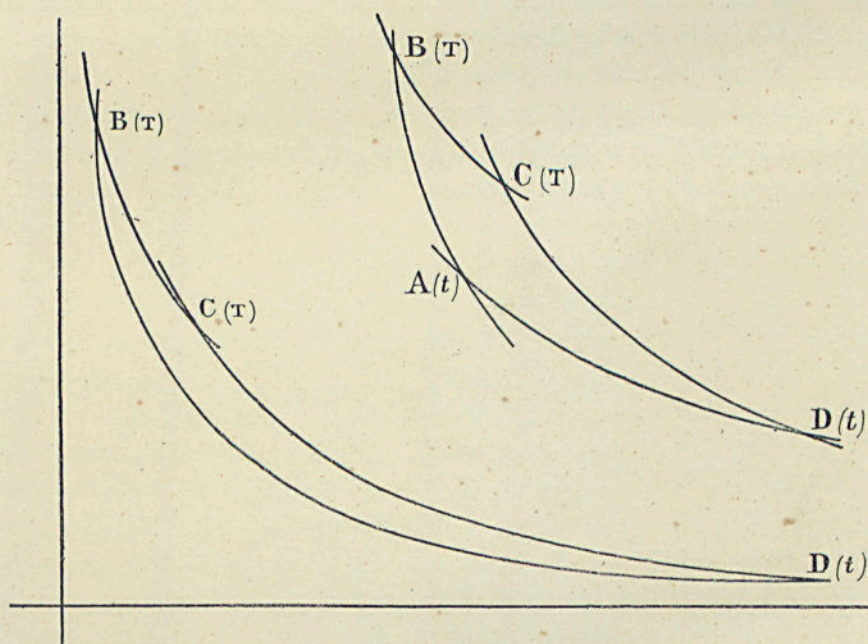


Fig. 75.

compression : la combustion de ce dernier s'opérait spontanément et sans allumage. Cette indication de la compression de l'air pur et de l'introduction subséquente du combustible dans le cylindre à la fin de cette compression adiabatique, constitue la plus grande originalité de l'invention de M. Diesel et je la considère comme sa caractéristique principale.

Pour obtenir le rendement maximum du cycle de Carnot, il fallait encore prolonger la détente adiabatique jusqu'à la température initiale t et terminer la série des opérations par une compression isothermique à cette même température. Le cycle projeté est dès lors celui de la figure 75, sur lequel nous avons marqué les températures correspondantes aux points A, B, C et D. C'est en somme le cycle de Carnot, limité par deux adiabatiques et deux isothermiques, si toutefois on peut admettre la réalité de ces opérations successives adiabatiques et isothermiques dans un même cylindre et au

contact d'une même paroi. Inutile de dire que le rendement d'un tel cycle serait maximum.

Mais on se heurtait à une grosse difficulté en voulant opérer de la manière que nous venons de dire. En effet, pour atteindre par la seule compression adiabatique AB la température T capable d'enflammer spontanément le combustible à son introduction, il eût fallu développer une pression énorme, inadmissible en pratique, même pour M. Diesel, qui ne recule pourtant pas devant ces pressions. On chercha donc à tourner cette difficulté : or, la première compression DA isothermique contribuait à élever la pression, sans intervenir dans l'élévation de température; elle était donc, dans l'esprit de M. Diesel, nuisible d'une part et inutile de l'autre. On l'abandonna et les deux temps DA et AB furent remplacés par une seule opération adiabatique DB.

Le cycle théorique Diesel devenait dès lors celui du contour BCD, formé de deux adiabatiques CD et DB et d'une isothermique BC (fig. 75).

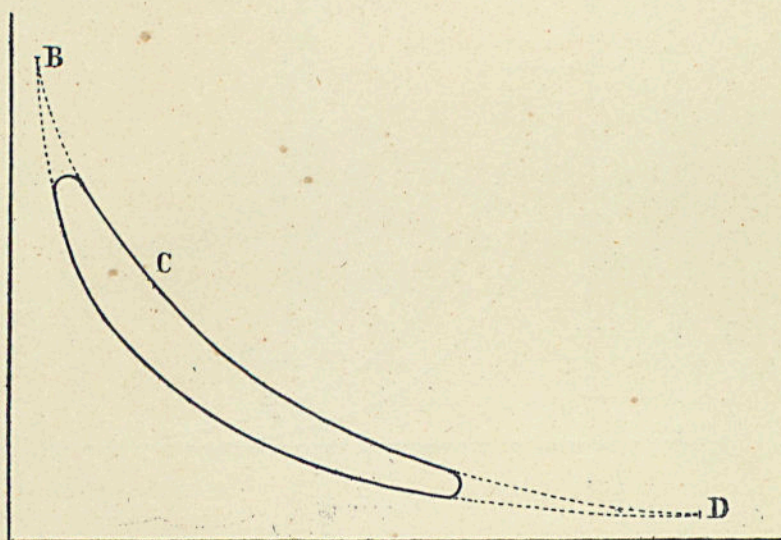


Fig. 76.

L'adiabatique DB est celle qui correspond à la compression d'une certaine masse d'air pur; la courbe CD représente, d'autre part, la détente de cette même masse de gaz augmentée de la masse du combustible introduit dans la phase BC. C'est ce qui explique la possibilité de l'intersection de ces deux courbes, qui correspondent à des masses différentes.

Dans son premier projet, M. Diesel avait prévu une compression d'air de 250 atmosphères; il comptait injecter dans les cylindres du charbon finement pulvérisé; son moteur devait avoir trois cylindres et marcher en compound.

En réalité, la machine qui a été mise en état dans le courant de l'année 1897, ne comprimait qu'à 35 atmosphères, fonctionnait au pétrole et n'avait qu'un seul cylindre.

Le cycle théorique avait subi des altérations imposées par la pratique.

Il avait fallu l'écourter, comme le montre la figure 76 ; la figure suivante (fig. 77), fait voir le diagramme tel qu'il a été relevé sur la première machine construite à Augsbourg. Les déformations sont évidentes et le rendement, basé même sur l'existence d'isothermiques et d'adiabatiques (qu'on ne réalise pas, parce qu'elles sont irréalisables), se trouve nécessairement réduit.

Il en est d'ailleurs ainsi dans toutes les machines thermiques.

La marche du moteur est à quatre temps : il correspond donc à un genre nouveau, que nous appellerons le cycle Diesel. L'espoir qu'on avait conçu de remplacer le cycle irréalisable de Carnot par un cycle pratique de rendement maximum ne s'est pas entièrement confirmé. On retrouve bien dans le moteur qu'on nous montre l'intention initiale de l'inventeur, mais la machine que nous voyons est moins originale que l'idée qui l'a fait naître.

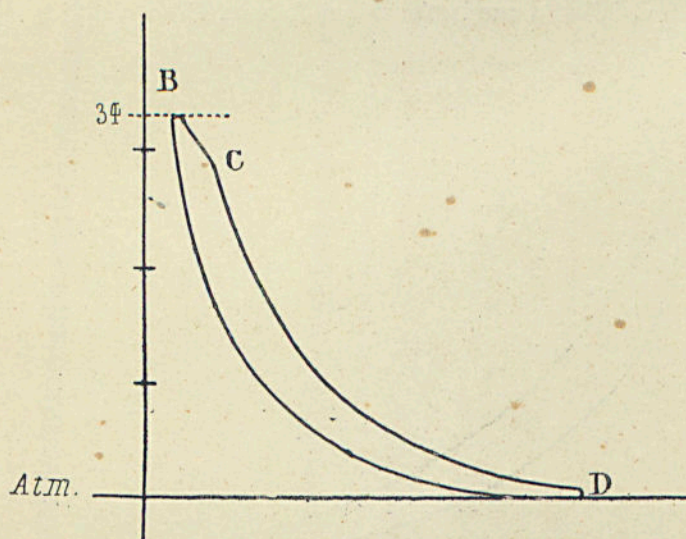


Fig. 77.

Nous dirons plus loin quels résultats pratiques elle a donnés.

Bornons-nous à calculer ici le rendement théorique du cycle Diesel.

Il a été envisagé de manières bien différentes par les auteurs qui s'en sont occupés. Et d'abord, si l'on ne tient pas compte du changement de masse qui se produit lors de l'introduction dans le cycle du combustible, on est autorisé à appliquer au cycle Diesel les conclusions relatives au troisième cycle ; on aurait donc un moteur à compression préalable, avec combustion graduelle et progressive, du genre Brayton. Or, il est intéressant de faire ressortir une coïncidence qui justifie cette façon de calculer : pour un moteur du troisième type, avec compression à 250 atmosphères, nos formules ont donné $\rho = 0,719$ (1). Mais, M. Diesel, partant de considérations particulières différentes des nôtres, a été conduit à attribuer par le calcul à ρ une valeur égale à 0,730 ; l'écart est insignifiant et cette concordance donne à notre calcul l'appui de celui de l'inventeur.

1. Voir ci-dessus page 288.

Voici un autre rapprochement qui a peut-être plus de valeur encore : dans les essais faits le 17 février 1892, par M. Schröter, la pression de l'air comprimé atteignait 35 atmosphères, et l'on trouva un rendement indiqué de 34 p. 100 en moyenne ; or, un moteur à combustion donnerait, dans des conditions identiques, 55 p. 100, en théorie ; mais ce résultat doit être diminué de toutes les pertes par la paroi et à l'échappement qui ne sont pas inférieures à 20 p. 100 et il prend, par suite, un grand caractère de vraisemblance.

Mais il est possible de serrer la vérité de plus près : malheureusement, il faut pour cela se lancer dans le champ des hypothèses, attendu qu'il est bien difficile de savoir avec certitude ce qui se passe dans le cylindre d'un moteur Diesel.

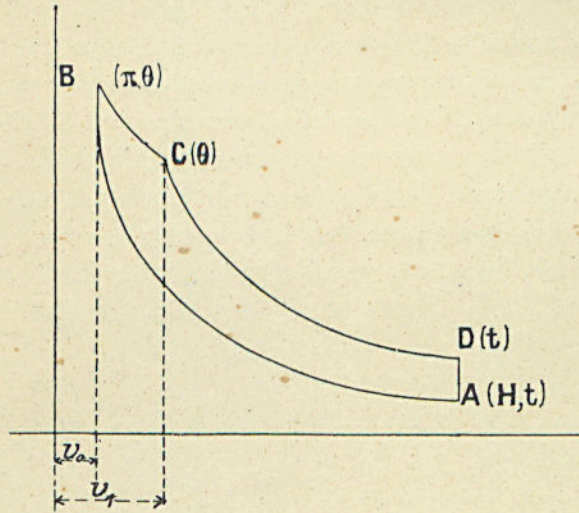


Fig. 78.

M. Schöttler⁽¹⁾ a pris comme but de ses calculs le diagramme ABCDA, de la figure 78 qui indique le cycle suivant :

- 1° Compression AB d'air ;
- 2° Combustion BC isothermique ;
- 3° Détente adiabatique CD ;
- 4° Refroidissement DA, de t' à t , sous volume constant.

La chaleur Q fournie par le foyer le long de l'isothermique BC est égale à

$$AR \theta \text{Log}' \frac{v_1}{v_0} ;$$

la chaleur reprise sur DA, est donnée par l'équation

$$q = c (t' - t).$$

Il vient donc :

$$\varphi = \frac{Q - q}{Q} = 1 - \frac{c (t' - t)}{AR \theta \text{Log}' \frac{v_1}{v_0}}$$

1. Schöttler. — « Die Gasmachine », page 228.

M. Schöttler est conduit par cette formule à attribuer à ρ une valeur égale à 0,47, qui est très vraisemblable, attendu que le rendement thermique réel indiqué atteint 0,31, et que le cycle réel présente sur le cycle théorique des imperfections nombreuses, ainsi que nous l'avons déjà dit ci-dessus.

VIII

Etude de divers autres cycles proposés.

M. Edmond Heirman, directeur des ateliers de la Sambre, près Charleroi, a proposé un système mixte de moteur que nous devons mentionner à cette place. Il comprimerait par deux pompes, dans deux réservoirs séparés, de l'air et du gaz, et il les admettrait dans le cylindre moteur par une soupape spéciale directement placée sous la dépendance du régulateur, de telle façon qu'il réaliserait une admission variable comme dans les machines à vapeur. Dès la fermeture de cette soupape d'admission, et à ce moment même, l'allumage du mélange tonnant se ferait par le jeu même de

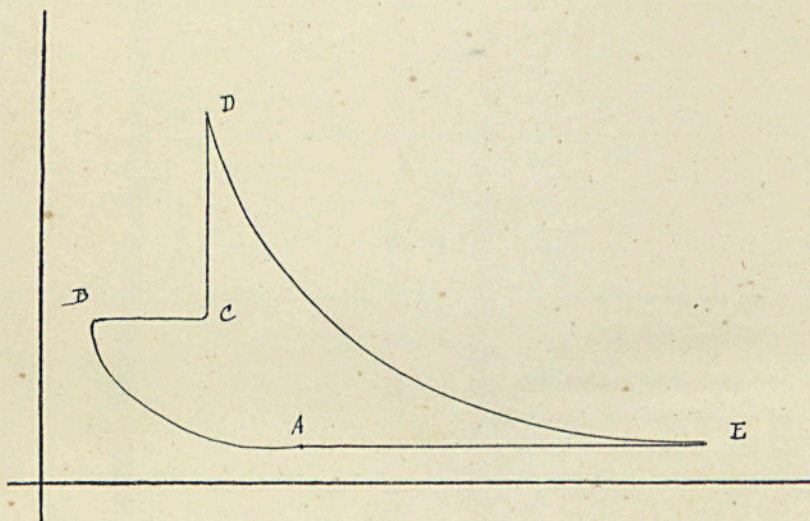


Fig. 79.

cette soupape, et la course du piston se terminerait par une détente que l'on pourrait prolonger aussi loin que l'on voudrait ; on ne serait donc plus astreint, comme dans le moteur à quatre temps, à introduire toujours le même volume de mélange et l'on ne perdrait pas l'avantage du cycle à explosion ; de plus, on réaliserait un moteur à deux temps, donnant un coup par tour. Le diagramme serait celui de la figure 79. La course en arrière expulserait les gaz brûlés et l'on n'en laisserait que la quantité nécessaire pour remplir les espaces morts, que l'on réduirait du reste au minimum ; on y opérerait une certaine compression comme dans la machine à vapeur.

La chaleur à fournir sur le chemin BC serait reprise aux gaz de l'échappement.

La théorie de ce cycle pourrait s'établir en le décomposant en deux autres correspondants au troisième et au second type des moteurs ; nous en laissons le travail au lecteur, en nous contentant de faire remarquer que le rendement théorique sera nécessairement compris entre ceux des moteurs à combustion et à explosion.

Le cycle de M. Heirman présente un intérêt particulier, résultant de ce qu'il semblerait se prêter à l'application des *régénérateurs* aux moteurs à gaz.

Les régénérateurs constituent un élément essentiel des machines de Stirling et d'Ericsson (1), attendu que dans ces machines la série des opérations comprend une compression et une détente que l'on ne peut rendre *isodiabatiques* qu'en prenant de la chaleur dans une de ces phases et en la restituant au cycle dans la phase conjuguée. Mais le cycle des moteurs à gaz ne comporte pas d'*isodiabatiques* ; il se rapproche au contraire, beaucoup de celui de Joule, conçu précisément dans le but de supprimer le générateur dont Stirling et Ericsson ne pouvaient se passer ; le moteur à gaz n'a donc pas besoin du régénérateur. Ces appareils ont eu néanmoins leurs partisans et voici ce qu'en écrivait M. Richard, en 1892 : « L'utilité d'un régénérateur est presque évidente, théoriquement ; le rendement thermique d'un moteur à compression moyenne passerait de 0,45 à 0,56 ; avec une compression plus élevée, ce rendement passerait de 0,54 à 0,72. » (2) Nous ne partageons pas l'avis optimiste de notre savant collègue.

Nous pourrions poser la question préalable, et demander d'abord s'il existe des régénérateurs.

C'est qu'en effet, voilà soixante-dix ans que les plus grands esprits, les chercheurs les plus ingénieux et les constructeurs les plus habiles s'épuisent à trouver le moyen de réaliser ces appareils que Hirn appelait des *tamis expirateurs* ; le succès n'a pas répondu à leurs efforts. On a appelé au secours mécaniciens, physiciens, chimistes et métallurgistes ! Puis, las de chercher, on s'en est remis à un hasard heureux et l'on a attendu la solution rêvée ; elle n'est pas venue.

Mais supposons qu'il soit enfin trouvé ce régénérateur idéal, de volume aussi réduit que possible, ayant néanmoins une énorme capacité calorifique, possédant une puissance colossale d'échange de températures, offrant un libre passage aux gaz, sans les étrangler, ni créer de contrepression, présentant des surfaces inaltérables, ne brûlant pas, ne s'effritant pas, etc., etc. ; nous ne lui ménageons aucune qualité ! Eh bien, qu'on le mette en fonctions : au bout de quelques heures « il se couvrira intérieurement de la graisse plus ou moins brûlée qu'apportera le gaz » (3), et il n'arrêtera plus du tout le calorique.

Mais les partisans convaincus du régénérateur tiennent à leurs chères illusions ; nous ne devons donc négliger aucun argument pour les éclairer.

1. Voir ci-dessus pages 76 et 80.

2. G. Richard. — « Les Nouveaux moteurs à gaz et à pétrole », page 460.

3. Ces paroles sont de Hirn. « Exposition analytique et expérimentale de la Théorie Mécanique de la chaleur » ; tome II, page 432, troisième édition de 1876.

Voici une autre considération qui fait bien ressortir le mal-fondé de leurs espérances.

Admettons encore que nous disposions d'un régénérateur parfait, ne perdant pas ses propriétés absorbantes et émissives du calorique ; nous dirigerons les gaz de la décharge à travers ses mailles, pour les dépouiller de la chaleur qu'ils emportent en pure perte et nous la restituerons au mélange tonnant admis au cylindre. En apparence, ce serait une opération profitable ; en réalité, il faut reconnaître qu'elle ne pourrait même pas être tentée. C'est qu'en effet, il en résulterait de trop multiples inconvénients. Et d'abord, le mélange plus chaud serait moins dense : il occuperait un volume plus grand, et il faudrait en admettre davantage par cylindrée ; il y aurait donc augmentation de l'action des parois, non seulement parce que la différence de température entre gaz et métal aurait crû, mais encore parce que la surface de contact aurait plus d'étendue pour une même masse de gaz combustible mise en œuvre. On nous répondra peut être qu'il n'y aurait qu'à changer le dosage de la charge ou à diminuer la dilution, ou bien encore qu'on pourrait forcer le degré de compression ; c'est une nouvelle erreur, car un mélange tonnant préalablement échauffé ne tolérerait même plus la compression habituelle, attendu qu'il exploserait spontanément, sans allumage.

Nous présenterons enfin une dernière considération plus importante encore : les cylindres des moteurs à gaz, alimentés d'un mélange froid, sont déjà tellement chauds, qu'il faut *absolument* les refroidir par des enveloppes à circulation d'eau froide ; aucun moteur n'échappe à cette loi. Et voilà que l'on voudrait surchauffer davantage le mélange admis ? Qu'en résulterait-il ? Les parois prendraient une température tellement élevée que le piston gripperait, que les tiroirs et les soupapes perdraient leur étanchéité, que les bourrages et les huiles brûleraient et que l'on ne pourrait même pas introduire de gaz tonnant dans le cylindre.

On n'échapperait à ces dangers qu'en exagérant encore la réfrigération des parois : mais alors, on tomberait dans un cercle vicieux, car on soutirerait par la paroi la chaleur récupérée à grands frais par le régénérateur.

Il n'y a qu'une espèce de moteurs à gaz, auxquels le régénérateur serait applicable et profitable ; ce sont les moteurs à combustion, dans lesquels la compression isothermique du mélange se fait dans un cylindre distinct. Ces moteurs permettent de très fortes compressions suivies de longues et complètes détentes ; le régénérateur serait placé entre le compresseur et le cylindre moteur. La détente abaisserait la température des gaz de telle façon que l'on ne rejeterait pas à l'échappement le calorique récupéré et reversé dans le cycle par le régénérateur ; il faudrait peut être activer la réfrigération du cylindre en augmentant la circulation de l'enveloppe, mais on ne se trouverait pas limité comme on l'est avec les moteurs à explosion opérant une compression probable dans le cylindre moteur lui-même.

C'est dans ces conditions que Siemens projetait de régénérer le calorique. L'opération est alors possible et elle peut procurer un certain bénéfice : et d'abord, on utilise des calories jetées à l'air dans les moteurs ordinaires ; de plus, le calorique

ainsi introduit dans le cycle contribue à améliorer son rendement en élevant la température supérieure. Un récupérateur est disposé de la sorte entre le compresseur et le cylindre moteur dans la machine Gardie ; Hirsch, Arson, Babcock, Atkinson ont inventé des combinaisons analogues ; mais elles n'ont pas donné les résultats qu'on en espérait, attendu qu'elles sont toutes abandonnées aujourd'hui.

Faisons remarquer en finissant que la récupération (ce mot est plus exact que celui de régénération) du calorique n'améliorerait pas la nature du cycle des moteurs à gaz : elle ne procurerait que l'utilisation des chaleurs perdues par une imperfection du cycle.

Pour obtenir ce résultat, il suffirait de vulgaires échangeurs à surfaces planes ou à tubes, traversés en sens inverse, d'un côté du métal, par les gaz de l'échappement, de l'autre côté par l'air frais ou bien par le mélange tonnant déjà comprimé, ce qui serait mieux ; ce genre d'appareils est peu coûteux et durable ; ce sont ceux que l'on emploie pour réchauffer l'air de certaines machines à air comprimé. L'expérience a montré (1) que, dans ces machines, le travail indiqué croît d'un cheval pour une dépense de 180 grammes de charbon par heure : aucun moteur n'a encore donné directement un tel rendement.

Nous devons aussi signaler ici un autre projet auquel on revient sans cesse, avec une constance que le succès n'a guère justifié davantage ; nous voulons parler du *compoundage* des moteurs, c'est-à-dire de la prolongation de la détente dans un cylindre spécial, de grande section. Il faut reconnaître que la détente par cascade dans des cylindres étagés, parfaitement logique pour la vapeur, ne l'est plus pour les gaz ; les raisons pour lesquelles le petit cylindre ne doit pas être mis en communication avec le condenseur, ni le grand cylindre avec la chaudière n'existent que pour la vapeur et pas pour les gaz. Mais l'emploi d'un second cylindre procure une grande prolongation de détente : l'avantage qui en résulte pourrait donc en certains cas justifier le *compoundage*. Il a été essayé dès le début par Otto, Clerk et Niel ; plus tard, M. Diesel adjoignait un cylindre de détente à ses deux cylindres à quatre temps ; mais il a abandonné ce dispositif, et nous ne connaissons plus guère aujourd'hui d'autre moteur *compoundé* que celui de MM. Roser et Mazurier (2).

L'idée de remplacer la compression adiabatique par une compression isothermique devait venir à l'esprit des ingénieurs préoccupés de faire bénéficier les moteurs des moindres économies à réaliser. Le rendement d'un cycle du deuxième type à compression isothermique se calcule sans difficulté de la manière suivante :

Chaleur disponible	$c (T-t)$
— employée dans le travail de la compression.	$A R t \left(\log \frac{v}{v_0} \right)$
— transformée en travail utile (3)	$c (T-t')$

1. Kennedy. — « Experiments upon the Transmission of power by compressed air in Paris ».
 2. L'intéressante question du *compoundage* sera traitée plus complètement dans le tome II.
 3. Le travail développé dans une détente adiabatique effectuée depuis la pression P jusqu'à la pression atmosphérique H, en passant de la température explosive T à la température t' des gaz détendus, est donné par la formule :

$$\mathfrak{C} = \frac{R T}{\gamma - 1} \left(1 - \left(\frac{H}{P} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right) = \frac{c (T - t')}{A}$$

Voir notre « Thermodynamique à l'usage des ingénieurs », 2^e édition, pages 85 et 91.

$$\rho = \frac{c (T - t') - ARt \log' \frac{c}{v_0}}{c (T - t)}$$

M. Vermand a pris la peine de calculer les valeurs des principales données de la question, pour diverses compressions isothermiques ; il suppose un mélange de 1 volume de gaz de ville avec 10 volumes d'air. Nous mettons en parallèle les chiffres correspondants aux compressions isothermiques et adiabatiques.

Pression maximum P.

Compression isothermique			Compression adiabatique		
3 atm.	5 atm.	7 atm.	3 atm.	5 atm.	7 atm.
17, 16	28, 59	40, 02	13, 40	19, 80	25, 80

Température d'évacuation des gaz

Compression isothermique			Compression adiabatique		
3 atm.	5 atm.	7 atm.	3 atm.	5 atm.	7 atm.
940°	835°	772°	1105°	1044°	1020°

Rendements théoriques

Compression isothermique			Compression adiabatique		
3 atm.	5 atm.	7 atm.	3 atm.	5 atm.	7 atm.
0, 562	0, 628	0, 665	0, 558	0, 593	0, 630

Ne nous occupons que des valeurs relatives de ces divers rendements : on voit que le bénéfice est minime, alors même que les températures t' sont beaucoup moindres que dans le cas étudié précédemment.

Il a paru néanmoins à plusieurs ingénieurs qu'il y avait lieu de chercher à réaliser cette économie : nous signalerons en particulier le dispositif proposé par M. Vermand. Pour obtenir une compression réellement isothermique, il l'opère dans un cylindre séparé, constamment refroidi à l'intérieur par une injection d'eau froide et au dehors par une abondante circulation ; de plus, pour mieux assurer l'effet cherché, les faces du piston seraient recouvertes d'une épaisse couche de feutre constamment humecté. L'air, puisé dans l'atmosphère, est ainsi comprimé à basse température jusqu'à la pression de régime adoptée, laquelle doit toujours être élevée ; au sortir du compresseur, l'air se mêle à des vapeurs de pétrole qui brûlent dans un réservoir parfaitement protégé contre le refroidissement ; les gaz brûlés sont alors introduits dans un cylindre moteur et déchargés dans l'air après une longue détente : cette détente doit abaisser leur température à 25 degrés.

Voici comment M. Vermand calcule le rendement théorique de cette machine.

Admettons que l'air soit pris au compresseur à 25° et surchauffé à 300° ; la quantité de chaleur Q fournie par la combustion d'un kilogramme d'huile de pétrole permet de chauffer un poids x d'air, lequel est donné par l'équation :

$$Q = x C (300 - 25) = x C \times 275$$

En prêtant au pétrole un pouvoir de 10.000 calories (c'est un minimum), on peut chauffer ainsi 150 kilogrammes d'air, soit 115 mètres cubes environ. Ce volume d'air

doit être comprimé d'abord à une pression P_1 ; ce travail, effectué par le moteur lui-même, peut être estimé en chaleur ; ce calorique, égal à Q' , vient évidemment en décompte du calorique Q disponible au moteur. Il reste donc $Q - Q'$.

On a pour une compression isothermique :

$$Q' = x A R T \log' \frac{P_1}{P_0}$$

La détente ramène la pression de P_1 à la pression P_0 de l'atmosphère ; on peut donc calculer la température absolue des gaz de la décharge T_0 en fonction de T_1 , température de l'air chaud, par l'équation :

$$\frac{T_0}{T_1} = \left(\frac{P_0}{P_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}$$

Nous connaissons la température des gaz évacués et par suite on peut calculer la chaleur q emportée par la décharge.

M. Vermand détermine dès lors la valeur du rendement économique ρ par l'équation connue :

$$\rho = \frac{Q - Q' - q}{Q}$$

Faisant :

$$\begin{aligned} Q &= 10\,000 \text{ calories} \\ T_1 &= 300^\circ \text{ centigrades} = 573^\circ \text{ absolus} \\ P_1 &= 10 \text{ kilogrammes} \end{aligned}$$

Il trouve :

$$\begin{aligned} T_0 &= 21^\circ \text{ centigrades} = 294^\circ \text{ absolus} \\ Q' &= 5\,550 \text{ calories} \\ q &= 545 \text{ calories} \\ \rho &= 0,39 \end{aligned}$$

L'auteur de ce projet a calculé qu'on pourrait ainsi obtenir le cheval-heure effectif par 163 grammes de pétrole ; mais ce résultat est purement théorique.

M. Duperron ⁽¹⁾ reprenant les idées anciennes de Simon, a cru pouvoir promettre, au nom d'une théorie nouvelle, un rendement extraordinaire à un moteur mixte à gaz et à vapeur, et il a indiqué un projet d'établissement d'un *brûleur vaporisateur* distinct du moteur dans lequel la combustion d'un carbure se ferait dans une atmosphère saturée de vapeur d'eau. Le cycle de ce moteur est aussi à combustion ; une longue détente permettrait d'opérer une condensation de la vapeur d'eau mise en œuvre. M. Duperron estime la consommation probable à 225 grammes de pétrole par cheval-heure effectif. C'est encore un résultat théorique ⁽²⁾.

Un grand nombre d'inventeurs se sont donné pour objectif, en ces derniers temps, de réaliser une admission variable avec compression et composition constante du mélange introduit dans le cylindre. Cette manière de procéder placerait ces moteurs dans

1. Duperron. — « Le Moteur économique ; dans le Génie civil », 2 juin 1900.

2. On a proposé d'adjoindre à ce genre de moteurs des condensateurs ; on abaisserait ainsi la température du réfrigérant, mais ce bénéfice serait acquis au prix d'une complication notable.

une catégorie intermédiaire entre les moteurs Charon à décompression et les moteurs Letombe à surcompression ; elle constituerait un progrès sur le cycle Charon, mais elle serait moins rationnelle que celle qui a été adoptée par Letombe. La consommation à demi-charge serait moindre que dans le moteur Charon et plus grande que dans le moteur Letombe. Le but poursuivi par les inventeurs dont nous nous occupons reste néanmoins fort intéressant, car il réaliserait déjà un perfectionnement notable du cycle Otto, et il se prêterait aisément au réglage de la vitesse. MM. Marius et Brellier d'Uccle (Belgique) ont été des premiers à s'engager dans cette voie (1) : voici comment ils ont réalisé la constance de la compression. Un piston auxiliaire, pouvant se déplacer dans les espaces morts du cylindre, partage ceux-ci en deux chambres, l'une de compression, l'autre de remisage ; une partie du mélange tonnant passe dans cette dernière à un moment donné et se trouve ainsi séparée de la masse qui explose et se détend derrière le piston moteur. C'est sous la dépendance du régulateur que se fait ce partage ; il est produit par la position que prend le piston auxiliaire ; il se fait de telle sorte que le mélange, de volume variable, logé entre le piston moteur et le piston auxiliaire, reçoit toujours la même compression. Aussitôt le partage fait, le piston est immobilisé dans la position qu'il a prise.

M. Marmonnier s'est proposé le même but, et il recourt aussi à l'emploi d'un piston auxiliaire, mais le fonctionnement de ce moteur est entièrement différent. Le piston auxiliaire ou contrepiston constitue en réalité le fond du cylindre moteur, mais ce fond est mobile et il prend les positions voulues pour que la quantité de gaz brûlés restant dans le cylindre après chaque course d'expulsion soit réduite ou augmentée proportionnellement au volume de gaz frais admis ; il en résulte que, pour une admission maximum ou minimum, la composition et la compression du mélange reste la même. Le contrepiston reçoit un mouvement alternatif de va-et-vient par l'intermédiaire d'une coulisse, dont le coulisseau est sous la dépendance du régulateur. Ce dispositif permettrait même de réduire le volume des gaz brûlés à demi-charge de telle façon qu'il se produise une surcompression légère, comme dans le moteur Letombe. Enfin on peut récupérer sur l'arbre moteur une partie du travail dépensé dans la phase de compression : M. Marmonnier démontre que, pour une admission aux $\frac{3}{10}$, la course du contrepiston devient égale au $\frac{1}{10}$ de celle du piston ; comme celui-ci subit tout le temps la poussée de la compression, il recueille les $\frac{7}{10}$ du travail de compression.

Pour évaluer cet avantage, il faut calculer le travail de compression adiabatique depuis le volume primitif v_0 jusqu'au volume v auquel elle s'arrête : il est égal à $\frac{RT}{\gamma - 1} \left(1 - \left(\frac{v_0}{v} \right)^{\gamma - 1} \right)$; son équivalent en chaleur est $c(\theta - t)$. Le calorique gagné par cycle est donc égal aux $\frac{7}{10}$ de $c(\theta - t)$ et le rendement croît de $\frac{7}{10} \cdot \frac{\theta - t}{T - \theta}$.

1. « Brevets allemands du 16 juin 1899 et du 23 septembre 1900 ».

Les beaux résultats obtenus par la machine atmosphérique de Langen et Otto étaient de nature à faire regretter la disparition de ce quatrième type de moteurs ; MM. Vermand, Seraine, et d'autres encore ont donc essayé de ramener l'attention des constructeurs sur ces machines remarquables, dont on espérait améliorer encore le rendement par l'application de la compression préalable.

Le rendement de ce nouveau genre de moteurs peut se calculer de la manière qui suit :

Le travail négatif de compression, qu'il serait utile de faire isothermique, d'un volume v_0 à un volume v , est égal à $RT \log' \frac{v}{v_0}$; la chaleur à fournir entre la température initiale t_0 et la température T est $Q = c (T - t_0)$; enfin, le travail utile est produit par l'action de l'atmosphère sur le piston, pour ramener le mélange dilaté du volume v' au volume primitif v_0 , et son équivalent en chaleur est $AH (v' - v_0)$; nous avons donc :

$$\rho = \frac{AH (v' - v_0) - ART \log' \frac{v}{v_0}}{c (T - t_0)}$$

M. Vermand a calculé les diverses valeurs de ρ (1) pour des compressions de 3,5 ou 7 atmosphères d'un mélange de un volume de gaz de ville avec 6, 8 ou 10 volumes d'air, et il les a rapprochées du rendement obtenu sans compression dans les mêmes conditions ; le tableau ci-dessous réunit synoptiquement les résultats de ce calcul.

Mélange	Rendements			
	sans compression	avec compression isothermique		
		à 3 atm.	à 5 atm.	à 7 atm.
à 6 volumes . . .	0,605	0,720	0,781	0,804
8 — . . .	0,656	0,765	0,788	0,814
10 — . . .	0,610	0,733	0,752	0,780

Il résulterait de ces chiffres que la consommation théorique d'un semblable moteur pourrait descendre à 151 litres par cheval-heure indiqué : il serait bien désirable que ces espérances de M. Vermand se réalisent.

Il nous reste un mot à dire des moteurs à temps multiples, et en particulier du moteur Griffin à 6 temps.

L'expulsion des gaz brûlés est suivie d'une aspiration d'air, constituant le 5^e temps, et d'une expulsion en 6^e temps. La théorie générique, qui ne considère pas l'influence des parois, fait rentrer ces machines dans la catégorie des quatre temps, attendu que les deux temps surnuméraires sont représentés par une même ligne de pression constante parcourue en sens inverse.

1. Vermand. — « Les Moteurs à gaz et à pétrole », aide-mémoire de la collection Leauté, pages 73 et 159.

IX

Influence des variations de c et de γ .

Nous avons établi notre théorie générique, en admettant une constance des chaleurs spécifiques et de leur rapport γ qui n'existe nullement : nous avons sacrifié la rigueur de nos calculs à la simplicité que procure cette manière de procéder.

Il convient de revenir maintenant sur ce point.

Constatons d'abord qu'il est absolument impossible de faire intervenir mathématiquement dans les calculs les variations des chaleurs spécifiques, sans compliquer singulièrement les formules. En effet, les chaleurs spécifiques sont des fonctions de la température, qui croissent continûment avec elle : si nous adoptons la fonction de M. Vermand, $c = a + bRT$, nous voyons, par exemple, que la quantité de chaleur à fournir à un kilogramme de gaz pour élever la température de t à T , sous volume constant, est égale à

$$Q_t^T = a(T-t) + \frac{bR}{2}(T^2 - t^2) = \left(a + bR \frac{(T+t)}{2} \right) (T-t)$$

Un échauffement à pression constante se calculerait ainsi qu'il suit :

$$C = c + AR = a + bRT + AR$$

$$Q_t^T = (a + AR)(T-t) + \frac{bR}{2}(T^2 - t^2) = \left(a + AR + bR \frac{(T+t)}{2} \right) (T-t).$$

Dans le cas de la compression ou de la détente isothermique d'un gaz, on retrouve évidemment l'équation connue :

$$Q = \Lambda p_o v_o \log' \frac{v}{v_o}$$

Mais, pour une compression adiabatique, entre les températures T et T_o , on aura :

$$\Lambda \mathfrak{G} = (T - T_o) \left(a + \frac{bR}{2} (T + T_o) \right)$$

La loi des variations de p , v et T est donnée par la relation :

$$\frac{p}{p_o} \left(\frac{v_o}{v} \right)^{\frac{a + AR}{a}} = e^{\frac{bR}{a} (T - T_o)}$$

La complexité de ces formules se répercute sur les formules de rendement que nous avons établies ci-dessus ; ainsi le rendement des moteurs du deuxième type à détente complète, prend la valeur ci-dessous (1) :

1. Pour apprécier la différence de ces formules avec les nôtres, on devra se reporter à la page (283)

$$Q = \left(a + bR \frac{(T + \theta)}{2} \right) (T - \theta)$$

$$q = \left(a + \Lambda R + bR \frac{(t' + t)}{2} \right) (t' - t)$$

$$\rho = \frac{\alpha (T - \theta - t' + t) - \Lambda R + bR \left(\frac{T^2 - \theta^2}{2} \cdot \frac{t'^2 - t^2}{2} \right)}{\left(a + bR \frac{(T + \theta)}{2} \right) (T - \theta)}$$

Avec une formule de ce genre, le travail fécond de comparaison auquel nous nous sommes livré, devient pour ainsi dire, impossible.

On calculera la température de sortie t' des gaz de l'échappement par l'équation

$$\frac{bR}{e} \frac{(T - t')}{a} = \frac{H}{\pi} \left(\frac{v'}{v} \right) \frac{\alpha + \Lambda R}{a}$$

Quelques auteurs ont esquivé la difficulté de ces calculs en prenant une valeur moyenne de c et de C , correspondante à l'écart des températures de la phase du cycle considérée : ainsi on adopte pour c , dans la phase de compression, la valeur 0,185 et dans la phase de combustion une valeur plus élevée égale à 0,340 ; le rapport γ décroît au contraire de 1,40 à 1,21. La formule du rendement, acceptée par nous ci-dessus, devient ainsi, en appelant c' et c'' les deux valeurs de c :

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

C'est le résultat que j'ai obtenu sans m'occuper de ces valeurs différentes de c ; la modification introduite ne porte que sur γ : or, j'ai pris $\gamma = 0,30$ dans mes calculs (1).

La valeur qu'il faudrait réellement attribuer à γ n'est ni 1,40, ni 1,30, ni 1,21 ; elle varie avec la composition du gaz et elle n'est pas indépendante de l'action de paroi. La théorie expérimentale élucidera ce point ; la théorie générique ne peut que choisir une valeur probable quelconque, et elle doit se résigner à ne pouvoir faire mieux (2).

X

Diagrammes entropiques.

Gibbs avait introduit en thermodynamique l'emploi d'un diagramme différent du diagramme classique de Clapeyron ; au lieu de prendre pour coordonnées le volume spécifique v et la pression p , il prenait l'entropie S , rapportée à l'unité de masse et la température absolue T . Belpaire a montré l'avantage qui résulterait de cette mé-

1. *Vide supra*, pages 65 et 285.

2. Dans son remarquable ouvrage, intitulé *Théorie des Moteurs à Gaz* (Paris, 1902), M. George Moreau envisage aussi l'influence des variations du coefficient de dilatation des gaz et il établit la forme nouvelle que prend l'équation de Poisson, quand on fait de α une fonction du temps. Nous renvoyons nos lecteurs à cet excellent traité.

thode nouvelle pour l'étude des machines thermiques et M. Boulvain a développé avec grand succès ces idées dans plusieurs publications, qui ont trouvé un grand écho dans le monde des techniciens (1). Nous allons résumer rapidement la théorie du savant professeur de Gand et nous montrerons les heureux résultats pratiques qu'il a obtenus.

On sait que si, dans un cycle fermé déterminé, nous appelons dQ la quantité de chaleur fournie pour une transformation élémentaire quelconque à une température variable T , nous devons avoir pour l'ensemble des opérations :

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

lorsque ce cycle est réversible.

Cette intégrale est, pour un état quelconque du corps qui suit le cycle, une fonction des variables qui le définissent ; il existe donc, pour tout état, une valeur déterminée de $\frac{dQ}{T} = S$.

Clausius a donné le nom d'*entropie* à cette fonction S . Toute transformation adiabatique pour laquelle on peut écrire $dQ = 0$, laisse à l'entropie une valeur constante S ; chaque adiabatique est donc caractérisée par une valeur constante de l'entropie.

Une adiabatique est par suite une *isentropique*.

Dans le cas d'un gaz parfait, les variations de l'entropie, pour une transformation finie AB quelconque, seront données par l'équation :

$$S'' - S' = \int_B^A \frac{dQ}{T} = C \log' \frac{v''}{v'} + c \log' \frac{p''}{p'}$$

ou :

$$S'' - S' = \log' v''^C p''^c - \log' v'^C p'^c$$

Nous avons fait usage jusqu'ici de deux axes coordonnés de volume et de pression pour représenter graphiquement une transformation quelconque ; le diagramme obtenu a la propriété de fournir, pour une variation déterminée, l'intégrale $\int p dv$, c'est-à-dire le travail produit dans le cycle ; en planimétrant un diagramme, on déduit de cette opération le travail *indiqué* sur le piston.

Mais ce diagramme des p et des v ne dit rien relativement aux variations de l'énergie intérieure.

Au contraire, un diagramme construit sur les coordonnées S et T , nous fournit une donnée nouvelle ; son aire représente la chaleur transformée en travail.

En effet, pour l'élément AB (fig. 80).

on a :

$$A_1 B_1 = \frac{dQ}{T}$$

1. Boulvain. — « Cours de mécanique appliqué aux Machines » ; 3^e fascicule, page 48, 4893 ; « Revue de Mécanique appliquée », tome I, page 22 ; 4897. Consulter aussi : R. Mollier : « Das Waermediagramm », Berlin, 1893.

D'autre part,

$$OA_1 = \int \frac{dQ}{T} = S_A$$

$$AA_1 = T$$

La surface ABB_1A_1 représente par suite la chaleur dQ , *c. q. f. d.*

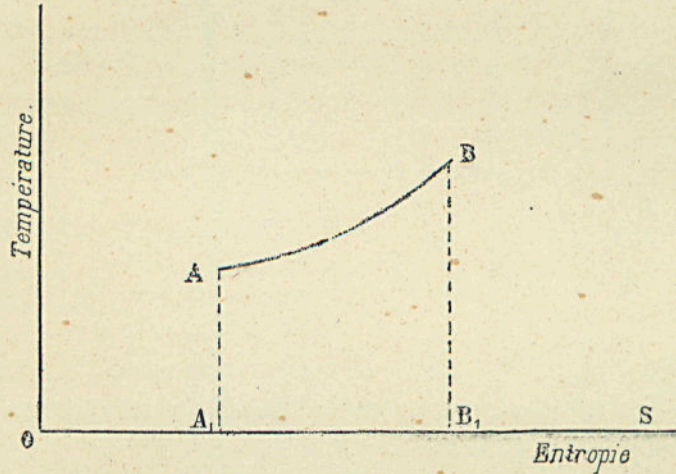


Fig. 80.

La chaleur est donc représentée graphiquement dans ces diagrammes ST , comme l'était le travail dans les diagrammes $p v$, par une aire.

Pour un cycle entropique $ABCD A$, le rectangle curviligne $ABCc a A$ donne par son aire la chaleur disponible ; l'aire $ADCc a A$ représente la chaleur portée au réfrigérant ; par suite, la surface $ABCD A$ fait connaître la quantité de chaleur utilisée, c'est-à-dire transformée en travail.

Le rendement est donc figuré par le rapport de l'aire de la courbe $ABCD A$ à l'aire totale $ABCc a A$.

On peut construire aisément ce diagramme.

Les isothermiques deviennent des lignes droites parallèles à OS .

Les adiabatiques sont des parallèles à OT .

Le cycle de Carnot se traduit donc par le rectangle $ABCD A$ (fig. 82).

La quantité de chaleur prise au foyer est représentée par le rectangle $A_1 ABB_1 A_1$; celle qui passe au réfrigérant est $A_1 DCB_1 A_1$; la différence, donnée par le rectangle $ABCD$, est transformée en travail.

On voit que tout cycle inscrit dans ce cycle rectangulaire, donc compris entre les mêmes limites de rendement, donne un rendement moindre ; le cycle de Carnot a donc un rendement maximum limite.

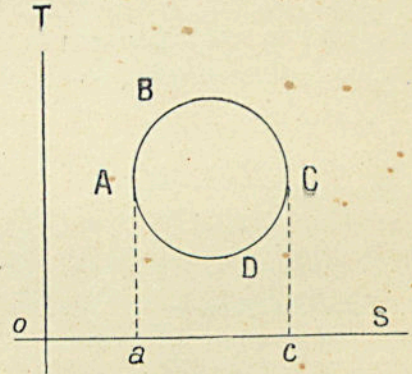


Fig. 81.

Avant de passer à l'étude des cycles des moteurs à gaz, il nous faut présenter quelques considérations préliminaires.

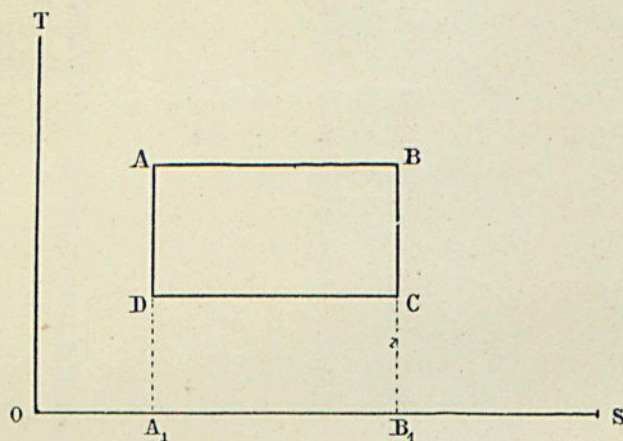


Fig. 82.

Construisons le diagramme entropique de l'unité de poids d'un gaz, dont la loi de détente adiabatique serait, en théorie,

$$pv^\gamma = p_1 v_1^\gamma$$

mais qui se détend réellement suivant la loi :

$$pv^K = p_1 v_1^K$$

K ayant une valeur plus grande, égale ou plus petite que γ .

Nous avons, outre la première équation que nous avons écrite :

$$(pv^K = p_1 v_1^K)$$

cette autre :

$$\frac{dQ}{T} = c \frac{dT}{T} + (C - c) \frac{dv}{v}$$

Nous cherchons :

$$\int \frac{dQ}{T}$$

Pour cela, trouvons à exprimer $\frac{dv}{v}$ en fonction de $\frac{dT}{T}$, ce qui est aisé :

$$pv = RT$$

$$RTv^{K-1} = p_1 v_1^K$$

$$\frac{dv}{v} = -\frac{1}{K-1} \frac{dT}{T}$$

Par substitution, il vient :

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{T} &= c \frac{dT}{T} - \frac{C - c}{K - 1} \frac{dT}{T} \\ &= \frac{dT}{T} \left(\frac{c(K - 1) - (C - c)}{K - 1} \right) \\ &= \frac{dT}{T} \left(\frac{cK - C}{K - 1} \right) \\ &= c \frac{K - \gamma}{K - 1} \frac{dT}{T} \end{aligned}$$

L'intégration donne :

$$S - S' = \int_T^T \frac{dQ}{T} = c \frac{K - \gamma}{K - 1} \log' \frac{T}{T'}$$

On prend comme valeurs initiales les valeurs S' et T' , arbitrairement choisies, permettant de calculer $S - S'$: il est dès lors aisé de construire le diagramme entropique.

On aura les trois solutions suivantes :

$$\begin{aligned} 1^\circ \quad & K = \gamma \\ & S - S' = 0 \end{aligned}$$

La détente est adiabatique.

La courbe est une droite parallèle aux ordonnées, c'est-à-dire parallèle aux T .

$$\begin{aligned} 2^\circ \quad & K > \gamma \\ & S - S' \text{ est positif, quand } T > T' \end{aligned}$$

Si K est très grand, on aura :

$$p^{\frac{1}{K}} v = \text{const.}$$

$$S - S' = c \log' \frac{T}{T'}$$

C'est une transformation à *volume constant*.

$$3^\circ \quad K > 1, \text{ mais } < \gamma$$

La ligne de détente est comprise entre l'adiabatique et l'isothermique, ce qui est le cas le plus ordinaire des détentes de gaz chauds dans un cylindre. L'entropie diminue quand la température augmente, car $K - \gamma$ est négatif.

$$4^\circ \quad K = 1$$

Alors $T = T'$; la ligne est isothermique.

Pour trouver l'accroissement d'entropie, il faut faire $dt = 0$ dans l'équation différentielle.

On trouve :

$$S - S' = (C - c) \log' \frac{v}{v'}$$

$$5^\circ \quad K = 0$$

Dans ce cas, $p = \text{const.}$

$$S - S' = C \log' \frac{T'}{T}$$

Envisageons maintenant les moteurs des trois premiers genres, à explosion, sans compression ou avec compression, et à combustion avec compression. Supposons que l'on admette dans chacun d'eux le même poids de mélange tonnant, au même dosage, et qu'on opère une combustion et une détente également complète des produits de la combustion. Prenons le mélange à la température initiale de 300° absolus (27° centigrades) et sous la pression atmosphérique : la chaleur développée dans les différents cycles sera la même, mais les températures réalisées après explosion ou combustion différeront beaucoup, pour des causes diverses et surtout par suite des compressions inégales qu'on aura pratiquées. C'est en cela que réside l'intérêt majeur de cette démonstration.

Dans un moteur à explosion sans compression, genre Lenoir, l'explosion du mélange correspond à la ligne AB, partant de l'état initial, à la température de l'air extérieur $t=300^\circ$, pour lequel nous faisons l'entropie égale à zéro, et aboutissant à l'état B, à la température T développée par l'explosion. Le phénomène ayant lieu à volume constant, nous avons :

$$S = c \log' \frac{T}{t}$$

T se calcule par les éléments de la composition du mélange.

La détente adiabatique est figurée par la ligne isentropique BC, parallèle à l'axe des températures ; le point C doit être tel que le mélange soit ramené à son état initial par une soustraction de chaleur effectuée sous pression constante. La ligne CA qui ferme le cycle est connue par conséquent et elle a pour équation :

$$S = C \log' \frac{T}{t}$$

La surface MABN représente la chaleur développée par l'explosion ; l'aire ABC montre quelle part a été transformée en travail ; la chaleur rejetée par la décharge est figurée par l'aire MACN.

Mais passons au moteur à explosion avec compression ; le cycle commence par une compression adiabatique, qui élève la température sans augmenter l'entropie. Appelons η le degré de compression, et θ la température à la fin de la compression ; nous savons d'abord que :

$$\left(\frac{\pi}{H}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = (\eta)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \frac{\theta}{t}$$

L'isentropique de compression est donc la droite AA' : puis vient l'explosion à volume constant, figurée par la ligne A'B' et représentée par l'équation :

$$S = c \log' \frac{T}{\theta}$$

On passe aisément de la courbe AB à la courbe A'B' en observant que les points des deux courbes, ayant même abscisse, correspondent à des températures proportionnelles à $\frac{t}{\theta}$.

Comme la même quantité de chaleur a été développée sur AB et sur A'B', nous pouvons écrire :

$$\text{aire } M A' B' N' = \text{aire } M A B N$$

La température B' est d'ailleurs plus grande que B, car il y a même différence entre les températures T' et θ qu'entre T et t :

$$T' - \theta = T - t$$

Les températures étant plus grandes, il faut donc que l'entropie soit moindre, sinon l'on n'aurait pas l'égalité des aires M'A'B'N' et MABN. Il faut par suite que MN' soit plus petit que MN.

Le cycle se ferme par la ligne B'C' et par la courbe C'A.

Nous voyons ainsi que la compression a pour effet de conduire à une température plus faible en C' qu'en C, à la fin de la détente.

De même, la chaleur perdue à la décharge est moindre, car MAC'N' est plus petit que MACN. Il faut donc que le rendement soit plus grand; il sera du reste d'autant meilleur que la compression initiale aura été plus forte.

C'est ce que nous voulions démontrer.

Le diagramme entropique d'un moteur à quatre temps a par conséquent la forme AA'B'C'A; qu'on le compare à celui qu'on obtient par transformation d'un diagramme en $p v$, relevé sur un moteur en marche (1), et l'on verra que les déformations ne sont pas grandes.

Une augmentation de compression fait croître la ligne AA' et fait remonter d'autant le point B', sans modifier la ligne AC'; l'aire AA'B'C'A augmente donc et par suite aussi le travail.

1. On pourrait construire directement cette courbe en augmentant les ordonnées de AC proportionnellement au rapport $\frac{\theta}{t}$

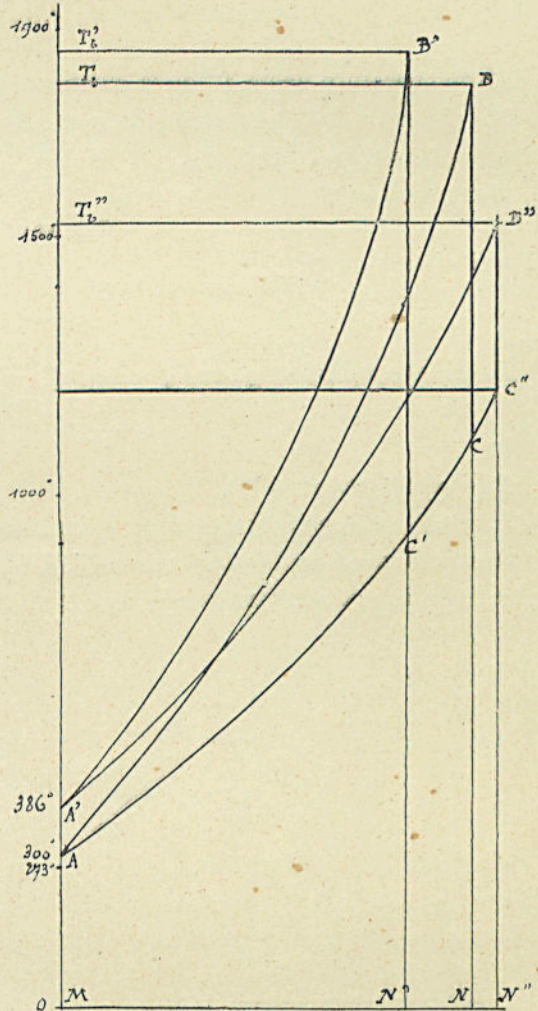


Fig. 83.

C'est la seconde démonstration que nous voulions faire.

Abordons maintenant l'étude des moteurs à combustion.

Nous débutons par la compression qui nous conduit comme précédemment au point A'; puis il se produit une combustion à pression constante, représentée par la ligne A'B'', dont l'équation est :

$$S = C \log' \frac{T}{\theta} \quad (2)$$

La température finale T'' de la combustion en B'' peut se déduire de la valeur calculée ci-dessus de θ , par la condition que la quantité de chaleur engendrée dans les deux opérations est la même.

On pose donc :

$$Q = C (T'' - \theta)$$

d'où il vient :

$$T'' = \theta + \frac{Q}{C}$$

La courbe a dès lors pour équation :

$$S = C \log' \left(1 + \frac{Q}{C\theta} \right)$$

Elle est figurée en A'B''.

Le cycle est donc représenté par le contour AB''C''; la température T'' est manifestement moindre que T' et même que T. Il faut dès lors pratiquer une compression plus forte pour obtenir un rendement égal à celui des machines du second genre à

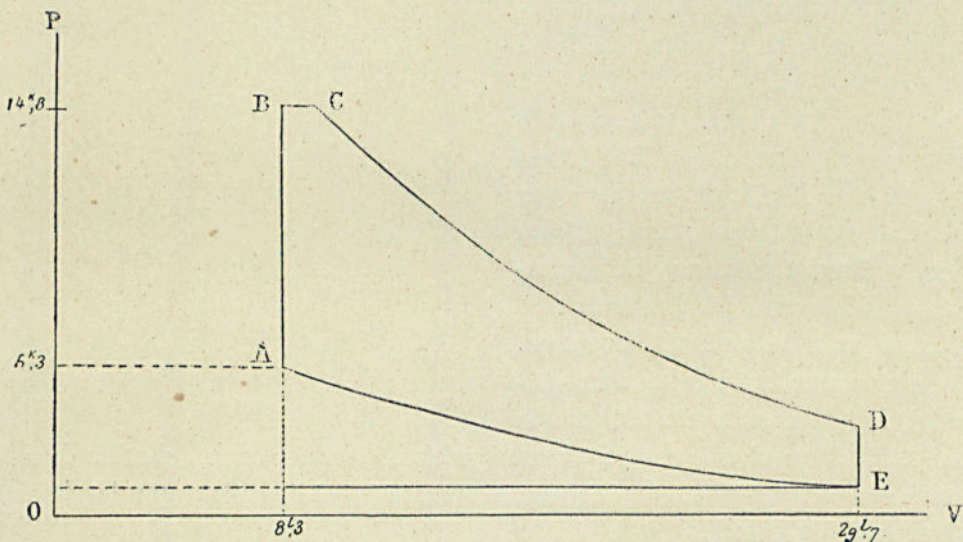


Fig. 84.

explosion : mais, comme la combustion s'opère à pression constante, la pression maximum du cycle ne dépasse pas celle de la compression initiale.

Ces considérations sont entièrement à l'avantage des moteurs à combustion ; elles confirment les conclusions déduites de notre théorie générique.

Ce qui précède permet d'apprécier l'avantage qui résulte de l'étude du diagramme entropique pour l'analyse des cycles.

M. Boulvin a appliqué le procédé à la discussion d'essais faits par M. Kennedy sur les moteurs Crossley.

Le diagramme pv avait la forme de la figure 84; on le voit en ABCDEA. Le volume de l'espace nuisible étant connu, on détermine pour chaque point du diagramme, la température des gaz, au moyen de l'équation.

$$pv = \text{const.}$$

M. Boulvin déduit, de ce diagramme moyen des expériences Kennedy, les températures aux divers points.

T en A est égal à	373°	absolus
en B — à	600°	—
en C — à	1610°	—
en D — à	1940°	—
en E — à	1205°	—

Pour construire le diagramme entropique, il faut déterminer K pour la compression EA et la détente CD.

Sur EA	K = 1,380
Sur CD	K = 1,435

Ce sont les valeurs pratiques de γ , supérieures à la valeur théorique et sensiblement différentes en compression et en détente.

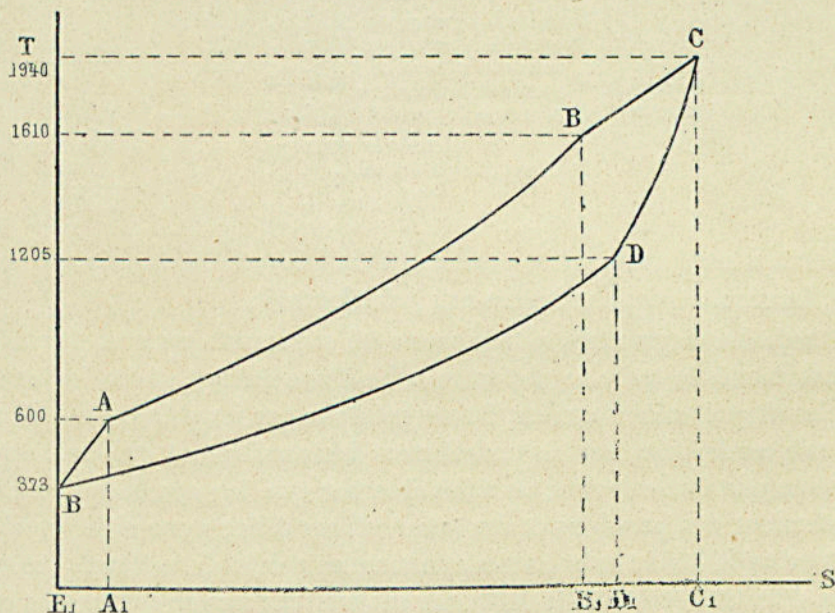


Fig. 85.

On calcule $S-S'$ par l'équation $c \frac{K-\gamma}{K-1} \log \frac{T}{T'}$; le premier facteur devient c pour les lignes à volume constant et C pour les lignes à pression constante.

M. Boulvin fait $c = 0,28$ et $C = 0,215$.

On arrive ainsi au diagramme entropique de la figure 85, qui ne diffère pas notablement du diagramme théorique donné précédemment. Mais l'hypothèse adiabatique ou isentropique n'est pas réalisée sur AB et CD, comme c'était prévu.

Voici les résultats qui ressortent de l'examen de ce graphique.

Sur les lignes AB correspondante à la température d'explosion, et BC, correspondante à la combustion à pression constante, le diagramme accuse 9,95 calories; le calcul donne 11,20 calories en supposant une admission de 0 gr., 998 de gaz, un poids spécifique de 0 kil., 495 par mètre cube et un pouvoir de combustion de 5.677 calories. Si ces chiffres sont exacts, ce qu'il est assez difficile de contrôler, la perte par les parois aurait été de 1,25 calorie.

En détente, le long de CD, la paroi a encore cédé 1,72 calorie; elle a pris au contraire 0,345 calorie en phase de compression sur EA.

Sur DE, il s'est perdu à la source inférieure 5,675 calories.

La chaleur transformée en travail est mesurée par la surface même du diagramme entropique; elle correspond à l'excès de la chaleur reçue dans la combustion, ou abandonnée par les parois, sur la chaleur cédée aux parois ou rejetée au dehors par la décharge.

La quantité de chaleur transformée en travail est de 2,90 calories.

Tous ces résultats sont présentés synoptiquement dans le tableau suivant :

Chaleur disponible 11,200 calories	}	1° cédée à la paroi sur ABC : . . . 1,25 cal.	}	+ 8,645 c.	
		2° cédée à la paroi sur CD : . . . 1,72			
		3° { cédée à la paroi . . . } sur DE: 5,675 —			
		4° reprise à la paroi sur EA : . . . 0,345 —			— 0,345
		Total des pertes :			+ 8,300
		5° Convertie en travail		2,900	
		Balance		11,200	

M. Boulvin a appliqué le même procédé à l'essai fait par M. Capper sur un moteur Crossley; les résultats sont analogues aux précédents (1).

La méthode des diagrammes entropiques a été condamnée par quelques théoriciens qui se sont donnés la tâche de passer au crible d'une critique sévère les travaux faits pendant les vingt dernières années. On a argué de ce que les phénomènes d'explosion, ou même de combustion, sont essentiellement irréversibles et que par conséquent l'entropie ne peut être calculée; on a fait observer que les courbes d'indicateur ne représenteraient des pressions et des températures définies que si la pression et la température avaient une même valeur en tous les points du mélange, ce qui n'est pas; on a démontré que toute la différence entre la chaleur de combustion et la chaleur reprise par les gaz brûlés, ou cédée à la paroi, n'est pas nécessairement transformée en travail extérieur, car il est survenu des variations de nature du mélange gazeux dans lesquelles de la chaleur a pu être absorbée par un travail interne; on a

1. Boulvin. — « Revue de Mécanique appliquée », février, 1897.

reproché aux maîtres qui ont tiré un si heureux parti des diagrammes entropiques de négliger le travail de la viscosité et du frottement des gaz, etc.

M Brunhes a discuté ces critiques dans une note substantielle ⁽¹⁾ dont les considérants sont marqués au coin d'un grand sens pratique; faisant la part de ce qu'il y a de fondé dans l'objection, il a relevé ce qu'elle avait d'exagéré et il a mis en lumière les avantages de cette méthode qui « permet de voir d'une façon plus intuitive et plus simple, bien des choses qui se trouvent vraies ». M. le professeur Stodola, de Zurich et M. Eddy, de Minneapolis, ont rendu le même témoignage à l'utilité pratique des diagrammes entropiques ⁽²⁾. Nous partageons l'avis de nos distingués collègues.

1. B. Brunhes. — « Quelques propriétés des moteurs à gaz étudiées par le diagramme entropique; sur l'entropie d'un mélange gazeux en combustion, *Journal de physique*, mai, 1901.

2. Stodola. — « Die Kreisprocesse der Gasmachine; Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure », tome XLII; 1898. Eddy. — « A new graphical Method of constructing the entropy temperature diagram of a gas Engine, American society of mechanical Engineers », décembre, 1899.

CHAPITRE SIXIÈME

THÉORIE EXPÉRIMENTALE DES MOTEURS A GAZ

C'est Hirn qui a créé la théorie expérimentale des machines thermiques ; il l'a définie en disant que c'est une théorie qui considère les choses comme elles sont en réalité, en cherchant à tenir compte du rôle que jouent les divers éléments du moteur en vertu de leurs propriétés physiques ; il l'a opposée à la théorie générique qui voit les choses comme elle les suppose, qui admet gratuitement des lois simples, et néglige à dessein un certain nombre de facteurs internes et externes, venant modifier les lois et compliquer les résultats. Cette dernière méthode a pu fournir de précieuses indications et elle a conduit à la découverte de théorèmes généraux ; mais l'expérience seule peut sanctionner ses conclusions et en démontrer la rigoureuse exactitude.

Les deux théories contribuent, sans doute, également au progrès des moteurs ; la première, fondée sur la thermodynamique, fait germer des idées et provoque des recherches ; la seconde, basée sur l'expérimentation, contrôle la première, la vérifie ou l'infirmes et lui sert souvent de frein et de correctif. Mais c'est cette dernière qui fournit le *critérium* absolu de nos jugements et de nos interprétations dans ce domaine : elle analyse et groupe des faits dûment constatés en se gardant le plus possible des conclusions dogmatiques ; ses résultats immédiats sont et restent indiscutables, les déductions qu'elle en tire pourraient seules être combattues.

L'établissement d'une théorie expérimentale est une œuvre difficile et de longue haleine ; l'histoire de la machine à vapeur en est la preuve. Elle ne peut être l'œuvre d'un seul homme, ni même d'une seule école ; elle demande à être appuyée sur des expériences répétées dans les conditions les plus variées, sur des machines de tous systèmes, à l'aide d'appareils divers et par des méthodes différentes. La théorie expérimentale du moteur à gaz n'est pas encore faite, c'est évident ; elle n'est guère encore qu'ébauchée, et les premiers résultats obtenus fourmillent encore de contradictions et d'incohérences. Que cela ne décourage pas ceux qui se sont adonnés à cette rude tâche ; quelque compliqués que soient ces phénomènes explosifs par lesquels s'actualise l'énergie du mélange tonnant, quelque considérables que soient les actions des parois, les phénomènes de dissociation, etc., quelque ardues que soient les observations et les mesures, la théorie pratique s'établira enfin et elle nous mettra en possession de la meilleure formule à appliquer pour aboutir aux rendements les plus élevés.

Nombreux sont les pionniers qui ont porté la pioche dans ce sol, vierge encore il y a vingt ans, et qui ont contribué à le défricher : leurs successeurs auraient tort d'ou-

blier ces premières tentatives de MM. Tresca, Schœttler, Steward et Brooks, Mallard et Le Chatelier, Dugald Clerk, Ayrton et Perry, Schröter. Slaby, Kidwell et Keller, Salanson et Debuchy, Donkin, Ebbs, Meyer, Letombe, Unwin, Kœhler, Stodola, Lencachez, Banki, Boulvin, Kennedy, Burstall, Moreau, etc.; je voudrais n'oublier personne.

Il y a deux manières de diriger les expériences, qui ont pour objet d'établir une théorie expérimentale; on peut, en effet, procéder par analyse ou par synthèse.

La méthode analytique consiste à faire varier tour à tour les diverses conditions du fonctionnement d'un moteur, compression, vitesse, fréquence et nombre des explosions, température des parois, composition du mélange, etc., et à comparer les résultats obtenus; cette méthode fournit certainement des données intéressantes et utiles, mais elle ne permet pas de découvrir les lois générales aboutissant à la marche la plus économique des moteurs, car il est extrêmement difficile de dégager des conclusions certaines de cet amas de résultats souvent contradictoires. Alors même que, pour un moteur déterminé, ces lois sembleraient découvertes, elles seraient contables pour un autre type de moteurs; démontrées pour un gaz de composition déterminée, elles pourraient être fausses pour une autre nature de gaz combustible. C'est en cela surtout que le moteur à gaz diffère du moteur à vapeur.

Il est plus rationnel de procéder par voie synthétique; voici ce que j'entends par ces mots. La théorie, ou bien certaines expériences de laboratoire, exécutées dans des conditions déterminées et fort simples, conduisent à formuler des lois; telles sont les lois énoncées par M. Dugald Clerk, par MM. Ayrton et Perry, par M. Grover, par M. Salanson ou par d'autres. Ces lois se vérifient dans des cas déterminés, pour certains moteurs, pour des gaz de nature définie, mais il peut arriver qu'elles soient fausses dans d'autres cas: elles sont fausses alors, parce que d'autres influences interviennent dans le phénomène observé. L'objet des recherches doit être de découvrir quand et pourquoi la loi cesse d'être la loi du phénomène. Le but qu'on se propose est alors limité, le domaine exploré est plus étroit et l'on a plus de chances d'aboutir à quelque chose; le problème présente certes encore d'énormes difficultés, et l'on n'est pas sûr de trouver une solution en dépit des plus longues et des plus patientes recherches, mais du moins a-t-on l'avantage de bien savoir ce que l'on veut; une solution négative constitue elle-même un progrès.

Les vérifications d'une loi admise comme point de départ ne doivent pas être faites sur un seul moteur, mais sur de nombreux types et sur de nombreux modèles, et dans les conditions les plus diverses de la pratique: ce n'est pas le travail d'un seul homme, ni d'un seul comité, ni d'une année, ni peut-être même d'une vie entière, mais c'est le travail de tous, patiemment continué pendant un long intervalle de temps, qui pourra conduire à élucider les points douteux de la théorie et de la pratique, et qui nous fera découvrir les moyens les meilleurs pour produire le plus de travail par unité de chaleur disponible dans les moteurs à gaz. Chaque chercheur ne pourra espérer qu'apporter une pierre au grand édifice qui se construit et s'élève par les efforts de tous.

Il ne s'agit pas, comme on voudrait le faire croire, d'attendre uniquement la lumière des laboratoires d'enseignement, établis à grands frais dans les Universités et les Ecoles Techniques (1) : certes, il serait désirable qu'on pût mettre à Paris, à Londres, à Berlin, à Munich, etc., une machine à vapeur et un moteur à gaz à la disposition d'un professeur savant, actif, persévérant, ingénieux, qui poursuivrait sur ces machines une série de belles expériences, destinées à éclaircir des points douteux et à trancher une question controversée. Mais il ne faut rien exagérer : ce n'est pas ainsi que s'édifiera la théorie expérimentale du moteur à gaz, pas plus que ne s'est établie ainsi la théorie de la machine à vapeur. Le laboratoire de Hirn était au Logelbach, dans un établissement industriel ; les machines qu'il étudiait n'étaient pas de petites demi-fixes de 10 chevaux, mais de puissants moteurs de 300 et 500 chevaux : c'est ainsi qu'il a fait progresser la science. Les essais effectués par MM. Schöttler, Donkin, Meyer, auxquels je demande la permission de joindre mon nom, sur de puissants moteurs d'atelier, ont été plus profitables que celles qu'il nous eût été loisible de faire sur un petit moteur de 6 ou 8 chevaux d'un laboratoire d'Université.

Pour établir une théorie expérimentale fructueuse, nous devons d'abord définir les différences qui existent entre les cycles théoriques fictifs admis par la théorie générique et les cycles réels parcourus par le gaz dans les moteurs en service industriel ; nous chercherons ensuite à démêler, dans les phénomènes complexes qui se passent dans les moteurs, les actions externes ou internes, dont la théorie générique n'a pu ou voulu tenir compte ; enfin nous chercherons dans quelle mesure se vérifient en pratique les lois expérimentales que nous aurons été amenés à formuler.

I

Imperfections des cycles réels.

Après avoir considéré les cycles tels qu'ils devraient être, nous allons chercher à les voir tels qu'ils sont.

Les cycles, parcourus par les moteurs, sont bien correctement ceux que nous avons définis : mais ils subissent des déformations nombreuses, qui produisent dans le rendement un abaissement dont il faut se rendre compte.

Nous avons fait les hypothèses suivantes :

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

1. Les laboratoires d'enseignement sont absolument nécessaires pour former des élèves : mais la science profite moins que l'enseignement de la création de ces laboratoires.

4° La détente s'effectue suivant une adiabatique, sans perte ni gain de chaleur ; et l'exposant γ a la même valeur en détente qu'en compression ;

5° La détente est complète ;

6° Il ne s'exerce pas de contrepression sur le piston dans sa période de retour vers sa position primitive ; le diagramme se ferme donc par une parallèle à l'axe des volumes, sous une pression constante égale à l'atmosphère.

Or, ces conditions ne sont pas réalisées dans la pratique, ainsi qu'il ressort de la comparaison des diagrammes théoriques et réels.

Prenons le moteur primitif de Lenoir comme type des moteurs à explosion sans compression ; les moteurs Atkinson, Clerk, Otto et Simon représentent bien les divers genres de moteurs à compression ; enfin les machines atmosphériques correspondent à la machine Langen et Otto.

Les figures ci-contre reproduisent exactement les diagrammes relevés sur ces moteurs à l'aide de l'indicateur Richard. J'ai supprimé les oscillations produites par le lancé du piston ; elles sont presque inévitables dans les machines à marche rapide, quel que soit le soin avec lequel les constructeurs de ces ingénieux instruments s'efforcent de réduire l'inertie des pièces mobiles.

Le diagramme du moteur à air dilaté Lenoir (fig. 86) montre que l'aspiration du mélange a lieu à une pression moindre que l'atmosphère ; l'arrondi et l'inclinaison de la ligne d'explosion témoignent d'une combustion qui ne se fait ni instantanément, ni à volume constant ; la pression des gaz refoulés est d'autre part un peu supérieure à la pression atmosphérique.

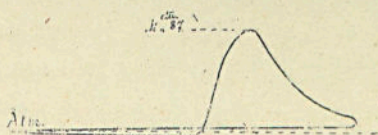


Fig. 86 — Diagramme Lenoir.

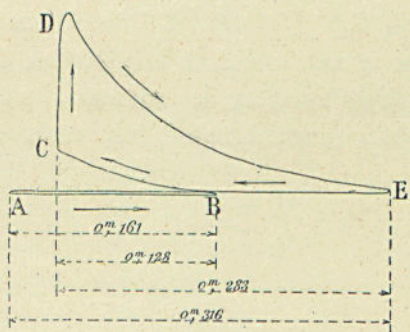


Fig. 87. — Diagramme Atkinson.

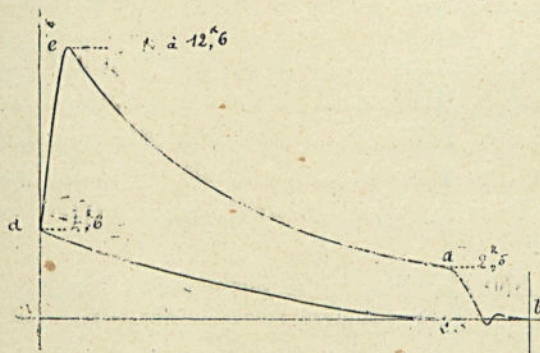


Fig. 88. — Diagramme Dugald Clerk.

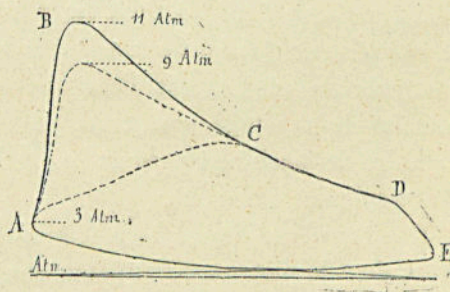


Fig. 89. — Diagramme Otto.

Dans le moteur Atkinson, à compression préalable avec détente complète, conséquence de la réduction de la course de compression (fig. 87), nous trouvons les mêmes imperfections, mais à un degré moindre.

Les figures 88 et 89 nous montrent des diagrammes du second type à deux et à quatre temps, des systèmes Dugald Clerk et Otto.

Dans le premier de ces moteurs, l'aspiration a lieu dans un cylindre auxiliaire, qui commence la compression, laquelle se poursuit jusqu'en *d* dans le cylindre moteur ; l'explosion et la détente s'étant produites, il y a expulsion des gaz brûlés de *a* en *b*.

Dans le moteur Otto, les quatre phases du cycle, aspiration du mélange tonnant, compression, explosion et détente, et enfin décharge des gaz brûlés s'effectuent dans le cylindre moteur ; c'est la marche à quatre temps. Le diagramme de la figure 89 montre de nombreuses imperfections, explosion non instantanée, sur AB, quelquefois très lente, comme en AC, détente interrompue par une avance à l'échappement DE, refoulement des gaz à l'atmosphère avec notable compression.

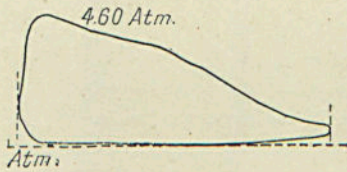


Fig. 90. — Diagramme Simon.

Ce n'est pas sans difficulté qu'on reconnaît dans le diagramme Simon (fig. 90) (1) le cycle théorique à combustion qui a servi de base à nos calculs, tant les lignes présentent d'arrondis et d'incorrections. Signalons particulièrement la portion du diagramme qui correspond à la combustion du gaz à pression constante ; elle est fortement inclinée sur l'axe des volumes. Le diagramme du moteur Gardie (fig. 91) est beaucoup plus correct à cet égard, mais nous constatons une contrepression notable à

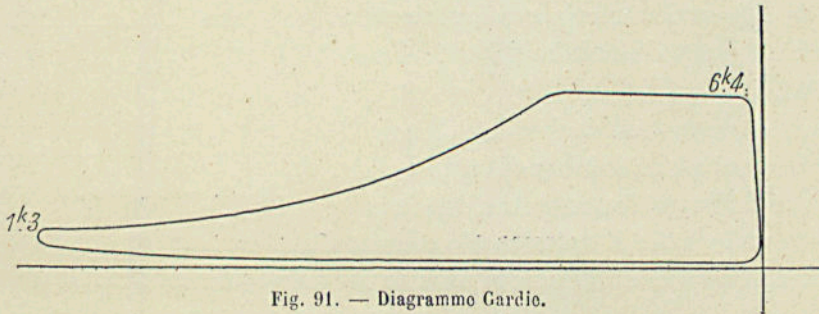


Fig. 91. — Diagramme Gardie.

l'échappement. Dans les deux diagrammes ci-dessus, la détente est presque complète. Il est à noter que les deux moteurs Simon et Gardie étaient à deux temps, et que la compression s'effectuait dans un cylindre auxiliaire, qui alimentait le cylindre moteur de mélange comprimé de la même façon qu'une chaudière alimente un cylindre de machine à vapeur : la courbe de compression est donnée par le diagramme de ce cylindre auxiliaire.

Il est particulièrement difficile de relever le diagramme des moteurs Langen et Otto, dont le piston est libre dans son ascension : le tracé de la figure 92 est la reproduction de celui qui est donné dans le remarquable travail de M. Dugald Clerk (2). La

1. La figure 90 a été dessinée d'après le diagramme relevé sur un moteur Simon par M. Slaby ; son travail est à lire in « Sitzungsbericht des Vereins zur Beförderung des Gewerbflusses », 3 avril 1884. J'ai relevé moi-même le diagramme de la figure 91.

2. « On the Theory of the Gaz engine », p. 33, figure 42, 4^{re} édition.

partie ombrée est seule utilisée pour produire du travail. La chute de pression est extrêmement rapide : le vide maximum est de près de $\frac{2}{3}$ d'atmosphère ; les gaz brûlés subissent une légère compression avant d'être expulsés. La détente des gaz est complète dans ce cycle et cette condition, qu'aucun autre moteur ne réalise au même degré, suffit pour expliquer l'étonnant succès de cette curieuse machine, en 1867. La rapidité de la détente dans la première période du cycle est un autre élément qui contribue à l'excellence du rendement : le piston est lancé vers le haut du cylindre comme un véritable projectile.

Nous allons étudier successivement l'influence exercée, au point de vue de l'utilisation du calorique, par les imperfections du cycle manifestées dans les diagrammes ci-dessus.

Et d'abord, occupons-nous des conséquences de la non-instantanéité de l'explosion : elle se marque par une inclinaison plus ou moins grande de la ligne d'ascension de la courbe, par son incurvation et par des arrondis du sommet du diagramme ; elle a pour conséquence une réduction des pressions et des températures maximum. La surface du diagramme se trouve par suite nécessairement diminuée et cette première imperfection du cycle n'est certes pas une des moins importantes parmi celles que nous avons à signaler. Il faut renoncer à l'exprimer en valeur absolue pour tous les moteurs, car il faudrait faire des calculs spéciaux pour tous les cas de la pratique : mais il est facile de reconnaître que cette perte est d'au moins 5 pour cent pour un moteur Lenoir primitif sans compression ; elle est moindre dans les moteurs à compression.

La pression explosive est d'autant plus grande et elle s'établit d'autant plus vite que le mélange tonnant est plus riche, la combustion plus rapide et les causes d'atténuation moins actives : l'action de paroi est la plus énergique de ces causes, et c'est pour ce motif que nous voyons, dans le diagramme Langen et Otto mieux que dans tout autre, la courbe s'élever presque parallèlement à l'axe des pressions. La pression explosive atteint dans ce moteur 7 atm., 4 alors qu'elle reste inférieure à 5 atmosphères dans le moteur sans compression de Lenoir ; dans ce dernier, l'arrondi du sommet du diagramme montre aussi que la combustion n'était pas achevée au moment du maximum de pression. Dans le moteur Hugon, à injection d'eau, la pression ne dépassait par 3 atm., 78 et la température correspondante était tout au plus égale à 1050° absolu : l'introduction de l'eau dans le cylindre était la principale cause de cet écart si considérable entre la théorie et la pratique ; les facilités de graissage et le travail gagné en détente devaient, il est vrai, compenser les effets de cette imperfection du cycle.

La compression préalable active visiblement la rapidité de la combustion explosive

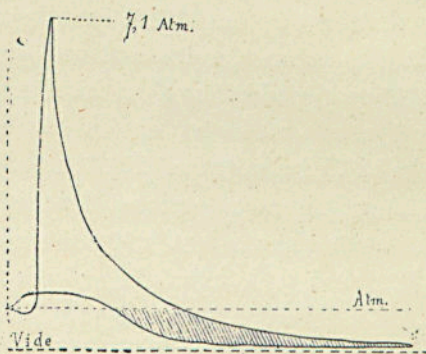


Fig. 92. — Diagramme Langen et Otto.

pour les raisons rappelées ci-dessus : ainsi dans le moteur Dugald Clerk, comprimant à 4 kilogrammes, la pression maximum dépasse 15 atmosphères et la température des gaz a été évaluée à 1810° absolus.

Autrefois, quand on ne comprimait guère qu'à 2 ou 3 kilogrammes, la pression explosive était beaucoup moindre qu'aujourd'hui : MM. Brooks et Steward, essayant un moteur Otto, en 1884, dans lequel un mélange à 7 volumes d'air était comprimé à 2 kilogrammes, relevaient une pression maximum de 9^k,3 et une température de 1410° centigrades ; le calcul faisait prévoir 13 kilogrammes et 1654°. Dans un moteur Tangye très moderne, expérimenté par moi en 1902, un mélange à 7 volumes comprimé à 7^k,1 développait 26^k,3 ; un moteur Niel, à haute compression, mais à mélange dilué relativement pauvre, donnait une foulée puissante de 29 kilogrammes ; il faut noter que ces deux moteurs avaient une consommation très réduite.

Passons à la deuxième imperfection des cycles réels : la combustion est incomplète. Ce fait a été signalé pour la première fois, à ma connaissance, par M. Bousfield, à la Société des Ingénieurs civils de Londres, le 4 avril 1882 : cet ingénieur a déclaré que les gaz de la décharge d'un moteur Otto restaient parfois explosibles et qu'ils pouvaient donner lieu à une faible détonation en passant sur un brûleur. Je n'ai pas eu l'occasion de vérifier ce phénomène, qui peut du reste être attribué à un coup raté : mais j'ai mis la combustion incomplète hors de doute, en faisant détoner les gaz soi-disant brûlés avec un certain volume de gaz de la pile, suivant la méthode de Bunsen : j'y ai constaté souvent la présence de l'oxyde de carbone. Toutefois la perte qui en résulte est généralement faible, car la quantité de gaz non brûlé est minime, lorsque l'allumage est normal.

La troisième supposition que nous avons faite est absolument inexacte : nous avons admis qu'il ne se perdait pas de calorique par la paroi ; or, il se dissipe en réalité une très notable portion du calorique rendu disponible par la détonation. Nous avons un procédé très simple pour évaluer la perte correspondante ; il consiste à calculer la quantité de chaleur emportée hors du cycle par l'eau de circulation de l'enveloppe du cylindre. Cette enveloppe joue le rôle du réfrigérant d'une façon continue, pendant toute la durée des opérations ; ce rôle, qui est inévitable et prévu dans la seconde période des transformations, est nuisible dans la première. Voyons dans quelle mesure.

Dans des expériences que j'ai faites en 1883 sur un moteur Otto de 4 chevaux j'ai constaté que, sur 6250 calories disponibles dans cette machine, il en passait 2232 à l'enveloppe, soit 35 pour cent. Une portion de ce calorique a pu être reprise aux gaz dans les phases de compression et de décharge ; mais la majeure partie de cette chaleur est soustraite aux gaz dans la période de détente, au détriment du travail développé par eux. L'intervention des parois froides est donc nuisible ; elle se traduit par une perte sensible, qui correspond à une grave imperfection du cycle. Tresca avait trouvé une perte de 66 pour cent dans un petit moteur Hugon : je pense que c'est le chiffre le plus fort qui ait été relevé. Dans un Otto de 7 chevaux effectifs, Brooks et Steward ont évalué la perte par circulation à 52 pour cent, et Haber et Weber l'ont estimée à

53 pour cent dans un Otto de 4 chevaux. Les fortes compressions pratiquées dans la suite ont fait baisser ces chiffres: dès 1885, mes essais du Simplex de Delamare-Deboutteville et Malandin me faisaient constater que l'eau de circulation emportait 40 pour cent du calorique disponible; plus tard M. Capper indiquait 38,9 pour un Crossley de 7 chevaux. Mais voici mieux encore: dans un Otto de 80 chevaux, alimenté de gaz pauvre, M. Meyer ne trouvait plus que 26 pour cent; on ne peut guère tomber en dessous.

D'après M. Schröter, un Diesel de 28 chevaux perd 40 pour cent par la paroi. En somme, dans les moteurs actuels, maintenus à une température d'enveloppe égale à 60° environ, la perte moyenne est de 35 à 40 pour cent (1).

Cette perte peut être atténuée, mais non supprimée: il faut s'y résigner. C'est la principale imperfection qu'il est le plus difficile de réduire, car on ne peut point se passer d'enveloppes d'eau froide dans les moteurs dont la force est supérieure à 4 chevaux. Il faut en effet nécessairement rafraîchir le cylindre, sinon l'on atteindrait des températures incompatibles avec la bonne marche des appareils, ou bien l'on se verrait obligé à une dépense effrayante d'huile de graissage. Les cylindres peuvent être munis d'ailettes ou de nervures; mais le résultat est toujours le même à l'intensité près. Le moteur à gaz se trouve par conséquent dans des conditions absolument inverses de celles de la machine à vapeur: dans cette dernière, on entoure le cylindre d'une chemise de vapeur dans le but de maintenir la température de la paroi au degré le plus élevé, pour améliorer le rendement; dans le moteur à gaz, on se voit obligé de refroidir cette paroi le plus possible, au grand détriment du rendement, pour assurer la conservation des organes de la machine. On peut faire remarquer, il est vrai, que si l'enveloppe d'eau froide exerce une action nuisible dans la période de détente, en soutirant de la chaleur sans la transformer en chaleur, elle peut au contraire devenir utile dans la phase d'évacuation, parce qu'elle remplit alors la fonction de réfrigérant; mais cet effet est moins marqué que le premier, par suite des moindres écarts de température entre les gaz et le métal dans cette période.

La quatrième déformation des cycles consiste dans l'allure des courbes de détente qui ne répondent pas à la définition des adiabatiques. Comment en effet les produits de la combustion pourraient-ils se détendre, sans perte ni gain de chaleur, dans une enceinte métallique conductrice? C'est manifestement impossible. Nous avons donc fait ci-dessus une hypothèse inadmissible; mais il serait extrêmement difficile d'évaluer la perte qui résulte de cette imperfection, car nous avons affaire ici à un phénomène très complexe.

Le rapport théorique des deux chaleurs spécifiques des gaz brûlés est égal à 1,30 à la température élevée à laquelle se produit la détente: la courbe devrait donc répondre à l'équation $pv^{1,30} = \text{constante}$. En réalité, l'exposant est toujours plus fort, et il peut s'élever au-dessus de 1,50: la courbe est donc toujours au-dessous de l'adiabatique et il en résulte un déchet qu'on cherche à apprécier par la diminution correspondante de l'aire du diagramme. Cet effet est dû surtout à l'action refroidissante de la paroi et

1. Nous reviendrons longuement sur ces divers phénomènes, que nous signalons ici d'une manière générale.

à la déperdition du calorique ; il est inévitable. Toutefois l'examen des diagrammes des divers types de moteurs nous démontre que la perte est très inégale. C'est dans les moteurs du premier groupe qu'elle est la plus considérable : ainsi dans le moteur primitif Lenoir la courbe était très en dessous de l'adiabatique. Elle se rapproche davantage de la ligne théorique dans la plupart des moteurs à explosion, à moins que la combustion n'y soit retardée par une extrême dilution du mélange.

La valeur de γ en compression est différente de la précédente, parce que la température des gaz n'est pas la même : nous avons donc adopté une hypothèse inexacte en prenant une même valeur de γ pour la compression et la détente. En réalité, la courbe de compression réelle est inférieure à l'adiabatique théorique ; c'est encore une conséquence de l'action de paroi, mais celle-ci est plutôt favorable au rendement, car le travail de compression est, par le fait, très légèrement diminué.

Nous étudierons dans la suite les variations de γ et nous chercherons à en déterminer les causes réelles.

Les détentes incomplètes constituent la cinquième déformation des cycles théoriques : ce point n'a pas besoin d'être développé. Il est évident qu'en ne détendant pas les fluides jusqu'à la pression de l'atmosphère, on n'utilise pas toute l'énergie disponible et qu'on porte au réfrigérant, c'est-à-dire à la décharge, des gaz trop chauds dont la chaleur est perdue par le fait.

L'absence de contrepression ressortait de la manière même dont les cycles se fermaient après détente complète : nous supposons en effet que les gaz étaient ramenés à leur état initial, sous la pression constante de l'atmosphère, par soustraction de calorique, avant d'être rejetés à l'air extérieur. Cette condition n'est pas réalisée, et il en résulte une sixième imperfection des cycles.

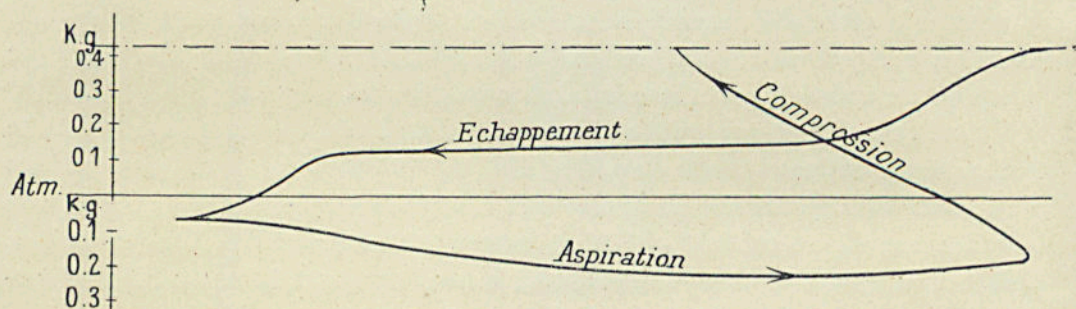


Fig. 93.

Le diagramme de la figure 93 nous montre combien les lignes d'aspiration du mélange et de refoulement des gaz brûlés sont loin d'être voisines de la ligne atmosphérique dans les moteurs à quatre temps. Il se produit à l'aspiration une dépression d'un quart de kilogramme et à la décharge une contrepression résistante de $0^k,2$ sur la majeure partie de la course. Ces divers phénomènes réduisent le travail utilisé dans le cycle ; cette influence n'est assurément pas grande, mais elle est appréciable.

Bien plus fâcheuse est la détérioration du cycle produite par le départ des gaz brû-

lés à haute température : C'est la cause de l'infériorité réelle des moteurs du genre Otto sur les Charon, les Heynen, les Letombe et autres.

Les gaz s'échappent toujours trop chauds ; Tresca leur trouvait 280° dans un moteur Lenoir et 186° dans un Hugon : Brooks et Steward ont relevé 432° dans un Otto et j'ai constaté des températures de 500°, voire même de 530° dans certains moteurs. Par contre, un Charon de 8 chevaux nous a donné 300° et un Letombe à double effet de 300 chevaux n'échappait qu'à 347°.

Ces différences notables sont tributaires de causes diverses, parmi lesquelles la richesse du mélange admis, le degré de détente et la réfrigération des parois sont prépondérantes ; mais il faut y joindre aussi le plus ou moins grand surmenage des moteurs, qui a pour effet d'élever considérablement la température de la culasse, des soupapes et du piston.

La chaleur emportée par les gaz de la décharge est toujours considérable ; son minimum est de 20 p. 100 de la chaleur disponible ; dans un excellent moteur Tangye, elle ne dépassait pas 23 p. 100 ; dans le moteur Diesel, elle atteint 27 ; dans le moteur Otto essayé par M. Meyer, elle montait à 54 p. 100, y compris les pertes par rayonnement, qui étaient sans doute de 5 p. 100. Ce même moteur ne perdait que 26 p. 100 par la paroi du cylindre : nous voyons ainsi que la chaleur emportée par les gaz croît, lorsque les calories prises par l'eau de réfrigération décroissent. Nous reviendrons sur ce fait qui est général.

On considère quelquefois ce départ de calories par l'échappement comme une perte sèche du moteur ; c'est une erreur, car cette chaleur est portée au réfrigérant, et on ne saurait ni éviter ce transport, ni même l'atténuer au delà d'une certaine limite.

Plus q grandit, plus le rendement $\frac{Q-q}{Q}$ s'abaisse, c'est vrai ; mais q ne peut tomber en dessous d'une certaine valeur limite, qui serait atteinte dans le cas d'une détente complète prolongée jusqu'à la pression atmosphérique.

En somme, les cycles réels sont imparfaits et le rendement pratique doit nécessairement être moindre que le rendement théorique. C'est ainsi que les moteurs à gaz, qui sont théoriquement à la tête des machines thermiques, n'ont pas marqué dès le début leur remarquable supériorité.

Tout le génie des inventeurs et des constructeurs devrait s'appliquer à rechercher le moyen de réduire ces imperfections des cycles.

Pour cela, il faut plus de théorie expérimentale que d'empirisme : la théorie est lumineuse, l'empirisme est aveugle, et, s'il arrive à quelque chose, c'est par tâtonnement ou par un hasard heureux.

Etablissons donc une théorie expérimentale solide et suivons ses indications.

II

De l'action de la paroi sur les combustions.

La paroi du cylindre joue un rôle considérable dans toutes les machines à feu.

Son action est bien connue dans la machine à vapeur : la vapeur d'eau qui afflue de la chaudière, rencontre une paroi de fonte parfaitement décapée et relativement froide, et elle se condense par contact immédiat. Le métal se recouvre par suite d'une couche liquide plus ou moins épaisse, laquelle se vaporise de nouveau pendant la détente. En somme, il y a condensation partielle pendant la durée de l'admission et évaporation pendant la détente et la décharge ; il en résulte un déchet qu'on ne peut atténuer que par l'emploi d'une enveloppe de vapeur vive, ou par la multiple expansion de la vapeur dans des cylindres étagés.

On réduit ainsi l'évaporation instantanée de l'eau, qui mouillait la paroi à la fin de la détente au moment où commence l'échappement au condensateur. « C'est, dit Hirn, la cause la plus désastreuse de perte de chaleur dans la machine à vapeur. »

L'action de paroi se produit aussi dans les moteurs à gaz, nous pouvons l'affirmer *a priori* : il ressort des considérations énoncées ci-dessus qu'elle est même beaucoup plus importante.

Nous avons vu en effet que l'eau de circulation emporte souvent la moitié de la chaleur totale de combustion du gaz dépensé. Tout le déchet qui résulte de l'imperfection du cycle, de la détente incomplète, de la décharge des gaz chauds et des résistances passives disparaît devant cette déperdition colossale. Aussi voyons ce qui se passe dans un bon moteur : alors qu'il est parfaitement construit, fort bien entretenu et admirablement conduit, sa consommation par cheval-heure indiqué est inférieure à 500 litres. Or, à vide, il consomme 120 litres par heure et par cheval nominal, soit près du quart de sa dépense normale ! Où passe le calorique dépensé ainsi pour mouvoir la machine sans produire un seul kilogrammètre de travail utile ?

Une bien minime partie est employée à surmonter les résistances passives du mécanisme.

Le reste passe au ruisseau avec l'eau de circulation.

Tel est l'effet de l'enveloppe d'eau dans les moteurs à gaz.

Malheureusement l'intervention de cet agent refroidissant s'impose aussitôt que l'on aborde les productions de forces considérables : on ne peut donc songer à supprimer la chemise d'eau ; mais on doit chercher à atténuer ses ruineux effets. Pour cela, il est nécessaire de connaître parfaitement les échanges de chaleur effectués entre les gaz et les parois : dans cette recherche, le physicien doit précéder l'ingénieur.

J'ai essayé de remplir le premier rôle (1).

1. Ce qui suit est une analyse sommaire de mes « Études sur les Moteurs à gaz tonnant », publiées chez M. Gauthier-Villars, brochure in-8°, 70 planches, avec planches et figures, 1883. Voir aussi ma conférence sur « l'action de paroi » à la Société industrielle du Nord, en 1883.

Il s'agissait de reproduire artificiellement, pour ainsi dire, les phénomènes d'explosion et de détente qui se succèdent derrière le piston des moteurs, en les faisant varier dans leurs principales circonstances.

A cet effet, j'ai opéré dans le cylindre de fonte dont je m'étais servi précédemment pour étudier le refroidissement des gaz et des vapeurs ; cet appareil a été décrit ⁽¹⁾ à plusieurs reprises et représenté par la gravure, ce qui me dispensera d'entrer dans de trop minutieux détails. Je me bornerai aux traits principaux.

Le cylindre, qui est disposé verticalement, a un diamètre intérieur de 200^{mm},¹ et une hauteur de 400 millimètres. Un piston libre, à garniture métallique de bronze, se meut dans ce cylindre, de bas en haut, sous l'action du mélange tonnant : sa course n'est que de 323 millimètres, attendu qu'il en a 77 d'épaisseur ; son poids est de 14^{kg} 500 ; la résistance au mouvement, produite par le frottement des cercles de bronze, équivaut en moyenne à une force d'environ 17 kilogrammes. L'effort à développer pour soulever le piston est donc de 31^{kg} 500. Le mouvement ascensionnel de ce piston peut être accéléré ou ralenti à volonté, grâce à un contrepoids et à un frein ; dans le premier cas, une corde attachée à l'extrémité de la tige et enroulée sur une poulie transmet au piston la force vive d'une masse de 75 kilogrammes tombant le long d'un coulisseau ; dans le second cas, un collier de pression fait frein sur la tige et permet d'enrayer tout mouvement, s'il devient nécessaire de le faire.

Grâce à ce double dispositif, la vitesse du piston et, par suite, la rapidité de la détente se trouve à la disposition de l'opérateur, et il peut la faire croître de 0^m,25 à 10 mètres par seconde.

Le mélange tonnant est admis sous le piston à travers un robinet dont la manœuvre est aisée ; des crans de repère, tracés sur la tige du piston indiquent le volume de gaz enfermé dans le cylindre et permettent de le jauger avec une exactitude suffisante. Le mélange est enflammé par l'étincelle d'une forte bobine d'induction, jaillissant au fond d'une petite cavité ménagée dans la paroi du cylindre. L'explosion a lieu et projette le piston vers la partie supérieure : des événements ménagés au couvercle livrent issue à l'air comprimé ; en les fermant, on constitue un *dashpot* qu'on peut utiliser pour amortir le choc du piston et atténuer l'ébranlement qui l'accompagne toujours. Le piston s'arrête lorsque le travail résistant de la pression atmosphérique, celui de son propre poids et celui des frottements ont absorbé sa force vive : il redescend lentement, au fur et à mesure du refroidissement et de la condensation des produits de la combustion.

Les pressions développées sous le piston sont mesurées par un appareil Richard, monté sur le cylindre et commandé par un cordon attaché à la tige du piston : les diagrammes tracés de la sorte ont donc leurs ordonnées proportionnelles aux pressions et leurs abscisses proportionnelles aux volumes occupés par les gaz. Un diapason horizontal inscrit ses vibrations sur une ligne parallèle aux abscisses et marque les temps avec une précision extrême : le diapason que j'ai employé donnait la note *ut*₁, et bat-

1. « Annales de Chimie et de physique », 5^e série, 4, XV, p. 433 (1878) ; t. XVIII, p. 280 (1879) ; t. XXIII, p. 431 (1881).

tait par conséquent 128 vibrations simples par seconde, de sorte qu'il était facile d'observer au moins le $\frac{1}{200}$ de seconde.

En relevant les courbes de l'indicateur et en évaluant leur aire, il devenait possible de connaître toutes les circonstances caractéristiques d'une explosion et de calculer le travail effectué, pour une dépense de gaz connue, dans des conditions quelconques. Le mélange tonnant étant composé sur la cuve à eau, on en introduisait un volume variable dans le cylindre, à l'aide d'une vessie en caoutchouc, en soulevant le piston jusqu'aux repères désignés à l'avance : l'étincelle jaillissait, l'indicateur traçait sa courbe en même temps que le diapason marquait une sinusoïde plus ou moins allongée; on lisait à la fois, sur le même papier, les volumes et les pressions occupés par les gaz, la vitesse d'ascension du piston, la durée totale du phénomène de détente, etc. L'enveloppe à circulation d'eau ou de vapeur, dont le cylindre était revêtu, maintenait à point voulu la température des parois de l'enceinte, dont l'effet thermique sur les gaz qu'elle renferme m'était connu par mes études précédentes. Toutes les conditions de l'expérience étaient de la sorte bien déterminées.

Les trois ressorts de l'indicateur, employés dans ces essais, fléchissaient de 1 millimètre pour une pression de 35, 70 ou 139 grammes par centimètre carré : la course du cylindre enregistreur était réduite dans le rapport de 1 à 2,543. Ces données sont importantes pour le calcul du travail indiqué \mathfrak{G} : S étant la surface du piston du cylindre d'expériences, en centimètres carrés, σ l'aire du diagramme en millimètres carrés, φ la pression en kilogrammes, par centimètre carré, qui fait fléchir le ressort de 1 millimètre, et enfin r la course réelle du piston par millimètre d'abscisse du diagramme (cette course étant exprimée en mètres), on a, en kilogrammètres :

$$\mathfrak{G} = S. \varphi. \sigma. r.$$

En effectuant les calculs, il vient :

$$\mathfrak{G} = \sigma. 0,112 = \sigma. 0,055 = \sigma. 0,028,$$

pour les trois ressorts employés.

L'aire σ des diagrammes peut être calculée par la formule de Simpson ou mieux encore à l'aide du planimètre d'Amsler.

Telle est la méthode à laquelle j'ai eu recours pour étudier les phénomènes qui se produisent dans le cylindre des moteurs à gaz.

De savantes recherches avaient été faites, avec le plus grand succès, sur la combustion des mélanges tonnants : MM. Bunsen, Berthelot, Mallard, et Le Châtelier, Dugald Clerk et Vieille paraissaient avoir élucidé complètement cet important sujet. Toutefois aucun de ces habiles et infatigables physiciens n'avait opéré dans les conditions mêmes qui se rencontrent dans la pratique, c'est-à-dire dans une enceinte fermée par un piston mobile de large surface : leurs remarquables expériences avaient été poursuivies en vase clos et sans détente. Or, dans mon cylindre, la détente jouait un rôle très considérable et les phénomènes observés se présentaient sous un nouveau jour.

L'emploi des détentes rapides présentait en particulier le double et précieux avantage de limiter les températures et de réduire les pressions développées dans l'explosion. En limitant les températures, j'écartais les effets de dissociation qui ne se produisent assurément pas au-dessous de 1,500° centigrades; de plus, en réduisant et en graduant les pressions, j'évitais les mouvements oscillatoires, qu'on ne réussit généralement à supprimer que par un étranglement des conduites, au préjudice de la rapidité et de l'exactitude des indications.

Je n'ai malheureusement pu réussir à expérimenter sur des mélanges tonnants préalablement comprimés et c'est une grave lacune de mes recherches, que je n'ai encore pu combler.

Ces travaux, faits en 1883, m'ont conduit à des observations utiles, que je vais résumer succinctement en me bornant à ce qui intéresse la théorie expérimentale des moteurs à gaz.

Une première série d'essais démontra que les phénomènes ne dépendaient nullement de la chaleur plus ou moins grande de l'étincelle d'inflammation; en effet, soit qu'on employât un ou six éléments Bunsen, soit que la bobine d'induction fût petite ou grande, soit même qu'on y adjoignit une cascade de trois bouteilles, les résultats de la détonation restaient identiques.

Dès le début de ces recherches, je reconnus que le gaz d'éclairage offrirait les plus sérieuses difficultés d'expérimentation, par suite des variations de composition qu'il présente d'un jour à l'autre dans une même ville. Certaines expériences exécutées au mois de février ne purent point être réunies à celles du mois de juin, bien qu'elles aient été faites dans des conditions identiques : ce fait s'explique par les observations très nettes, relatives au pouvoir calorifique du gaz d'éclairage, que nous avons rapportées ci-dessus. Une variation de 8 0/0 ne permet point de rapprocher deux expériences et d'analyser leurs résultats.

C'est ainsi que je fus amené à entreprendre des recherches spéciales sur un mélange tonnant de composition constante : j'ai eu recours au mélange d'oxyde de carbone et l'air. L'oxyde de carbone était produit par la réaction de l'acide sulfurique sur le prussiate jaune de potasse : un laveur retenait l'acide cyanhydrique qui accompagne le gaz en proportions notables. Le mélange était fait sur la cuve à eau : les gaz étaient donc saturés de vapeur d'eau. J'ai cru pouvoir négliger cet élément dans le calcul du pouvoir calorifique des divers mélanges tonnants que j'ai employés : mes chiffres de rendement seront donc un peu trop faibles de ce chef.

Le mélange théorique d'oxyde de carbone et d'air est de 2 vol., 404 d'air pour 1 volume de gaz combustible : en prenant 2 vol., 675 d'air pour assurer une combustion complète, nous formons un mélange qui dégage par litre à zéro et à 760 millimètres, 0 cal., 83.

A 15°, le calorique dégagé par litre serait égal à 0 cal., 78; à 64°, 0 cal., 66.

Avec l'oxygène pur, augmenté de $\frac{1}{20}$ d'air, on recueillerait 1 cal., 93 par litre de mélange tonnant à zéro et 1 cal., 82 à 15°.

La proportion du comburant venant à augmenter, la chaleur varie suivant des lois qu'il est aisé de calculer par les formules que nous avons données ci-dessus, il suffit de connaître le pouvoir calorifique du gaz combustible.

Le premier objectif de mes recherches était d'observer l'effet produit sur une explosion par la vitesse de la détente : cette vitesse peut être représentée par $\frac{dl}{dt}$, rapport du déplacement du piston au temps. Le tableau ci-dessous fait ressortir à l'évidence l'influence des vitesses de détente.

Mélange de 1 volume d'oxyde de carbone avec 2 vol. 675 d'air à 15° C.
(Volume du mélange, 2 lit., 081).

Durée de l'explosion t	Course du piston l	Vitesse $\frac{dl}{dt}$	Travail théorique \mathcal{E}	Travail calculé par le diagramme \mathcal{E}'	Utilisation 0/0 η
s	mm.	m.	kgm.	kgm.	
0,17	254	1,5	688	22,0	3,2
0,12	258	2,15	»	29,0	4,2
0,11	»	2,35	»	34,0	4,9
0,08	»	3,25	»	42,0	6,1
0,05	»	5,20	»	53,0	7,7
0,045	»	5,60	»	60,0	8,7

Quelques essais ont été faits avec un mélange de 1 volume d'oxyde de carbone, $\frac{1}{2}$ volume d'oxygène et 0 vol., 075 d'air excédent; mais dans ces conditions, la charge devient brisante et les résultats perdent toute rigueur, par suite de l'excessive vitesse de la détente, qui dépasse 9^m,80 par seconde; les lancers du piston de l'indicateur déforment la courbe et l'estimation de l'aire du diagramme devient incertaine. Je renonce à produire les chiffres relatifs à ces essais.

Les expériences, dont nous venons de rapporter les résultats, démontrent à l'évidence que l'utilisation croît avec la vitesse; en opérant sur le gaz d'éclairage, nous voyons se dégager les mêmes conclusions, malgré quelques divergences introduites par les variations de composition du gaz des usines. Le travail théorique \mathcal{E} a été calculé en admettant un pouvoir de 5.250 calories par mètre cube de gaz.

Mélange de 1 volume de gaz d'éclairage avec 9 vol. 4 d'air
(Volume du mélange, 2 lit. 081).

t	l	$\frac{dl}{dt}$	ζ	ζ'	η
s	mm.	m.	kgm.	kgm.	p. 0/0
0,48	122	0,25	446	5,3	1,2
0,47	127	0,27	»	5,3	1,2
0,40	»	0,32	»	7,0	1,5
0,39	132	0,34	»	6,6	1,4
0,31	140	0,45	»	7,8	1,7
0,23	147	0,64	»	10,8	2,4

Mélange de 1 volume de gaz d'éclairage avec 6 vol. 33 d'air
(Volume du mélange, 2 lit. 081).

t	l	$\frac{dl}{dt}$	ζ	ζ'	η
s	mm.	m.	kgm.	kgm.	p. 0/0
0,15	259	1,7	633	17,6	2,7
0,09	»	2,9	»	40,1	6,2
0,06	»	4,3	»	50,5	7,9
0,06	280	4,8	»	50,7	9,3

L'effet de la vitesse de détente est encore sensible avec des mélanges tonnants de richesse différente, ainsi que le prouvent de nombreuses expériences faites dans les conditions les plus diverses.

L'utilisation croit donc toujours avec la vitesse : ce premier point est acquis pour nous jusqu'à la vitesse de 6 mètres par seconde, laquelle dépasse de beaucoup celle des pistons de nos moteurs.

L'influence de la température de la paroi est un second facteur de son action dont il fallait rechercher les effets. J'ai donc effectué deux séries parallèles de recherches avec un gaz tonnant identique, emprunté à un même réservoir, et introduit dans un cylindre dont la paroi était portée à 15°, 64° et 93° par une circulation d'eau chaude ou de vapeur.

Que j'aie opéré avec de l'oxyde de carbone ou avec le gaz d'éclairage, l'allure des courbes de détente a été entièrement différente suivant que le cylindre était réchauffé ou refroidi :

A chaud, la pression initiale s'établit instantanément, tandis qu'à froid l'arrondi du diagramme témoigne d'une combustion graduelle et lente ; la courbure de la ligne de détente varie elle-même et elle répond tour à tour, pour l'oxyde de carbone, aux for-

mules $pv^{0,22}$ et $pv^{0,8}$. Enfin l'utilisation est augmentée ou diminuée du même coup, ainsi que le prouvent les chiffres suivants :

	Température de la paroi	Utilisation p. 400	Bénéfice p. 400
A froid	15°	1,9	} 0,7
A chaud	64°	2,6	
A froid	15°	3,0	} 0,8
A chaud	64°	3,8	

A chaud, la pression initiale est plus considérable qu'à froid, et la combustion est beaucoup plus rapide; dans quelques diagrammes relevés à froid, j'ai même trouvé que la diminution de pression due aux progrès de la détente pouvait être compensée par l'augmentation qui résultait de la combustion prolongée, de telle sorte que la courbe de détente était parallèle à l'axe des volumes.

Les diagrammes obtenus avec un mélange de 1 volume de gaz avec 9,40 volumes d'air, ont été plus caractéristiques encore.

Ces expériences et d'autres encore que nous ne pouvons décrire ici en détail, établissent nettement l'action énergique des parois sur les phénomènes de combustion.

L'emploi simultané de l'indicateur et du diapason m'a permis de déterminer en fonction du temps la suite des températures et des pressions développées dans les produits de la combustion et j'ai pu analyser complètement les phénomènes d'explosion et de détente tels qu'ils se passent dans une enceinte, derrière un piston mobile.

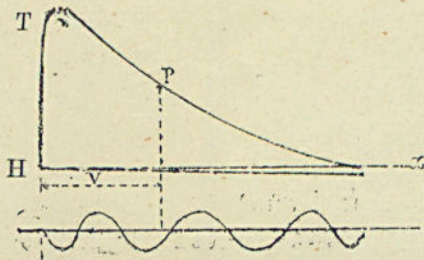


Fig. 94.

Nous reproduisons ci-contre une courbe tracée par l'indicateur dans l'explosion et la détente d'un mélange tonnant: celle que nous avons choisie (fig. 94) est précisément relative à un mélange de 1 volume de gaz et de 6 volumes d'air. Le diagramme supérieur donne les pressions en ordonnée et les volumes en abscisse; la sinusoïde inférieure, inscrite par le diapason, marque le temps; une vibration simple correspond à $\frac{1}{128}$ de seconde. Nous avons recueilli un nombre considérable de diagrammes plus ou moins semblables à celui-ci (1), correspondants à tous les mélanges et à toutes les vitesses: leur étude a été des plus fructueuses.

En effet, la température initiale t étant connue, on détermine la température T instantanément produite, par la formule $\frac{T}{t} = \frac{P}{H}$, dans laquelle P est la pression maximum du diagramme et H la pression atmosphérique, égale à $1^k,033$. Puis, dans le cours de la détente, les températures T' des gaz à chaque point de la courbe sont données par la formule $\frac{P'V'}{T'} = \frac{PV}{T} = \text{constante}$, $P, V,$ et T étant les données initiales, $P'V'T'$ celles qui

1. Nous en avons reproduit les divers types dans nos « Études sur les Moteurs à gaz tonnant »; le lecteur désireux d'approfondir ces questions, s'y reportera avec profit.

correspondent au point considéré. Dans toutes ces formules, les températures sont absolues.

La pression P'' qu'aurait atteinte le gaz à volume constant se calcule par la formule $P''V''^\gamma = P'V'^\gamma$: nous prendrons pour γ , rapport des chaleurs spécifiques, la valeur déterminée ci-dessus, égale à 1,30. Enfin la température T'' , qui aurait été réalisée dans ces conditions fictives, s'obtient par la relation $\frac{T''}{T'} = \frac{P''}{P'}$.

J'ai dressé, d'après un certain nombre de diagrammes, des tableaux donnant au bout d'intervalles égaux d'une durée de 0 sec., 016 les pressions et les températures observées, qui ont été mises en face des pressions et des températures calculées. Les pressions observées P' décroissent rapidement tandis que les températures T' correspondantes à cette observation croissent et passent par un maximum: à ce moment la combustion est achevée. L'action de la paroi ressort de la comparaison des chiffres calculés et observés.

Cette action refroidissante est par le fait même déterminée, car nous savons de combien la température maximum réalisée est inférieure à la température théorique: au lieu de trouver 2755°, par exemple, nous trouvons 2197°; la perte totale est donc de 558°. Il s'agit de calculer la perte élémentaire éprouvée pendant chaque intervalle de temps égal à 0 sec., 016 et de faire la somme. Cherchons quel est, pendant chacun de ces intervalles, l'excès moyen de la température du gaz sur celle de la paroi; puis les valeurs moyennes de la surface S de la paroi et du volume V des gaz étant inscrites en face de ces excès, appliquons la formule de la vitesse de refroidissement pour le temps 0 sec., 016. Il n'y a pour nous dans cette formule d'autre inconnue que l'exposant de l'excès de température; c'est une fonction de l'excès lui-même, que nous devons déterminer par tâtonnement. Dans ce cas, la formule donnant la vitesse v de refroidissement est

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = v = \frac{S}{V} 0,02357 \varepsilon^{1,203} + 0,00048 \varepsilon$$

Il n'y a qu'à multiplier cette valeur de v par le temps 0,016 pour connaître la perte par intervalle. La somme des pertes ainsi calculée est égale à 547°; il eût fallu trouver 558° pour être absolument d'accord avec l'observation; la différence est négligeable.

Cette formule aurait besoin de subir une légère modification de son paramètre pour convenir aux divers mélanges de gaz d'éclairage et d'air.

L'étude, dont je viens de retracer les grandes lignes, m'a conduit à formuler les deux lois qui suivent:

1° *L'utilisation croît avec la vitesse de détente, et avec la température de l'enceinte.*

2° *La combustion des mélanges tonnants est d'autant plus rapide que la vitesse de détente est plus grande et la paroi plus chaude.*

Ces lois sont d'une importance capitale dans la question des moteurs à gaz tonnant: elles définissent l'action de la paroi.

Et d'abord, cette influence si grande de la vitesse de détente n'est qu'une conséquence de l'action de paroi; comment pourrait-on expliquer autrement cette modification de tout l'ensemble des phénomènes explosifs avec la vitesse de la détente? Ce ne peut être que par le refroidissement au contact de la surface métallique qui, s'exerçant pendant un temps plus ou moins considérable, vient soustraire le calorique au sein même de ce foyer et diminue l'intensité de la réaction. Or, ce n'est pas seulement la rapidité de la combustion qui manifeste cette influence, mais la surface du diagramme elle-même est réduite, le travail diminue et l'utilisation baisse, ainsi que nous l'avons constaté ci-dessus. Pour tirer le meilleur effet du calorique disponible dans les mélanges tonnants, il importe donc d'opérer la détente des produits de la combustion au contact d'une paroi chaude, dans le temps le plus court et de réduire le plus possible la surface de la paroi du cylindre, c'est-à-dire de faire $\frac{S}{V}$ minimum. C'est le phénomène qui a aussi été observé, après nous, par M. Vieille; la pression maximum explosive dépend du rapport de la surface de refroidissement du récipient au volume de la masse gazeuse. Nous reconnaissons ainsi immédiatement l'avantage de réaliser le maximum de $\frac{Q}{V}$, rapport de la quantité de chaleur disponible au volume occupé par le mélange tonnant: en d'autres termes, nous découvrons qu'il y a, non pas seulement un avantage théorique, mais encore un réel bénéfice pratique à comprimer préalablement les gaz avant la détonation.

L'action de paroi est donc le grand régulateur des phénomènes explosifs. Elle suffit pour activer ou ralentir plus ou moins une combustion, et pour produire une combustion lente et graduelle: pas n'est besoin de recourir aux phénomènes de dissociation, pour expliquer cette réaction prolongée du comburant sur le combustible. En effet, nos expériences étaient faites dans des conditions telles que la dissociation était impossible, puisque la température dans notre cylindre ne dépassait pas 1.500°. La dilution du mélange tonnant dans une masse de gaz inertes, dans laquelle il est noyé, produit le même effet que la paroi, attendu qu'elle n'agit pas autrement, c'est-à-dire par refroidissement.

Pour réduire le plus possible l'action de paroi, on ne saurait trouver de moyen plus simple que de réduire $\frac{S}{V}$ au minimum, donc de comprimer énergiquement le mélange tonnant avant d'opérer la mise de feu: les hautes compressions ne sont donc pas seulement indiquées par la théorie générique, elles sont justifiées par la théorie pratique. Voilà pourquoi nous les avons préconisées dès le début de nos études sur les moteurs. Nous sommes heureux de constater que M. Dugald Clerk a partagé notre manière de voir. Il s'exprimait en effet dans des termes suivants dans son premier *Traité des Moteurs*:

« Sans compression préalable, un moteur ne peut engendrer de force économiquement et sous dimensions restreintes: quelle que soit la dilution du mélange, quel que soit le mode d'introduction de l'air dans le cylindre, quelle que manière de stratifier

les couches qu'on emploie, sans compression, il n'y a pas de réussite possible. Les proportions du mélange tonnant sont les mêmes dans nos dernières machines que dans le moteur Lenoir primitif, la durée de l'inflammation n'est pas moindre ; il n'y a de différence que dans la compression. La combustion, ou plutôt la propagation de la combustion, est plus rapide dans le moteur moderne, parce que la masse du mélange employé par cylindrée est plus considérable, alors que le temps nécessaire pour l'achèvement de la combustion n'a pas augmenté (1). » Tout se réduit en somme à diminuer le plus possible l'étendue des surfaces de contact d'une masse de gaz donnée avec la paroi qui l'enserme. Voilà où il faut tendre. Les successeurs d'Otto l'ont bien compris et si la consommation des moteurs que l'on construit aujourd'hui est descendue à 450 litres, par cheval-heure effectif, c'est surtout à leur forte compression que ce remarquable résultat est dû.

III

Des divers régimes de détonation et de combustion.

J'ai exposé ci-dessus le procédé par lequel j'ai pu suivre les progrès de la combustion d'un mélange tonnant et analyser une explosion dans toutes ses phases.

Nous avons vu que le régime de détonation et de combustion ne dépendait pas seulement de la qualité du mélange, mais encore des conditions de son allumage, de son explosion, et de sa détente, et en particulier de la surface et de la température de la paroi de l'enceinte qui le renferme, du rapport de cette surface au volume des gaz, de la rapidité de la détente, etc. Il importe de discuter l'influence de ces divers facteurs.

La première observation des phénomènes explosifs nous a déjà fait constater que, même à volume constant, la détonation n'est jamais instantanée ; sa durée se prolonge davantage quand le mélange explose derrière un piston qui fuit devant lui.

Les travaux de MM. Mallard et Le Châtelier permettent d'expliquer ce résultat. Deux conditions sont nécessaires pour que la combustion se propage dans un mélange gazeux : il faut en premier lieu que le gaz soit inflammable, c'est-à-dire que la combustion puisse être provoquée en un point par une simple élévation de température ; en second lieu, il est indispensable que la quantité de chaleur dégagée par la combustion soit assez considérable pour que la fraction qui est transmise aux parties voisines du mélange non encore brûlées, puisse les élever à leur température d'inflammation. La vitesse de propagation de la flamme est donc intimement liée à la nature du mélange ; mais toute cause extérieure de déperdition de calorique intervient dans le phénomène et c'est ainsi que s'explique le rôle considérable de l'action de paroi et son influence

1. Dugald Clerk, *On the Theory of the gas engine* ; London, 1883, page 33.

sur la vitesse de propagation de la flamme. L'agitation plus ou moins grande du gaz tonnant mélange les couches et active encore la propagation de la flamme. Les effets d'une détente rapide s'expliquent donc sans difficulté.

Les limites de combustibilité des mélanges de gaz sont bien définies. L'inflammabilité commence pour un mélange de 1 volume de gaz de ville et 3 vol., 7 d'air; elle paraît maximum pour 6 volumes d'air; avec 13 volumes d'air, elle cesse d'être possible par l'étincelle d'induction, mais elle se fait encore bien au dard de chalumeau comme cela avait lieu dans le moteur Otto à tiroir; enfin la flamme ne se propage plus dès que l'air dépasse 16 volumes. Tous ces résultats s'appliquent aux mélanges pris sous la pression de l'atmosphère.

Mais la combustibilité augmente avec la pression: c'est un effet que nous expliquons sans peine par le rapprochement des molécules et surtout par la diminution des surfaces refroidissantes pour une même masse de fluide.

Le volume de l'allumeur joue un rôle considérable dans l'inflammation des mélanges tonnants. Aussi, d'après l'observation de tous ceux qui se sont occupés des moteurs à gaz, l'étincelle d'induction, qui a cependant une température très élevée, mais un très faible volume, ne peut provoquer toujours l'inflammation de mélanges peu combustibles, qui brûlent au contraire fort bien quand on les allume à l'aide d'un coup de chalumeau ou par le transport d'une flamme assurément moins chaude que l'étincelle, mais infiniment plus étendue. Ainsi s'explique l'abandon momentané des allumeurs électriques employés au début par Lenoir dans son premier moteur; l'étincelle ne donnait pas une certitude absolue dans les moteurs sans compression ou à faible compression et l'on y renonça pendant de longues années. M. de Kabath y revint en 1882, mais il prit le soin de former un mélange riche autour des points entre lesquels jaillissait l'étincelle; sir W. Siemens obtenait le même résultat par l'introduction de gouttes de pétrole, qui devaient enrichir le gaz par carburation.

Otto a gardé longtemps le privilège important du meilleur allumage; imbu de sa théorie des *tranches*, il préparait un mélange riche dans le canal d'allumage, lequel faisait l'office d'une sorte de cartouche et projetait un jet de flamme dans le mélange moins riche et plus dilué formé derrière le piston. La mise de feu était ainsi assurée. Ce procédé a perdu de son mérite, lorsque les constructeurs ont abordé les fortes compressions préalables, grâce auxquelles la combustion s'effectue dans les conditions les meilleures.

La propagation de la combustion se fait suivant deux modes absolument distincts, découverts par MM. Berthelot et Vieille. Dans les mélanges riches, il se produit une onde explosive, qui se propage avec une vitesse très supérieure à celle du son, pouvant atteindre 2 000 mètres par seconde: ce mode ne se présente pas dans les moteurs à gaz. Au lieu de cette déflagration pour ainsi dire instantanée, on y observe une détonation relativement lente, qui présente un tout autre caractère. La propagation de la flamme ne dépasse guère 1^m,23 dans ce mode, pour les mélanges tonnants formés avec le gaz d'éclairage: cette vitesse correspond au mélange le plus tonnant contenant 6 volumes d'air pour 1 volume de gaz; MM. Mallard et Le Châtelier, ont observé des

vitesse de 0^m,25 dans les mélanges pauvres. D'après ces habiles observateurs, ces vitesses sont variables avec la température initiale de l'allumeur, avec sa surface, et avec le diamètre des tubes dans lesquels se fait la détonation. Nous retrouvons donc encore ici l'influence des parois.

Mes expériences m'ont permis de mesurer les vitesses d'inflammation par un procédé tout différent de celui qui avait été employé jusque-là: c'est par l'observation des courbes de détente d'un gaz tonnant derrière un piston animé de vitesses variables. Lorsque la pression reste constante et que la ligne de détente est parallèle à l'axe des volumes, comme dans la figure 95, il est permis d'affirmer que la flamme a suivi le piston dans sa progression avec une vitesse égale à la sienne: dans ce cas, il n'y a donc qu'à mesurer la vitesse du piston pour connaître la vitesse d'inflammation, ce qui est facile à l'aide du diapason enregistreur. Mes expériences m'ont conduit à des résultats voisins de ceux de MM. Mallard et Le Châtelier: je n'ai pu observer, sous la pression atmosphérique, de vitesse égale à 1^m,60 et la moindre vitesse que j'ai observée dépassait 0^m,24; pour un même mélange, elle variait de 0^m,64 à 0^m,24, suivant la rapidité de la détente. Cette vitesse n'est pas absolue, mais elle est fonction de données complexes, parmi lesquelles l'action refroidissante de la paroi est certainement prépondérante, car on peut constater que la vitesse augmente quand la température de la paroi s'élève. La vitesse de la flamme augmente aussi avec l'agitation des gaz. Elle croît enfin avec la pression des gaz et avec leur température initiale.

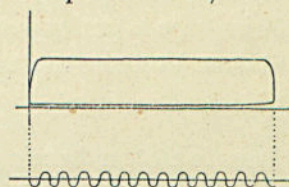


Fig. 95.

Dans les moteurs à gaz, même dans les moteurs sans compression, la vitesse de propagation de la flamme est toujours supérieure à celle du piston au moment où elle se produit, sinon nous aurions des diagrammes d'une forme analogue à celle de la figure ci-dessus. Or voici les vitesses moyennes du piston, la vitesse maximum et celle qui correspond à $\frac{1}{10}$ de course (1) dans quelques moteurs anciens et récents.

	Course	Nombre de tours	Vitesse moyenne	Vitesse maximum	Vitesse au $\frac{1}{10}$ de course
Moteur Lenoir (1861).	0 ^m ,100	131	0 ^m ,43	0 ^m ,68	0 ^m ,41
Moteur Otto (1890)	0 ,356	150	1 ,78	2 ,71	1 ,63
Moteur Clerk	0 ,305	150	1 ,52	2 ,31	1 ,39
Moteur Otto (1900).	0 ,475	190	3 ,00	4 ,72	2 ,83
Moteur Crossley	0 ,380	270	3 ,42	5 ,37	3 ,22
Moteur Tangye	0 ,686	160	3 ,66	5 ,41	3 ,24

1. Cette vitesse du piston, correspondant au $\frac{1}{10}$ de course, a été calculée sans tenir compte de l'obliquité des bielles: elle est égale à 0,6 de la vitesse maximum; la vitesse maximum est d'ailleurs égale à la vitesse constante du bouton de manivelle. Enfin la vitesse moyenne s'obtient en divisant la course par la durée d'un demi-tour de la manivelle.

Ces chiffres font voir la gradation rapide des vitesses de piston adoptées par les constructeurs de moteurs ; cette vitesse est aujourd'hui deux fois plus grande qu'elle ne l'était autrefois. La vitesse de propagation de la flamme a dû croître simultanément, sinon les diagrammes eussent subi une déformation considérable, qui aurait eu pour conséquence une diminution notable de la pression moyenne. On ne pouvait guère songer à employer des mélanges plus riches ; on a préféré augmenter la compression qui conduit au même résultat. Les grandes vitesses de piston, si avantageuses pour l'utilisation du calorique, ont donc été rendues possibles par l'augmentation de la compression, dont les effets théoriques ont ainsi été doublés.

Le moment de l'allumage, et par conséquent la position du piston à laquelle correspond l'explosion, joue évidemment un rôle considérable dans le développement de la pression explosive. Au point mort de la course, la vitesse du piston est nulle ; elle croît très vite proportionnellement au sinus de l'angle formé par la manivelle motrice avec le prolongement de l'axe du cylindre. Au point mort, l'explosion se produit donc à volume constant ; au-delà, elle se développe dans une enceinte de volume rapidement croissant.

Dans le moteur Lenoir primitif, l'allumage avait lieu vers les $\frac{6}{10}$ de la course : la vitesse du piston était alors voisine de son maximum et il eût fallu une explosion instantanée pour qu'elle se fit à volume constant ; aussi la pression s'établissait-elle par une ligne inclinée, présentant un grand arrondi, et la pression maximum du diagramme restait très inférieure à la valeur théorique qu'elle aurait dû atteindre. Otto, Clerk, et leurs disciples ont, au contraire, effectué l'allumage au voisinage du point mort ; ils ont obtenu ainsi les diagrammes pointus qui se rapprochent de la forme des diagrammes réels du tracé théorique et correspondent, dans une certaine mesure, à un perfectionnement du cycle.

Delamare-Deboutteville était néanmoins resté partisan des allumages légèrement retardés, qui avaient pour lui l'avantage de réduire les pressions explosives, donc de ménager les organes du moteur et de supprimer les coups durs, tout en développant l'effort sur une manivelle mieux placée pour le recevoir et pour le transmettre à l'arbre de couche. Cette opinion a été discutée et elle était en effet discutable : nous y reviendrons.

La courbe de détente, dont l'équation est $pv^\gamma = \text{constante}$, caractérise le régime de combustion, par la valeur de l'exposant γ . Cette valeur serait théoriquement égale à 1,23 à la température de l'explosion ; elle est bien supérieure en réalité dans les moteurs et se montre essentiellement variable avec les conditions intrinsèques et extrinsèques du phénomène.

A la température moyenne de la compression, γ serait voisin de 1,36 sous les mêmes réserves que ci-dessus.

Dans les moteurs Otto et les similaires, la courbe de détente répond généralement à la formule $pv^{1,47}$; c'est la valeur observée par MM. Ayrton et Perry. J'ai relevé maints diagrammes qui répondaient à $pv^{1,50}$ et même $pv^{1,55}$: par contre, MM. Brooks et Steward ont trouvé une valeur d'exposant égale à 1,33.

MM. Edgar Kidwell et Edwin Keller ont présenté au *Mechanical Engineering Department* de l'Université de Pensylvanie un travail fort complet sur un moteur Otto, dans lequel ils ont relevé les pressions successives développées dans le cylindre dans la phase de détente et dans celle de compression : l'équation de la courbe de détente a paru être :

$$pv^{1,4385} = 15,901$$

et celle de la courbe de compression,

$$pv^{1,5313} = 3,7557$$

L'erreur du calcul effectué sur ces bases est faible.

M. Slaby a fait une intéressante étude sur les variations de γ ; sa valeur serait une fonction de la vitesse u du moteur, ce qui est d'accord avec nos prévisions, fondées sur l'action de paroi (1).

Voici les chiffres publiés par ce savant expérimentateur.

Pour $u = 100$	$\gamma = 1,290$
150	1,289
200	1,287

Admettons en moyenne 1,289.

En détente, γ est beaucoup plus fort.

Le tableau ci-dessous montre les variations de γ le long d'un même diagramme, et pour diverses vitesses de rotation du moteur.

Vitesse du moteur u en tours	Valeurs de γ Valeurs entre les ordonnées du diagramme						
	2 à 3	3 à 4	4 à 5	5 à 6	6 à 7	7 à 8	8 à 9
110, 1	1, 598	1, 560	1, 551	1, 565	1, 607	1, 670	1, 717
162, 7	1, 504	1, 490	1, 492	1, 515	1, 564	1, 589	1, 556
116, 5	1, 601	1, 544	1, 500	1, 560	1, 628	1, 650	1, 655
155, 8	1, 545	1, 502	1, 460	1, 505	1, 566	1, 647	1, 563
173, 8	1, 563	1, 485	1, 425	1, 508	1, 551	1, 606	1, 534

Les moyennes sont les suivantes :

u	γ
110, 1	1, 61
162, 7	1, 59
155, 8	1, 54
162, 7	1, 53
173, 5	1, 52

La valeur de γ décroît donc quand la vitesse augmente (2); on aurait exactement $\gamma = 1,75 - 0,00133 u$.

1. « Calorimetrische Untersuchungen uber den Kreisprozess der Gasmachine »; Berlin, 1894.

2. M. Slaby démontre ainsi avec nous que la perte par les parois doit diminuer visiblement avec la vitesse.

Le tableau suivant rapproche un certain nombre de valeurs de γ trouvées par divers expérimentateurs opérant sur des moteurs de toute espèce.

	γ	
	En détente	En compression
Slaby (Otto) (1886)	1,3 à 1,4	—
Witz (Otto) (1883).	{ 1,537 à (45°) 1,479 à (50°)	—
Slaby (Otto).	{ 1,61 à 110 tours 1,52 à 273 tours	—
Unwin (Atkinson).	1,305	1,399
Kennedy (Griffin)	1,373	1,245
— (Griffin)	1,350	1,262
— (Atkinson)	1,264	1,205
— (Crossley)	1,435	1,280
Ayrton et Perry.	1,479	1,301
Capper (Crossley)	1,374	1,302
Witz (Tangye 1902)	1,450	1,240

Les écarts entre ces valeurs de γ montrent bien la différence qui peut exister entre les phénomènes de compression et de détente d'un moteur à l'autre : ainsi, γ varie de 1,3 à 1,6 dans la détente, de 1,2 à 1,4 dans la compression ; or, bien que γ soit généralement supérieur en détente, M. Unwin trouve l'inverse ! Est-il donc un phénomène plus complexe que celui de la détente dans un cylindre de moteur ?

La valeur de γ ne reste même pas constante le long d'une même courbe de détente, ainsi que nous l'avons vu ci-dessus ; nous l'avons constaté sur de nombreux moteurs dont les pistons étaient cependant bien étanches : que penser dès lors des discussions de quelques théoriciens sur les rendements calculés des cycles ?

Voici d'autres remarques à formuler sur les variations de γ .

Dans un même moteur, γ prend des valeurs différentes à pleine charge et à vide, toutes autres choses égales d'ailleurs ; j'ai en effet relevé sur un moteur Otto les chiffres ci-dessous.

Valeur de γ à vide, à 45° : 1,639.
Valeur de γ à charge, à 45° : 1,586.

J'ai constaté aussi que γ dépend du volume du cylindre, c'est-à-dire de $\frac{S}{V}$, et M. Schöttler est du même avis que moi, attendu qu'il prête à γ une valeur moindre dans les gros moteurs que dans les petits (1). M. Meyer a aussi remarqué une moindre perte à la paroi dans un moteur à pétrole de 270 millimètres que dans un autre de 140 de diamètre.

M. Ebbs a constaté, dans des machines sans compression, que la vitesse du piston augmente la rapidité de l'explosion ; la valeur de γ doit donc diminuer par le fait même. Il résulte de ses essais que la longueur de la course correspondante à l'explo-

1. Schöttler. — « Die Gasmachine », 3^e édition, page 296.

sion reste constante, quelle que soit la vitesse du moteur. C'est encore une action de paroi : il est fort possible qu'elle soit moins sensible quand le mélange tonnant a subi une forte compression préalable.

M. Meyer a opéré sur un moteur Otto, à deux cylindres de 520 millimètres de diamètre, alimenté de gaz pauvre (de coke) donnant 1202 calories par mètre cube ⁽¹⁾, et il a relevé un grand nombre de diagrammes, parmi lesquels se trouvent quelques séries analogues à la figure 96. Elles constituent toutefois des exceptions, attendu que la majorité des tracés indique une combustion lente et retardée par des courbes sur-

baissées, alors que les courbes à pointe aiguë sont au contraire assez rares. Or, il est facile de constater, par les tableaux d'expérience de M. Meyer, que l'on a relevé des courbes du dernier genre au moment où le moteur tournait à la plus grande vitesse, et qu'on n'en a pas relevé une seule dans les intervalles où le moteur ralentissait légèrement sa marche. On pourrait dire, fait observer l'auteur de cette intéressante étude, que les diagrammes correspondants

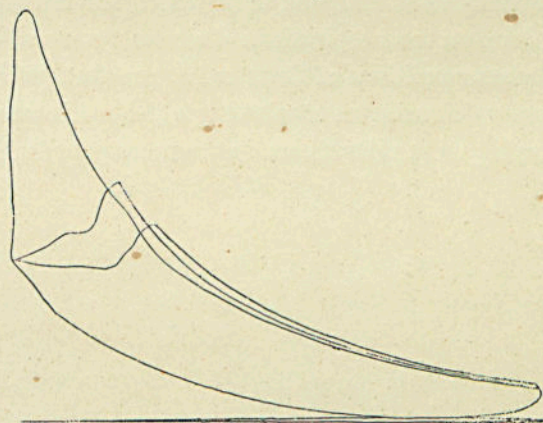


Fig. 96.

à une inflammation rapide sont plus forts, et que par suite il s'est produit aussitôt une rotation plus rapide ; mais on peut aussi croire avec une grande vraisemblance que c'est cette accélération du mouvement du moteur qui a occasionné la combustion plus rapide. Les beaux diagrammes sont donc l'effet de la vitesse et non sa cause ; c'est bien ainsi qu'il faut interpréter ce phénomène, dans lequel les remouls interviennent faiblement, mais qui est principalement dû à l'action de paroi.

L'effet est d'ailleurs nettement marqué et les différences sont relativement considérables : ainsi pour une même admission et une même richesse de gaz et pour une même compression préalable de 9^k,14, on observe les variations suivantes de la pression :

	PRESSION		
	Maximum	Finale	Moyenne
Combustion lente. .	8 ^k ,3 à 13 ^k	3 ^k ,23	3 ^k ,52
— rapide .	20 ^k ,3	2 ^k ,90	4 ^k ,25

En combustion rapide, le phénomène est plus régulier et il est accompagné d'un plus grand développement d'énergie ; l'écart est de 20,7 % et il serait suffisant pour élever le rendement d'un moteur de 19,3 % (chiffre trouvé par M. Meyer) à 23,8 %.

Observons d'ailleurs encore que la pression finale est inférieure dans la combustion rapide.

1. « Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure », tome XXX, 1896.

M. Frese a vu baisser γ dans un même cylindre aussitôt que le nombre de tours augmentait; il a d'ailleurs fait la remarque, très importante dans l'espèce, que la surface des diagrammes successifs (donc leur pression moyenne) restait constante, alors même que l'accélération de la machine tendait à la faire diminuer, puisque le volume de mélange aspiré dans le cylindre diminuait (1).

C'est ici le lieu de signaler une observation faite par M. Monnier et communiquée, en 1883, à la Société technique de l'industrie du gaz: « Lorsqu'on ne demande au moteur, disait-il, qu'une partie du travail dont il est susceptible, le nombre des inflammations diminue, le piston aspire de l'air pur qui refroidit le cylindre, et, s'il y a deux ou trois aspirations d'air successives, l'inflammation se fait dans de moins bonnes conditions ». Cette remarque fort judicieuse avait une grande portée; elle concordait avec les résultats que j'obtenais vers le même temps avec un moteur Otto sur lequel je relevais les diagrammes consécutifs ci-contre.

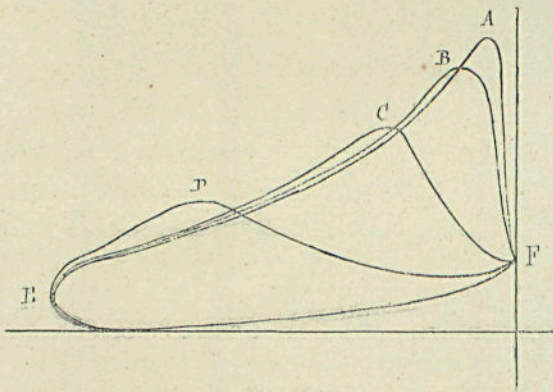


Fig. 97.

Ces diagrammes montraient à l'évidence que, lorsque la paroi du cylindre se refroidit à la suite de plusieurs ratés consécutifs ou d'une marche à vide, la vitesse de combustion se ralentit aussitôt: c'est ce qui se voit sur la figure 97. Après avoir présenté un sommet aigu, la courbe de détente devient presque parallèle à l'axe des volumes, ce qui prouve que dans ces conditions la vitesse d'inflammation est tout au plus égale à la vitesse de

propagation du piston. La pression explosive baisse en même temps.

Les ingénieurs de la maison Tangye, ayant constaté le même fait, ont cherché à supprimer cette action nuisible de la paroi refroidie en augmentant la richesse du mélange admis à la suite de deux refus d'admission et ils ont augmenté ainsi la puissance et le rendement de leurs machines.

En somme, nous trouvons des causes multiples d'élévation de la valeur de l'exposant γ et par suite d'abaissement des courbes de détente, d'où résulte évidemment une diminution du travail indiqué. Cet effet est indiscutable; M. Bailly, ingénieur distingué des ateliers Cockerill à Seraing, a montré (2) quelle était son importance. Opérant sur des mélanges de plus en plus pauvres, il a observé que le travail diminue à mesure que la combustion est plus lente, mais dans un rapport notablement moindre que la pression explosive; ainsi trois diagrammes pris successivement à une vitesse de 315 tours ont donné les résultats ci-dessous:

1. Frese. — « Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure », 1886.

2. Cité par M. Hubert dans son étude sur l'Utilisation directe des gaz de hauts fourneaux. *Annales des Mines de Belgique*, tome II, 1897.

Pressions explosives . .	13 ^k ,7	7 ^k ,5	5 ^k ,3
— moyennes . .	2,6	2,3	1,75
Travail indiqué en chevaux.	6,45	5,45	4,25
— relatif	100	85	68

Ces résultats concordent pleinement avec ceux que j'avais relevés à l'aide de mon cylindre d'expériences.

Comment se justifierait donc la théorie célèbre de l'école de Deutz, qui produisait à dessein des combustions lentes en vue d'améliorer le rendement des moteurs ? C'est le moment d'étudier et de discuter cette thèse qui a été l'objet de longues controverses.

Le premier brevet d'Otto, de 1876, revendiquait la formation d'un mélange hétérogène, obtenu en conservant dans l'espace mort du cylindre des gaz brûlés, à la suite desquels on introduisait d'abord de l'air pur, puis un mélange tonnant de richesse déterminée, qui restait cantonné dans la partie postérieure de la culasse et dans le canal d'admission.

On prétendait que ces gaz brûlés, cet air et ce mélange ne se mêlaient pas et constituaient au contraire des tranches, dont la richesse augmentait depuis le piston jusqu'au canal d'admission par lequel s'effectuait la mise de feu. La flamme se propageait de l'arrière à l'avant avec une vitesse décroissante, produisant une combustion lente (*eine verlangsamende verbrennung*), qui se prolongeait jusqu'au bout de la détente : le coup faisait donc long feu, et cette combustion graduelle et poursuivie (le *nachbrennen* des Allemands dit bien la chose) devait être la cause de l'amélioration considérable et indéniable obtenue par Otto sur ses prédécesseurs. Telle était la prétention des ingénieurs allemands. On chercha à établir l'existence des tranches par des arguments variés, qui présentent aujourd'hui un médiocre intérêt, d'une faible importance dans l'espèce (1) ; les preuves invoquées ne furent pas décisives. Il eût été plus décisif de démontrer que le *nachbrennen* améliorait le rendement ; cette preuve ne nous a point été fournie. Or, tandis qu'on la cherchait, Delamare-Deboutteville et Malandin, Lenoir, Clerk, Fielding établirent des moteurs plus économiques que les moteurs Otto, sans mélange hétérogène et sans tranches, et ils obtinrent par la marche à quatre temps, avec une forte compression préalable, sans *nachbrennen*, des rendements qu'Otto n'avait jamais pu réaliser. Les faits proclamaient donc l'inanité de la théorie des tranches et confirmaient la théorie de l'action de paroi : je me contenterai de le constater. La théorie des tranches ne vit plus que dans les souvenirs du passé et les moteurs Otto, qui s'étaient laissés devancer, ont reconquis le rang qu'ils n'auraient jamais dû perdre en faisant, comme tout le monde, de la haute compression et des mélanges homogènes.

Quel est le rôle, dans la combustion, des gaz brûlés, conservés au fond de la culasse dans les moteurs à quatre temps ? Ces gaz chauds et inertes favorisent-ils ou bien

1. Signalons en particulier les expériences de MM. Teichmann, Lewicki et Schöttler dans lesquelles l'allumage s'effectuait par le fond de la culasse ou bien par le côté du cylindre ; la combustion était moins vive dans ce dernier cas, comme on devait s'y attendre, puisque la mise de feu se faisait dans de moins bonnes conditions.

faut-il admettre, avec quelques ingénieurs, qu'ils retardent les réactions? N'y aurait-il pas avantage à les balayer et à les remplacer par de l'air pur et frais, suivant le mode préconisé par d'importants constructeurs anglais?

M. Emerson Dowson s'est fait le champion de cette idée, dont la paternité appartient peut-être à M. Atkinson; il prétend que c'est une erreur de diluer les gaz tonnants avec les produits de l'explosion précédente, et qu'il faut, au contraire, expulser ces produits par une chasse d'air, effectuée au moment opportun. Voici les arguments qu'il produit à l'appui de sa thèse :

1° L'inflammation de la charge est beaucoup plus rapide et sa combustion plus complète;

2° Il se produit une perte de puissance moins considérable; et par suite, une machine de dimensions données développera une puissance plus grande;

3° On évite les inconvénients provenant des allumages prématurés;

4° La conservation des gaz brûlés derrière le piston élève la température du cylindre et la nouvelle charge qui se mêle à ces résidus se dilate beaucoup, ce qui a pour effet de réduire l'énergie disponible dans un volume déterminé de gaz tonnant;

5° On évite les ratés d'inflammation et le gaz tonnant ne s'accumule pas dans le cylindre; on supprime ainsi ces explosions brutales qui nuisent à la stabilité du moteur et compromettent la régularité de la vitesse;

6° Ces avantages sont plus marqués encore avec le gaz pauvre de gazogène qu'avec le gaz riche de ville.

Cette argumentation était fort logique, mais elle n'a pas convaincu tout le monde : l'expérience seule pouvait prononcer. Jusque là, il était difficile de prendre parti pour ou contre l'expulsion complète des produits de la combustion.

De nombreuses expériences ont été dirigées dans le but d'élucider ce problème; les solutions recueillies ne sont malheureusement pas d'accord.

MM. Mallard et Le Chatelier avaient annoncé que la pression maximum explosive d'un mélange dilué d'oxygène et d'oxyde de carbone, était plus vite atteinte lorsque le diluant était de l'azote au lieu d'être de l'acide carbonique : ils concluaient donc en faveur du balayage des gaz brûlés.

MM. Salanson et Debuchy (*) ont publié sur la question un intéressant mémoire, sous le titre de : *Recherches expérimentales sur le moteur à gaz*, dans lequel ils ont étudié l'influence du dosage des mélanges tonnants, de son homogénéité, de sa dilution et de son inflammabilité. Ces habiles opérateurs se sont servis d'un moteur à gaz spécialement établi pour se prêter aux essais les plus variés : on mesurait son travail effectif à l'aide d'un frein appliqué sur l'arbre moteur et l'on déduisait du travail recueilli la valeur du rendement dans les conditions de l'essai. Ils ont formulé quelques lois parmi lesquelles nous citerons les suivantes :

1^o On doit employer dans les moteurs à gaz des mélanges au dosage le plus faible possible : il n'y a de limite à cet égard que la limite même d'inflammabilité du mélange.

1. Cette étude a été insérée dans le *Bulletin de la Société technique de l'Industrie du gaz en France*, 1887.

2^o On doit chercher à avoir une pression initiale au cylindre aussi élevée que possible à la température la plus basse possible.

Ces lois sont d'accord avec les nôtres, et elles mettent en pleine lumière l'influence des parois, car l'avantage des basses températures résulte de la réduction de l'effet nuisible des parois, lequel est fonction de la différence de température du gaz chaud et du métal relativement froid. Nous disons qu'il importe d'élever le plus possible la température du métal; nos collègues préfèrent abaisser la température du gaz : cela revient au même au point de vue pratique.

La nature du diluant interviendrait énergiquement d'après MM. Salanson et Debuchy et ils ont cru voir aussi que le résidu gazeux conservé derrière le piston retardait la combustion plus que ne le ferait une charge d'air pur : la température initiale développée devenait moindre par le fait; le rendement devait donc s'améliorer en vertu de leur seconde loi.

MM. Salanson et Debuchy se trouvaient ainsi d'accord avec MM. Mallard et Le Chatelier sur la matérialité du fait, mais ils en déduisaient une conclusion inverse.

Une autre contribution à ces études est due à M. Grover (¹), qui a mesuré expérimentalement les effets produits par la teneur des mélanges tonnants en gaz brûlés. Ce savant ingénieur a effectué une longue série d'expériences au laboratoire du collège de Leeds : son mode opératoire ne diffère pas de celui que j'ai employé dans mes expériences de 1883 sur la combustion des mélanges tonnants. Il a employé un cylindre résistant en fonte ayant 28 litres de capacité; la charge était allumée par une étincelle d'induction; les pressions étaient enregistrées par un indicateur Crosby sur un tambour tournant, sur lequel un diapason traçait par sa sinusoïde des repères permettant de mesurer les temps avec précision. J'ai constaté autrefois qu'un tarage convenable de l'indicateur permet de réaliser ainsi une mesure suffisamment précise des pressions développées par l'explosion. Les volumes des gaz constitutifs des mélanges étaient déterminés en remplissant d'abord le cylindre d'eau et en jaugeant le liquide qu'il fallait faire écouler pour aspirer le gaz. On commençait par conserver dans le cylindre le volume de gaz brûlés sur lequel on se proposait d'opérer; on introduisait ensuite un demi-volume d'air pur, puis le gaz d'éclairage et l'on complétait la charge par une aspiration d'air. Le gaz, fourni par l'usine de Leeds, avait la composition suivante en volume :

H = 52,9 ; CO = 6,5 ; CH⁴ = 35,2 ; carbures divers = 4,2 ; CO², O et Az = 1,2

Ce gaz exige pour sa combustion complète 5,7 volumes d'air.

On a expérimenté sur des mélanges de 16, 15, 14, 13, 12, 10, 8 et 7 volumes d'air : le premier dosage donnait souvent lieu à des ratés d'explosion.

M. Grover a fait connaître d'intéressants et très importants résultats, que nous ne pouvons tous rapporter ici ; nous ne signalerons que les plus saillants.

Il a démontré, contrairement à la loi Salanson, que les explosions sont plus rapides

1. Frederick Grover. — « The effects of the products of combustion upon explosive mixtures of coal gas and air »; dans « The Practical Engineer », 1895.

lorsque l'excès d'air est remplacé par des gaz brûlés inertes ; cela ressort du diagramme ci-contre dans lequel on a porté en abscisses les temps et en ordonnées les pressions. La courbe la plus surbaissée (fig. 98) est celle d'un mélange fait dans la propor-

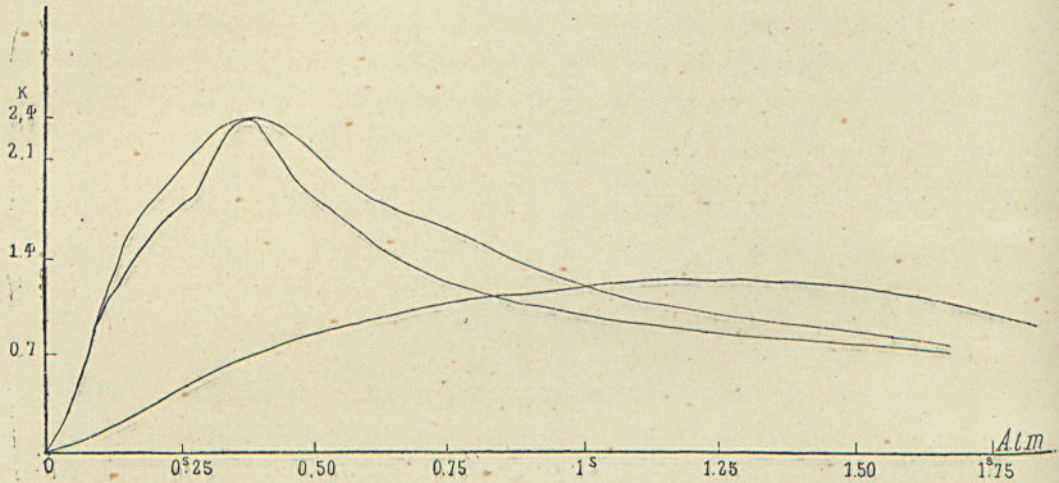


Fig. 98.

tion de 15 pour 1 ; les autres sont des courbes obtenues avec des substitutions à l'air de 18 et 20 0/0 de gaz brûlés.

Le tableau ci-contre donne en chiffres les résultats relevés avec divers mélanges.

On voit que, pour certains dosages, la substitution des gaz brûlés à l'air excédent provoque d'abord un accroissement de la pression explosive ; toutefois une augmentation graduelle de la teneur en gaz brûlés conduit fatalement, plus ou moins vite, à une diminution de pression.

Voici les lois formulées par M. Grover :

1° On obtient les pressions les plus considérables lorsque l'air mélangé dépasse faiblement le volume strictement nécessaire pour la combustion complète.

2° Dans quelques mélanges, on réalise un accroissement notable de pression lorsque les gaz brûlés prennent la place de l'air en excès.

3° Quand le volume des gaz brûlés n'excède pas 58 0/0 du volume du mélange, celui-ci reste encore explosif, pourvu que le volume d'air ne soit pas inférieur à 5,5 fois le volume du gaz.

4° En remplaçant l'air excédent par des gaz brûlés, on réduit la durée de l'explosion.

L'auteur de ce beau travail ne conclut pas autrement ; il semble qu'il n'ose pas condamner absolument le balayage et qu'il veuille laisser au lecteur la responsabilité de son verdict.

M. Atkinson a voulu trancher le différend par une série d'essais décisifs, et il a observé longuement la marche d'un moteur Crossley, permettant de chasser les gaz résiduaux ou de les conserver dans le cylindre ; il a été conduit à conclure en faveur de leur expulsion, et il a créé son célèbre *Scavenging engine*, dont le rendement a justifié d'abord les plus belles espérances.

RAPPORT entre les volumes du gaz et du cylindre	RAPPORT entre les volumes de gaz et d'air	RAPPORT entre les volumes de gaz brûlés et d'air + gaz	PRESSION maximum	Accroissement
$\frac{1}{15} = 6,6 \%$	$\frac{1}{14} = 7,1 \%$	0	1 ^k , 69	—
»	$\frac{1}{12,5} = 8,0$	$\frac{1}{9} = 11,1$	2 , 32	0, 63
»	$\frac{1}{11} = 9,1$	$\frac{1}{4} = 25$	2 , 53	0, 84
»	$\frac{1}{6,6} = 15,1$	1 = 100	2 , 32	0, 63
»	$\frac{1}{5,2} = 19,2$	—	1 , 76	0, 07
$\frac{1}{13} = 7,7$	$\frac{1}{12} = 8,3$	0	2 , 53	—
»	$\frac{1}{10,7} = 9,3$	$\frac{1}{9} = 11,1$	2 , 81	0, 28
»	$\frac{1}{9,4} = 10,6$	$\frac{1}{4} = 25$	2 , 88	0, 07
»	$\frac{1}{5,5} = 18,3$	1 = 100	2 , 25	(- 0, 28)
$\frac{1}{11} = 9,1$	$\frac{1}{10} = 10,0$	0	3 , 37	—
»	$\frac{1}{8,9} = 11,2$	$\frac{1}{9} = 11,1$	3 , 37	0
»	$\frac{1}{8,3} = 12$	$\frac{1}{5,6} = 17,8$	3 , 51	0, 14
»	$\frac{1}{7,2} = 13,8$	$\frac{1}{3,3} = 30$	3 , 09	(- 0, 28)
$\frac{1}{9} = 11,1$	$\frac{1}{8} = 12,5$	0	4 , 36	—
»	$\frac{1}{7,1} = 14,2$	$\frac{1}{9} = 11,1$	4 , 00	(- 0, 36)
$\frac{1}{7} = 14,3$	$\frac{1}{6} = 16,2$	0	4 , 36	—
»	$\frac{1}{5,8} = 17,7$	$\frac{1}{19} = 5,2$	4 , 15	(- 0, 21)

Nous partageons les vues optimistes de M. Atkinson; l'expulsion des gaz brûlés constitue une opération avantageuse en elle-même. Malheureusement elle entraîne des conséquences qui compensent en partie le bénéfice qu'elle pourrait procurer et

elle impose d'autre part des complications fâcheuses. La compensation s'effectue par la perte de la chaleur des gaz brûlés qu'on rejette dans l'atmosphère au lieu de l'utiliser à réchauffer la charge de mélange tonnant ; le balayage augmente aussi l'effet nuisible de paroi. La complication est produite par l'adjonction obligée des pistons et pompes auxiliaires effectuant la chasse ; Beck et Griffin ont employé à cet effet la marche à six temps, qui fait perdre deux temps et diminue la puissance du moteur. En dernière analyse, le balayage constitue un progrès discutable et nous nous expliquons son succès très relatif.

Nous sommes amenés à examiner la question non moins importante des effets résultant des gaz inertes au point de vue de la combustion dans le cylindre.

Sur les conseils de M. Bunte, professeur à l'Institut technique de Carlsruhe, MM. Haber et Weber ont entrepris d'intéressantes études sur la combustion incomplète qui peut se présenter dans les moteurs : ils ont pris comme sujet d'expérience un moteur Otto des ateliers de Deutz, de 4 chevaux, dont ils ont analysé avec soin les produits d'échappement. Une première série d'essais effectuée sur un moteur à soupape leur a donné les résultats ci-dessous (1) :

	Travail électrique	Température de la paroi	Degré de combustion incomplète
Robinet de gaz entièrement ouvert.	1200 watts	66°	0,42 %
—	»	60	0,53
Robinet de gaz à demi fermé . .	590	53	4,39
—	545	64	3,38

Dans le premier essai, il se trouvait 8,4 0/0 d'acide carbonique, 8,6 dans le second, 5,05 dans le troisième ; le dernier essai donna 4,3 d'acide carbonique et 12,5 d'oxygène. Les gaz combustibles étaient de l'hydrogène, de l'oxyde de carbone, de l'acétylène (en quantité très minime) et des carbures. On a dosé dans une expérience 0,139 0/0 d'hydrogène, 0,161 d'oxyde de carbone et 0,155 de méthane.

Ces essais ont prouvé à l'évidence que les gaz de la décharge ne renferment que des traces de gaz combustibles, quand un moteur fonctionne à pleine charge, et qu'il s'en perd, au contraire, des proportions appréciables lorsque le travail est réduit. Dans ce cas, la perte de chaleur correspondante peut atteindre 4 0/0 et il y a lieu de la prendre en considération.

Les auteurs de ce beau travail attribuent ces combustions incomplètes à la dilution exagérée des gaz combustibles, constituant un mélange amené à la limite d'explosibilité. Si le mélange était bien uniforme, et si les veines gazeuses étaient énergiquement brassées, l'effet serait moins marqué, car toutes les molécules combustibles rencontreraient des molécules comburantes, si toutefois l'air était admis en proportion suffisante. L'action de paroi interviendrait aussi, quoique moins vivement ; il est évident, en effet, qu'une partie des gaz combustibles échappera à la combustion, si

1. *Journal für Gasbeleuchtung*, 1896.

ceux-ci sont refroidis au-dessous de leur température de combustion par le contact d'un métal trop froid.

M. Haber a donc établi que les mélanges pauvres doivent être parfaitement homogènes pour brûler complètement et qu'ils brûleront mieux dans une enceinte à parois chaudes que dans une enceinte trop énergiquement refroidie.

M. Sewell a confirmé ces observations (1) ; prenant comme sujet d'expérimentation un moteur Otto de 10 chevaux, il a observé des pertes croissantes de 4,8 et même 15 0/0, quand ce moteur travaillait à charge réduite, le réglage s'opérant par appauvrissement du mélange. Ces résultats expliqueraient les insuccès de certains moteurs de ce genre, dont la consommation est d'ailleurs toujours supérieure à celle des moteurs réglés par admission de *tout ou rien*.

M. Pétréano ayant enlevé le tuyau de décharge d'un moteur pour laisser échapper directement à l'air les gaz brûlés, a constaté qu'il sortait fréquemment du moteur un jet de flamme, preuve incontestable d'une prolongation de la combustion après la fin de la détente. Ce résultat pourrait se présenter dans le cas évidemment très rare d'une insuffisance d'oxygène ; les gaz mal brûlés achèveraient leur combustion au contact de l'air de l'atmosphère ; une diffusion défectueuse du gaz dans l'air qui l'accompagne dans le cylindre produirait les mêmes effets. Mais nous croyons que le cas signalé par M. Pétréano est plutôt une conséquence de la dilution exagérée des mélanges insuffisamment comprimés ; dans les moteurs actuels, cette grosse imperfection est assurément peu fréquente.

Ce qui précède nous amène à insister sur l'influence d'un parfait mélange des gaz dans les moteurs. Les premiers inventeurs, et notamment M. Lenoir, avaient déjà pressenti l'importance d'une complète diffusion du combustible dans le comburant et ils avaient fait de grands efforts pour réaliser la chose au moyen de soupapes spéciales de diffusion et de mélange. Mais les derniers travaux de MM. Denayrouse et Bandsept ont mis plus vivement en lumière l'avantage qu'il y a à opérer un brassage parfait des gaz à leur admission au cylindre.

M. Bandsept avait exposé ses idées en 1893, dans un intéressant travail sur la production et l'utilisation rationnelles de la chaleur des gaz ; d'après lui, pour se rapprocher des limites théoriques de la combustion parfaite, il faut faire subir au mélange de gaz et d'air trois actions : « des chocs superficiels par volumes, des frottements multiples par jet et un laminage moléculaire ». Ces mots, que nous empruntons à M. Bandsept, ne sont peut-être pas très clairs, mais l'éminent ingénieur savait bien ce qu'il voulait dire, et il l'a prouvé en établissant des brûleurs qui ont encore accru la luminosité des manchons Auer et lui ont permis de réaliser des économies inattendues. Il disait aussi que le mélange intime des éléments et leur dosage exact produiraient mieux leur effet, si l'on faisait ce mélange au préalable, avant de l'introduire dans l'appareil destiné à effectuer sa combustion : on devait réussir ainsi à déterminer la plus grande somme de réactions élémentaires en un espace et en un temps

1. « Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure », tome XLIII, 1900. Ces résultats sont rapportés par M. Meyer dans son article intitulé : « Grosse Gasmachines ».

donné. C'était donc le moyen de développer la plus haute température de combustion, attendu que les effets du refroidissement externe ne se feraient plus sentir d'une manière appréciable. Je trouve enfin dans ce mémoire l'axiome suivant, que l'on ne saurait assez méditer : « La combustion est plutôt une question d'air que de gaz ».

Ces idées devaient trouver leur application dans les moteurs aussi bien que dans les appareils d'éclairage.

Pénétré de l'importance d'une parfaite diffusion des éléments combustibles au sein des charges d'air comburant, M. Pétréano s'est efforcé, dès 1896, de la réaliser dans les moteurs en même temps qu'il cherchait à chauffer l'air avant son admission au cylindre. Il est évident qu'en opérant un malaxage intime du combustible et du comburant et en élevant la température de ce dernier, on arrive à rendre explosif un mélange qui ne le serait pas dans les conditions ordinaires du fonctionnement des moteurs ; l'explosion d'un mélange déterminé est rendue ainsi plus soudaine et par suite la pression explosive augmente ; enfin, dans un moteur donné, on évite ces combus-

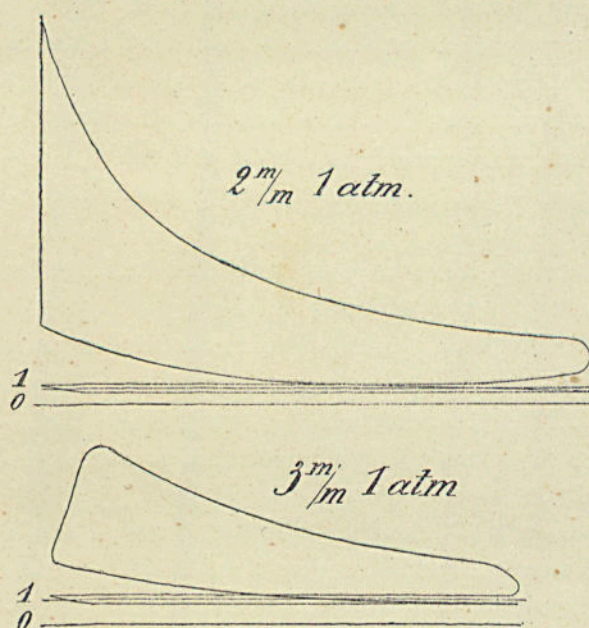


Fig. 99.

tions lentes et prolongées, qui sont quelquefois encore inachevées au moment où les gaz brûlés sont rejetés à l'atmosphère par la soupape de décharge. L'expérience a justifié ces déductions de la théorie. En effet, en faisant passer l'air et le gaz à travers un réchauffeur, qui brasse le mélange en même temps qu'il l'échauffe, M. Pétréano a obtenu des diagrammes d'une forme toute différente, plus aigus que ceux qu'on relève habituellement, dans lesquels la pression explosive se développe presque instantanément, et monte à un niveau beaucoup plus élevé, ainsi qu'on le voit sur la courbe

supérieure de la figure 99 ; le diagramme inférieur est le diagramme obtenu dans le même moteur dans les conditions de marche ordinaire. La combustion est alors effectuée entièrement au début du cycle et l'on ne voit plus, en démontant le tuyau d'échappement, l'inflammation se prolonger jusqu'au sortir du cylindre, comme on le constate souvent dans certains moteurs. Par voie de conséquence, il passe moins de calorique à travers la paroi, conformément aux principes que j'ai posés dans ma théorie des moteurs à gaz tonnant, et l'on pourrait presque supprimer le courant d'eau de réfrigération dans l'enveloppe du cylindre, même dans une machine de cinq chevaux. Tous les diagrammes relevés à la suite dans un essai sont dès lors identiques et superposables et l'on n'observe plus de ratés : le travail augmente donc

et M. Pétréano affirme avoir obtenu vingt-quatre chevaux par un moteur Otto qui en développait d'abord difficilement seize. Les encrassements du cylindre disparaissent, par suite de ces combustions plus rapides et plus complètes. Enfin, le rendement du moteur est amélioré, et l'on gagne de 50 à 150 litres sur la consommation de gaz par cheval-heure ; aussi nous a-t-on cité une expérience faite sur le moteur Otto de 16 chevaux dont nous venons de parler, dans lequel le cheval-heure effectif aurait été obtenu par 450 litres. Bref : il y a bénéfice à tous égards. Ces expériences, qui ont été faites à Berlin, devront être répétées sur d'autres moteurs, afin qu'on puisse les contrôler avec soin et en varier la forme de manière à en dégager tous les enseignements qu'elles comportent.

La formation du mélange tonnant dans l'enveloppe peut d'ailleurs faire naître dans certains esprits des inquiétudes qu'il faudra dissiper.

Les travaux que nous venons de rapporter ont démontré les conséquences favorables à tous égards d'une compression préalable élevée ; nous devons encore chercher à caractériser la nature exacte et l'importance du bénéfice réalisé.

Il ne reste plus de doutes aujourd'hui sur les avantages des fortes compressions ; tous les constructeurs les pratiquent d'ailleurs et parviennent ainsi à réduire de plus en plus les consommations et à augmenter la puissance des moteurs.

Ces effets heureux de la compression ressortent bien de la comparaison ci-dessous, établie par M. Dugald Clerk entre des essais faits par lui à onze ans de distance sur des moteurs Crossley, qui ne diffèrent guère entre eux que par le degré de compression préalable. Ce tableau permet d'ailleurs de juger des progrès réalisés par les grands constructeurs anglais en un si court intervalle de temps.

Diamètre du cylindre	203 ^m /m	241, 2 ^m /m
Course du piston	0 ^m , 4064	0 ^m 4572
Volume d'une cylindrée	13 lit. 17	20 lit. 90
Volume de la chambre de compression	8 lit. 45	8 lit. 35
Pression de compression	2 ^k , 179	3 ^k , 374
Pression explosive	8 ^k , 858	14 ^k , 060
Pression moyenne	4 ^k , 007	5 ^k , 729
Révolutions par minute	164	160
Travail indiqué	9 H P	19, 25 H P
Travail effectif	6, 75	15, 75
Gaz consommé par H. P. indiqué	722 lit.	600 lit.
— — effectif	963 lit.	733 lit.
Rendement organique	0, 75	0, 82

Le perfectionnement réalisé par l'augmentation de la compression ressort mieux encore des comparaisons suivantes faites par M. Atkinson.

	Moteur Otto de 1882	Moteur Crossley de 1888	Moteur Crossley à balayage de 1894
Diamètre du cylindre	229 ^m /m	241	291
Course du piston	0 ^m , 406	0, 457	0, 533
Tours par minute	154	160, 7	173, 6
Pression moyenne	5 ^k , 04	4 ^k , 79	6 ^k , 94
Consommation par H P indiqué	549 lit.	582	410
— — effectif	793	676	466
Compression	2 ^k , 8	4 ^k , 29	5 ^k , 55
Pression explosive	11 ^k , 95	14 ^k , 34	19 ^k , 68

Les trois diagrammes de la figure 100 sont caractéristiques de l'évolution dont nous venons de relever les résultats.

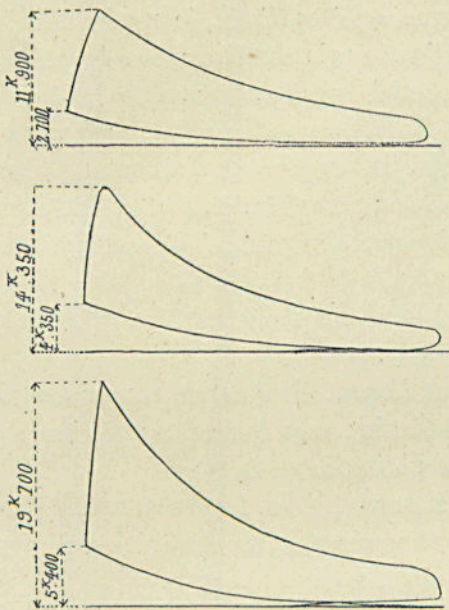


Fig. 400.

La pression explosive croît visiblement avec la compression préalable, et la forme du diagramme se modifie. La pointe aiguë du troisième diagramme témoigne d'une combustion plus rapide; la consommation par cheval-heure est par le fait descendue à 466 litres.

La série des diagrammes de la figure 101 est fort suggestive aussi: j'emprunte ces courbes à un intéressant travail de M. Cui-nat, basé sur des recherches de M. Al-laire (1).

Ces diagrammes ont été pris sur un moteur Charon, à deux cylindres de 350 mil-limètres de diamètre, 0^m,600 de course, faisant 150 tours par minute; ils corres-pondent aux données suivantes:

	Pression moyenne	Travail indiqué	Rendement organique	Consommation de gaz
	kilogr.	chevaux		litres
A	1,575	31,1	0,53	1072
B	2,200	43,2	0,69	638
C	2,540	49,5	0,81	538
D	2,820	54,7	0,87	497
E	3,010	58,3	0,91	479

Le rendement augmente avec la compression et la consommation baisse; l'allure des diagrammes change en même temps et caractérise la nature des combustions qui ont lieu dans ces diverses conditions. On ne saurait trouver une démonstration plus complète des résultats des fortes compressions et des combustions vives qui en résultent.

Nous pourrions accumuler les preuves en faveur des compressions considérables; citons encore des expériences faites par M. Bellamy sur un moteur Stockport; pour des compressions montant de 4^k,22 à 6^k,33 et 7^k,36, la consommation de gaz a baissé de 538 à 500 et 481 litres par cheval-heure effectif. Le moteur Niel, que j'ai essayé à Evreux, en 1902, avec M. A. Moreau, comprimait à près de 11 kilogrammes et ne consommait que 439 litres de gaz d'un pouvoir supérieur de 5.664 calories: nous ver-ront plus loin quels rendements thermiques correspondent à ces chiffres.

1. « Résultats d'essais faits sur un moteur à gaz », par H. Cui-nat; *Bulletin Technologique*, de la Société des anciens élèves des écoles d'Arts et Métiers, 1894.

La progression du rendement avec la compression est manifeste ; y a-t-il donc lieu de chercher à l'augmenter encore ?

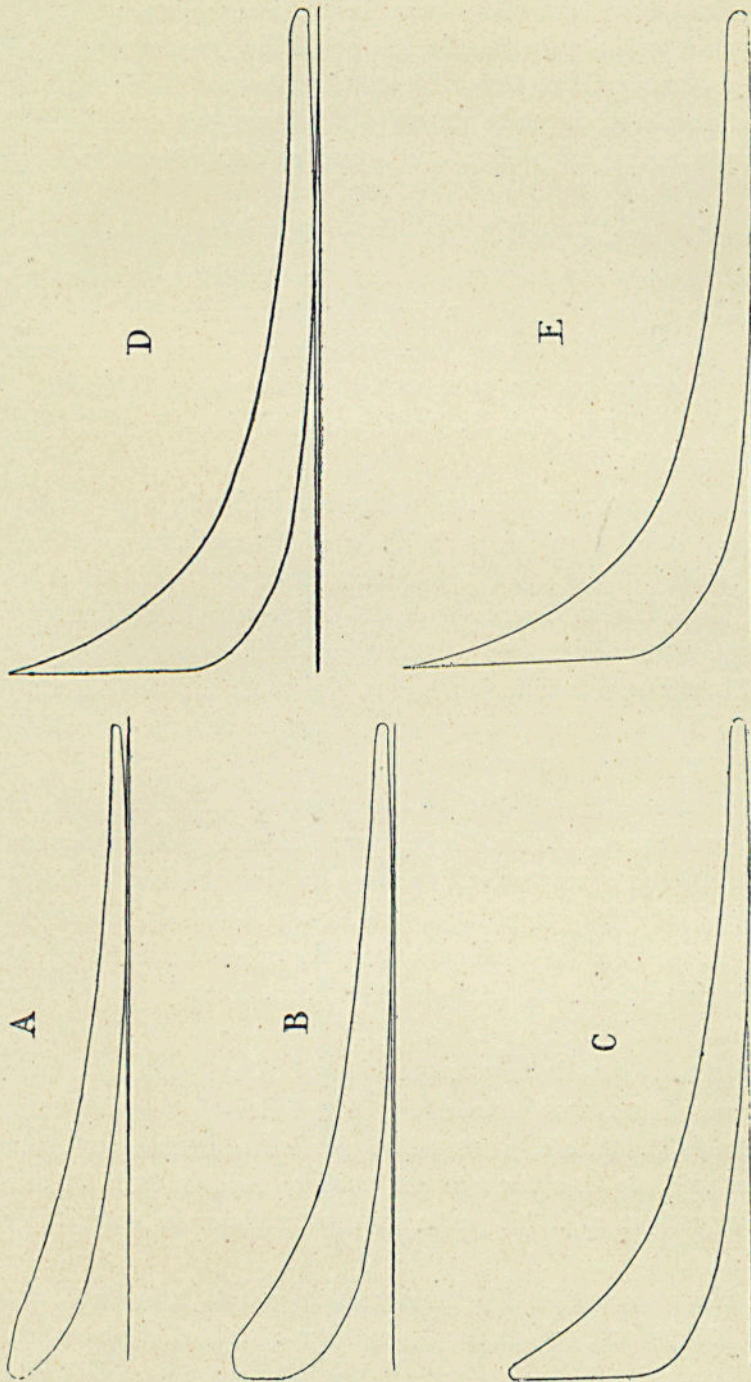


Fig. 101.

La théorie répond affirmativement à cette question ; mais la pratique nous impose une limite qu'il serait imprudent de franchir, sous peine de s'exposer aux plus graves

inconvenients. C'est qu'en effet les hautes températures produites par ces compressions adiabatiques considérables, concourant avec une inflammabilité rapidement croissante du mélange ont pour effet de donner lieu à des allumages spontanés et à des explosions violentes qui présentent le plus grand danger et se manifestent en tout cas par des coups durs qu'il faut éviter. Il est vrai qu'il est facile de remédier au mal, soit en opérant sur des mélanges de plus en plus pauvres, soit en abaissant la température des gaz par une injection d'eau, soit même en refroidissant énergiquement le cylindre.

J'ai insisté sur le premier procédé, dès le début de l'évolution des moteurs vers les compressions élevées : plusieurs ingénieurs ont partagé cette manière de voir, et le succès de plusieurs moteurs est dû en partie à cette manière de faire. L'emploi des gaz pauvres de gazogènes et des gaz plus pauvres encore de hauts fourneaux a facilité l'application du principe, qui ne présentait du reste aucune difficulté. L'injection d'eau était plus compliquée, mais M. Banki a réalisé des dispositifs simples, dont l'effet a été remarquable.

Il existe encore d'autres procédés qui permettent d'aborder sans danger les compressions élevées ; le balayage des gaz brûlés n'est pas un des moins efficaces, parce qu'il refroidit la paroi *ab intus*, et qu'il la débarrasse des cambouis solidifiés adhérents au métal, dont l'incandescence engendre trop souvent les allumages intempestifs. Signalons aussi un refroidissement énergique de la culasse, par une circulation d'eau très active et bien complète jointe à un régime de fonctionnement éloigné de tout surmenage. Mais nous nous engageons ici dans un domaine essentiellement pratique, que nous ne pouvons encore aborder.

Ces considérations s'appliquent non seulement aux moteurs à explosion, mais encore aux moteurs à combustion ; M. Diesel a été amené aussi à pratiquer des compressions considérables de mélanges pauvres, et il a pu monter à des pressions de 40 kilogrammes, grâce à l'artifice dont il fait usage et qui consiste à n'introduire le combustible dans le comburant que sur la fin de la compression ; le combustible brûle au fur et à mesure de son injection, dans des conditions qui suffisent à expliquer les remarquables résultats obtenus.

La théorie générique établie dans le chapitre précédent nous a fait prévoir ⁽¹⁾ que les fortes compressions avaient pour effet de faire baisser la température de l'échappement, à la fin de la détente, alors même que cette détente restait incomplète, comme cela se présente dans les moteurs Otto ; ce résultat de la théorie pure est confirmé par la pratique et il fait partie des constatations de notre théorie expérimentale.

On peut en effet comparer les diagrammes théoriques de la figure 72 avec ceux des figures 100 et 101 qui sont relevés sur des moteurs : le parallélisme est complet.

Nous compléterons les études qui précèdent en donnant, à titre de documents, une série de diagrammes relevés par M. Dowson sur des moteurs alimentés au gaz pauvre ;

1. *Vide supra*, page 293.

sans effectuer de compression exagérée, mais en préparant savamment ses mélanges et en formant un gaz tonnant très homogène, cet ingénieur distingué a obtenu des diagrammes identiques à ceux qu'on obtient avec des gaz riches.

Le diagramme A correspond à un gaz riche de la ville d'Openshaw, alors que le diagramme B a été pris sur le même moteur alimenté de gaz Dowson : l'échelle des

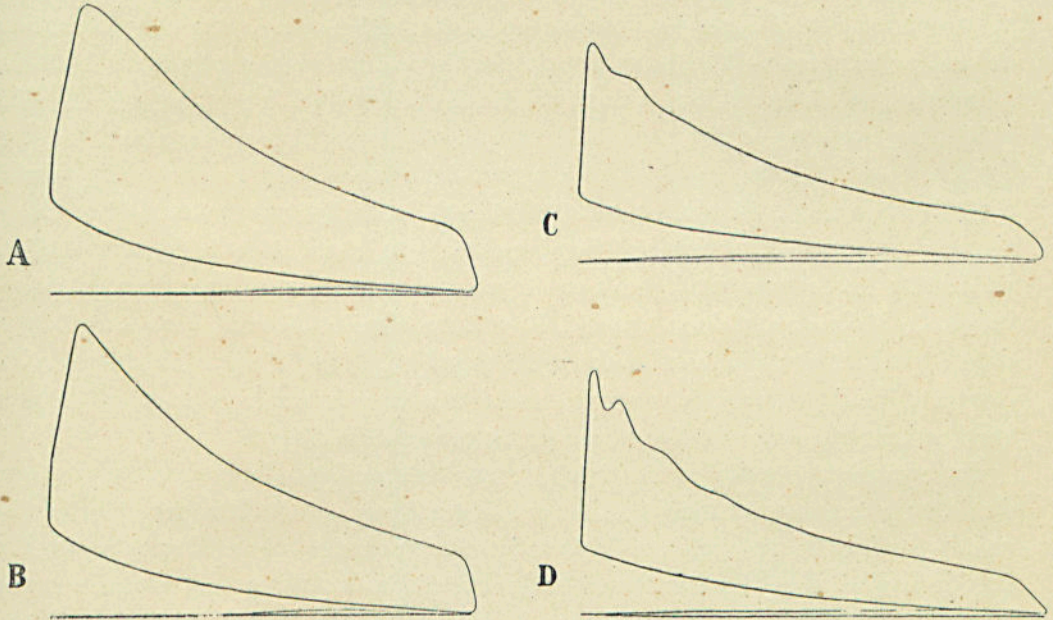


Fig. 402.

deux courbes est la même, soit de $3^{\text{mm}},3$ par kilogramme : centimètre carré, de manière à permettre la comparaison. La pression moyenne est de 5 kilogrammes pour A et de $4^{\text{kg}},9$ pour B.

Les diagrammes C et D sont à une échelle moindre de $2^{\text{mm}},25$; le premier est celui d'un gaz Dowson à l'anthracite, le second, d'un gaz de coke. La pression moyenne a la même valeur égale à $4^{\text{kg}},45$ dans les deux cas.

Ces relevés démontrent qu'il est possible d'obtenir de beaux diagrammes avec les gaz les plus pauvres : le tout est de faire de bons mélanges.

IV

La théorie expérimentale devant les faits.

Les observations rapportées ci-dessus portaient sur des phénomènes spéciaux, considérés isolément ; or, il se passe dans le cylindre des moteurs tout un ensemble de réactions multiples et complexes, dont quelques-unes sont encore inconnues et dont

la plupart sont mal expliquées. Il est évident que les règles que nous avons formulées ne sauraient embrasser tous ces faits ; par suite, ces règles ne se vérifieront pas toujours. C'est un aveu qui s'impose : nous le faisons sans difficulté.

Prenons quelques exemples pour bien mettre les choses au point.

L'action de paroi est reconnue ; on ne saurait nier son importance. Il y a un intérêt réel à la réduire en maintenant à cette paroi une température relativement élevée et en opérant des détenteurs rapides : est-ce à dire qu'en obéissant à cette indication de la théorie expérimentale, nous soyons assurés de faire baisser la consommation de n'importe quel moteur ? Nous n'en avons jamais eu l'illusion. Il peut arriver en effet et il arrive souvent que l'on perde à l'échappement le calorique qu'on a pu épargner dans la course motrice, en disputant à la paroi les calories qu'elle absorbe. C'est facile à expliquer : si, dans l'évolution constituant le cycle, les gaz ont moins cédé de calorique, ils se trouvent nécessairement plus chauds au moment de la décharge et l'on jette à l'air les calories que l'on n'a pas laissé couler au ruisseau avec l'eau de circulation. Le bénéfice peut donc être nul. Il en sera ainsi fatalement dans tout moteur dans lequel s'opère une combustion lente et prolongée arrêtée par une détente incomplète. Voilà pourquoi nous avons attaché tant de prix aux moyens procurant une combustion rapide et complète et une prolongation de la détente.

Autre conséquence des parois chaudes : leur température élevée diminue la masse du mélange tonnant introduit dans le cycle et tend par suite à diminuer aussi le travail disponible ; le moteur travaille donc à moindre charge et le rendement en souffre inévitablement. Il peut se faire aussi que la proportion du mélange soit modifiée et que la combustion s'opère moins bien, par défaut ou par excès de carburant ; le mélange peut d'ailleurs s'allumer prématurément et donner lieu à un déchet notable d'énergie. Pour toutes ces causes, la marche à température élevée ne donnera pas les résultats attendus : une marche rapide peut de même entraîner des modifications de dosage et autres qui se répercuteront fâcheusement sur l'utilisation du calorique.

L'avantage des fortes compressions est établi par maintes constatations qu'il n'est pas permis de mettre en doute ; et pourtant, ce serait une erreur de croire qu'en augmentant la compression dans n'importe quel moteur on améliorera son rendement. Il faut tenir compte de facteurs nombreux, dont l'action se superpose aux autres, tels que la richesse du gaz, la composition du mélange, la charge du moteur, sa vitesse, le degré de détente, etc. Quelquefois se produiront des résultats inexplicables ; tel est ce fait, observé dans quelques moteurs, d'un accroissement de consommation en marche à vide, accompagnant une augmentation de la compression, alors qu'à pleine charge cette augmentation avait diminué la consommation du même moteur ; c'est un argument qu'on a fait valoir en faveur des machines à compression et détente variable par le régulateur, genre Charon.

Nous pourrions multiplier ces exemples démontrant qu'il n'y a rien d'absolu dans les lois de la théorie expérimentale elle-même.

Ce préambule était nécessaire pour expliquer certaines conclusions de savantes études faites sur des moteurs, avec une habileté et une impartialité à laquelle nous

rendons hommage tout en nous réservant de critiquer quelques déductions qu'on en a tirées.

Un des travaux les plus considérables qui aient été faits sur les moteurs à gaz est assurément celui de M. Slaby, professeur à la *Technische Hochschule* de Berlin (1) : c'est une étude expérimentale approfondie qui a coûté plusieurs années de travail à l'éminent professeur. Elle a été exécutée sur un petit moteur Otto, disposé de manière à pouvoir faire varier à volonté le dosage du mélange, la température du cylindre, la vitesse du piston, la compression, le point d'allumage, la détente, l'avance à l'échappement, etc. ; en un mot, c'est un moteur à gaz de laboratoire d'enseignement.

Le diamètre du cylindre était de 172,5 millimètres ; la chambre de combustion et de compression avait un volume de 4,345, mais ce volume s'élevait à 4,841 par l'adjonction des divers canaux d'admission et de décharge. La course du piston était de 340 millimètres, ce qui correspond à 7,942 par cylindrée. Le rapport de la chambre au cylindre était donc égal à $\frac{4,841}{7,942} = 0,6095$; la compression en volume était donnée par le rapport :

$$\frac{4,841 + 7,942}{4,841} = \frac{12,783}{4,841} = 2,64.$$

M. Slaby a constaté que la compression aussi bien que la détente était marquée par une perte à la paroi, diminuant incontestablement avec la vitesse du moteur, mais il a observé par contre que la perte à l'échappement augmentait plus vite encore, de telle sorte que le bénéfice réalisé dans les phases précédentes était compensé par cette perte. Dans ces essais, la température des parois venant à augmenter, le rendement thermique n'en était nullement amélioré. Voici quelques chiffres qui établissent ces résultats.

Numéros	Durée de l'essai	Température de l'eau	Vitesse en tours par minute	Travail indiqué en chevaux	Consommation par cheval-heure en litres
1	30 ^m	9°	82,2 tours	2,83	859
2	30	10	90,3	3,21	829
3	30	10	83,5	2,88	880
4	60 ^m	10°	172,7 tours	4,50	819
5	30	12	188,7	4,95	865
6	30	12	175,8	4,93	867
7	30 ^m	80°	90,4 tours	2,58	916
8	15	80	76,0	2,27	945
9	30	95	94,5	2,90	899
10	30 ^m	86°	200, » tours	4,40	893
11	15	87	205,3	4,37	914
12	30	90	183,9	4,68	869

1. « Calorimetrische Untersuchungen über den Kreisprozess der Gasmachine », Berlin, 1891.

M. Slaby a conclu de ses essais :

« Man wird es nicht für zu weit gehend halten, wenn ich durch meine Versuche die von Witz gefundenen Gesetze, in ihrer Anwendung auf Gasmotoren, für wiederlegt erachte. »

Il déclarait donc que les lois expérimentales que j'avais formulées étaient sans application dans le domaine de la pratique.

Je juge inutile de revenir sur la polémique qui s'engagea sur ces points : je rappellerai seulement que j'opposai aux expériences du savant berlinois d'autres expériences qui confirmaient les lois incriminées, et que je relevai dans son propre travail des chiffres qui ne justifiaient pas ses critiques (1).

Voici par exemple les résultats obtenus par M. Slaby en produisant le même travail effectif, le même jour, avec un gaz identique, à des températures de 16° et 100° dans les mêmes conditions de vitesse.

Durée de l'essai	40 minutes	40 minutes
Température du cylindre	16°	100°
Vitesse en tours par minute	93,95 tours	95,75 tours
Pression moyenne du diagramme	4 ^k 195	3 ^k 597
Consommation du gaz pour le même travail effectif	1908 litres	1779 litres

On voit que, la température passant de 16° à 100°, la consommation de gaz diminue de 129 litres sur 1908, soit de 6,7 pour cent, ce qui n'est pas négligeable.

Si les lois qu'on me faisait l'honneur de désigner par mon nom, péchaient par excès de généralisation, on pouvait donc dire que la critique elle-même présentait le même défaut.

M. Schöttler, après avoir résumé les divers arguments présentés par les deux parties dans cette discussion, conclut en ces termes, que je crois intéressant de reproduire : « Deshalb bin ich der Ansicht, dass allerdings die Grundsätze welche Witz aus seinen Versuchen ableitet, auf Gasmaschinen anwendbar sind und angewendet werden müssen, obgleich bei einer einzelnen fertigen Maschine andere Einflüsse eintreten können, welche die günstigere Wandungswirkung aufheben. Diese muss man eben zu beseitigen suchen. Man soll also ein möglichst Gasarmes Gemisch bei möglichst grosser Kolbengeschwindigkeit möglichst schnell verbrennen » (2) « C'est pourquoi je considère que les lois déduites par Witz de ses expériences sont applicables aux moteurs à gaz et qu'elles doivent leur être appliquées, alors même que pour un moteur déterminé des influences étrangères interviendraient pour masquer l'influence des parois ; ce sont ces influences qu'il faudrait écarter. Qu'on cherche donc à faire brûler le plus vite possible un mélange aussi pauvre que possible avec la plus grande vitesse de piston possible. »

1. Cf : Réponse à quelques objections contre l'action de paroi dans les moteurs à gaz, *Bulletin de la Société du Nord*, 1886.

2. Schöttler. — « Die Gasmaschine », page 296 ; 3^e édition, 1899.

M. Norris a communiqué au Congrès des Ingénieurs civils de Leeds une étude faite sur un moteur Robey de 16 chevaux dans laquelle nous relevons des observations, qui viennent aussi appuyer nos vues. Il déclare avoir constaté une économie de 7 à 10 % en maintenant l'enveloppe du cylindre à 70° centigrades au lieu de 18°; toutefois il ne pense pas que l'on obtienne d'aussi beaux résultats avec tous les moteurs. Il est encore d'accord avec nous pour affirmer l'influence favorable des détentes rapides et des hautes compressions (1).

L'expérience suivante, faite par M. Mathot, sur un moteur Dudbridge de 10 chevaux, à des températures différentes de l'enveloppe du cylindre, nous produit un argument décisif, que nous avons été heureux de relever. Avec une circulation d'eau intense, maintenant le cylindre à 20°, le moteur ne développait que 10,65 chevaux; avec une circulation modérée, donnant 60° à l'écoulement, la puissance du moteur atteignit 11,24 chevaux: l'augmentation était de près de 6 % (2). Dans le premier essai, la consommation par cheval-heure effectif fut trouvée égale à 62 litres. Le régime de combustion et de détente était évidemment modifié par l'action de paroi, attendu que les pressions moyennes des deux expériences furent 6^{kg},25 et 6^{kg},50 par centimètre carré.

Nous pourrions multiplier les exemples en faveur de notre manière de voir; mais il nous paraît inutile d'insister davantage sur ce point.

Le Comité des moteurs à gaz institué par la Compagnie des ingénieurs-mécaniciens anglais (*Gas Engine Research Committee*) a publié, sous la signature du professeur Burstall, ses deux premiers comptes-rendus (3). M. Kennedy a déclaré que les expériences poursuivies par le Comité sont les plus importantes et les plus intéressantes de toutes celles qu'il a vu entreprendre par la Compagnie; ce témoignage hautement autorisé honore grandement les ingénieurs éminents qui ont organisé ces épreuves (MM. Burstall, Donkin, Fielding, Maw, Platt, Roberts-Austen et Wilson).

L'objet des travaux du comité était extrêmement large, puisqu'on se proposait de déterminer l'effet économique produit sur un moteur en modifiant toutes les diverses conditions de son fonctionnement, compression préalable du mélange, vitesse du piston, fréquence des explosions, température des parois, teneur du mélange en air et gaz, etc. On a pris comme sujet d'expérience un moteur à quatre temps de la maison Fielding et Platt, ayant 152,5 millimètres de diamètre et 0^m,305 de course, pouvant aisément développer quatre chevaux; sa régulation était opérée par admission du tout ou rien: le régulateur était disposé de façon à pouvoir réduire à volonté la vitesse de 205 à 120 révolutions. En faisant varier la longueur de la bielle, on pouvait obtenir des compressions comprises entre 2^{kg},46 et 6^{kg},33 absolus par centimètre carré. Plutôt que d'employer un compteur pour mesurer le gaz dépensé, on a préféré recourir

1. *Journal du Gaz et de l'Électricité*, 31 janvier 1893.

2. A noter que pour développer 10,65 chevaux, le moteur ne faisait aucun passage à vide alors qu'il donnait 11,24 chevaux avec 2 pour cent d'explosions disponibles; cette constatation a été facile à l'aide de l'enregistreur Mathot, qui sera décrit plus loin.

3. « First Report to the Gas Engine Research Committee; description of apparatus and methods and preliminary results », by professor Frederic Burstall, 1898. « Second Report, etc. », 1904.

à un gazomètre jaugé, qui avait l'avantage de débiter le gaz sous une pression constante ; mais le compteur a paru applicable à la mesure de l'air admis. Un appareil électrique assez compliqué était adapté au moteur en vue de recueillir les gaz de la décharge au moment même de l'ouverture de la soupape d'échappement, sans qu'il y eût possibilité de rentrée d'air. Le travail était relevé par un indicateur Wayne, à piston rotatif, fourni par la maison Elliott ; les diagrammes d'une même série d'essais différaient si peu qu'on pouvait fort aisément construire un diagramme moyen, qui servait de base à la discussion des résultats obtenus.

L'allumage était effectué d'abord à l'aide d'un tube à incandescence en fer, pourvu d'une soupape (*timing valve*), analogue à celle de Crossley, mue électriquement ; plus tard, on employa l'ignition électrique.

La composition du gaz a déjà été indiquée à la page 85 pour les divers échantillons prélevés au cours des essais.

Le pouvoir calorifique des deux premiers échantillons était de 10.430 et 9.874 calories par kilogramme de gaz ; ils exigeaient pour leur combustion complète 5,61 ou 5,47 volumes d'air ; le troisième donnait 4.850 calories par mètre cube, et exigeait 5,49 volumes. Les pouvoirs ci-dessus sont les pouvoirs inférieurs.

Dix-sept séries d'essais, poursuivis avec une rigueur et une méthode parfaite, ont donné les résultats mentionnés ci-dessous.

Numéro d'ordre	Vitesse en tours	Compression		Explosions sur 400	Volume d'air par litre de gaz	Température du cylindre	Composition de la décharge		Travail indiqué	Consommation par cheval-heure indiqué	Rendement thermique indiqué	Numéro de mérite
		kg.	kg.				CO ²	O				
1	118	3,65	8,29	89	9,1	60,0	6,0	10,0	1,72	934	12,6	16
2	161	4,36	14,83	50	8,0	62,7	7,6	6,4	2,65	724	16,2	6
3	158,3	4,50	12,02	58	8,36	64,7	7,2	7,4	2,69	733	15,5	8
4	164,3	4,50	14,27	52	7,13	63,5	8,0	5,2	2,79	770	15,4	9
5	204,4	4,57	11,74	67	8,35	64,5	7,2	7,6	3,79	761	15,6	7
6	204,2	4,57	7,38	88	8,48	60,8	7,2	7,6	3,41	908	13,4	15
7	156,2	5,06	12,02	64	9,48	62,7	6,0	9,6	2,87	659	18,0	2
8	158,2	5,20	16,66	53	7,18	66,0	8,2	5,6	2,44	842	14,4	12
9	157,7	5,34	16,17	55	7,08	65,0	8,2	5,8	2,61	784	15,24	10
10	155,5	5,62	11,32	69	10,10	71,3	5,2	10,8	2,61	681	17,65	4
11	154,2	5,83	14,27	69	8,75	56,5	6,5	7,0	2,50	751	16,40	5
12	154,9	5,83	20,11	61	5,28	75,6	9,3	0,4	2,52	993	11,7	17
13	117,6	6,05	12,58	75	10,40	60,0	6,2	9,4	1,84	798	15,0	11
14	117,7	7,17	14,76	78	9,25	60,8	5,4	10,6	1,60	880	13,6	13
15	197,2	7,24	14,13	92	8,60	62,0	6,8	8,6	5,10	576	21,0	1
16	157,5	7,38	19,54	70	7,18	59,0	7,4	6,6	2,48	857	13,4	14
17	148,9	7,38	9,49	85	10,80	67,0	3,6	11,6	2,56	673	18,0	3

Ce tableau présente un très grand intérêt et il comporte peut-être de graves enseignements ; mais je crains qu'on n'éprouve de grandes difficultés à dégager des conclusions certaines de cet amas de chiffres. Le comité a commenté de la manière suivante les résultats qu'il a obtenus. Il faut écarter d'abord l'essai n° 15, qui est le

premier par ordre de mérite, parce qu'il correspond exceptionnellement à une pleine charge de plus de 5 chevaux. Les meilleurs résultats, à charge normale, sont ceux qui portent les numéros d'ordre 7 et 17 ; ils correspondent à 9,48 et 10,80 volumes d'air, alors qu'il n'en fallait théoriquement que 5,5 ; mais 17 est caractérisé par une forte compression alors qu'au contraire 7 n'a qu'une faible compression. Le comité pense que l'influence des fortes compressions ne s'exerce heureusement sur le rendement que pour des compositions déterminées du mélange ; ainsi il fait remarquer que les essais 4, 8, 9 et 16, pour lesquels la teneur en air est identique, font ressortir un désavantage pour 16, dans lequel cependant la compression est la plus forte. Comparant aussi 1 et 14, dans lesquels la compression varie dans le rapport de 1 à 2, il constate que la forte compression du dernier essai n'a pas suffi pour améliorer le rendement. Il conclut dans les termes suivants : « Nos essais semblent prouver que l'économie dépend d'un choix judicieux dans la composition du mélange en air et en gaz, la teneur en air augmentant avec la compression. Mais ces expériences ne sont pas assez nombreuses en ce moment pour nous permettre de déterminer la teneur qui convient pour une compression donnée » (1).

Le second rapport fait connaître les résultats de quatre nouvelles séries d'essais, dont nous extrayons les chiffres des tableaux de la page suivante.

Le comité n'a pas publié de commentaires sur ces nombreuses expériences.

Nous proposerions de conclure dans le sens de ce qui suit.

L'essai A, dans lequel la compression augmente au fur et à mesure que le mélange est constitué plus pauvre et que le travail diminue, fait ressortir l'avantage des hautes compressions et des mélanges pauvres ; le résultat du n° 7 le prouve. L'essai B est ordonné de même et il conduit aux mêmes conclusions ; toutefois c'est principalement l'avantage des mélanges pauvres qui ressort de cette série dans laquelle la compression a peu varié. Les expériences C concordent avec les précédentes ; on voit que, le travail effectif baissant de 4,04 à 2,45 chevaux, le rendement thermique indiqué monte néanmoins de 17,2 à 21,9 0/0. La série D attribue le meilleur rendement de 23,1 à une compression de 8^k,36 absolus ; pour un mélange pauvre formé à 10,7 volumes d'air, le moteur ne développe que 4,06 chevaux indiqués et 2,81 chevaux effectifs.

Le meilleur régime de marche de ce moteur de 152 millimètres de diamètre, 0^m,305 de course faisant 200 révolutions par minute, correspond donc à 3 chevaux effectifs au plus, pour environ 7^k,5 de compression effective et 11 volumes d'air par volume de gaz, le pouvoir supérieur de ce gaz étant 5.300 calories environ.

Le comité n'a pas jugé utile de faire varier la vitesse, qui est restée voisine de 200 tours par minute, ni la température de l'enveloppe, maintenue aux environs de 65° dans toutes ces expériences.

Le moteur soumis à ces multiples épreuves ne possède qu'un rendement médiocre

1. « The tests seem to indicate that economy depends on the choice of the correct ratio of air to gas, and that this ratio increases with the compression. The number of experiments is not yet sufficient to determine what this ratio is for any given compression. »

Numéro d'ordre	Vitesse en tours par minute	Compression		Explosions par minute	Volume d'air par litre de gaz	Température du cylindre	Température de la décharge	γ en détente	Travail indiqué	Travail effectif	Consommation par cheval-heure indiqué	Rendement thermique indiqué
		kg.	kg.									
<i>Essai A.</i>												
1	191,5	3,82	10,39	95,7	5,5	63	1097	1,501	5,11	3,98	770	16,6
2	190,3	3,75	10,19	94,4	6,4	64	982	1,491	4,68	3,51	749	17,4
3	200,6	3,85	10,10	96,2	7,2	62	937	1,426	4,53	3,30	716	17,9
4	201,5	3,98	9,23	95,7	7,8	66	947	1,400	4,41	3,55	707	18,7
5	207,5	4,07	8,78	89,9	8,2	60	932	1,328	3,95	2,98	707	18,7
6	197,1	3,67	9,13	94,3	8,1	58	847	1,405	4,24	2,88	708	18,3
7	206,8	4,32	7,35	99,2	10,1	64	857	1,347	3,86	2,72	703	18,9
8	201,3	3,67	8,57	91,7	8,6	64	737	1,410	3,75	2,55	720	17,7
<i>Essai B.</i>												
1	196,3	4,96	15,79	93,9	5,4	63	1027	1,483	5,44	3,93	702	19,0
4	196,2	4,86	11,87	87,1	7,0	61	942	1,516	4,54	3,41	665	20,0
8	202,3	5,29	9,92	95,5	9,8	62	817	1,341	4,05	2,83	634	20,7
9	203,5	5,36	9,05	97,4	10,5	61	747	1,338	3,81	2,51	623	21,2
<i>Essai C.</i>												
1	198,7	6,45	14,75	95,2	5,0	64	992	1,413	5,27	4,04	754	17,2
3	200,8	6,73	17,32	95,1	5,8	66	907	1,382	4,93	3,84	708	18,2
5	198,8	6,59	11,72	99,1	7,9	62	857	1,332	4,65	3,66	640	20,0
7	201,6	6,52	9,65	92,5	9,8	61	817	1,299	4,03	2,45	586	21,9
<i>Essai D.</i>												
1	199,0	8,66	13,60	92,7	6,5	65	862	1,344	4,46	3,71	728	18,1
2	196,7	8,92	18,28	92,3	6,8	62	822	1,338	4,57	3,41	690	19,1
3	199,1	8,82	14,80	98,0	7,4	62	872	1,324	4,96	3,80	620	21,2
4	200,3	8,70	14,41	96,6	8,0	64	887	1,327	5,08	3,71	580	22,1
5	202,0	8,70	14,05	95,1	8,4	66	842	1,327	4,88	3,51	566	22,7
6	202,5	8,85	13,81	95,0	9,4	60	777	1,294	4,45	3,10	577	22,3
7	200,7	8,66	12,18	92,7	9,9	61	787	1,251	4,21	2,91	569	22,7
8	200,2	8,36	11,85	93,7	10,7	66	749	1,245	4,06	2,81	558	23,1
9	200,5	8,82	12,60	92,9	10,9	63	702	1,230	3,94	2,70	566	22,7
10	202,0	8,72	12,00	95,4	11,7	64	637	1,199	3,71	2,37	572	22,5

de 23,1 en travail indiqué au maximum, le plus généralement égal à 19 ou 20 0/0 : cette infériorité relative est due à ce que la détente est fort incomplète ; les gaz brûlés s'échappent par suite du cylindre à une température trop élevée (1). Il est regrettable que le comité n'ait pas fait porter ses études sur une machine mieux conditionnée, utilisant donc plus parfaitement le calorique disponible et consommant moins de gaz. Un moteur de 4 chevaux, qui dépense souvent 700 litres et jamais moins de 558 litres

1. Toutefois il faut noter que les tableaux indiquent la température exacte des gaz au moment de l'ouverture de l'échappement et non pas celle qu'ils possèdent dans le tuyau de décharge.

par cheval-vapeur indiqué, alimenté de gaz de ville à 5.250 calories environ (pouvoir supérieur) ne constitue pas un excellent sujet d'études aujourd'hui, alors que l'on établit de nombreux moteurs consommant moins de 500 litres dans les mêmes conditions.

M. Eugène Meyer, alors professeur à la *Technische Hochschule* de Hanovre, a poursuivi dans son laboratoire un certain nombre d'expériences comparatives sur un moteur Otto de 8 chevaux, dans lequel on modifiait judicieusement les conditions diverses du fonctionnement.

La compression étant d'environ 6 kilogrammes, on a obtenu les résultats ci-dessous :

Nombre de tours par minute	Volume d'air par volume de gaz	Consommation du gaz par cheval-heure indiqué	Calories emportées par l'eau de circulation pour un litre de gaz
218	5,93	584	2,260
235	8,92	524	1,995

Nous voyons donc décroître la consommation de gaz au fur et à mesure que la vitesse augmente ainsi que la dilution du gaz dans le mélange tonnant; l'action de paroi est donc moindre, comme la théorie le fait prévoir, et cet effet se manifeste par une diminution de la chaleur emportée par l'eau de réfrigération du cylindre.

M. Meyer a fait des expériences analogues sur un moteur Otto de 50 chevaux, alimenté de gaz de ville dont le pouvoir inférieur était de 4.960 calories; le pouvoir supérieur peut donc être estimé à 5.400 calories; la compression était forte et atteignait 9^k,25, et la pression explosive montait à 22-25 kilogrammes.

Voici les chiffres relevés à diverses charges.

Nombre de tours par minute	Travail indiqué ζ_i	Travail effectif ζ_e	Rendement organique p. %	$\zeta_i - \zeta_e$	Consommation		Calories emportées par l'eau de circulation pour un litre de gaz.	Température d'échappement
					par cheval-heure indiqué	par cheval-heure effectif		
198,8	73,5	65,1	89	8,4	388	438	1,884	498
204,6	63,3	54,6	86,1	8,7	428	496	1,776	455
206,3	52,6	42,7	81,0	9,9	465	573	1,735	392
207,9	40,1	30,7	76,0	9,4	618	808	1,664	325
206,0	29,4	18,0	61,0	11,4	752	1230	1,515	224
200,6	12,5	0	»	12,5	946	»	»	142

Le réglage de ce moteur s'effectuait par appauvrissement du mélange et les diagrammes se modifiaient profondément dans leur forme, passant de la courbe élançée I à la courbe surbaissée II de la figure 103.

1. Meyer. — « Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure », tome XLIII, 1900.

Or, la consommation s'accroît rapidement par cheval-heure indiqué à mesure que la charge devient moindre, ce qui était attendu ; mais la perte à la décharge et à la paroi diminue en même temps, de telle sorte qu'on ne saurait attribuer à l'action de paroi la consommation de plus en plus élevée que nous constatons. On ne peut expliquer autrement que par le ralentissement de la combustion le *nachbrennen* manifesté par le diagramme II, ayant sans doute pour effet une combustion incomplète.

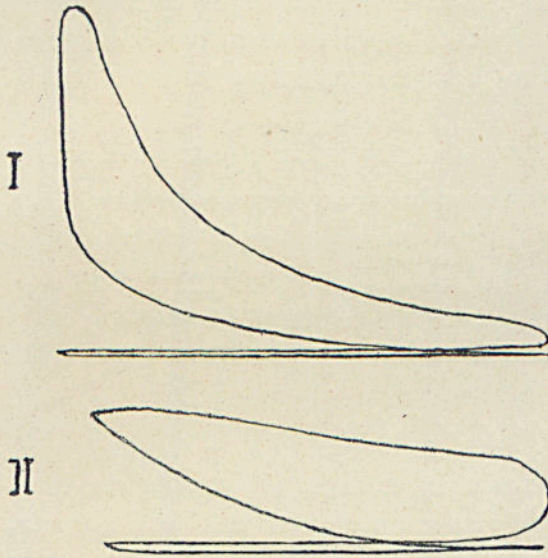


Fig. 403.

Nous voyons donc qu'on aurait tort de poser en principe que la dilution améliore le rendement ; ce n'est vrai que si la dilution est accompagnée par une augmentation corrélative de la compression, suffisante pour maintenir une inflammabilité déterminée du mélange formé. Cette constatation confirme ce que la théorie nous avait appris sur les avantages des cycles à surcompression : elle justifie la pratique des

constructeurs qui opèrent des compressions de plus en plus fortes à mesure qu'ils appauvrissent leur mélange.

M. Meyer a mis en lumière ce point important de la théorie générique et expérimentale par une série d'essais, poursuivis avec une méthode parfaite et une rigueur indiscutable, sur un moteur d'étude de son laboratoire de la *Technische Hochschule* de Berlin (1). Nous extrayons du savant mémoire de M. Meyer les données suivantes :

Nombre de tours	Travail indiqué en chevaux	Travail effectif en chevaux	Gaz par ch.-h. effectif en litres	Calories par ch.-heure effectif	Volumes d'air pour un do gaz	Pression de compression	Pression explosive
<i>Gaz de ville</i>							
202, 2	13, 50	10, 11	628	3270	8, 3	8 ^k	20, 2
202, 8	13, 04	9, 74	645	3290	8, 7	7, 4	19, 9
203, 3	13, 18	10, 16	676	3555	7, 8	6, 2	17, 1
<i>Gaz pauvre</i>							
204, 9	12, 25	8, 20	3110	3315	1, 25	7, 6	16, 4
194, 6	11, 28	8, 56	3000	3640	1, 15	6, 9	16, 0
203, 0	10, 49	7, 10	3920	4470	1, 19	5, 9	10, 6

1. *Untersuchungen am Gasmotor*, par E. Meyer, Berlin 1903. Ce moteur mesure 220 mm. de diamètre, 0m,330 de course, et il a une vitesse normale de 200 révolutions par minute ; il sort des ateliers de Deutz ; des dispositifs spéciaux permettent de faire varier à volonté la compression et le moment de l'allumage. Le rendement du moteur est bon, mais non excellent.

Les conclusions du distingué professeur sont formelles relativement aux avantages de la compression et nous nous trouvons entièrement d'accord avec lui sur ce point. Par contre, nous estimons qu'il n'attribue pas à l'action de paroi toute l'importance qu'elle possède et qui ressort de ses expériences elles-mêmes. Voici en effet quelques chiffres que nous trouvons à la page 12 du mémoire dont nous résumons les indications.

Nombre de tours ₂	197,6	198,5	198,1	199,1	203,0	200,8
Travail indiqué en chevaux	13,86	13,20	12,87	13,52	13,30	12,84
Travail effectif	9,88	9,93	9,90	9,96	10,15	10,04
Rendement organique.	0,712	0,752	0,768	0,736	0,763	0,782
Gaz par cheval-heure effectif en litres	743	705	667	698	673	615
Pouvoir inférieur du gaz.	5050	4985	5040	5045	5042	5010
Calories par cheval-heure effectif.	3750	3510	3360	3520	3395	3080
Température de la paroi Degrés de l'allumage	17,7	35,2	68,3	17,1	35,5	69,0
Degrés de l'allumage	5	5	5	4	4	4
Consommation d'huile par heure	9,6	14,0	26,4	49,0	64,6	37,1
Chaleur emportée par l'eau de l'enveloppe.	39,1	39,1	35,9	38,1	38,5	36,3
Calories par cheval-heure indiqué.	2650	2640	2585	2590	2590	2405

La consommation par cheval-heure effectif tombe de 3.750 calories à 3.360 et de 3.520 à 3.080 ; l'économie atteint 10 0/0 ; mais on l'attribue à un meilleur graissage et à une amélioration du rendement organique : admettons-le, tout en faisant observer que le moteur essayé possède un rendement organique fort médiocre et que vraisemblablement, dans un moteur mieux établi, l'influence d'un excès de graissage serait moins sensible. Quoi qu'il en soit de ce qui précède, nous voyons que, pour une différence de température de l'eau de réfrigération de 35°,5 à 69°, la consommation par cheval-heure indiqué passe de 2.590 à 2.405 litres ; le bénéfice de 181 litres correspond à 6 0/0. Nous estimons que ce n'est pas une quantité négligeable dans l'espèce. Il importe de noter d'ailleurs que la variation réelle de la température de la paroi est beaucoup moindre qu'elle ne le paraît par la comparaison des températures de l'eau de réfrigération ; si l'enveloppement du cylindre n'est pas assez complet et surtout si la réfrigération des pièces surchauffées de la culasse n'est pas effectuée d'une façon rationnelle, on peut faire traverser l'enveloppe par des torrents d'eau sans opérer de refroidissement suffisant, et l'eau sort relativement froide alors que le métal reste chaud.

Une très intéressante étude a été faite encore par M. Meyer sur les combustions incomplètes qui ont lieu dans les moteurs : nous avons déjà signalé (*) la grave imperfection qui en résulte et l'importance qu'il y a à pratiquer un mélange homogène du com-

1. Vide Supra, pages 330 et 336.

bustible et du comburant ; on ne saurait assez insister sur ce point, que les praticiens perdent trop souvent de vue. Les chiffres ci-dessous, que nous prélevons dans le mémoire de M. Meyer, témoignent de l'importance de la question (1).

	GAZ DE VILLE				GAZ PAUVRE		
Pouvoir inférieur du gaz. . .	5150	5060	5490	5200	1140	1260	1188
Compression	8 ^k , 0	8, 35	6, 12	5, 8 ^c	7, 2	7, 5	5, 8
Proportion d'air au gaz . . .	7, 89	11, 43	8, 44	11, 11	1, 12	1, 25	1, 5 ²
Excès d'air pour cent. . . .	37	103	56	74	16	22	53
Calories par cheval-heure indiqué	2470	2600	2530	2610	2560	2480	2960
Perte en calories par mètre cube de gaz par combustion incomplète.	166	770	245	721	60	156	129
Perte en pour cent sur la chaleur totale	3, 2	15, 1	4, 7	14, 4	5, 3	12, 9	11, 3
Travail effectif en chevaux .	10, 24	6, 13	8, 24	6, 16	8, 16	8, 06	6, 10

La plus forte perte coïncide avec l'existence d'un grand excès d'air dans un mélange faiblement comprimé, le moteur travaillant à demi-charge ; mais une diffusion imparfaite du gaz dans l'air est évidemment le facteur le plus efficace dans ce phénomène.

La méthode des bilans fournit des indications précises et fort utiles pour analyser le fonctionnement d'un moteur et se rendre compte de l'utilisation du calorique : nous en rapporterons quelques-uns pour établir une base générale d'appréciation.

Voici d'après MM. Thurston et Cartwright la manière dont se répartit la chaleur disponible dans un moteur consommant 600 litres par cheval-heure indiqué et 780 litres par cheval effectif.

Perte par l'eau de circulation.	46, 90
— par rayonnement	10, 76
— à l'échappement.	23, 55
— par frottements.	4, 10
— par travail de la pompe	0, 42
Utilisation nette	14, 27
	<hr/> 100, 00

Ces résultats, admirés autrefois, sont grandement dépassés aujourd'hui.

MM. Brooks et Steward ont donné le tableau de répartition suivant, en 1884, à la suite de leurs essais d'Oboken.

Perte par l'eau de circulation	52, 0
— par rayonnement.	15, 5
— à l'échappement	15, 5
Utilisation en travail indiqué	17, 0
	<hr/> 100, 0

1. Pour apprécier la combustion incomplète on faisait passer les gaz préalablement dépouillés de leur vapeur d'eau et de l'acide carbonique dans des tubes capillaires en platine chauffés au blanc ; des traces de gaz combustibles brûlent dans ces conditions.

L'utilisation est déjà meilleure, et ce progrès est dû sans doute à une détente plus complète, car la perte à l'échappement a diminué.

Mes divers essais de 1883 ont donné des résultats analogues.

La grande étude publiée, en 1883, par M. Slaby, sur un moteur Otto de 4 chevaux, a conduit aux chiffres ci-dessous :

Chaleur transformée en travail	16,5 0/0
— emportée par l'eau de l'enveloppe.	51,2
— entraînée dans la décharge.	32,3
	<hr/>
	100,0

Ces expériences ont montré comment se répartissent les pertes dans les diverses phases d'un cycle.

Phase de compression	-- 0cal, 351
— d'explosion	+ 2 ,630
— de détente.	— 0 ,095
— d'échappement	— 1 ,493

La somme algébrique de ces quantités est égale à +0,691 calories, qui sont transformées en travail. Mais il a été relevé que les calories équivalentes à la quantité de gaz admise dans le cycle étaient égales à +4,186, alors que l'explosion n'en marquait que +2,630 sur le diagramme : la différence de 1,556 calories, égale à 37,4 0/0, semblerait n'avoir même pas été introduite dans le cycle. Cette constatation devrait être l'objet de nouvelles recherches.

MM. Kidwel et Keller ont publié les chiffres ci-dessous, en 1890, pour un moteur Otto de 6 chevaux.

Perte par l'eau de circulation.	50,16
— à l'échappement.	27,93
Utilisation nette	22,91
	<hr/>
	100,00

Les essais de la Société des Arts ont conduit à des résultats comparables pour un moteur Otto-Crossley :

Perte par l'eau de circulation	35,2
— à l'échappement, etc.	45,6
Utilisation nette.	19,2

Mes expériences de 1885 sur le moteur Simplex sont résumées dans les chiffres suivants :

Perte par l'eau de circulation	41,4
— à l'échappement, etc.	37,7
Utilisation nette.	20,9
	<hr/>
	100,0

Une machine Atkinson, essayée par la Société des Arts, a rendu 22,8 0/0, ainsi qu'il ressort des indications publiées par le jury.

Perte par l'eau de circulation	27,0
— à l'échappement, etc.	50,2
Utilisation nette.	<u>22,8</u>
	100,0

Les moteurs Otto de 200 chevaux du service des eaux de Bâle ont fourni à M. Meyer les résultats suivants ; ils sont alimentés de gaz pauvre.

Perte par l'eau de circulation	25,9
— à l'échappement, etc.	54,8
Utilisation en travail indiqué	<u>19,3</u>
	100,0

Dans ses derniers essais de Berlin, le même expérimentateur a dressé le bilan suivant, pour son moteur de laboratoire de 10 chevaux.

Perte par avance à l'échappement 0/0	0,46	0,35
— par combustion retardée.	0,72	4,23
— par la paroi	14,07	11,27
— par combustion incomplète.	4,00	15,00

Il est à noter qu'on attribue généralement à l'échappement des gaz brûlés la perte résultant de la combustion incomplète ; et de fait, c'est bien ainsi qu'il faut appliquer ce déchet. Nous croyons toutefois que le moteur du savant professeur de Berlin opérait médiocrement le mélange, ce qui était cause des pertes exagérées constatées par combustion défectueuse au cours de ces essais dans quelques cas particuliers.

Le moteur Niel (nouveau type) essayé par M. A. Moreau et par moi, en 1901, qui ne consommait que 439 litres de gaz, à 5664 calories, par cheval-heure indiqué, a donné lieu à d'importantes constatations :

Perte par l'eau de circulation	21,6
— par la décharge et le rayonnement	38,8
— par les frottements	14,1
Rendement thermique effectif.	<u>25,5</u>
	100,0

Ce moteur était caractérisé par une forte compression d'un mélange très dilué ; son rendement organique à pleine charge était de 85,9 0/0.

Un des essais les plus complets que j'ai faits a eu pour objet un moteur Tangye, de 254 millimètres de diamètre, 0^m,483 de course, développant 27 chevaux par 200 tours, en consommant par cheval-heure effectif 493 litres de gaz à 5.383 calories (pouvoir supérieur) ; j'ai dressé le bilan ci-dessous de son fonctionnement.

Perte par l'eau de circulation	35,3
— par la décharge	23,0
— par le rayonnement	4,2
— par les résistances passives.	13,6
Utilisation en travail effectif	<u>23,9</u>
	100,0

Dans ce moteur, on ne comprimait qu'à 5^k,4.

En somme, nous voyons les pertes par l'eau de circulation passer de 52 0/0 à 21,6, tandis que le calorique emporté par les gaz monte de 15,5 à 54,8 : on peut dire que, dans une certaine mesure, la somme de ces deux pertes ne varie guère, attendu qu'on perd généralement par les gaz ce qu'on regagne sur la paroi ; toutefois ce n'est pas toujours exact, et les derniers moteurs réalisent évidemment un meilleur rendement thermique, en portant moins de calories à la décharge, en même temps qu'en réduisant légèrement les pertes à la circulation d'eau. C'est le fruit des fortes compressions de mélanges pauvres suivies d'une longue détente : nous sommes donc toujours ramenés aux mêmes conclusions.

M. E. Meyer a poursuivi une série d'essais en vue de déterminer l'influence de la grandeur des moteurs sur leur fonctionnement et leur rendement (1) : ces recherches intéressent aussi la théorie expérimentale. Malheureusement, M. E. Meyer a opéré sur des moteurs à pétrole ; il eut été préférable de prendre comme sujets d'expérience des moteurs à gaz ; les résultats que nous allons synthétiser ci-dessous présentent néanmoins une grande importance.

Voici d'abord les données de construction relatives aux deux machines mises en parallèle.

	12 HP	2 HP
Diamètre du cylindre.	270 m/m	140
Course du piston	0 ^m ,370	0 ^m ,210
Volume engendré par course	21,19 litres.	3,23
Volume de la chambre de compression.	12,32 »	1,98
Vitesse de régime.	175 révolutions.	230

Le pouvoir calorifique inférieur du pétrole employé était de 10.200 calories par kilogramme, vapeur d'eau non condensée : ce chiffre a servi de base à l'établissement du rendement thermique.

Le tableau synoptique ci-après présente les résultats dans l'ordre d'une admission de pétrole décroissante. Les essais ont duré en moyenne de 15 à 20 minutes, ce qui est trop court pour réaliser un régime normal de marche et atteindre cet état permanent que les allemands appellent *beharrungszustand*. La pression explosive oscillait dans le grand moteur entre 11,0 et 13,3 kilogrammes, entre 10,6 et 13,6 dans le petit ; la valeur moyenne est la même dans les deux machines. Les pressions à la fin de la détente étaient égales à 3,65 kilogrammes dans le gros cylindre, et 3,50 kilogrammes dans le petit. L'eau de réfrigération était admise à 12°,5.

1. « Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure », tome XL (tiré à part).

	Numéro d'ordre	Vitesse en tours	Explosions par minute	Consommation d'huile par explosion	Pression moyenne	Travail indiqué	Travail effectif	Consommation par cheval-heure effectif	Température de la paroi	Température de la décharge	Durée de l'inflammation en secondes	Chaleur pour cent		
												Transformée en travail	Emportée par l'eau	Emportée par les gaz
		tours		gr.	kil.	chev.	chev.	kil.	degrés	degrés	sec.			
Moteur de 12 chevaux	1	177,3	79,5	1,206	4,94	17,76	15,48	0,394	40,9		0,031	19,1	37,3	43,6
	2	176,3	82,0	1,174	4,73	17,45	14,49	0,398	38,7		0,033	18,7	34,0	47,3
	3	177,2	80,1	1,155	4,67	16,82	14,57	0,381	44,7		0,032	18,7	35,6	45,7
	4	177,4	81,0	1,144	4,65	16,93	14,59	0,381	44,8		0,032	18,8	36,4	44,8
	5	176,1	83,5	1,127	4,69	17,61	14,48	0,390	38,8		0,034	19,3	34,0	46,7
	6	177,0	82,0	1,115	4,77	17,62	14,56	0,377	41,4		0,030	19,9	35,6	44,5
	7	177,0	82,7	1,095	4,63	17,21	14,56	0,373	43,5		0,032	19,6	35,4	45,0
	8	177,3	80,2	1,059	4,54	16,35	13,56	0,376	43,5		0,035	19,9	35,0	45,1
	9	176,6	80,8	1,052	4,36	15,79	13,46	0,379	39,4		0,037	19,2	35,0	45,8
Moteur de 2 chevaux	13	231,8	111,4	0,252	4,84	3,71	2,92	0,576	45,3	453	0,016	13,6	37,0	49,4
	10	231,9	108,6	0,235	4,88	3,65	2,92	0,524	43,1	434	0,017	14,8	39,8	45,4
	11	231,9	111,4	0,210	4,82	3,70	2,92	0,481	43,5	398	0,021	16,4	46,2	37,7
	12	231,6	110,0	0,194	4,81	3,63	2,81	0,456	42,3	398	0,027	17,5	43,3	39,2

M. Meyer fait observer que, dans les essais 11 et 12, il s'est produit vraisemblablement une plus forte condensation d'huile contre les parois, qui a échappé à la combustion.

Ces chiffres provoquent de curieuses et utiles observations.

Et d'abord, nous voyons que la perte due aux parois est certainement moindre dans le grand moteur que dans le petit ; elle passe de 35 0/0 à 46. Les essais 10 et 13 sont moins caractéristiques que les deux derniers, mais il est fort probable que le pétrole injecté n'a pas été complètement brûlé.

Le travail indiqué représente, dans le premier cas, 19,6 0/0 de la chaleur disponible, et seulement 17,5 0/0 dans le second cas : la réduction de l'action de la paroi n'aboutit, par suite, qu'à 2 0/0 de bénéfice, la perte par l'échappement devenue plus grande étant venue compenser l'avantage obtenu. C'est du moins l'avis de M. Meyer ; pour le justifier, il est obligé de sacrifier les essais 13 et 10. Je ne partage pas sa manière de voir à cet égard : à mon avis, il faut faire une moyenne entre les essais 10, 11, 12 et 13, et alors apparaît manifestement le bénéfice réalisé par la réduction de l'action de paroi. Je ne pousse pas cette opinion à l'extrême parce que les pertes à l'échappement peuvent augmenter sensiblement dans les cylindres de fort diamètre ; mais l'action de paroi ne doit pas être méconnue.

La durée d'inflammation est prolongée dans le gros cylindre ; et pourtant, dit M. Meyer, la vitesse du piston est, dans ce cas, de 2^m,16 au lieu de 1^m,6. Cette constatation ne confirme en effet pas la loi que j'avais formulée.

Les concours de moteurs à pétrole ont aussi fourni à la théorie expérimentale d'importantes contributions.

À la suite du concours de Meaux, M. Ringelmann a établi des bilans comparatifs d'une grande valeur théorique et pratique : nous en extrayons les chiffres ci-dessous.

Moteurs	Chaleur		
	Transformée en travail effectif	Emportée par l'eau de réfrigération	Perdue de toute autre manière
Hornsby	11,9 %	29,0 %	59,1 %
Niel (mi-fixe).	15,1	30,1	54,8
Winterthur	14,1	28,4	57,5
Grob (mi-fixe)	19,5	30,0	50,5
Griffin	15,2	40,2	44,6
Merlin	16,2	24,2	59,6

Les rendements de ce tableau sont ceux qui correspondent à un travail moyen de 4 chevaux, mais ils ont été largement dépassés, quand on faisait développer aux moteurs le maximum de travail. Les chiffres ci-dessous en témoignent.

Moteurs	Rendement maximum
Niel	20,5
— Grob	22,1
— Merlin	11,3

Les beaux essais du concours de Meaux ont aussi permis à M. Ringelmann de déterminer les volumes d'air employés pour brûler 1 kilogramme de pétrole ; on les calculait d'après le nombre d'explosions, le volume d'une cylindrée et le pétrole consommé. Théoriquement, le pétrole russe employé (densité = 0,823, pouvoir calorifique = 11.040 calories par kilogramme) exigeait 15.117 kilogrammes ou 11.691 litres d'air à 0° et 760 millimètres. Or, voici les quantités d'air comburant réellement introduites dans le cycle.

MOTEURS	Travail effectif en chevaux	Rendement %	Volume d'air réellement admis par kilogramme de pétrole	Différence sur le volume théorique
			litres	
Hornsby	0	—	32.954	+ 21.263
	3,86	11,9	37.364	+ 25.673
Niel	0	—	13.093	+ 1.402
	6,23	20,5	14.446	+ 2.755
Grob	0	—	4.612	— 7.079
	5,21	15,4	9.554	— 2.137
Winterthur	0	—	41.359	+ 29.668
	7,34	22,1	16.344	+ 4.653
Griffin	0	—	9.065	— 2.626
	4,11	17,7	12.069	+ 378
	7,38	14,4	8.504	— 3.187

Ces relevés présentent un grand intérêt. En effet, nous pouvons reconnaître ainsi l'influence d'un excès ou d'un défaut d'air. Le premier cas est celui d'un moteur Hornsby, qui appelle trois fois plus d'air qu'il ne lui en faut et fournit un assez mau-

vais rendement thermique. Le moteur Grob, en donnant son maximum de travail, était strictement rationné, et c'est dans ces conditions que son rendement a monté à 22,1 0/0, le chiffre le plus élevé qu'on ait constaté à Meaux ; observation analogue pour le moteur Griffin, lorsqu'il faisait 4,11 chevaux. Mais quel sera l'effet d'un défaut d'air ? Nous allons le voir sur le moteur Wintherthur, qui manquait d'air ; or, il a malgré cela rendu 15,4 0/0 ; ce dernier résultat est étrange. Il est contredit par ce que nous observons pour le Griffin, qui rendait 17,7 avec + 378 litres et ne donne plus que 14,4 avec — 3187, alors pourtant que l'augmentation du travail eût dû améliorer ce rendement. En somme, nous devons conclure de ce qui précède, qu'il y a plutôt avantage à ne pas trop exagérer le dosage de l'air, sauf peut-être pour les marches à vide ; mais un défaut d'air est plus nuisible encore ; le mieux est de s'en tenir à un léger excès de comburant.

Au concours de Berlin, MM. Hartmann et Schöttler ont fait aussi une analyse très délicate du fonctionnement des moteurs à pétrole : ayant mesuré avec soin la quantité de pétrole consommée par heure, ils ont calculé la quantité de chaleur disponible et ils en ont détaillé l'emploi. Prenons par exemple le moteur Altmann : 33.200 calories correspondaient au pétrole dépensé. On en retrouvait 23.300, soit 70,3 0/0 dans le travail total indiqué relevé par le diagramme. Le travail d'explosion correspondait à 56,6 0/0, et le travail d'expansion seulement à 35,2 ; 13,7 0/0 sont employés à comprimer le mélange, et 15,3 à refouler la pression atmosphérique dans les diverses phases du cycle (1) ; ce dernier travail se retranche du travail d'expansion pour former le travail indiqué. Ce travail représente donc 19,55 0/0 de la chaleur disponible ; le travail effectif en représente 15,70 0/0. Les frottements absorbent 3,7 0/0. Nous donnons ci-contre quelques séries de chiffres publiées dans le remarquable travail des ingénieurs allemands.

Bilan du fonctionnement des Moteurs à pétrole au concours de Berlin.

Moteurs	Travail effectif	Pétrole consommé		Chaleur disponible en calories	Chaleur employée en travail					
		par cheval-heure	par heure		absolu	d'explosion	de détente	indiqué	effectif	de frottement
		gr.	k.							
Daimler . .	3, 25	609	1, 980	21.350	—	—	4.100	2.100	20600	—
Otto . . .	4, 0	575	2, 300	25.000	8.660	7.350	4.290	2.560	2.540	—
Durkopp . .	4, 46	585	2, 609	28.100	—	—	4.060	2.520	2.830	—
Hille . . .	8, 50	456	3, 880	41.800	20.300	17.400	9.920	6.270	5.420	860
Hille . . .	3, 12	450	1, 400	15.200	5.600	4.750	2.950	1.940	2.000	—
Swiderski .	10, 00	518	4, 050	43.600	20.000	18.100	10.150	7.240	5.020	2.210
Altmann . .	12, 1	423	5, 808	62.500	37.800	32.600	18.700	11.220	7.750	3.500

Nous n'essaierons pas de résumer en quelques lignes l'enseignement qui ressort des nombreux chiffres que nous venons d'accumuler pour compléter la théorie expé-

1. C'est ce que MM. Hartmann et Schöttler appellent « Stauungs-arbeit ».

rimentale, ce serait impossible. Mais nous en dégagerons une indication générale : il faut surtout chercher à produire une combustion rapide et parfaite, en comprimant énergiquement dans un cylindre, qu'on ne refroidira pas inconsidérément, un mélange parfaitement homogène, qui ne peut être très pauvre qu'à la condition d'être très comprimé.

Il nous reste enfin à demander à la théorie expérimentale la solution d'un problème, que la théorie générique ne saurait traiter, et qui a une certaine importance pratique. En voici l'énoncé : « Etant donné un moteur d'une puissance maximum nominale de N chevaux effectifs, consommant à vide L_v litres et L_N à pleine charge, quelle est sa consommation par cheval-heure effectif quand il développera n chevaux ? »

C'est M. Ringelmann qui a posé le problème lors des concours des moteurs à alcool de 1901 et de 1902, et qui a donné la formule qui le résout ; il s'en est servi pour effectuer le classement des moteurs de puissance très diverse qu'il fallait comparer et juger.

M. Ringelmann admet (1) que la consommation horaire y d'un moteur en fonction d'une puissance x peut être représentée assez exactement par l'équation

$$y = a + bx ;$$

c'est l'équation d'une droite (fig. 104), dont le paramètre a égal à ao , ne serait pas autre chose que la consommation horaire du moteur marchant à vide ; le coefficient b

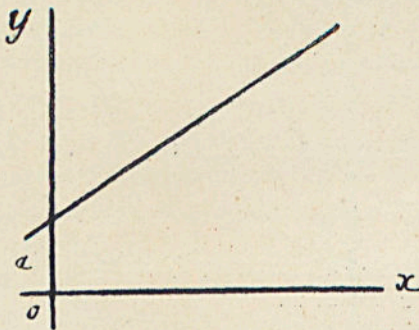


Fig. 104.

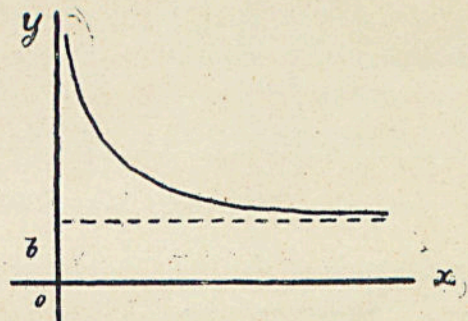


Fig. 105.

serait constant et ne dépendrait que du combustible employé. Le paramètre a serait une constante du moteur. Cette formule donne sans peine la consommation par cheval-heure à toute puissance x ; on a en effet

$$\frac{y}{x} = \frac{a}{x} + b = Y$$

La courbe représentée par cette nouvelle équation est une hyperbole équilatère asymptotique aux axes x et y (fig. 105).

Cette manière de voir de M. Ringelmann est assez rigoureuse en admettant en effet que la dépense de gaz L_v corresponde exactement au travail nécessaire pour mainte-

1. Ringelmann, Rapport du jury du concours des moteurs à alcool, page 30.

nir le moteur à sa vitesse constante, sans autre travail : on doit considérer $L_n - L_v$ comme le prix extérieur du travail effectif, lequel est probablement proportionnel à la dépense. Or, cela se vérifie le plus souvent, surtout dans les moteurs du genre Otto, réglés par admission de tout ou rien.

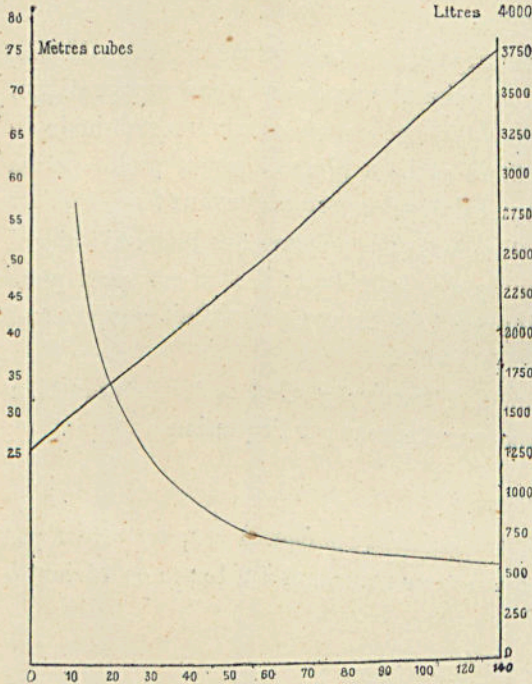


Fig. 106.

Lorsque les diagrammes sont bien identiques, on peut mesurer le travail effectif par le nombre d'admissions en plus qu'à vide et alors la formule Ringelmann est très précise : nous donnons en effet sur la figure 106 les courbes tracées il y a plus de dix ans à la suite des essais effectués à Lille sur des moteurs Otto à deux cylindres pouvant développer 120 chevaux avec du gaz de ville. Les consommations à diverses charges étaient les suivantes :

Puissances effectives.	Consommation L.
0 ; Marche à vide.	26.800 = L_v
20 chevaux.	35.000
40 —	43.450
60 —	51.685
80 —	60.020
100 —	68.310
120 —	76.570. = L_N

L'équation donnant la consommation pour n chevaux serait donc :

$$L_n = 26,800 + 415. n;$$

elle correspond très bien aux consommations relevées au cours de l'essai qui a fourni les chiffres de base L_v et L_N .

Ces considérations peuvent donc rendre de grands services dans la pratique.

Mais il importe que les conditions du dosage du mélange et de sa richesse restent invariables ; sinon, le paramètre $a = L_v$ ne serait pas constant. J'en trouve la preuve dans certains essais faits sur un moteur genre Otto de 22 chevaux que j'ai longuement étudié en marche à vide : désireux de découvrir les meilleures conditions de la combustion, je maintenais la vitesse aussi constante que possible, en changeant le dosage du mélange ; malgré mes efforts, elle a passé de 180 à 190 tours par minute, mais la différence est faible et les résultats obtenus sont encore comparables.

Or, voici les principales données relevées au cours de ces expériences.

Nombre de tours	Admissions par minute	Température du gaz	Pression atmosphérique	Consommation de gaz		Pouvoir du gaz	Calories du gaz consommé
				au compteur	réduite à 0° et 760 ^{mm} /m		
		degrés	millim.	litres	litres	calories	
185	18	9	757	3.300	3.178	5.293	16.821
180	13	12	765	2.408	2.321	5.300	12.301
190	23	18	765	3.060	2.889	5.306	15.329
192	17	18	765	2.670	2.520	5.306	13.371

Ces chiffres démontrent que la consommation de gaz à vide n'est nullement une constante, car elle dépend de la température, de la pression, du pouvoir du gaz, etc. ; elle varie de plus très sensiblement avec le degré de dosage du mélange, avec le nombre de tours du moteur et avec le nombre d'admissions. En effet, nous trouvons entre les consommations, réduites à zéro et 760 millimètres, des différences de 859 litres sur 3.178, soit 27 0/0.

Les calories consommées ne sont elles-mêmes pas constantes et elles varient dans de larges limites : elles ne sont pas non plus proportionnelles à la vitesse.

Et pourtant, le moteur en question était réglé par admission de *tout ou rien* ; avec une disposition faisant opérer par le régulateur une réduction incessante du titre avec une compression variable du mélange, les écarts seraient plus considérables encore.

Pour que la consommation L_v restât la même, il faudrait réaliser un certain nombre de conditions qu'on ne rencontre pas dans tous les moteurs. Cette consommation de gaz ne peut du reste être définie, si l'on ne spécifie pas en même temps la température, la pression et le pouvoir calorifique du gaz, ainsi que le titre du mélange employé. Sous ces réserves, la formule de M. Ringelmann présente une réelle utilité pratique.

Elle serait plus intéressante encore, si on l'avait exprimée en calories ; mais elle ne saurait alors même prétendre à une grande rigueur ⁽¹⁾.

Les essais que nous avons rapportés ci-dessus nous conduisent à une conclusion que nous devons faire ressortir : la consommation la plus réduite de 2.321 litres (12.301 calories) correspond au nombre moindre d'admissions par minute (13), donc au mélange le plus riche : c'est un argument de plus en faveur de notre théorie de l'action de parois et contre les combustions lentes.

1. M. Ringelmann a appliqué sa formule à des moteurs à alcool, pour lesquels elle est beaucoup plus exacte, étant donné qu'on alimente le moteur avec un même alcool.

CHAPITRE SEPTIÈME

ESSAIS DES MOTEURS

I

Mesure du travail indiqué, du travail effectif et du rendement organique.

La puissance d'une machine est exprimée par le travail qu'elle peut fournir dans l'unité de temps (¹); il y a lieu de définir le travail que l'on veut considérer.

On considère particulièrement le *travail indiqué* et le *travail effectif*.

Le travail indiqué est le travail brut développé sur le piston moteur par le fluide, vapeur ou gaz, mis en œuvre; on le mesure au moyen des diagrammes relevés à l'aide de l'indicateur de Watt.

Pour calculer le travail exercé sur le piston au moyen du diagramme relevé, il suffit de savoir déterminer la pression moyenne exercée sur le piston; car alors P_m étant cette pression moyenne, S étant la surface du piston et C sa course, le travail effectué par coup de piston sera égal à $P_m S C$ kilogrammètres, si P_m est exprimé en kilogrammes par centimètre carré, S en centimètres carrés et C en mètres. Par suite, si la machine fait n tours par minute, soit $\frac{n}{60}$ tours par seconde, le travail brut par

1. Dans le but de préciser le sens des mots employés dans les essais des moteurs et de réagir contre l'emploi de locutions vicieuses, le *Congrès de la Mécanique appliquée* de 1889 a formulé les résolutions suivantes :

1° Le mot *force* ne doit être employé que comme synonyme d'effort; il faut proscrire spécialement l'expression : « transmission de force », qui se rapporte en réalité à la transmission d'un travail, et celle de « force d'une machine », qui n'est que l'activité de la production du travail par ce moteur, ou, en d'autres termes, le quotient d'un travail par un temps

2° Le mot *travail* désigne le produit d'une force par le chemin parcouru par son point d'application, suivant sa propre direction;

3° Le mot *puissance* doit être exclusivement employé pour désigner le quotient d'un travail par le temps employé à le produire;

4° En ce qui concerne l'expression numérique de ces diverses grandeurs, pour tous ceux qui acceptent le système métrique, les unités sont les suivantes :

La force a pour unité le *kilogramme*.

Le travail a pour unité le *kilogrammètre*.

La puissance a trois unités que l'on peut employer au gré de chacun; le *cheval* de 75 kilogrammètres par seconde, le *Poncelet* de 100 kilogrammètres par seconde et le *kilowatt* de 102 kilogrammètres.

Le cheval anglais (*Horse-Power*) vaut 75,9 kilogrammètres par seconde.

seconde, c'est-à-dire la puissance indiquée en chevaux sera, en simple effet, pour un moteur donnant une impulsion par tour, (1)

$$\mathcal{Q} = \frac{P_m S C n}{60 \times 75} = \frac{P_m S C n}{4500}$$

ou encore, en exprimant S en fonction du diamètre D du cylindre,

$$\mathcal{Q} = P_m \frac{\pi D^2}{4} \frac{C n}{4500} = P_m \frac{\pi D^2 C n}{18000}$$

Tout revient à déterminer P_m .

C'est donc par la détermination de P_m qu'on effectue la mesure du travail *indiqué*.

Le travail *effectif* présente plus d'intérêt pratique : on appelle ainsi le travail immédiatement utilisable sur l'arbre de couche de la machine ; on le mesure à l'aide du frein dynamométrique de Prony.

Un frein dynamométrique est un mécanisme ayant pour objet de maintenir un mouvement uniforme du moteur, en absorbant par un frottement toute l'énergie en excès : le travail du frottement remplace la résistance des outils à mener et il permet de mesurer la puissance du moteur.

Ces freins sont généralement de la classe des freins flexibles : ils se composent d'un lien souple en fer ou en acier, garni de frottoirs en bois, embrassant un arc considérable de la circonférence d'un tambour ou d'une poulie calée sur l'arbre de couche. Les deux extrémités de ce lien traversent une barre rigide, munie elle-même d'un frottoir ; des écrous de serrage, dont le point d'appui se trouve sur la barre, permettent de tendre le frein et de faire appliquer fortement les frottoirs sur la jante de la poulie ; le frein, devenu solidaire de cette poulie, tend à tourner avec elle. Or, on dispose les choses de telle sorte que le mouvement ait pour effet de relever la barre rigide ; d'autre part, on charge celle-ci d'un poids P, lequel s'ajoutant au poids mort p de l'appareil, maintiendra la barre horizontale. Quand ce résultat sera obtenu, il y aura équilibre entre le travail dépensé en frottement et le travail de la force $(P + p)$ agissant sur l'extrémité d'un levier de longueur l ; on aura donc, pour un tour, un travail égal à $(P + p) 2 \pi l$, et pour $\frac{n}{60}$ tours par seconde, une puissance en chevaux

$$\mathcal{Q} = \frac{(P + p) 2 \pi l n}{60 \times 75} = \frac{(P + p) 2 \pi l n}{4500}$$

On calculera \mathcal{Q} en chevaux si P et p sont exprimés en kilogrammes et l en mètres. Tous calculs faits, il vient

$$\mathcal{Q} = 0,001395 (P + p) l n$$

Entre le piston, qui recueille l'équivalent mécanique du calorique utilisé (c'est le travail indiqué), et la circonférence du frein dynamométrique, sur laquelle se mesure la résistance tangentielle par laquelle on évalue le travail effectif, il existe des résis-

1. Pour une impulsion par deux tours, c'est-à-dire pour les moteurs à quatre temps, ou multiplié par $\frac{n}{2}$ au lieu de n .

tances passives qui entraînent une perte de travail ; aussi le travail effectif ne peut-il être qu'une fraction du travail indiqué. Cette fraction permet d'apprécier le rendement *organique* ou *mécanique* du moteur : c'est un coefficient de construction, par lequel on estime la perfection du mécanisme ; nous n'insisterons pas sur son importance pratique.

Les causes de réduction du travail indiqué sont les suivantes : c'est d'abord le frottement du piston contre la paroi du cylindre, le frottement de sa tige dans le presse-étoupes, le frottement des tourillons et des pièces articulées, les vibrations et les chocs des organes, les résistances au mouvement des tiroirs, des pompes, etc. Zeuner divise très sagement ces résistances en deux parts, l'une qui constitue la résistance constante, persistante dans le travail à vide, l'autre essentiellement variable avec l'effort exercé sur le piston, qu'on peut admettre comme proportionnelle au travail indiqué. Si nous appelons \mathfrak{T}_i le travail indiqué et \mathfrak{T}_e le travail effectif, nous pourrions écrire la relation

$$\mathfrak{T}_e = \beta \mathfrak{T}_i - \alpha$$

$$\frac{\mathfrak{T}_e}{\mathfrak{T}_i} = x = \beta - \frac{\alpha}{\mathfrak{T}_i}$$

Le calcul ne pourrait donner avec précision les deux paramètres β et α ; aussi détermine-t-on x par la voie expérimentale, en relevant le mieux qu'on peut \mathfrak{T}_e et \mathfrak{T}_i et en divisant le premier travail par le second.

Le rendement organique n'est pas une constante pour une machine déterminée, ainsi que l'a démontré M. Delafond, par une série d'expériences effectuées au Creusot sur une machine à vapeur excellente (1).

Ces essais ont été faits sur une machine Corliss du Creusot ayant 550 millimètres de diamètre au cylindre, 1.100 millimètres de course.

Cette machine pouvait marcher avec ou sans condensation, le tuyau d'échappement portant une soupape à deux voies, qui permettait d'envoyer la vapeur au condenseur ou à l'air libre. La pression pouvait varier considérablement ainsi que la détente : on a obtenu de la sorte les valeurs du rendement organique x en fonction de l'admission et du travail ; elles ont varié de 0,67 à 0,89 en marchant à condensation et de 0,82 à 0,91 à échappement libre. Le rendement organique varie donc avec les conditions de fonctionnement de la machine.

Ces conclusions sont immédiatement applicables à un moteur à gaz, dont le rendement organique variera avec la pression explosive du gaz tonnant, par conséquent avec la richesse du gaz et le degré de dilution du mélange, avec le travail développé, avec le graissage du cylindre et des organes frottants, avec la vitesse, etc., etc.

Les modèles d'indicateurs de Watt, dont on se sert pour l'étude des machines à vapeur, sont généralement applicables aux moteurs à gaz, à condition d'être munis de ressorts assez durs, car les pressions s'élèvent beaucoup plus dans le moteur à gaz

1. Nous empruntons les considérations et les chiffres qui suivent à notre « Traité de Machines à vapeur », p. 403, 2^e édition, 1902 (J.-B. Baillières, Paris).

que dans la machine à vapeur, où l'on dépasse rarement 6 à 8 kilogrammes. Le type d'indicateur le plus répandu est celui de Richard, parfaitement construit par MM. Elliott frères de Londres, qui s'étaient en quelque sorte fait un monopole de cet excellent instrument ; mais aujourd'hui il est construit aussi par MM. Kraft et fils, Schæffer et Budenberg, Lejeune, M'Innes, etc. ; dans ces instruments, le parallélogramme de Watt est utilisé pour donner au crayon une trajectoire rectiligne. Nous jugeons inutile de décrire ces appareils, qui sont connus de tous nos lecteurs.

Ils ont subi certaines modifications de forme, qui ne sont pas toujours des perfectionnements.

En employant d'autres modes de direction, on a fait l'indicateur Thompson et celui de Tabor.

M. John Musgrave construit en Amérique et M. Janssens a introduit en France l'appareil Tabor : en raison de la légèreté de son mécanisme, il convient bien aux moteurs à gaz ; il présente de plus l'avantage de donner au crayon inscripteur un déplacement rigoureusement rectiligne. Voici comment ce résultat est obtenu : le levier porte-crayon est articulé sur l'extrémité d'une petite bielle *ab* (fig. 107), articulée elle-même par son pied *b* sur le chapeau du cylindre. Une seconde bielle *cd* relie de même le levier au piston de l'indicateur.

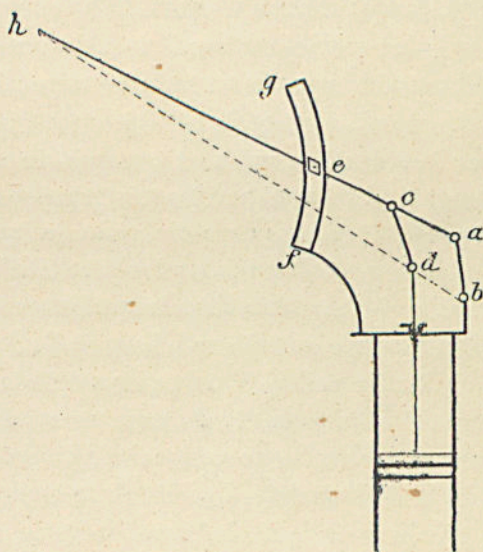


Fig. 107.

Enfin, un petit galet *e*, tournant librement sur un axe, implanté sur le levier, est reçu par une coulisse courbe *fg* ménagée dans une réglette, fixée aussi sur le chapeau. La disposition de ces organes est telle que les deux bielles restent parallèles entre elles, quelle que soit l'inclinaison du levier ; le crayon *h* et les axes *d* et *b* sont toujours sur une même ligne droite. La courbure assure le déplacement rectiligne du crayon.

La disposition de ces organes est telle que les deux bielles restent parallèles entre elles, quelle que soit l'inclinaison du levier ; le crayon *h* et les axes *d* et *b* sont toujours sur une même ligne droite. La courbure assure le déplacement rectiligne du crayon.

Pour augmenter la mobilité des diverses pièces, le chapeau du cylindre porte une plaque mince tournante, à laquelle sont fixés le support de la coulisse courbe et le pied de la première bielle : de plus, un fourreau creux en acier sert de liaison entre la seconde bielle et la tige à rotule du piston. Le tambour enregistreur tourne comme à l'ordinaire sur une tige verticale en acier, dont l'extrémité inférieure sert à maintenir, au moyen d'un filetage et d'un écrou à tête moletée, une contreplaque portant un galet sur lequel passe la corde de commande du tambour à papier. On règle à volonté la tension du ressort à spirale, par un mécanisme de rochet et cliquet, permettant d'arrêter le mouvement du tambour sans décrocher la corde de commande.

Des essais faits à l'arsenal de Brooklyn ont permis d'apprécier les qualités de cet

indicateur : il paraît que ses parties mobiles ont une masse moindre d'un tiers de celle des autres instruments de ce genre. Les frottements eux-mêmes sont réduits de 25 0/0, pourvu qu'on prenne la peine de graisser légèrement la coulisse. Nous nous sommes servi de l'appareil Tabor et nous avons constaté qu'il convient bien aux moteurs à gaz, à condition toutefois que leur vitesse ne soit pas trop grande.

Un dernier modèle du Tabor se distingue par un mécanisme nouveau de commande du tambour, inventé par M. Houghtaling. Une roue à denture hélicoïdale, fixée à la base de ce tambour, engrène avec une vis sans fin à plusieurs filets, sur l'arbre de laquelle est montée folle l'une des poulies d'un jeu de rechange. On en choisit une dont la circonférence correspond environ au quart de la course de la machine à essayer ; une course du piston fera donc faire quatre tours à la poulie. Or, le palier de l'arbre à vis sans fin fait corps avec une boîte renfermant un petit ressort à spirale ; celui-ci est bandé dans la course d'aller, mais, dans la course de retour, il fait tourner la poulie en sens inverse et il rappelle la corde.

Le grand avantage de cet ingénieux dispositif est de supprimer l'emploi des poulies de réduction, qui sont quelquefois assez difficiles à installer sur les petits moteurs et qui tolèrent mal les très grandes vitesses de 400 tours pratiquées aujourd'hui. Il présente de plus un autre avantage, qui est de permettre d'arrêter le mouvement du tambour et d'en renouveler par suite le papier sans avoir à décrocher la corde, ni à arrêter les machines dans lesquelles ce décrochage est souvent impossible ; en effet, un embrayage monté sur le bout de l'arbre de la vis réalise, par la simple manœuvre d'un bouton moleté, l'indépendance de la poulie et de son axe, qui porte la vis. On suspend le mouvement du tambour en tournant le bouton et en tirant à soi la bague portant la broche de connexion ; la poulie continue alors de tourner, mais le tambour reste immobile. Il suffit d'une main pour cette manœuvre.

L'indicateur de M. Lefebvre, de Paris, présente aussi quelques perfectionnements heureux, qui le signalent à notre attention et qui le recommandent pour les moteurs à gaz. Et d'abord, le ressort de flexion est enfermé dans un cylindre étanche, intermédiaire entre le corps du piston et le guide du crayon ; il est ainsi préservé du contact de la vapeur d'eau et des produits de la combustion, qui sont acides, et oxydent rapidement l'acier, si l'on ne prend pas un grand soin des ressorts. La tige du piston est reliée au parallélogramme Evans, portant le crayon, de façon à ce qu'on puisse aisément rectifier sa position, en agissant sur trois petites vis qui se trouvent sur le bouton. Le guide Evans est maintenu en place par une vis de rappel, fixée dans une tête isolante, grâce à laquelle on ne se brûle pas les doigts. Enfin l'écrou à pas différentiel, ordinairement employé pour relier l'indicateur à son robinet, est remplacé par un simple écrou de raccord, à large tête isolante.

Un autre indicateur qui présente des qualités spéciales pour l'étude des moteurs à gaz est celui de Crosby ; cet appareil est caractérisé par un ressort en double spirale, portant à sa partie inférieure une rotule soudée sur le fil d'acier, laquelle est engagée dans une douille fendue du piston ; ce dispositif évite le couple de rotation déterminé

par la flexion des ressorts simples. D'autre part, le parallélogramme est réduit à sa plus simple expression.

Enfin, le constructeur a substitué au ressort habituel en spirale du tambour un ressort en hélice, qui produit une tension plus constante du cordon reliant l'indicateur au réducteur de course.

Le ressort à double spirale et à rotule de Crosby peut subir sans déformation et sans détérioration les chocs résultant de la déflagration brutale des mélanges tonnants sous le piston ; les flexions restent proportionnelles à l'effort développé ; de plus le guidage parfait de la tige creuse du piston dans la longue douille du couvercle assure la régularité du tracé. Faisons observer enfin que le parallélogramme et ses accessoires sont réduits au minimum de poids. Bref, l'indicateur Crosby convient très bien aux relevés de diagrammes sur moteurs à gaz.

La construction et la vérification des ressorts présentait une réelle difficulté pour les pressions considérables ; M. Crosby les a évitées en réduisant la section du piston de son indicateur, de telle sorte que des ressorts ordinaires donnant une flexion de 5 millimètres par kilogramme, par exemple, ne fléchissent plus que de 2^{mm},5 avec un piston de section moitié moindre.

Le seul défaut de cet appareil (est-il rien sans défauts), est de donner des diagrammes fort réduits en ordonnée et en abscisse ; mais on le corrigerait aisément en augmentant les dimensions de l'instrument, et la remarquable précision du tracé rachète ce léger inconvénient, qui ne nous empêchera pas de classer cet indicateur parmi les meilleurs.

L'indicateur Wayne rompt avec les traditions que Watt nous avait léguées relativement aux meilleures dispositions à adopter pour relever les diagrammes les plus corrects sur une machine ; jusqu'ici le papier recevait un mouvement circulaire, fonction des déplacements rectilignes du piston moteur de la machine à étudier, et le crayon du parallélogramme amplificateur avait un mouvement rectiligne, suivant l'axe du cylindre dynamométrique. M. Wayne a interverti les rôles ; dans son appareil, la vapeur ou le gaz agit sur un piston rotatif qui fait corps avec le porte-crayon et le papier est tendu sur un châssis qui se meut en ligne droite dans une coulisse ; ce ressort ne travaille donc plus à l'extension et à la compression, mais à la torsion.

Le cylindre d'indicateur est coulé avec deux butées intérieures diamétralement opposées, de part et d'autre desquelles se trouvent deux orifices d'admission et un autre orifice pour l'écoulement de la vapeur condensée. Les canaux qui desservent ces deux orifices convergent dans le conduit unique venant du cylindre moteur. En raison du dédoublement de l'admission, la vapeur agit également, mais en sens inverse, sur chacune des ailettes du piston, de façon à constituer un couple de rotation. Le ressort est à double enroulement, de manière à offrir au mouvement alternatif de rotation du piston une égale résistance à la torsion dans les deux sens. Il faut observer d'ailleurs qu'il est à l'air libre, et qu'il s'échauffe par conséquent moins que les ressorts des indicateurs ordinaires.

Le traceur est fixé sur la tige même du piston ; le stylet est engagé dans un tube conique, et il subit la poussée d'un petit ressort.

Le papier est porté par un chariot couissant dans une glissière à queues d'hironde, ménagées dans une console fixée au support même de l'indicateur.

Le mouvement alternatif de ce chariot peut être réalisé simplement au moyen de deux cordes reliant ses extrémités à la crosse du piston de la machine en expérience et s'enroulant en sens inverse autour d'un tambour fixé à ce chariot. Mais on peut aussi se contenter d'employer un seul cordon, qu'on nouerait à la droite du chariot, et qui passerait sur un tambour lui permettant de venir à l'appareil suivant une direction quelconque. Le rappel de ce tambour est obtenu par une bande d'acier enroulée en sens contraire de la corde et fixée sur lui.

L'appareil Wayne convient spécialement aux moteurs à grande vitesse : il permet de relever des diagrammes excellents à l'allure de 500 tours.

Il est construit par la maison Elliott, de Londres.

Le *Gas-Engine Research Committee* a donné à cet instrument la préférence sur tout autre pour ses remarquables essais sur les moteurs. Le professeur Burstall a augmenté la précision des tracés en remplaçant la feuille de papier par une lamelle de mica recouverte de noir de fumée ; le stylet trace donc sa courbe en blanc sur fond noir ; on fixe ensuite au vernis à la gomme laque.

L'indicateur M'Innes-Dobbie s'est beaucoup répandu en ces derniers temps parmi les ingénieurs s'occupant de moteurs à gaz, et ce suffrage des hommes compétents témoigne de ses rares qualités. Cet appareil présente comme le précédent l'intéressante particularité que le ressort est en vue, étant placé au-dessus du cylindre et entièrement en dehors ; il est donc moins exposé à subir des températures élevées qui peuvent nuire à sa conservation et modifient certainement la loi de ses flexions. Le cylindre est revêtu d'un produit spécial vulcanisé, isolant ; son couvercle et le raccord inférieur sont garnis de la même matière : le maniement de l'instrument est ainsi grandement facilité. Le piston est en acier ; sa masse est très faible ; d'autre part la dureté du métal garantit une étanchéité durable. Le mouvement du parallélogramme s'effectue dans le plan vertical de l'axe du cylindre, ce qui constitue un perfectionnement sur les anciens appareils M'Innes : les bras sont courts et extrêmement légers. On a pu relever des diagrammes sur des moteurs effectuant 800 révolutions par minute.

Cet appareil est représenté par la figure 108, avec adjonction du dispositif Mathot que nous décrirons plus loin.

Mentionnons encore l'indicateur Rosenkranz, à parallélogramme d'Evans, dont la construction s'est remarquablement perfectionnée, et dont toutes les pièces sont interchangeables. Cet appareil présente un dispositif qui est très apprécié pour les moteurs à grande vitesse : on peut arrêter le tambour, pour le charger d'un papier, sans avoir à décrocher le cordon. Pour cela on a enroulé ce cordon sur une poulie folle placée en dessous du tambour, et qui est rappelée par un ressort spécial ; le tambour est aussi muni d'un ressort, qui l'appuie contre une saillie de la poulie, de

sorte qu'il est entraîné d'ordinaire par elle. Mais le tambour est à rochet ; en appuyant sur un cliquet, on l'arrête à fond de course. Dès lors, la poulie continue seule son mouvement alternatif ; mais il suffit de presser sur le cliquet, pour que le tambour l'accompagne de nouveau.

M. Marcel Deprez avait indiqué depuis longtemps une méthode différente pour la prise des diagrammes, qui a été heureusement appliquée dans ces derniers temps par M. Perry, professeur à Finsbury College : nous voulons parler de la méthode optique. Elle consiste à projeter un faisceau délié de lumière sur un miroir animé de deux mouvements, l'un de soulèvement produit par la pression de la vapeur, l'autre d'oscillation ; solidaire du déplacement du piston. Le faisceau réfléchi va peindre sur un écran une figure, résultant de la composition de ces deux mouvements ; c'est le dia-

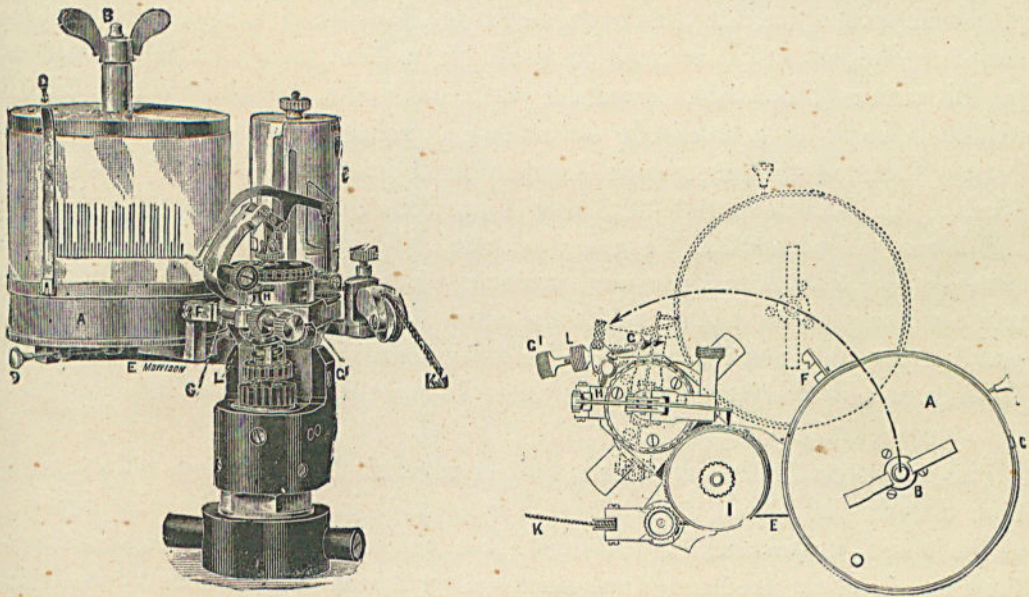


Fig. 108. — Indicateur M'Innes et enregistreur Mathot.

gramme des points inscrits successivement sur l'écran, auquel la persistance des impressions sur la rétine donne la continuité : on peut lui faire prendre l'étendue qu'on veut et fixer son contour en le suivant avec la pointe d'un crayon. Nous n'avons qu'à décrire l'appareil sur lequel le miroir est fixé. C'est une boîte en bronze, fermée sur une face par une lame mince et flexible en acier ; la pression dans le cylindre est transmise à cette boîte par un conduit, et il en résulte pour la lame une flexion et un bombement, fonction des variations de la pression. Or, le miroir est collé sur cette lame flexible. La boîte est montée sur deux tourillons, qui lui permettent de prendre un léger mouvement d'oscillation : un jeu de leviers, reliés à la crosse du piston moteur, produit cette oscillation, qui est normale au soulèvement de la lame.

Il importe d'observer que le diagramme optique ainsi tracé est très correct, attendu que le disque d'acier a une période vibratoire si courte que son inertie n'entraîne aucune déformation de la courbe, même à des vitesses de 1,500 tours par minute. Cet

appareil conviendrait donc fort bien à l'étude des moteurs à gaz, pour lesquels la brusquerie de l'explosion et la rapidité des mouvements constituent une sérieuse difficulté avec les meilleurs appareils.

Installé à demeure, cet instrument fournirait à chaque moment au mécanicien l'indication précise du travail effectué par le moteur : il pourrait donc donner lieu à une application originale. Elle a été faite sur plusieurs moteurs à l'exposition des moteurs à alcool de 1902 à Paris et l'empressement des ingénieurs autour de cet appareil témoignait de l'intérêt qu'il offrait.

L'indicateur optique exposé portait la signature de MM. Hospitalier et Carpentier⁽¹⁾ : il présente quelques nouveautés. Le miroir est vertical et il est appuyé par un ressort contre trois pointes, dont l'une est fixe, alors que les deux autres subissent des déplacements proportionnels, ainsi que nous l'avons dit ci-dessus, à la pression qui règne dans le cylindre et au déplacement du piston du moteur. Ce dernier mouvement est produit par une petite bielle, commandée par une manivelle, reproduisant à une échelle réduite la bielle et la manivelle du moteur, et reliée à l'arbre du moteur par un flexible. Comme cette transmission de mouvement pourrait se faire avec un certain décalage, on intercale entre le flexible et la manivelle à mouvoir deux roues dentées auxiliaires, qui permettent d'annuler le retard. Cet appareil, qu'on a appelé un *manographe*, étant éclairé par une bonne lampe à acétylène, donne des diagrammes très nets ; on peut les photographier au besoin, mais on ne le fera pas souvent ; il paraîtra plus utile aux ingénieurs de se servir de cet instrument pour observer et étudier une suite de diagrammes successifs. Sa complication limitera malheureusement ses applications.

Plus simple est l'indicateur Mathot, qui permet aussi d'analyser le fonctionnement d'un moteur par l'étude d'une série de relevés. Il y a nombre d'années déjà que M. Richarson, Rosenkranz, Clair, Guinotte, etc. avaient imaginé des indicateurs continus inscrivant sur une bande de papier les diagrammes correspondants à une suite de coups de piston successifs : ces remarquables instruments avaient le défaut d'être très chers et de développer rapidement une longueur encombrante de papier.

M. Mathot s'est contenté d'inscrire la pression de compression et la pression explosive, en faisant avancer progressivement le tambour d'un millimètre environ par tour : ce mouvement est produit par un mécanisme d'horlogerie commandé par un régulateur-compensateur très sensible.

Nous avons déjà fait voir cet instrument monté sur un indicateur et nous en donnons encore deux vues dans la figure 109.

L'indicateur est construit comme la plupart des appareils ; on lui adjoint un bras B portant le tambour enregistreur T, qui pivote autour de l'axe *o* du tambour ordinaire. Il est facile d'amener le papier en contact avec le style *c* et de maintenir le contact par la vis V. Le style enregistre le nombre et la puissance des explosions successives ; les ordonnées qui permettent de les apprécier sont séparées par des traits moins

1. *Industrie Electrique*, 40 janvier, 1902.

longs qui correspondent à la compression du mélange : on peut donc évaluer ses va-

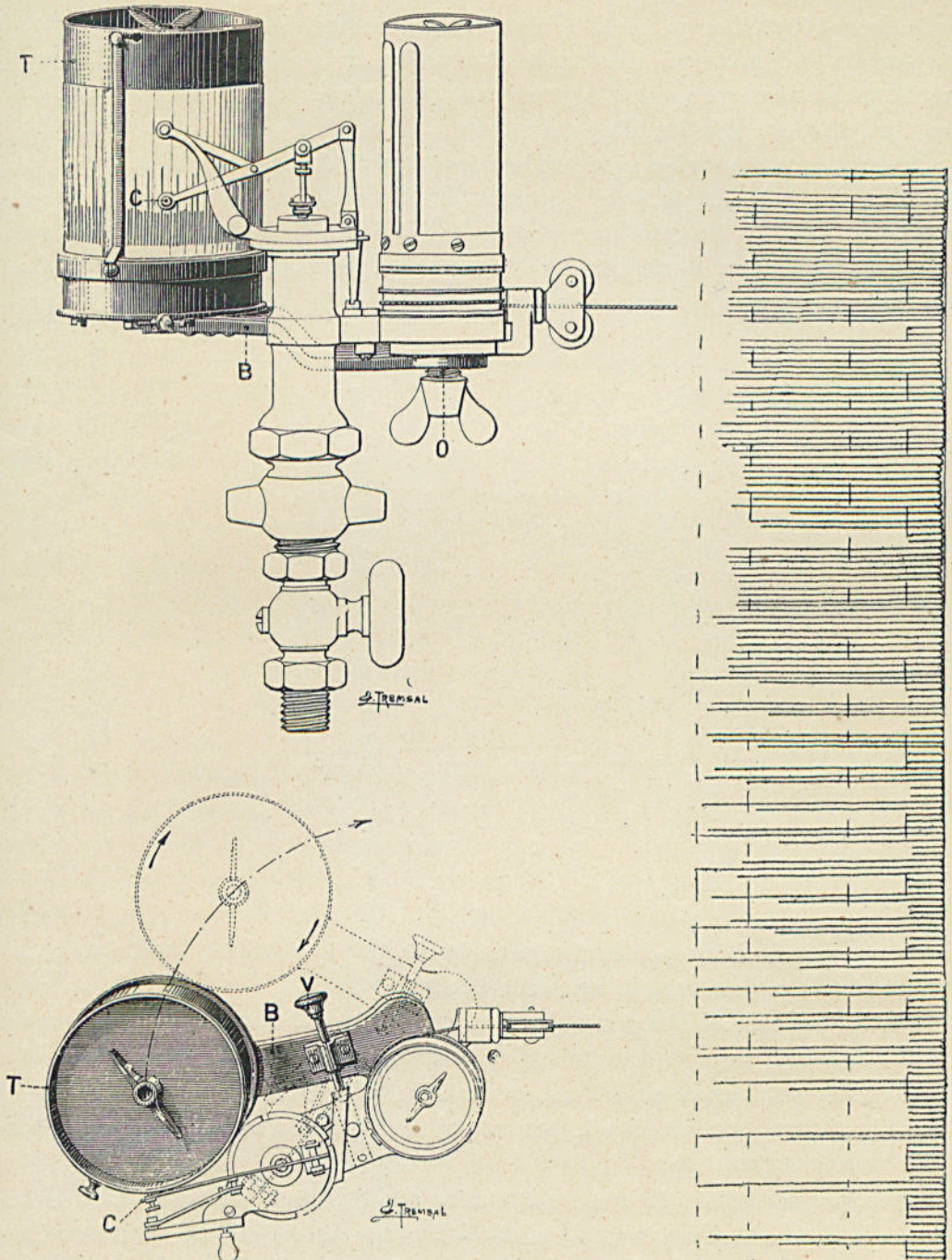


Fig. 409. — Fig. 410. — Indicateur et Tracé Mathot.

leurs successives dans les moteurs à compression variable. On passe sans difficulté à la prise des diagrammes ordinaires en faisant pivoter d'abord le tambour T, puis les

leviers du style *c* de façon à les amener respectivement dans les positions indiquées en plan par les traits ponctués (').

La figure 110 montre un tracé Mathot correspondant à diverses charges d'un même moteur ; on peut suivre sur cette bande les variations de régime du moteur et apprécier l'effet des passages à vide : la première explosion qui suit un de ces passages est toujours atténuée. L'action de paroi est ainsi démontrée d'une manière saisissante, qui s'impose aux esprits les plus rebelles. Si le tuyau d'échappement crée une résistance à la décharge des gaz, on voit au contraire les explosions décroître progressivement, par suite de l'accumulation des gaz brûlés dans le cylindre. Même effet avec une conduite de gaz insuffisante ou dépourvue de poches de caoutchouc jouant le rôle d'accumulateurs de gaz. Une résistance créée sur le tuyau d'amenée d'air pro-

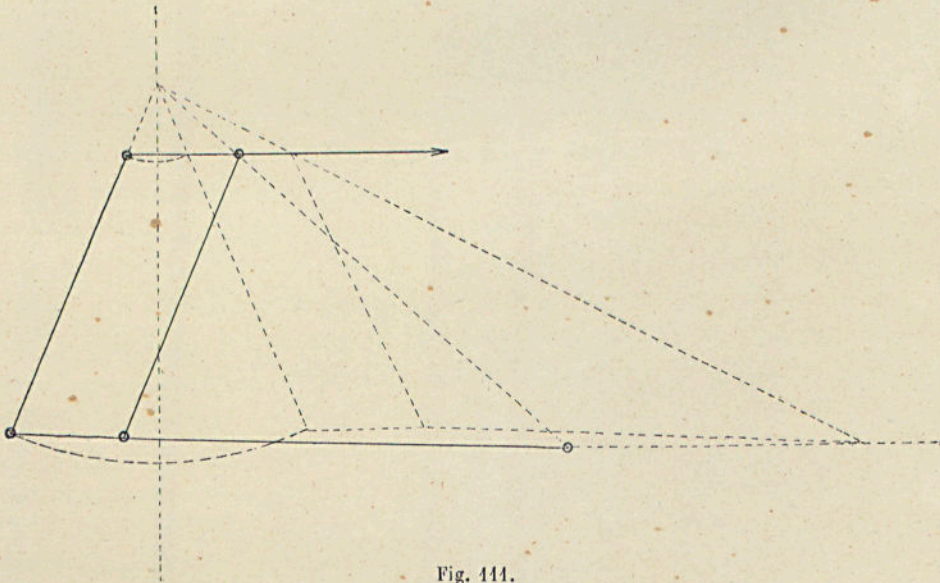


Fig. 111.

duit aussi une diminution de la pression explosive. Ce peu de mots permet d'apprécier l'utilité de l'ingénieur enregistreur de M. Mathot.

Passons maintenant à l'examen des meilleurs dispositifs d'installation et d'emploi des indicateurs.

La course utilisable de ces instruments ne dépasse guère 12 centimètres ; l'emploi d'un réducteur de course entre la crosse du piston du moteur et le tambour de l'appareil s'impose donc toujours.

Le moyen le plus simple consiste à monter sur le bâti un balancier, dont l'extrémité inférieure est reliée par une bielle à la crosse, le cordon de l'indicateur étant attaché entre le point d'oscillation du balancier et son extrémité, à la hauteur voulue

1. M. Duflos, de Vitry en Artois avait eu l'idée, vers 1896, de monter sur le cylindre des moteurs d'automobiles un manomètre métallique dont l'indication moyenne permettait d'apprécier les pressions développées et de régler ainsi le dosage du mélange : ce dispositif très simple rendait service, mais n'était pas applicable sur les moteurs à grande puissance.

pour que le rapport des leviers donne la réduction cherchée. Ce dispositif est assurément le plus simple de tous, mais il donne souvent des tracés incorrects, parce que les abscisses correspondantes aux déplacements du tambour ne sont pas rigoureusement proportionnelles aux chemins parcourus par le piston ; quand la réduction est faible, et c'est le cas des petits moteurs, l'erreur commise est négligeable ; mais elle est plus importante pour les moteurs à longue course. M. Meyer a indiqué un moyen de corriger ce procédé (1). Il emploie un balancier portant un parallélogramme articulé ; le cordon de l'indicateur est attaché à l'extrémité supérieure du parallélogramme et le levier de connexion avec le piston s'articule à l'extrémité inférieure. Ce point reste alors sur la ligne droite qui réunit le point de suspension au point d'attache du cordon mobile avec le piston. On peut donc abréger sans inconvénient la longueur de la corde de l'indicateur.

On utilise le plus souvent comme appareil de réduction des poulies différentielles, avec ressorts de rappel ; mais on obtient de meilleurs résultats avec une poulie à deux diamètres, dont la plus grande est mûe par une corde attachée à la crosse du piston, tandis que la petite poulie transmet le mouvement au tambour à papier : les

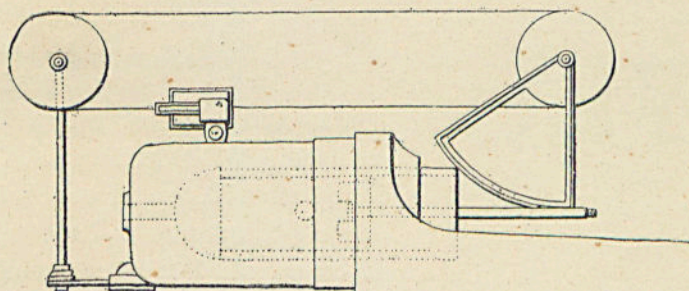


Fig. 112.

diamètres de ces poulies doivent naturellement être proportionnels à la course du piston et à la longueur du diagramme. L'axe des poulies est fileté, afin de pouvoir toujours maintenir dans un même plan les deux brins de la corde ; en tournant, les poulies se déplacent en effet sur l'axe et les brins s'enroulent en hélice sur la jante sans jamais se superposer, ni se croiser. Un fort ressort de rappel en spirale est logé à l'intérieur de la poulie et il assure une tension permanente des cordes, sans flottement. Le support de la poulie se monte directement sur l'indicateur ou bien on la fixe sur un boulon ou une saillie du cylindre du moteur.

Staneck employait deux poulies, et son dispositif a été adopté par M. Burstall dans les essais du *Gas Engine Committee* ; la figure 112 montre comment s'opérait la commande de l'indicateur Wayne, qu'on voit placé sur le cylindre.

Il n'est pas toujours aisé de s'attacher au piston ; dans ce cas, on peut sans difficulté prendre directement le mouvement sur l'arbre de couche lui-même. On réalise alors fort élégamment un réducteur de course en montant sur le bout de l'arbre un

1. « Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure », 28 décembre 1895.

petit excentrique dont la ligne des centres concorde rigoureusement avec l'axe de la manivelle du vilebrequin de l'arbre moteur.

La maison M'Innes de Glasgow construit pour cet emploi une coulisse à excentricité variable qu'on peut ajuster instantanément sur n'importe quel arbre, grâce à une pince-glissière embrassant l'extrémité de l'arbre. Le rayon d'excentricité doit être rigoureusement parallèle à la direction du cordon allant au tambour de l'indicateur, de sorte que son point mort par rapport à ce tambour corresponde exactement au point mort du coudé ou de la manivelle motrice.

M. Mathot a fort ingénieusement perfectionné ce dispositif, et il a réussi à rendre extrêmement aisée la rattaché du cordon sur l'excentrique.

Il fait usage d'une griffe à trois branches, orientées à 120° l'une de l'autre, munies chacune d'une vis *c* à pointe aciérée (fig. 113) permettant de fixer solidement l'appareil sur l'arbre du moteur : la vis centrale *a* sert de repère et donne le moyen de

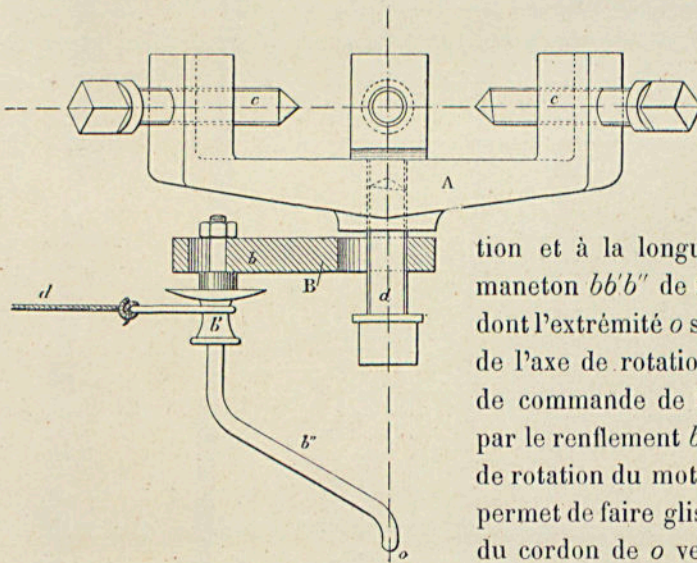


Fig. 113.

s'assurer que l'axe de l'appareil coïncide avec celui de l'arbre. Cette même vis fixe la manivelle B dans la direc-

tion et à la longueur voulue. Elle porte un maneton *bb'b''* de forme courbe, renflé en *b'*, dont l'extrémité *o* se place sur le prolongement de l'axe de rotation de l'appareil. Le cordon de commande de l'indicateur *b'd* est retenu par le renflement *b'* : quelle que soit la vitesse de rotation du moteur, l'extrémité immobile *o* permet de faire glisser sans difficulté la boucle du cordon de *o* vers *b'*, quand on veut attacher ; par contre, une légère pression sur ce

cordon le fait sortir et dégage l'indicateur ⁽¹⁾.

La manière dont les indicateurs sont installés sur les cylindres contribue grandement à l'exactitude et à la correction des diagrammes relevés. Le professeur Goss, de Saint-Louis (États-Unis d'Amérique), a publié sur ce sujet d'intéressantes observations, que M. Mallet a résumées dans la chronique du *Bulletin de la Société des Ingénieurs civils de France*. Il importe d'abord que la communication de l'indicateur avec le cylindre soit courte et directe, si l'on veut que le diagramme marque rigoureusement les pressions développées et leurs variations. L'effet de l'interposition d'un long tuyau retarde sensiblement le mouvement du crayon, et ce retard est d'autant plus marqué que la vitesse du piston est plus grande et l'explosion plus vive. Par contre, une longue conduite fait inscrire des pressions plus élevées dans la pé-

1. L'appareil Mathot est breveté.

riode de détente ; aussi l'aire d'un diagramme est-elle plus grande qu'elle ne devrait l'être lorsque les appareils sont montés sur un tuyau de quelque longueur et l'on relève alors un travail trop fort.

Quelques ingénieurs préfèrent placer l'indicateur horizontalement, plutôt que verticalement ; nous apprécions peu les arguments qu'ils ont fait valoir à l'appui de cette pratique. Je monte généralement l'appareil sur le couvercle de la boîte renfermant la soupape de décharge.

Mon expérience personnelle, basée sur les très nombreux diagrammes que j'ai relevés, me conduit à affirmer que l'étanchéité du piston d'indicateur constitue un élément extrêmement important pour la correction des déterminations effectuées par cet appareil, si utile, mais dont il est si facile d'abuser. Avec un indicateur médiocrement étanche et une conduite trop développée, les diagrammes sont faussés au delà de ce que l'on peut se figurer et les ingénieurs ne sauraient trop être mis en garde contre cette grave cause d'erreur.

Les cordons doivent être aussi flexibles que possible, mais nullement élastiques : on les fait en chanvre de première qualité, tressé et non pas tordu, ou bien en boyau ; dans le premier cas, il faut qu'ils soient bien secs, car l'humidité augmente l'élasticité du chanvre. On peut aussi se servir de fils de laiton très fins et soigneusement recuits.

Nous recommandons qu'en général on donne aux cordons la moindre longueur que possible, au réducteur de course la moindre masse, au ressort de rappel du cylindre enregistreur la tension nécessaire pour ne pas laisser vibrer le cordon et ne pas produire un lancé de ce cylindre, ainsi que cela se remarque dans les moteurs à très grande vitesse. Le crayon doit glisser sans frottement à la surface du papier, si l'on ne veut pas déformer les courbes de détente.

Le tarage d'un ressort d'indicateur est une opération qui a pour but de mesurer l'ordonnée correspondante sur le diagramme à un kilogramme de pression par centimètre carré sur le piston de l'appareil ; on détermine de la sorte l'échelle du diagramme. On dit, par exemple, qu'elle est de 5 millimètres ; on sous-entend les mots : par kilogramme-centimètre carré de pression (1).

Le tarage des indicateurs est une opération délicate, qui est souvent mal faite ; nous considérons comme mauvaise l'expérience dans laquelle on tire le ressort hors du cylindre pour étudier sa flexion en le chargeant de poids croissants (2) ; nous sommes d'ailleurs médiocrement satisfait du procédé, meilleur assurément, mais critiquable encore, qui consiste à laisser le piston dans l'indicateur, à retourner celui-ci (tête en bas) et à attacher à la tige du piston des poids pour déterminer la longueur de l'ordonnée du diagramme correspondante à 1, 2, 3, ... n kilogrammes ; le résultat obtenu de la sorte est toujours discutable, parce qu'il faut mesurer avec une extrême précision

1. Les Anglais représentent l'échelle par une fraction : ainsi l'échelle dite au $\frac{1}{80}$ correspond à une ordonnée de 1 pouce pour une pression de 80 livres par pouce carré ; en transposant ce chiffre en unités métriques, on trouvera que dans ce diagramme, une ordonnée de 4,51 millimètres correspond au kilogramme par centimètre carré.

2. Cette opération oblige de mesurer la longueur des divers bras de levier du parallélogramme pour passer de la flexion du ressort à l'ordonnée réellement tracée par le crayon.

le diamètre du piston ; cette manière d'agir a, d'autre part, le grave défaut de ne pas tenir compte des fuites du piston, qui tendent à faire indiquer par l'appareil une pression moindre que celle qui règne effectivement dans le cylindre moteur. La seule détermination correcte s'effectue en montant l'appareil sur un réservoir de grande capacité renfermant de l'air comprimé, dont la pression est mesurée par un manomètre à air libre ou tout au moins par un manomètre étalon parfaitement exact ; c'est ainsi que je procède toujours dans mon laboratoire. On trace sur le tambour une série de lignes parallèles correspondantes aux diverses pressions. Comme la flexibilité du ressort varie avec la température, il convient d'amener d'abord l'indicateur à la température qu'il atteindra sur le cylindre.

Mais l'action de la température est faible sur les indications des appareils ; la quantité dont la flexion augmente par degré ne dépasse, en effet, pas 0,000492 par degré d'augmentation de température, ainsi que l'ont démontré des essais faits par la Société alsacienne des propriétaires d'appareils à vapeur. Le tarage à chaud n'est donc nécessaire que dans les essais de haute précision.

Dans les remarquables essais faits par le professeur Schröter sur le moteur Diesel, le savant expérimentateur a constaté que l'échelle du ressort de son indicateur diminuait au fur et à mesure que la pression augmentait ; il en résulte qu'on aurait commis une erreur en prenant pour un ressort déterminé une valeur moyenne. Voici comment M. Schröter a tourné cette difficulté.

Appelons F la surface du piston moteur, p la pression en kilogrammes par unité de surface, m l'échelle du diagramme en un point quelconque de ce diagramme, y l'ordonnée correspondante à une abscisse x ; on aura pour le travail \mathfrak{G} :

$$\mathfrak{G} = \int p \, dv = \int p \, F \, dx = F \int \frac{y}{m} \, dx.$$

Or, désignons par $m_1, m_2, m_3, \text{etc.}$ les échelles trouvées expérimentalement pour 1, 2, 3, etc. kilogrammes de pression, et décomposons le diagramme par des lignes horizontales menées à 1, 2, 3, etc. kilogrammes de pression (fig. 114) ; nous aurons, pour les diverses sections Δf ,

$$\begin{aligned} \mathfrak{G} &= F \left[\frac{1}{m_1} \int_{x_2}^{x_1} y \, dx + \frac{1}{m_2} \int_{x_3}^{x_2} y \, dx + \dots \right] \\ &= F \left[\frac{\Delta f_1}{1} + \frac{\Delta f_2}{m_2} + \dots \right] = F \Sigma \left(\frac{\Delta f}{m} \right) \end{aligned}$$

Mais, désignons par le symbole m_0 l'échelle moyenne à accepter. Pour l'ensemble du diagramme, nous aurons :

$$\mathfrak{G} = F \Sigma \frac{(\Delta f)}{m_0}$$

d'où

$$m_0 = \frac{\Sigma (\Delta f)}{\Sigma \left(\frac{\Delta f}{m} \right)}$$

M. Schröter s'est contenté de faire ce calcul pour le diagramme dont la surface se rapprochait le plus de la moyenne arithmétique des surfaces de tous les diagrammes relevés. Il a en outre procédé séparément pour les périodes de détente et de compression et il a déterminé les moyennes m_0 pour ces différentes phases.

Le ressort employé donnait les diverses valeurs ci-dessous :

$m_1 = 4,30$	$m_5 = 3,90$
$m_2 = 4,29$	$m_6 = 3,96$
$m_3 = 4,13$	$m_7 = 3,85$
$m_4 = 4,06$	

L'échelle moyenne m_0 de détente calculée sur ces données était égale à 4,06 et celle de compression à 4,14.

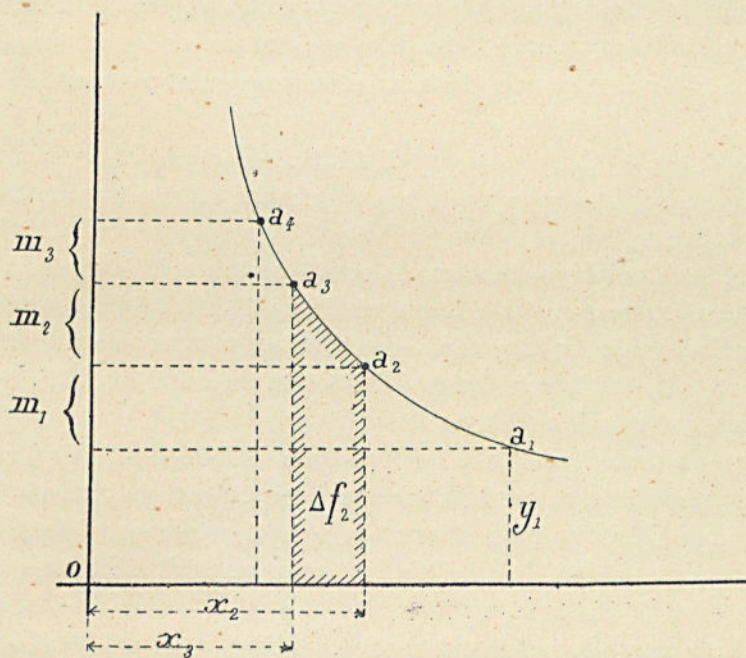


Fig. 114.

Le phénomène observé par M. Schröter est général et il s'observe sur tous les ressorts, mais les écarts sont plus ou moins considérables. Le ressort de 20 kilogrammes de mon appareil Crosby donne les valeurs suivantes de m :

m de 0 à 1	= 1 ^{mm} ,70
3 à 4	= 1,68
6 à 7	= 1,66
9 à 10	= 1,65
12 à 13	= 1,64
15 à 16	= 1,64

J'ai relevé ces valeurs en me servant du grand manomètre à air libre de mon laboratoire de Lille ; les différences sont très faibles et témoignent des qualités du double ressort en spirale de mon indicateur.

La moyenne de 1 à 7 kilogrammes est de 1,68 ; elle tombe à 1,65 entre 1 et 15 kilogrammes, de telle sorte qu'il n'y a pas lieu de prendre une échelle différente pour les courbes de compression et de détente. Les corrections à faire pour le calcul du travail et de l'exposant γ sont d'ailleurs tellement faibles qu'on les jugera inutiles dans la plupart des essais, même les plus soignés (1).

C'est un art que de savoir relever de beaux et bons diagrammes, et il faut pour cela du soin, de l'habileté et de l'éducation, car ce n'est pas du premier coup qu'on y réussit. Quelques conseils ne sont donc pas superflus.

Il faut d'abord s'assurer que le ressort de l'appareil convient à la pression qui doit être développée dans le cylindre. Cela fait, il s'agit de vérifier que le tambour enregistreur a un mouvement exactement proportionnel à celui du piston de la machine : on relie donc le cordon, enroulé dans la gorge de l'enregistreur, à la crosse, par l'intermédiaire du réducteur et l'on fait faire au moteur quelques tours à la main. Les points morts des deux courses devront coïncider rigoureusement à l'avant et à l'arrière.

Les cordes doivent toujours rester parallèles à elles-mêmes dans leurs divers mouvements. Il faut aussi bien éviter une tension excessive qu'une tension trop faible qui les laisserait flotter.

Quand on relève des diagrammes sur de grands moteurs, la longueur des cordons occasionne des vibrations et des étirages de la ficelle, dont il faut se méfier ; on se trouvera bien dans ce cas de la soutenir en son milieu, soit par une roulette, soit simplement par un petit coulisseau. Quelquefois on recourra à des tringles rigides de connexion, glissant dans des guidages.

On s'arrange de façon à ce que le tracé tombe au milieu du papier : il ne doit point se produire de vibrations, ni de chocs dans les mouvements du traceur. Le crayon, qui est une simple pointe de cuivre traçant sur du papier recouvert de blanc de zinc, doit être fin, mais non aigu, de manière à donner un trait délié sans déchirer le papier : le papier doit être lisse.

Il faut veiller à ce que le papier soit appliqué entièrement sur le tambour, sans pli, ni boursouffure, et qu'il ne puisse glisser sous l'entraînement du style : à cet effet, on serre les pinces quand elles sont relâchées.

On appuiera doucement le crayon ; beaucoup d'appareils sont munis d'un butoir, qui limite la pression qu'on peut exercer sur le papier.

Si l'on doit procéder à de longs essais, il importe de ne pas laisser chauffer outre mesure le cylindre de l'indicateur, car le piston perdrait de sa mobilité et la courbe de détente serait faussée ; on enlèvera donc l'appareil de temps en temps pour le laisser refroidir. Son graissage devra toujours être abondant, mais on ne doit employer que de très bonne huile, très fluide (1).

1. Le jeu des articulations du parallélogramme de l'indicateur entraîne quelquefois une cause d'erreur notable, agissant en sens inverse suivant que le piston monte ou descend ; ce défaut constitue un cas de réforme pour l'instrument.

1. M. Mathot monte son indicateur sur un robinet à circulation d'eau ; c'est une excellente pratique pour les moteurs à gaz.

Tels sont les conseils que nous donnons aux jeunes ingénieurs qui entreprennent de relever un diagramme et de calculer le travail indiqué d'une machine.

C'est par les diagrammes qu'on détermine le *travail indiqué*. On y procède en mesurant soit l'ordonnée moyenne de chaque diagramme, soit l'aire des courbes ; on peut le faire par la formule de Simpson ou à l'aide du planimètre d'Amsler.

Proposons-nous, par exemple, d'évaluer l'ordonnée moyenne d'un diagramme par la formule de Simpson.

On le décomposera en un nombre pair n de rectangles d'égale largeur, par des ordonnées verticales équidistantes : désignons par $p_0, p_1, p_2 \dots p_n$, les longueurs de ces ordonnées et par p_m l'ordonnée moyenne, on pourra écrire :

$$p_m = \frac{1}{2n} \left[p_0 + 4(p_1 + p_3 + p_5 + \dots) + 2(p_2 + p_4 + p_6 + \dots) + p_n \right]$$

L'échelle du ressort étant connue on déduira de l'ordonnée moyenne p_m la pression moyenne P_m en kilogrammes par centimètre carré de piston, et l'on calculera le travail indiqué comme nous l'avons dit plus haut : on fait d'ordinaire n égal à 10.

Poncelet a donné une formule qu'on applique aussi quelquefois pour faire la quadrature de l'aire ou pour calculer l'ordonnée moyenne : elle a l'avantage d'exiger moins d'ordonnées que la méthode de Simpson. Cette formule est la suivante :

$$p_m = \frac{1}{4}(p_0 + p_n) - \frac{1}{4}(p_1 + p_{n-1}) + 2(p_1 + p_3 + \dots)$$

On applique enfin quelquefois la méthode de Tchébitchef, qui consiste à mener une ordonnée au milieu du diagramme et à conduire à droite et à gauche trois ordonnées distantes du centre de quantités $0,267 \frac{l}{2}$, $0,422 \frac{l}{2}$ et $0,866 \frac{l}{2}$, l étant la longueur du diagramme. Les six ordonnées ainsi obtenues étant a, a', b, b', c et c' , on n'a qu'à poser :

$$p_m = \frac{1}{6}(a + b + c + a' + b' + c')$$

Le procédé le plus rapide de calcul des diagrammes est celui de l'intégrateur d'Amsler ; cet ingénieur inventeur, originaire de Schaffouse, en Suisse, a construit un instrument qui permet de mesurer fort simplement l'aire d'une courbe fermée, et qui s'appelle pour cela le *planimètre*. Il se compose essentiellement de deux tiges articulées, BA et AO dont l'une est terminée par une pointe O et la seconde par une pointe B, mais dont l'autre extrémité porte une roulette C. Si l'on fixe la pointe O sur le papier en dehors du contour fermé et que l'on suive la ligne de ce contour avec la pointe B, on peut déduire du nombre de tours faits par C la surface de la courbe. M. Résal a démontré, en effet, que l'aire du contour fermé parcouru

par B est égale au produit de la longueur du bras BA par le déplacement circonférentiel de la roulette.

Si l'on prend AB égal à la longueur du diagramme, on obtient directement p_m , c'est-à-dire l'ordonnée moyenne.

Notons qu'il faut parcourir la courbe fermée dans le sens du mouvement des aiguilles d'une montre.

La grande différence qui peut exister entre les divers diagrammes relevés à la suite sur un moteur parfaitement réglé, oblige d'en prendre le plus grand nombre possible pour calculer un travail indiqué moyen.

On procède généralement de la manière suivante : à chaque relevé, on fait tracer au crayon cinq ou dix diagrammes superposés sur un même papier, en s'astreignant à en inscrire toujours le même nombre. D'autre part, on relève un semblable diagramme toutes les dix ou quinze minutes, à intervalles très réguliers. Le planimètre permet en parcourant toutes les courbes d'un même papier de faire une première moyenne pour chaque relevé ; on calcule la moyenne générale de l'essai par les chiffres correspondants à toutes les prises de diagrammes. On détermine ainsi la pression moyenne développée sur le piston au cours de l'expérience.

Mais on ne saurait calculer le travail indiqué si l'on ne connaissait exactement le nombre d'impulsions motrices par minute. Pour un moteur à deux temps, donnant une poussée par tour, le facteur n de la formule

$$\Phi = \frac{P_m \cdot S \cdot C \cdot n}{4500}$$

est égal au nombre de tours du moteur : pour un moteur à quatre temps, admettant tous les deux tours, n est égal à la moitié du nombre de tours. Mais si le moteur est réglé par admission de *tout ou rien*, il faut absolument compter le nombre n' d'impulsions motrices par minute ; n' est égal à la moitié du nombre de révolutions, moins les passages à vide.

Le meilleur moyen de déterminer n' consiste à monter un compteur ordinaire automatique sur un des organes d'admission ⁽¹⁾ et à faire le relevé de ses indications au début et à la fin de l'expérience. Il est quelquefois plus aisé d'employer un compteur électrique au lieu d'un compteur mécanique parce que le premier n'exige qu'un contact et ne donne lieu à aucun travail ; mais ce genre d'appareils doit être surveillé, car il peut donner des ratés dont on ne se doute pas. Le compteur électromagnétique de Wheatstone est un des plus recommandables de l'espèce. J'ai employé plusieurs fois un récepteur de Morse, pour inscrire sur une bande de papier les admissions ; l'indicateur Mathot pourrait aussi donner ce chiffre, mais au prix d'une coûteuse dépense de papier.

Dans le même ordre d'idées, nous trouvons encore un appareil spécial présenté en 1896 au *Stevens Institute of technology* par MM. Christy et Hasbrouck. C'est un

1. Quand le mouvement alternatif est d'amplitude insuffisante pour faire fonctionner le compteur, on est obligé de recourir à des leviers de multiplication, qu'il n'est pas toujours facile d'installer.

indicateur de Watt dont le piston a 1,6 centimètre carré de section; le ressort n'a pas d'autre fonction à remplir que d'amortir le choc de l'explosion. La tige du piston fait mouvoir un levier à sonnette actionnant la bielle d'un compteur de tours totalisateur.

A défaut de ces appareils, on se contente quelquefois de compter les passages à vide à la main, en appuyant le doigt sur un des organes d'admission et en suivant en même temps des yeux un chronomètre à secondes. On se trompera moins en comptant les admissions que les passages à vide. Il est quelquefois plus sûr encore de compter le nombre d'admissions consécutives et à faire la moyenne des chiffres ainsi déterminés; mais il faudrait répéter souvent cette observation pour aboutir à un nombre correct.

Les diagrammes relevés sur un moteur à gaz ne servent pas seulement à calculer son travail indiqué, mais on les utilise pour analyser le fonctionnement de la machine: les courbes rendent compte, en effet, de toutes les circonstances dans lesquelles se produit l'aspiration, l'explosion, la détente et l'échappement. « L'indicateur est le *stéthoscope* de l'ingénieur, a dit avec raison M. Thurston, car il découvre à l'examen les parties inaccessibles du moteur plus complètement que le stéthoscope ne révèle au médecin la condition et le fonctionnement des organes intérieurs du corps humain. » On ne saurait mieux faire ressortir les avantages de l'étude expérimentale d'une machine par cet admirable procédé de Watt.

Les diagrammes doivent donc être soumis à une analyse rigoureuse, dans le but d'étudier toutes les phases du cycle et de suivre toute la série des opérations qui le composent. Je signalerai surtout l'étude qu'on doit faire des courbes de détente et de compression, qui sont de la forme $p v^\gamma = C$; il importe de déterminer γ . Pour cela, on mesure sur la courbe un certain nombre de pressions et les volumes correspondants, en tenant compte des espaces nuisibles; on peut écrire alors:

$$\begin{aligned} \log p + \gamma \log v &= \log C = K \\ \log p' + \gamma \log v' &= K \end{aligned}$$

d'où l'on peut déduire γ , puisque nous possédons deux équations.

$$\gamma = \frac{\log v' - \log p}{\log v - \log v'}$$

Ce calcul de γ ne se fait pas d'ordinaire sur un seul diagramme, mais plutôt sur un diagramme moyen, obtenu en superposant les courbes relevées en cours d'expériences, et en traçant une courbe qui totalise leurs indications; les conditions générales du fonctionnement doivent rester les mêmes autant que faire se peut.

Bryan Donkin a préconisé, pour l'étude approfondie des cycles, l'emploi de diagrammes dont les abscisses sont proportionnelles aux temps, au lieu d'être proportionnelles aux courses du piston; il appelle les premiers *time-base diagrams* et il réserve aux seconds le nom de *Watt diagrams*. Au lieu de donner au cylindre enregistreur un mouvement varié et alternatif, en le reliant par

un cordon à la tête du piston, on lui imprime un mouvement uniforme et continu par un mécanisme d'horlogerie approprié ; c'est une certaine complication, mais elle procure le moyen d'étudier avec plus de précision et d'analyser avec une grande rigueur la phase la plus intéressante du cycle, qui correspond à la déflagration du mélange tonnant derrière le piston. Dans le diagramme ordinaire de Watt, c'est à ce moment que le mouvement de l'enregistreur est le plus lent ; la courbe tracée alors par le crayon est donc plus courte et moins précise et les détails du phénomène échappent à l'observateur. Sur le diagramme des temps (time-base) cette phase occupe au contraire plus d'espace, ainsi qu'on le voit sur les figures 115 et 116, dans les-

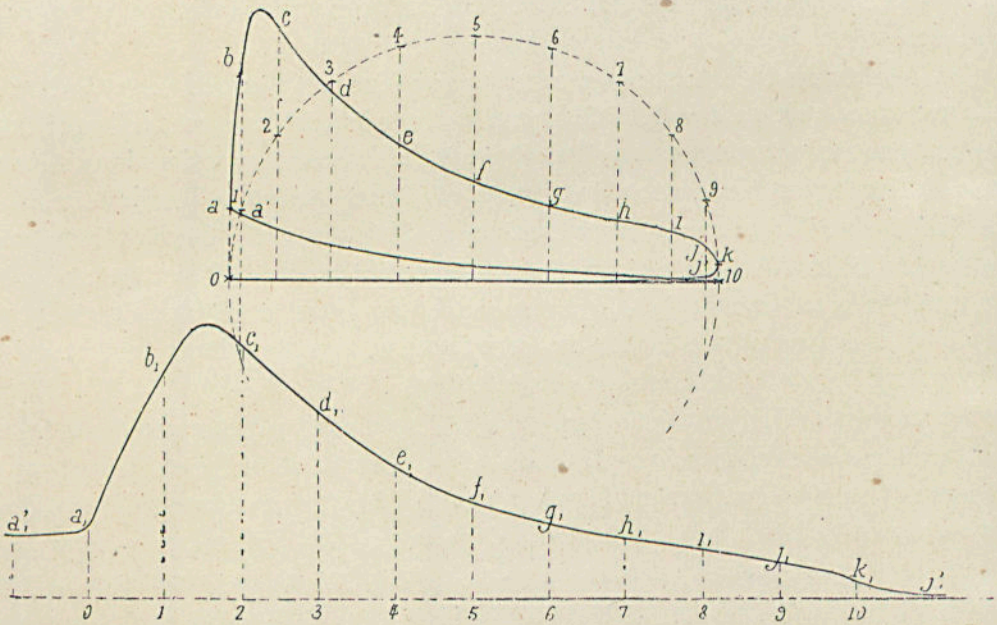


Fig. 115 et 116.

quelles nous comparons les diagrammes relevés sur un même moteur par les deux procédés. Les lettres correspondantes a et a_1 , b et b_1 etc. permettent de se rendre compte de la différence des deux tracés et constituent des repères sur chacun d'eux (1).

Le frein de Prony présente les formes les plus diverses : la figure 117 montre la forme classique, la plus simple de toutes. Elle assure la constance de la longueur L du bras de levier, mesurée sur l'horizontale entre la verticale passant par le centre de l'arbre et le brin qui porte la charge P . Ce frein est équilibré, de telle sorte que les

1. Il convient d'observer que le diagramme des temps ne se prête pas directement à la mesure du travail indiqué : on ne saurait donc employer le planimètre d'Amsler pour déterminer sa pression moyenne, mais on peut recourir alors au procédé de Simpson, de Poncelet, de Parmentier ou bien de Tchébitchef, en ayant soin de ne pas tracer des ordonnées équidistantes, mais correspondantes à des déplacements égaux du piston.

poids imposés au frein constituent sa charge nette P. La puissance \mathcal{Q} est donnée par la formule :

$$\mathcal{Q} = \frac{P 2\pi L n}{4500}$$

On doit mesurer la longueur L avec le plus grand soin au millimètre près, en s'aidant d'une règle et de deux fils à plomb : pour vérifier l'équilibre, on monte le frein

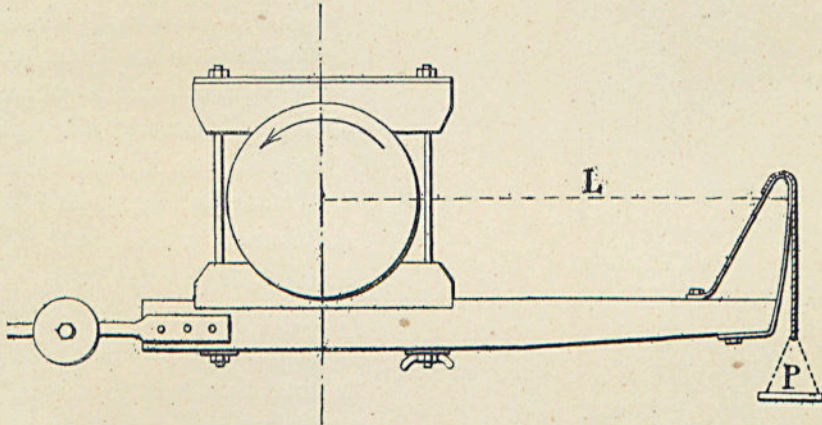


Fig. 417.

sur un couteau dont l'arête corresponde exactement au centre de la poulie. Il importe que le levier du frein soit en dessous de la poulie et non pas au-dessus, car l'équilibre est ainsi plus stable: il est vrai que l'on ne peut pas toujours réaliser cette condition.

On graisse la surface de la poulie par un corps gras quelconque, mais le mieux est d'employer une bande de lard, qui fond d'autant plus vite que la jante chauffe davantage. On peut aussi lubrifier à l'eau de savon. L'échauffement sera tolérable, si l'on donne à la jante une surface suffisante, et si la poulie de frein a un diamètre assez grand: j'estime qu'il ne faut pas dépasser 18.000 kilogrammètres à la seconde par mètre carré de surface frottante (1).

On constitue encore un frein excellent en substituant aux mâchoires de bois un collier d'acier garni de tasseaux : ce frein a l'avantage de pouvoir se monter sur des poulies de diamètre différent et d'embrasser une plus grande surface de jante.

Au lieu de faire soulever des poids par le bras du frein, on peut le faire appuyer, par l'intermédiaire d'une béquille, sur le plateau d'une bascule et peser son action ; ce dispositif répond évidemment à une rotation en sens inverse de la première. Ce frein a été employé par MM. Brooks et Steward dans leurs célèbres expériences sur le moteur Otto, et nous avons suivi fréquemment cet exemple ; mais il faut veiller

1. Nous jugeons inutile de rappeler au lecteur que le nombre de tours n'intervient pas dans le calcul de la surface frottante, puisque le travail du moteur et le travail consommé en frottements varient ensemble proportionnellement au nombre de révolutions.

bien soigneusement à ce que la béquille soit rigoureusement verticale et parfaitement libre.

Il est évident d'ailleurs que dans ce cas le poids de la béquille et le poids mort du levier doit être décompté de la charge P marquée par la balance.

Les ingénieurs utilisent plus souvent le frein de Prony sous une autre forme ; nous voulons parler du frein à corde, qui fournit de bons résultats sans être plus dangereux qu'aucun autre.

Voici quel est le principe du fonctionnement de ce frein : la poulie motrice est embrassée par une corde dont une des extrémités est attachée à un point fixe A, tandis que l'autre est tendue par un poids P (fig. 118) qui donne lieu à un frottement considérable ; l'adhérence qui se développe entre la poulie et la corde tend à soulever le poids tenseur et l'on mesure le travail en multipliant ce poids P par la vitesse circonférentielle de la poulie. Pour faciliter le réglage de ce frein, on attache généralement le

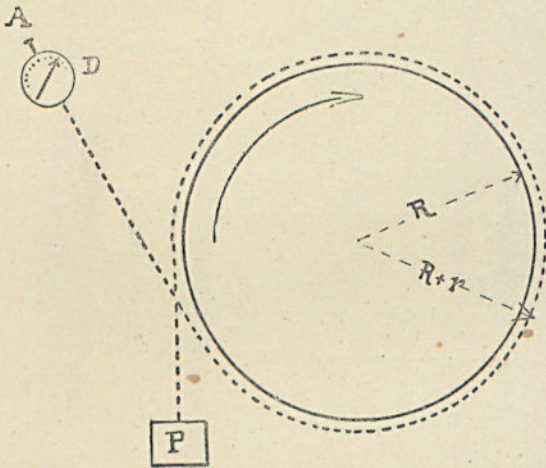


Fig. 118.

bout fixe de la corde à un dynamomètre D, fig. 119, dont on modifie la tension p par une vis de serrage à double filet. Voici dès lors comment on calcule le travail. Appelons R le rayon de la poulie de frein, et soit r le rayon de la corde ; nous aurons :

$$\mathcal{Q} = \frac{2\pi(R+r)n}{60 \times 75} (P-p).$$

On exprimera $R+r$ en mètres et $P-p$ en kilogrammes : \mathcal{Q} est dès lors la puissance en chevaux. C'est par ce procédé que j'ai effectué mes essais de 1890 sur le moteur Simplex de 100 chevaux, à Rouen ; la poulie était à irrigation continue et je lubrifiais légèrement sa surface à la plombagine. L'essai a pu être prolongé 60 heures de suite, sans aucune difficulté, à une vitesse de 100 tours à la minute. J'ai employé le même frein à Seraing pour expérimenter sur le premier moteur à gaz de hauts fourneaux de 250 chevaux et M. Hubert a procédé de même pour le moteur de 600 chevaux.

Le frein à cordes est susceptible de nombreuses modifications de forme : nous en décrirons quelques-unes.

Pour les petits moteurs, on se contente souvent d'un demi-enroulement de corde, qui suffit pour constituer un frein efficace : cette disposition a d'ailleurs l'avantage de se régler automatiquement. En effet, si le frottement augmente, le poids P est soulevé, son moment PR reste constant, mais p diminue et par suite le frottement diminue aussi, de telle sorte que l'équilibre se rétablit. Inversement, si le frottement diminue, P descend, p augmente et par le fait même le frottement reprend sa valeur.

On peut manquer des poids suffisants pour le travail qu'il faut mesurer ; dans ce cas, on multiplie leur effet par une sorte de romaine, qui se prête aisément à un

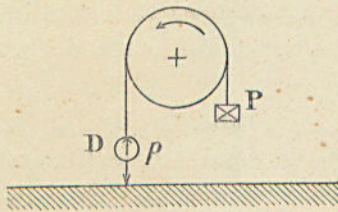


Fig. 419.

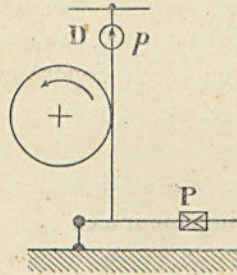


Fig. 420.

réglage progressif, dont on retire souvent de grands avantages : il suffit, pour faire croître le travail, de reculer le poids sur le levier.

M. Bourdon, professeur à l'Ecole centrale des Arts et Manufactures, fixe, d'une part, la corde de frein *abcd* (fig. 421) à un dynamomètre B, attaché au plafond par un moufle, et il charge son autre extrémité par les poids du plateau P. Pour augmenter la stabilité du frein, un deuxième dynamomètre A est placé entre le point *e* de la corde et le sol. Le moteur étant arrivé à son régime normal de marche, on obtient l'équilibre du frein en donnant à la charge P la valeur qu'il faut ; mais, pour les calculs, il est nécessaire d'ajouter à P le poids π de la corde pendante *ed* augmenté de la tension *a* du dynamomètre A. D'autre part, on devra retrancher la tension *b* du dynamomètre B, diminuée de la tension initiale π' exercée sur B par le poids de la corde. Ainsi, dans un essai fait sur un moteur Simplex de 60 chevaux, le frein était formé de quatre cordes de 28 millimètres de diamètre, enroulées sur une poulie de 1^m,705 de diamètre, faisant 138 tours par minute : on a relevé dans cette épreuve les chiffres suivants :

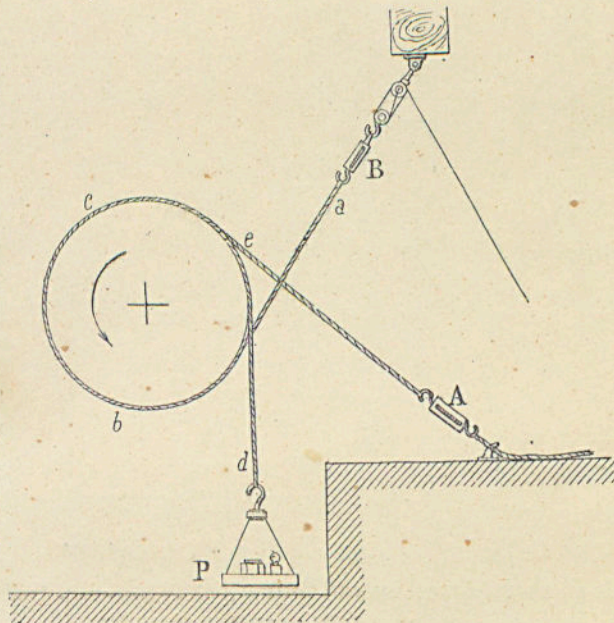


Fig. 421.

$$\begin{array}{l}
 P \dots \dots \dots = 372 \text{ kilogrammes.} \\
 \pi = 4 \left\{ \begin{array}{l} \pi + a = 38 \quad - \\ b - \pi' = 37 \quad - \end{array} \right. \\
 a = 34 \\
 b = 46 \\
 \pi' = 9
 \end{array}$$

Charge totale = $372 + 38 - 37 = 373$ kilogrammes.

Ce procédé a le défaut d'imposer l'observation quelquefois fort pénible et toujours assez inexacte de deux dynamomètres, dont l'aiguille n'est pas au repos ; on achète donc la stabilité au prix d'une complication réelle de l'opération.

M. Ringelmann s'est proposé de supprimer tout ressort et de constituer un frein automatique ; en conséquence, il a modifié les appareils à corde de la manière suivante (1) :

Pour réaliser le réglage automatique, sans faire varier le poids ou l'effort tangentiel, cet habile ingénieur a eu recours aux déplacements mêmes du frein sous l'influence

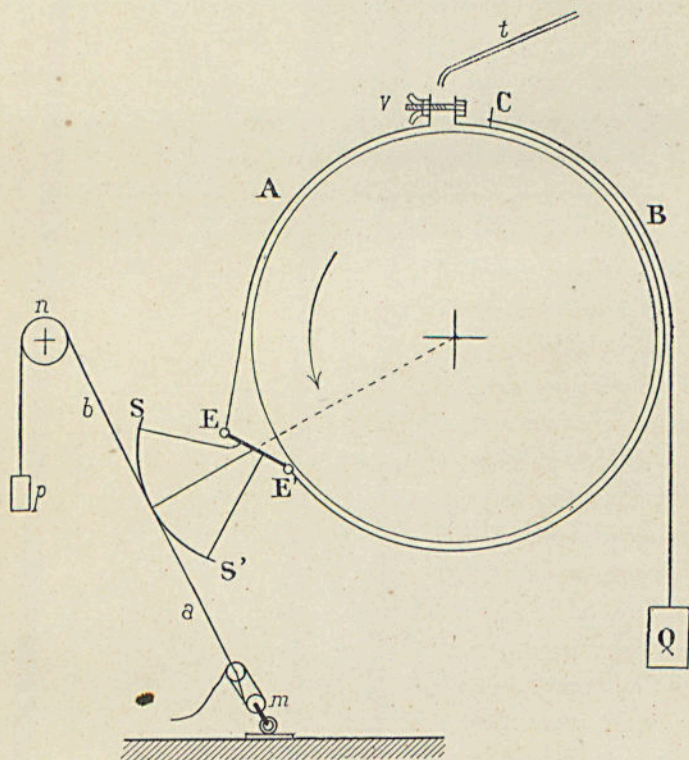


Fig. 122.

de la variation du travail fourni par le moteur. Son frein se compose d'un collier dont les deux parties A et B (fig. 122) sont reliées par une vis V de réglage ; cette vis ne sert qu'à la mise au point au début de l'essai ; et l'on n'a pas à y toucher pendant toute la durée de l'expérience ; sa monture reçoit le tuyau *t* d'arrivée de l'eau de savon destinée à refroidir extérieurement la jante et à régulariser le frottement. La partie B supporte le crochet C de la corde à laquelle on attache la charge Q. Les deux parties A et B sont reliées par une entretoise EE', solidaire avec un secteur SS' d'un rayon quelconque. Une corde *a* est attachée au point S et à un point fixe *m* ; une seconde corde *b* est attachée au point S', passe sur une poulie *n* et est tendue par un poids *p* quelconque. Le réglage de la position moyenne du secteur est fait

1. *Bulletin du syndicat agricole de Meaux*, juin, 1894, page 223.

de telle façon que les deux cordes a et b soient dans le prolongement l'une de l'autre, et que la droite mn soit normale au prolongement d'un rayon quelconque du volant ; pour faciliter le réglage préalable, la corde a est attachée à un petit treuil-tendeur m . Le poids p quelconque (1 kilogramme suffit) n'a pas d'action sur le frein C , car son effort se reporte au point m , qui est fixé au sol. Lorsque le frein est entraîné par le volant, le secteur SS' descend ainsi que le point O , dans le sens indiqué par la flèche ; mais en roulant sur la corde a , l'ensemble $EE' SS'$ prend un mouvement angulaire, le point E se rapproche de la jante du volant et allonge, par suite, le frein d'une quantité y variable avec l'angle décrit par le secteur. Que le frein vienne au contraire à se desserrer, le mouvement inverse se produira et le secteur tournera en sens contraire ; le point E s'écartera du volant en resserrant le frein d'autant plus énergiquement que son déplacement angulaire aura été plus accentué. Un graissage uniforme est nécessaire pour maintenir le réglage précédemment établi ; l'eau de savon lubrifiant la poulie sera donc débitée par un vase à niveau invariable, alimenté par un récipient supérieur.

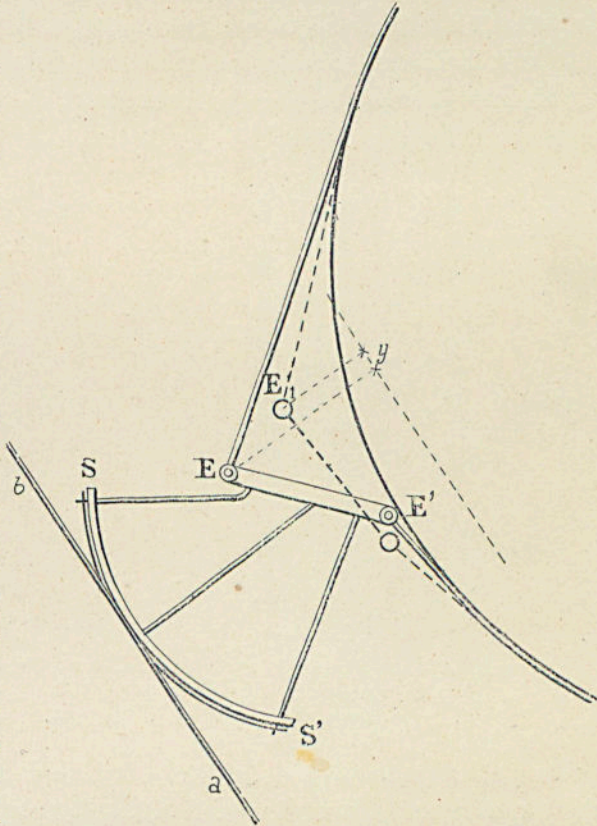


Fig. 123.

On peut reprocher au frein de M. Ringelmann d'avoir une liaison avec un point fixe par l'intermédiaire d'un brin dont on ne mesure pas la tension ; la valeur absolue

des résultats obtenus peut être faussée de ce chef. L'inventeur répond que la tension du brin a est équilibrée par celle du brin b , et que, par suite, elle n'entre pas en compte ; ce serait exact, s'il était réellement démontré que ces deux tensions sont égales. A notre avis, on ne doit se servir de ce frein que dans des essais comparatifs, effectués dans les mêmes conditions ; c'est du reste ce qu'a fait M. Ringelmann au concours de Meaux.

M. Carpentier a proposé, il y a plusieurs années déjà, un modèle de frein à enroulement variable, qui rend des services pour la mesure des petites forces et que nous croyons devoir signaler ici.

Ce dispositif exige deux poulies, l'une A calée sur l'arbre moteur, l'autre B, folle sur cet arbre ; cette dernière est à joue (fig. 124). Une corde, fixée sur cette joue,

s'enroule sur la poulie folle et passe ensuite sur la poulie fixe A : ses extrémités portent les poids p et P . On règle ces poids p et P de manière à obtenir l'équilibre par un ou deux tours de corde sur A : la poulie B reste alors immobile, tandis que la poulie A frotte sur la corde ; le frottement est proportionnel à la longueur de corde enroulée sur cette poulie A. Que le frottement vienne maintenant à augmenter par l'échauffement du métal ou à diminuer par un afflux de lubrifiant, le frein se réglera de lui-même. En effet, un accroissement de frottement entrainera la poulie B en soulevant le poids P et déroulera en même temps une certaine longueur de corde sur A, de manière à rétablir l'équilibre ; de même, une diminution de frottement fera descendre P , mais enroulera de la corde sur A. Le plus grand défaut du frein Carpentier est d'exiger deux poulies sur l'arbre moteur ; il est rare qu'on les ait à sa disposition ou bien qu'on puisse les établir sur l'arbre.

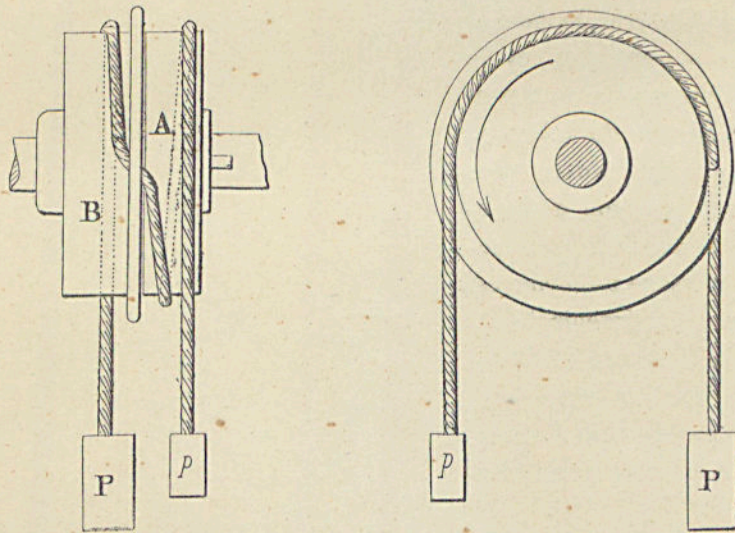


Fig. 124.

Pour nous, nous estimons qu'on peut faire de bons essais au frein sans recourir à des dispositifs aussi compliqués. Il suffit d'employer de larges surfaces frottantes, de manière à éviter un grand échauffement de la corde, et de lubrifier au moyen de substances indécomposables par la chaleur, pour réaliser un équilibre excellent, n'exigeant que par moments l'action de l'ouvrier sur le serrage, et donnant, par conséquent, des résultats corrects, même avec un moteur à marche médiocrement régulière.

Quand la puissance dépasse 12 ou 15 chevaux et que l'essai se prolonge, on doit employer une poulie à irrigation intérieure dont on maintient la température à 40° environ par un abondant courant d'eau froide. L'essai peut alors être poursuivi indéfiniment, à condition toutefois que l'on n'ait pas à absorber trop de kilogrammètres par mètre carré de surface frottante : la pratique nous a conduit à ne pas dépasser 30.000 kilogrammètres par mètre carré. Il faut alors au moins 50 litres d'eau froide par cheval-heure, et cette quantité peut même ne pas suffire avec un frein neuf, dont

la pression ne se répartit pas également sur les surfaces frottantes. Je me suis toujours bien trouvé de poulies à rebords, à l'intérieur desquelles on injecte l'eau par une lance, dans le sens de la rotation ; on la recueille par une sorte de cuiller, embouchée sur un tuyau d'évacuation : ce dispositif est applicable aux plus grandes puissances. Quelquefois la poulie est presque entièrement fermée et l'eau déborde alors par le centre comme par un déversoir. Enfin, on peut construire des poulies closes, dans lesquelles l'eau arrive par un tuyau central et s'écoule par un second tuyau concentrique au premier ; ce dispositif exige un joint sur les tuyaux. Mes essais sur le moteur Letombe de 300 chevaux ont été effectués à l'aide d'une poulie de ce genre, construite en tôles de fer assemblées : l'eau était admise sous pression dans la poulie.

J'ai constaté plusieurs fois qu'il serait possible de mesurer le travail par le nombre de calories gagnées par le liquide ; il suffirait de jauger exactement l'eau écoulée, de déterminer avec soin son élévation de température et d'évaluer la chaleur perdue ; cette dernière correction ne dépasse jamais 1 à 2 0/0. Je n'ai pas de résultats d'expériences personnelles à publier à ce sujet, attendu que je n'ai jamais eu l'occasion d'organiser sérieusement un essai de ce genre ; mais le travail a été fait par M. Dwelshauvers-Dery, de Liège, et nous extrayons ce qui suit d'une étude effectuée par ce savant distingué, en 1896 (1).

La poulie de frein, calée sur l'arbre moteur, avait la forme d'un cylindre creux ; elle était fermée à l'avant par une feuille de tôle à jonction étanche, munie d'un orifice central de déversement, ainsi qu'on le voit sur la figure 125. Cette poulie était constamment alimentée d'eau froide par le tuyau recourbé T, qui débitait l'eau d'un réservoir supérieur. La température initiale de l'eau d'arrivée était déterminée par le

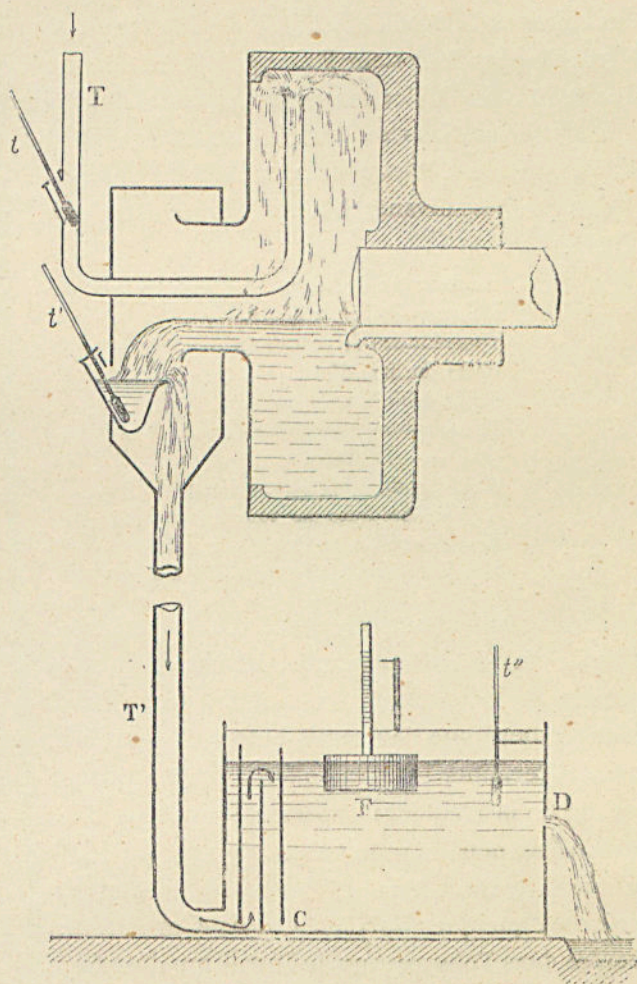


Fig. 125.

1. *Revue Universelle des Mines*, tome XXXIV, 3^e série, page 141.

thermomètre t . Un cornet recevait l'eau déversée hors du trop-plein ; le thermomètre t' en prenait la température. Reçue dans une sorte de trémie, l'eau se rendait dans le bac inférieur A, pour y être jaugée en passant par l'orifice B, pratiqué en mince paroi. Le thermomètre t'' faisait connaître la température moyenne de l'eau du bac, laquelle permettait de passer des volumes d'eau à leur poids par application des tables de densité. Le bac présentait certaines dispositions particulières. Et d'abord, il était muni des chicanes D, dont l'objet était de donner un plan d'eau bien tranquille à la surface libre ; de plus, le flotteur F marquait la hauteur du liquide au-dessus du centre de l'orifice B, et cette indication servait au calcul de l'orifice par des tables établies à l'avance.

Les observations se faisaient en marquant périodiquement les températures des thermomètres t , t' et t'' et la hauteur du flotteur.

Les chiffres suivants, relevés dans un essai, achèveront de faire comprendre la méthode.

Hauteur du flotteur	135 ^m / _m , 11
Volume débité par heure.	1.155 lit., 037
Température de cette eau	20°, 787
Poids du litre d'eau	0 ^k , 9981
Poids débité par heure	1.152 ^k , 842
Température initiale de l'eau	10°, 871
— finale —	21°, 016
Chaleurs du kilogramme d'eau	10 cal., 874 et 21 cal., 031
Chaleur produite par tour de machine.	3 cal., 226628
Travail mesuré au frein par tour.	1.377 kgms., 73
Équivalent mécanique de la chaleur calculé	426 kgms., 99

C'est la valeur moyennement admise par l'équivalent ; observons qu'elle a été obtenue en négligeant le rayonnement extérieur et la chaleur absorbée par la fusion de la graisse de lubrification ; on peut donc conclure de cette belle expérience de M. Dwelshauvers-Dery que l'on serait autorisé à procéder par des mesures calorimétriques pour déterminer le travail effectif des moteurs et que les résultats relevés auraient la valeur de la meilleure expérience au frein. C'est un avantage réel, car ce frein se trouve simplifié et réduit à un appareil de friction : l'observation des températures n'exige que des thermomètres sensibles et exacts ; seule, la mesure de l'eau débitée présente quelques difficultés, mais elles sont moins grandes que celles que l'on rencontre dans l'observation de l'équilibre d'un frein.

Les expériences au frein sont toujours délicates et dangereuses ; elles exigent une préparation soignée et une surveillance de tous les instants.

Le travail effectif peut se mesurer avec une approximation égale et souvent supérieure à celle que donne l'évaluation du travail indiqué par les diagrammes ; avec un frein bien conditionné et bien installé, nous croyons pouvoir atteindre aisément une précision plus grande. Mais il faut pour cela que la durée de l'expérience soit assez longue : un frein à irrigation est donc indispensable pour un essai dont on ne puisse discuter les conclusions.

Malheureusement, on n'a pas toujours un semblable frein à sa disposition : d'autre part, il est des cas où l'on n'a même pas les moyens de se servir du frein, par manque

d'espace surtout. Il convient alors de recourir à un procédé indirect ⁽¹⁾ pour mesurer le travail d'un moteur : la commande d'une dynamo fournit souvent d'une façon élégante la solution de la question. En effet, si l'on connaît le rendement de la génératrice, et de la transmission du mouvement, il est aisé de calculer par les volts et les ampères observés le travail effectif développé en fonction du travail électrique relevé au tableau. Les constructeurs de dynamos possèdent des procédés corrects de détermination du rendement de leurs dynamos à toute puissance : si l'attaque de la dynamo par le moteur est directe, la connaissance de ce rendement suffit ; si la commande se fait au contraire par courroies ou par câbles, il intervient un deuxième facteur d'une appréciation plus délicate. Voici toutefois quelques résultats d'expérience qui pourront servir de base aux calculs.

Nos expériences faites à Lille, en août 1894 ⁽²⁾, sur les pertes de travail résultant de l'emploi des courroies ou des câbles ont démontré qu'elles sont sensiblement égales.

En commande directe, la distance des axes étant normale ainsi que la tension des brins, j'ai déduit de nombreux essais que la perte varie de 7 à 5 0/0, suivant la puissance du moteur ; on comptera 7 0/0 jusqu'à 12 chevaux, 6 0/0 jusqu'à 25 chevaux et 5 0/0 au-delà. Ces chiffres ne sont évidemment que des chiffres moyens approchés.

Avec un renvoi de mouvement, la perte est plus grande ; à Cassel, j'ai trouvé une perte de 8 0/0 pour 35 chevaux.

Le rendement des dynamos est donné généralement à pleine charge : il décroît assez sensiblement avec la charge. Ainsi une dynamo Bréguet de 130 kilowatts, donne 88,5 0/0 à 130 kilowatts, 88 à 120, 87,6 à 104 et 85 à 63 kilowatts.

Le nombre de watts correspondants au cheval électrique étant de 736, on aura :

Pour un rendement total de 87 %.	640 watts par cheval effectif.			
— — 85	626	—	—	—
— — 80	589	—	—	—
— — 75	552	—	—	—

On dressera une échelle décroissante des watts suivant la charge.

Voici un exemple que j'emprunte à divers essais que j'ai faits sur des moteurs de 60 chevaux indiqués : ils peuvent donner une indication générale pour machines moyennes.

	En chevaux.			
Travail indiqué . . .	$\frac{G_t}{G_t}$	60,0	50,0	40,0
— électrique . . .	$\frac{G_e}{G_t}$	42,6	33,0	24,8
— effectif . . .	$\frac{G_e}{G_E}$	50,7	41,8	33,0
Rendement total . . .	$\frac{G_e}{G_t}$	0,71	0,66	0,62
Rendement, transmis - sion et dynamo . . .	$\frac{G_e}{G_E}$	0,84	0,79	0,75
Watts par cheval effectif . . .		618	581	542

1. Les dynamomètres de rotation, et notamment ceux de Morin, de Schuckert (à ressort), de White (à engrenages) et de Farcot ou Banki (à courroies) fournissent une solution directe du problème, que nous nous contenterons de signaler, parce que ces appareils coûteux sont rarement à la disposition des expérimentateurs.

2. Ces expériences ont été faites par une commission de la Société Industrielle du Nord présidée par M. Dubreuil et dont nous faisons partie : *Bulletin de la Société Industrielle du Nord*, 1894.

On pourrait obtenir mieux avec d'excellentes machines.

Le rapport du travail effectif au travail indiqué donne le rendement organique qui est un véritable coefficient spécifique, par lequel on peut juger de la perfection mécanique du moteur : ce rapport est égal à 0,85 ou même 0,88 dans un moteur parfaitement construit ; quand on trouvera 0,90, on devra vérifier l'exactitude des calculs ; un moteur qui ne donnerait que 0,60 ou 0,70 sera réputé de mauvaise construction.

En thèse générale, le travail indiqué, relevé au diagramme, est toujours inférieur au travail brut réellement développé sur le piston, et par suite le rapport calculé du travail effectif au travail indiqué est plus grand qu'il ne l'est en réalité. Ce fait est connu de tous les ingénieurs qui se sont occupés de moteurs à gaz ; il explique les résultats excessifs qu'on observe quelquefois. Ainsi M. Emerson Dowson a réuni (1) tous les rendements organiques calculés d'après les essais qui ont été publiés, et il signale des rendements de 0,88 à 0,92, auxquels on ne peut guère accorder de crédit ; j'ai moi-même obtenu un jour 0,94 sur un moteur Simplex, mais j'ai déclaré en publiant ce chiffre, qu'il était dû à ce que je n'avais pu compter correctement les passages à vide qui s'étaient produits au cours de mes expériences. Il y a du reste une autre cause de ce phénomène, qui est dû le plus souvent à l'insuffisance de la section des tuyaux sur lesquels l'indicateur est branché, dont l'effet est de conduire à une valeur trop faible du travail indiqué, ainsi que nous l'avons signalé plus haut.

II

Essais de puissance et de consommation.

Les épreuves des moteurs doivent être faites avec le plus grand soin, car c'est le seul moyen d'apprécier la valeur d'une machine.

Voici d'abord quels sont les éléments principaux à relever dans un essai :

Diamètre du cylindre moteur.

Course du piston.

Longueur de la chambre de combustion, ou volume de l'espace mort.

Nombre de tours par minute.

Nombre d'explosions par minute.

Température de l'air extérieur.

Température de l'eau du compteur à gaz.

Température des gaz de la décharge.

Température de l'eau de circulation à l'entrée et à la sortie de l'enveloppe du cylindre.

1. « Dowson : On gas-power compared with Steam power », p. 14.

Pression atmosphérique.

Consommation de gaz.

Consommation d'eau.

Consommation d'huile et de graisse.

Toutes ces déterminations doivent être répétées en marche à vide, à demi-charge, à pleine charge et en surcharge de 10 ou 15 0/0.

Quelques observations ne seront pas inutiles sur ces divers points. Et d'abord, un compteur de tours (Redier, Garnier ou autre) est nécessaire pour connaître exactement le nombre total des révolutions effectuées pendant la durée de l'expérience : on le fixe souvent sur l'arbre de couche, ou bien on l'actionne par la tige du piston ; quelquefois on prend le mouvement alternatif, qui est nécessaire à son mouvement, sur la tige même du tiroir ou des soupapes non soumises au régulateur. Le nombre de tours observé est évidemment à doubler quand le mouvement est pris sur l'arbre de distribution des moteurs à quatre temps.

Nous avons déjà indiqué les moyens employés pour relever le nombre de passages à vide.

C'est par le thermomètre fronde, qu'on détermine le mieux la température de la salle du moteur ; un thermomètre qu'on suspend en un point, contre un mur, ou ailleurs, ne donne que la température du mur qu'il touche. On fait un thermomètre fronde de n'importe quel instrument, pourvu qu'il soit court et robuste, et qu'il porte une boucle permettant d'y passer la ficelle par laquelle on le fait tourner dans l'air.

Aucune difficulté pour évaluer la température de l'eau : il est par contre assez malaisé d'estimer les températures des gaz d'échappement. Il faut recourir nécessairement à des pyromètres, ceux de Pouillet ou de Bulkley, par exemple, qu'on engagera dans le tuyau de décharge, au sortir même du cylindre. On peut quelquefois employer des baguettes fusibles de plomb, d'antimoine, de bismuth ou d'autres métaux convenablement choisis, dont les températures de fusion varient de 200 à 500 degrés centigrades.

On fait aussi un excellent usage du pyromètre calorimétrique de Salleron. Cet instrument se compose d'un calorimètre, bien isolé par une épaisse enveloppe de feutre, dans lequel on introduit un poids d'eau connu, toujours le même. Sa température est donnée par un thermomètre sensible. Un petit cylindre de platine, d'argent ou de cuivre rouge ayant été maintenu un quart d'heure au moins dans un tube fermé engagé dans le tuyau d'échappement du moteur, on l'en retire rapidement et on l'immerge dans l'eau du calorimètre dont la température monte de t à θ . La quantité de chaleur apportée au calorimètre est fonction de la différence de température observée ; elle est d'autre part proportionnelle à la température x acquise par le cylindre d'essai. Il est donc aisé d'établir une relation élémentaire entre x et $(t - \theta)$. Pour une masse de cuivre pesant 257 grammes et un volume d'eau distillée d'un demi-litre, on a, dans mon appareil :

$$x = 100 (\theta - t) \div 70$$

Je me suis servi souvent de ce calorimètre et je n'ai eu qu'à me féliciter de son emploi.

Quelques ingénieurs donnent la préférence aux thermomètres électriques ; l'invention du couple Le Châtelier, composé de platine pur et de platine allié à 10 0/0 de rhodium, permet, en effet, de déterminer avec une grande précision les températures élevées ; d'autre part, les fils se prêtent bien à l'exploration des culasses de cylindre, des tuyaux d'échappement et des cavités dont on a intérêt à connaître la température. La sujétion d'un galvanomètre compense en partie ces avantages : il est vrai qu'on a pu simplifier cet instrument. On emploie un Despretz-d'Arsonval renfermé dans une double caisse, dont l'instrument occupe une partie, la lampe et son échelle transparente l'autre partie ; pour l'usage, la caisse se coupe en deux boîtes qu'on pend à un mur à un mètre de distance environ l'un de l'autre. Il n'y a qu'à observer une déviation de l'image du réticulé sur une règle gradué. La soudure froide est à la température de l'air ambiant.

La maison Rousselle et Tournaire a créé un modèle de pyromètre complet à lecture directe, dont le galvanomètre doit être posé sur une table ; à cet effet cet instrument est monté sur trois vis calantes et il est pourvu d'un niveau ; sa graduation est double, en millivolts ou en degrés centigrades. L'aiguille se déplace au-dessus d'une glace, ce qui assure des lectures très précises. Le couple est renfermé dans un double tube de protection.

Le *Gas Engine Research Committee* a donné la préférence au procédé qui déduit la température d'un fil métallique de l'accroissement de résistance qu'il subit. Appelant R_0 et R_1 les résistances aux températures zéro et T degrés, R la résistance mesurée à la température x qu'on veut déterminer, on a

$$x = \frac{R - R_0}{R_1 - R_0} (1)$$

M. Callendar a mis au point cette excellente méthode, dont le seul défaut est d'exiger des installations difficiles de ponts de Wheatstone et de galvanomètres ; ces derniers sont nécessairement des apériodiques du genre d'Arsonval. Par contre, on peut ainsi déterminer la température en n'importe quel point du cylindre et en n'importe quelle phase du cycle ; ce dernier résultat est obtenu par l'emploi d'un appareil à contact mettant le galvanomètre en circuit au moment précis que l'on veut. Nous ne pouvons décrire par le détail tous ces appareils, que le Comité a fait connaître dans son second rapport (page 1047) auquel nous sommes forcé de renvoyer le lecteur.

La consommation de gaz doit être mesurée à l'aide de compteurs exacts, soigneusement contrôlés et proportionnés à la dépense probable du moteur (¹) ; il est à noter

1. Une correction reste à faire pour passer à la température exacte que marquerait le thermomètre normal à hydrogène.

1. Voici les débits normaux des compteurs usuels :

Compteur de 3 becs ; débit de 360 litres à l'heure.

— 5 —	— 700 —
— 10 —	— 1.400 —
— 20 —	— 2.800 —
— 40 —	— 5.600 —

On peut doubler ces débits, mais au détriment de l'exactitude des mesures.

qu'un compteur surmené marque moins qu'il ne devrait. Ainsi un compteur de 10 becs fournira 2.800 litres avec une erreur en moins de 1,5 0/0. Il faut veiller à ce que le compteur soit bien de niveau et que l'eau soit à la hauteur normale; dans un compteur de 10 becs, un abaissement de 10 millimètres fait commettre une erreur en moins de 4 0/0; elle ne serait que de 2 0/0 dans un compteur de 200 becs.

Les compteurs ne doivent pas être placés trop loin des moteurs, auxquels on attribuerait les fuites de la canalisation. C'est une bonne pratique d'installer un antipulsateur ou du moins une poche de caoutchouc entre le compteur et le moteur.

Le tarage d'un compteur se fait aisément par le moyen d'une cloche-gazomètre : la cloche doit être munie d'un compensateur, qui annule les différences de pression dues à l'immersion variable de ses parois. Mais il est plus facile dans la pratique d'employer un compteur-étalon en guise de contrôleur; on le place dans le circuit du gaz en avant du compteur.

Le procédé suivant, dû à Hirsch, ancien professeur au Conservatoire des Arts et Métiers, peut être appliqué dans certains cas. L'observateur met le compteur en communication, par un tuyau, avec la partie supérieure d'un corps de chaudière, rempli d'eau, et jaugeant environ 2.000 litres : un tuyau de vidange placé à la partie inférieure de ce récipient, permet d'en laisser écouler l'eau dans une bêche, placée sur une bonne bascule. Il faut évidemment que la chaudière soit parfaitement étanche : en faisant couler l'eau, il se produit un vide relatif dans le récipient et par suite un appel sur le compteur, qui marque le volume d'air qui le traverse; c'est exactement le volume d'eau évacué.

On a objecté à ce mode de tarage que l'écoulement du gaz, pendant l'opération, est plus lent que pendant la marche de la machine. Toutefois on peut répondre que, dans les deux cas, le gaz traverse le compteur à la pression de la conduite, laquelle est supérieure à la pression atmosphérique, ce qui atténue la portée de l'objection faite à Hirsch.

D'ailleurs, le gonflement de la poche de caoutchouc intercalée sur la conduite en aval du compteur montre bien que, même en allure de travail, ce compteur est traversé par du gaz sous pression.

Dans un essai très soigné, il est absolument nécessaire de tenir compte des fluctuations de la pression du gaz; en outre du baromètre, dont on consulte les indications, il convient donc de placer sur le compteur un manomètre à eau marquant la pression sous laquelle le gaz est débité.

Par suite d'insuffisance des canalisations et du compteur, il arrive fréquemment que le moteur aspire son gaz en produisant une dépression à chaque coup du piston moteur; il peut arriver alors que le compteur marque trop, le volant prenant un mouvement accéléré au moment de l'appel brusque du gaz.

Quand on doit évaluer la consommation d'un moteur puissant en gaz pauvre ou en gaz de hauts fourneaux, il devient impossible de recourir à un compteur; j'ai employé dans ce cas, pour plusieurs essais, la cloche même du gazomètre.

On la remplit d'abord entièrement; puis, à un signal donné, on ferme la conduite

d'arrivée du gaz, de sorte que le moteur puise uniquement son gaz dans la réserve constituée par la capacité du gazomètre ; cette provision doit être suffisante pour permettre une marche régulière pendant huit ou dix minutes.

La cloche s'abaisse d'une hauteur déterminée, qu'on mesure avec soin sur les colonnes de guidage, en prenant des repères faciles à observer ; connaissant la section horizontale de la cloche et sa chute en un temps x , on calcule aisément le volume débité par minute. Une erreur pourrait être commise si la cloche ne descendait pas d'un mouvement de translation vertical ; on y obvie en faisant des lectures simultanées sur les trois ou quatre colonnes et en prenant la moyenne des lectures.

Cette méthode bien appliquée peut être très précise : en voici la preuve. Ayant effectué à Differdange un essai de consommation sur un moteur de 70 chevaux, je trouvai un nombre que M. Meyer confirma fort exactement par un nouvel essai auquel il procéda quelques jours après, en refaisant toutes les mesures et toutes les lectures.

Le point délicat de cette méthode est la détermination de la section de la cloche : le mieux est de mesurer son périmètre extérieur sur chaque virole et d'en déduire la circonférence intérieure, par déduction de l'épaisseur.

Une donnée fait presque toujours défaut dans les procès-verbaux d'expériences : c'est le rapport des volumes de gaz et d'air admis au cylindre ; l'importance de cet élément est fort grande cependant. On le détermine très exactement en faisant passer l'air par un compteur de grande dimension, quand le dispositif du moteur le permet ; un petit ventilateur marchant à grande vitesse alimente le compteur, par l'intermédiaire de poches de caoutchouc constamment pleines, dont on règle la pression par une soupape disposée contre le ventilateur.

Mais il est rare qu'on dispose d'un compteur suffisant pour ce service : on est alors obligé de recourir à un procédé indirect, qui repose sur l'analyse des gaz de l'échappement.

Appelons v le volume d'air strictement nécessaire pour la combustion complète d'un volume de gaz et V le volume réellement admis dans le mélange ; soit encore C le volume d'anhydride carbonique produit dans la combustion du mélange. L'excès d'air $V - v$ n'est pas altéré dans la combustion et on le retrouve dans les gaz brûlés, sous forme d'oxygène et d'azote. Le volume total d'air et de gaz brûlés par volume de gaz sera donc égal à $V - v + v'$, v' étant le volume après combustion du mélange composé de v volumes d'air et de un volume de gaz. Si nous déterminons le pourcentage x d'acide carbonique et y d'oxygène existant dans les gaz brûlés, nous aurons par suite les deux équations suivantes :

$$x = \frac{C}{V - v + v'} \qquad y = \frac{0,209 (V - v)}{V - v + v'}$$

On déduit C , v et v' de l'analyse du gaz combustible et l'analyse des gaz brûlés donne x et y : on calcule V par ces deux équations. Si les résultats ne concordent pas bien, on en prendra la moyenne.

Ce procédé est plus facile à décrire qu'à appliquer : la prise des gaz à l'échappement

se fait à l'aide d'un aspirateur débouchant derrière la soupape de décharge ; il est nécessaire de le refroidir par un courant d'eau. M. Burstall a employé cette méthode dans les essais du Comité de recherches.

L'eau de circulation se jauge à l'aide d'un compteur à eau Kennedy ou autre ; mais on se contente le plus ordinairement de recueillir l'eau dans des bâches et d'évaluer le temps qu'il faut pour les remplir ; on en déduit aisément le volume qui s'écoule par heure hors de l'enveloppe du cylindre.

Les huiles consommées se mesurent en pesant les graisseurs au début et à la fin des essais ; tout graissage à la main doit être proscrit dans une expérience sérieuse.

Un essai n'a aucune valeur si l'expérimentateur ne détermine pas la puissance calorifique du gaz employé : je n'y manque jamais depuis 1885 et je constate toujours que cette mesure était absolument nécessaire. Ainsi il m'est arrivé de trouver du gaz de ville donnant 5.980 calories par mètre cube, alors qu'en moyenne ce gaz n'en donne que 5.250 et qu'on en trouve souvent qui n'en développe que 5.100 ; la différence est de 15 0/0, de telle sorte qu'un même moteur consommera 600 litres du premier gaz et 691 du second.

Enfin, le gaz doit toujours être ramené à 0° et à 760 millimètres de pression, sinon les résultats cesseraient d'être comparables : ainsi, entre Paris et Madrid, dont les altitudes sont de 60 et 663 mètres, la consommation d'un moteur change considérablement. Dans une ville à altitude élevée, un constructeur avait garanti une consommation assez réduite de gaz, qu'il tenait sans difficulté à Paris, mais qu'il lui était absolument impossible de réaliser en un point où le gaz avait 710 millimètres de pression au lieu d'en avoir 754. Je signale ce fait aux constructeurs qui font des contrats de garantie ; qu'ils n'oublient pas de tenir compte de l'altitude des lieux dans lesquels leur moteur devra fonctionner.

III

Essais de vitesse et de régularité

Un des principaux obstacles à l'expansion rapide des moteurs à gaz a été le défaut de régularité qu'on leur reprochait à tort ou à raison, le plus souvent à raison : le besoin de corriger cette infériorité des moteurs à quatre temps sur les machines à vapeur à un temps a été longtemps le meilleur argument des ingénieurs restés fidèles au cycle à deux temps ; mais il fallut bien reconnaître que la multiplication des cylindres et le retour au double effet pouvaient résoudre plus sûrement le problème. Les champions des moteurs à un cylindre (1) sont même parvenus à démontrer qu'un monocylindrique admettant du gaz à chaque coup, tournant assez vite et pourvu d'un volant suffisant, pouvait donner la régularité exigée dans la plupart des cas, même

1. Edouard Delamare-Deboutteville est au premier rang parmi eux.

dans la commande des dynamos à lumière. Ces progrès réalisés par la construction des moteurs à gaz ont grandement contribué à leur succès.

Les considérations qui précèdent justifient l'intérêt qu'on a accordé aux essais de vitesse et de régularité.

Ces épreuves prennent souvent une importance prépondérante dans les réceptions de moteurs, parce qu'il est des circonstances dans lesquelles la consommation ne tire guère à conséquence tandis que la régularité constitue, au contraire, une condition essentielle du bon fonctionnement ; tel est le cas, par exemple, des moteurs qui commandent des alternateurs à accoupler. On répétait autrefois comme un axiôme indiscutable que les moteurs à gaz ne pouvaient être appliqués à ce service ; cette affirmation, évidente il y a quelques années, est devenue une contre-vérité aujourd'hui, puisque nous aurons à décrire des stations à courants alternatifs mues par des moteurs à gaz dans les conditions les meilleures.

Il y a deux éléments à considérer dans la régularité d'un moteur : il faut d'abord que sa vitesse moyenné, à la minute, c'est-à-dire le nombre moyen de révolutions par minute, reste constant, quel que soit le travail fourni. L'idéal consisterait dans ce fait, qu'un moteur de 25 chevaux par exemple, marcherait à la même vitesse à vide, ou bien en développant 10, 20 ou 25 chevaux ; ce serait l'idéal, disons-nous, car cela se voit rarement, quoi qu'en disent les intéressés, nous le savons par une longue expérience : toutefois on a réalisé de grands progrès dans cette voie, et j'ai pu imposer dans des cahiers des charges l'obligation, qui a été tenue, de ne pas permettre une variation supérieure à 3 0/0, pour une décharge instantanée du maximum à zéro, sans qu'on touche au robinet d'admission du gaz ni à aucun organe du moteur. Il faut une installation parfaite des appareils de réglage pour obtenir un tel résultat ; mais on y arrive dans plusieurs ateliers, sans être obligé d'exagérer outre mesure ni la vitesse de régime, ni la masse des volants.

L'observation des variations de la vitesse moyenne se fait à l'aide d'un tachymètre (1) ou bien plus simplement en observant le compteur de tours automatique pendant une minute avant la décharge du moteur et tout de suite après, durant une minute encore : c'est ainsi que je procède ordinairement. On pourrait utiliser aussi des tachymètres à main, qui conviennent surtout aux moteurs à grande vitesse.

Au concours des moteurs à pétrole de Meaux, M. Ringelmann avait institué un véritable concours de régularité.

Comme les vitesses des divers moteurs étaient fort différentes, le jury décida d'établir une base de comparaison en estimant en centièmes les variations de la façon suivante :

1. Ces appareils, que les Allemands appellent tachomètres, reposent généralement sur l'emploi d'un pendule conique, dont les écarts agissent sur une aiguille indicatrice, mobile sur un cadran, qui marque instantanément la vitesse du moteur ; on les actionne à l'aide d'une courroie, qui est supposée ne pas glisser sur la poulie. On construit à Cologne un tachymètre à deux fluides, renfermant deux liquides non miscibles de densités différentes ; le liquide le moins dense s'élève dans un tube de verre, en vertu de la force centrifuge agissant dans ce sens, par suite de la forme spéciale du vase renfermant les liquides ; ce vase reçoit un mouvement de rotation proportionnelle à celui du moteur : le mouvement est encore transmis par une courroie.

Appelons

N le nombre de tours moyen.
 n — — minimum.
 n' — — maximum.

Les variations en moins de la moyenne étaient

$$100 \frac{n'}{N} - 100 = A$$

Les variations en plus étaient :

$$100 - 100 \frac{n}{N} = B$$

Dès lors, la variation totale avait pour expression :

$$\left(100 - 100 \frac{n}{N}\right) + \left(100 \frac{n'}{N} - 100\right) = C.$$

Les trois valeurs A, B et C, ont été données dans le rapport de M. Ringelmann pour tous les moteurs mis en expérience, et elles ont permis de classer les concurrents au point de vue de la régularité de leur marche.

Le second élément à envisager est relatif à la vitesse vraie à tout moment de la période du cycle, aussi bien dans la phase de compression que dans la phase d'explosion : on l'égalise en faisant de grands volants très lourds, tournant à grande vitesse, dont le rôle est d'accumuler l'énergie de l'impulsion motrice et de la restituer pendant les phases d'inertie ou de travail négatif du piston. En dépit de la grande masse de ces volants et de leur puissance vive, le coup moteur reste toujours plus ou moins sensible, pour un œil exercé, dans la lumière des lampes à incandescence, dont les variations permettent souvent de compter le nombre de tours du moteur monocylindrique faisant mouvoir la dynamo : ces lampes fournissent par cela même un moyen d'appréciation de la régularité du cycle de ces moteurs.

La détermination de la régularité cyclique des moteurs a pris une grande importance à la suite de l'emploi plus fréquent des moteurs à gaz dans les stations centrales d'électricité. Un certain nombre d'instruments ont été inventés dans le but de traduire par un coefficient ou par des courbes le degré plus ou moins grand de régularité réalisé.

Citons d'abord l'appareil Williams ou Moscrop ⁽¹⁾ destiné à contrôler et à enregistrer les vitesses successives d'un moteur pendant une révolution. Cet appareil se compose d'un mouvement d'horlogerie destiné à dérouler d'un mouvement uniforme une bande de papier, sur laquelle appuie la pointe d'un crayon, dont la position est déterminée par le manchon d'un pendule conique, recevant son mouvement de la machine mise en essai. Si le mouvement de la machine était parfaitement régulier, le crayon resterait immobile et il tracerait une ligne droite sur le papier ; toute variation de vitesse produisant un déplacement du manchon du pendule, et par suite du crayon, aura

¹ 4. Cet appareil est construit par MM. Arundel et Co, de Stockport ; MM. Fryer et Cie, de Rouen, en sont concessionnaires en France.

pour effet de donner une ligne ondulée. Le papier porte des divisions dont l'écartement permet d'apprécier l'étendue des variations : on peut lui donner un déroulement lent ou rapide, suivant la nature des observations qu'on se propose de faire ; pour analyser un cycle, il convient évidemment de donner au papier une vitesse maximum.

Le Moscrop a été heureusement simplifié et perfectionné par M. Otten, de Lille, qui a supprimé le mouvement d'horlogerie et fait entraîner le papier par le moteur lui-même : cette modification permet d'abaisser notablement le prix de l'appareil, sans nuire grandement à la précision de ses indications, dans lesquelles la hauteur des hachures est le seul élément intéressant à relever.

Nous nous sommes servi tour à tour d'un appareil Moscrop et d'un Otten, le premier étant placé sur une machine à vapeur compound Dujardin de 600 chevaux, marchant dans des conditions parfaites de régularité et de fonctionnement (¹), le second sur le moteur X Crossley de 42 chevaux, appliqué à l'éclairage électrique de la filature de MM. Wallaert frères, à Lille.

Les deux machines sont excellentes dans l'espèce et les meilleures qu'on puisse signaler : la comparaison des deux tracés ci-dessous est donc fort intéressante. Le tracé A (fig. 126) est celui qu'on obtient avec la machine compound, développant 64 tours en faisant avancer le papier de 51 millimètres à l'heure, tandis que B est donné par un déroulement de 5 millimètres à la seconde ; la distance des traits parallèles *m* et *n* correspond à une variation de 3 0/0 ; il est donc aisé d'apprécier la variation maximum de la vitesse. La hauteur des hachures mesure les écarts de

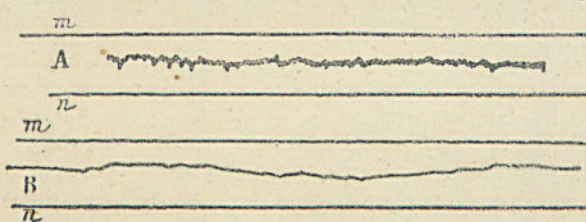


Fig. 126.

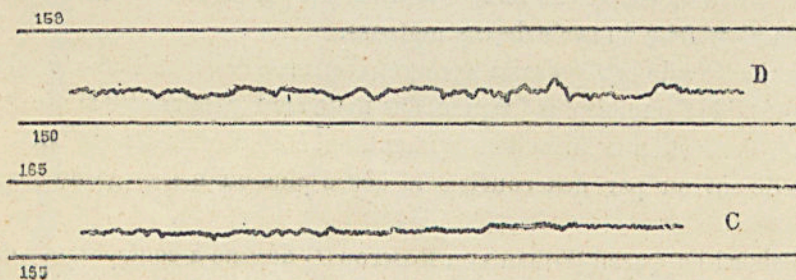


Fig. 127.

vitesse produits dans les diverses phases du cycle : elle donne pour ainsi dire le coefficient de l'action du volant, tandis que la rectitude de la ligne moyenne témoigne de la constante de la vitesse due au régulateur.

Les tracés C et D de la figure 127 ont été relevés sur la machine Crossley, faisant 160 révolutions par minute : la distance des traits parallèles correspond à des varia-

1. Du rôle et de l'efficacité des enveloppes de vapeur dans les machines compound (*Bulletin de la Société Industrielle du Nord de la France*, décembre 1892).

tions marquées sur nos tracés, de 150 à 158 et de 155 à 165 tours ; le trait D correspond à un déplacement du papier de 20 millimètres à la minute.

Le rapprochement de ces courbes permet d'apprécier la perfection relative réalisée même par les moteurs monocylindriques au point de vue de la régularité ; assurément, ils le cèdent encore aux grandes machines à vapeur, mais il faut reconnaître que de grands progrès ont été réalisés.

La méthode que nous venons de décrire est très pratique ; mais pour les études théoriques à faire sur les moteurs, il convient de procéder à une analyse plus délicate et plus précise des mouvements de la machine : on le peut en recourant à l'emploi de l'appareil le plus rigoureux qui existe pour la mesure des temps, nous voulons dire le diapason. Supposons qu'un diapason vibrant porte à l'extrémité d'une de ses branches un petit style très délié, appuyant sur un cylindre recouvert de noir de fumée, animé d'un mouvement de rotation sur son axe : le style tracera sur le cylindre une ligne sinusoïdale. Comme les vibrations du diapason sont isochrones, c'est-à-dire

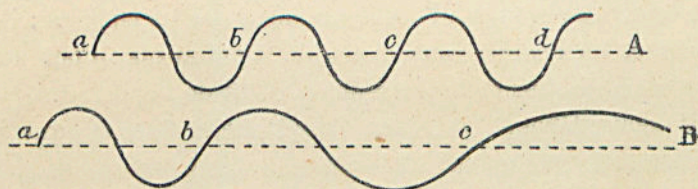


Fig. 128.

qu'elles sont exécutées pendant des intervalles de temps égaux, les durées correspondantes au tracé d'une courbe sont égales : il faut donc compter le même temps entre les points *a*, *b*, *c* et *d* de la sinusoïde (fig. 128), qu'elle soit régulière ou non. Si elle est régulière, comme la courbe A, le mouvement du cylindre est uniforme, car la vitesse angulaire est constante ; si elle est irrégulière, le mouvement est varié.

Dans le cas du tracé B, le mouvement est accéléré car la vitesse angulaire croît avec le temps. De la mesure des longueurs *ab*, *bc*, etc., on peut déduire la loi de la variation des mouvements.

Ce procédé, appliqué d'abord par Radinger, est susceptible d'une grande précision, attendu qu'on peut employer des diapasons à vibrations rapides, qui tracent des repères correspondants à des intervalles de temps extrêmement courts.

Ainsi, un diapason donnant le *ut*₁ fait 65,25 vibrations, si l'on prend pour *la*₃ 435 vibrations, et 64, si *la*₃ n'en exécute que 426 1/3 par seconde ; ce sont les valeurs normales du *la* des musiciens et du *la* classique de Chladni. De même on a :

<i>ut</i> ₂	130,50	ou	128
<i>ut</i> ₃	261,00	ou	256
<i>ut</i> ₄	522,00	ou	512
<i>ut</i> ₅	1044,00	ou	1024
<i>ut</i> ₆	2088,00	ou	2048
<i>ut</i> ₇	4176,00	ou	4096
<i>ut</i> ₈	8352,00	ou	8192

On peut donc mesurer le huit millième de seconde, et, comme ce sont des oscillations doubles, on arrive aisément et sûrement au seize millième de seconde.

Les précieux avantages du diapason sont utilisés depuis longtemps pour déterminer la loi d'un mouvement complexe ; je m'en suis servi, en 1878, pour étudier l'influence des parois sur le réchauffement des gaz ⁽¹⁾ et pour établir la loi des phénomènes explosifs ⁽²⁾. Depuis lors, j'ai fait des tracés d'un autre genre en appuyant le style du diapason sur un papier fixé sur l'arbre de couche lui-même : pour que les sinusoides ne se superposent pas, il convient alors de faire avancer progressivement le diapason. Ce dispositif a été fort habilement mécanisé par MM. Manlove, Alliot et C^{ie}, qui ont construit un instrument spécial à ce genre d'observations, dénommé par eux le cyclomètre. Un cylindre, recouvert de papier noirci au noir de fumée, est accouplé directement à l'arbre dont la rotation doit être étudiée : un engrenage droit transmet ce mouvement, dans un rapport convenable, à la vis d'un chariot portant le diapason ; le style tracera donc sur le cylindre une sinusöide hélicoïdale. La vibration du diapason est entretenue électriquement, de manière à ce que l'expérience puisse être prolongée aussi longtemps qu'on le désire. Le papier est fixé sur le tambour à l'aide de deux rouleaux tenseurs disposés à l'intérieur même de ce tambour : il est ainsi parfaitement tendu et on l'enlève sans difficulté. L'enfumage se fait au moyen d'une lampe paraffinée placée sous le tambour dans le bâti de l'appareil.

L'appareil Manlove, Alliot et C^{ie} a été employé par M. Ranson, qui a entrepris une série d'expériences sur les moteurs Atkinson et sur les moteurs Crossley ; ce travail a été publié dans les Mémoires de la Société des Ingénieurs civils de Londres ⁽³⁾ ; nous en extrayons les documents suivants :

Deux moteurs Atkinson ont été soumis aux essais, l'un de 2, l'autre de 4 chevaux, tous deux pourvus de deux volants de poids considérable. Les poids P de ces volants ont été réduits au rayon de la manivelle de manière à être comparables : les vitesses maximum et minimum étaient relevées au cyclomètre. Puis on a étudié deux Crossley, l'un de 4 chevaux, l'autre de 10 chevaux, mais du type E à grande vitesse, ayant des volants de masse beaucoup plus considérables. Le tableau ci-dessous indique synthétiquement les résultats obtenus.

Moteurs	Puissance et type	Nombre de volants	Poids réduit des volants	Vitesse moyenne	Vitesse maximum	Vitesse minimum	Différence brute	Différence pour cent
Atkinson . . .	2 H P	2	210k.	150,8	156,65	147,55	9,675	6,02
— . . .	2 H P	2	334	152,8	155,56	150,84	4,720	3,09
— . . .	2 H P	2	334	178,8	180,65	175,43	5,230	2,92
— . . .	4 H P	2	257	142,5	145,97	138,16	7,811	5,48
— . . .	4 H P	1	129	142,4	149,45	133,40	16,05	11,27
Crossley . . .	4 H P	1	354	202,8	207,4	197,5	9,16	4,68
— . . .	E	2	3220	238,1	240,5	236,6	3,83	1,61
— . . .	E	1	1610	250,2	253,8	247,8	5,92	2,37

1. De l'effet thermique des parois d'une enceinte sur les gaz qu'elle renferme ; *Annales de physique et de chimie*, 1878
 2. « Études sur les moteurs à gaz tonnant » ; Paris, Gauthier-Villars, 1883.
 3. « On Flywheels and Governors », 1892.

Les courbes ci-dessous des figures 129 et 130 montrent aux yeux ces variations, A avec petit, B avec grand volant, pour des moteurs Atkinson et Crossley.

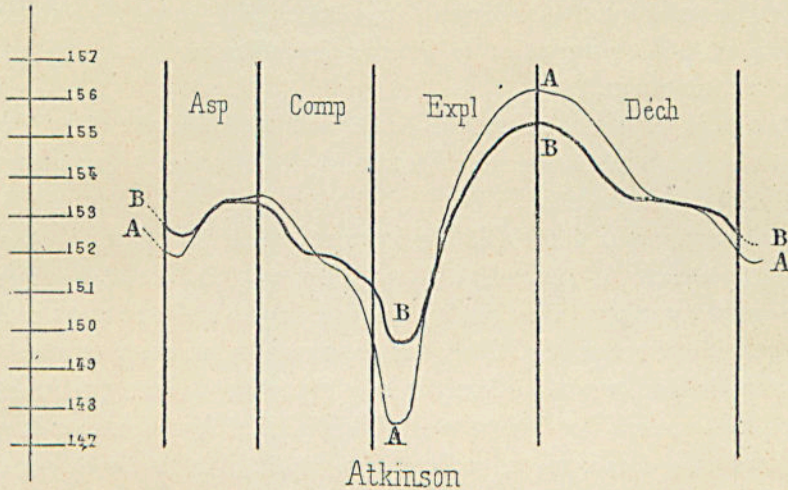


Fig. 129.

D'une manière générale, M. Ranson a observé que la variation des vitesses dans le cycle est en raison inverse du produit $\frac{P w^2}{S}$, P étant le poids réduit du volant, S la surface du piston et w la vitesse du moteur. Il a constaté aussi que les courbes des vitesses sont presque parallèles aux courbes des moments moteurs : on y voit toujours un maximum considérable à la fin de l'explosion et un autre, beaucoup plus faible et moins accentué, vers la fin de l'aspiration ; par contre, le minimum a lieu sur la fin de la compression.

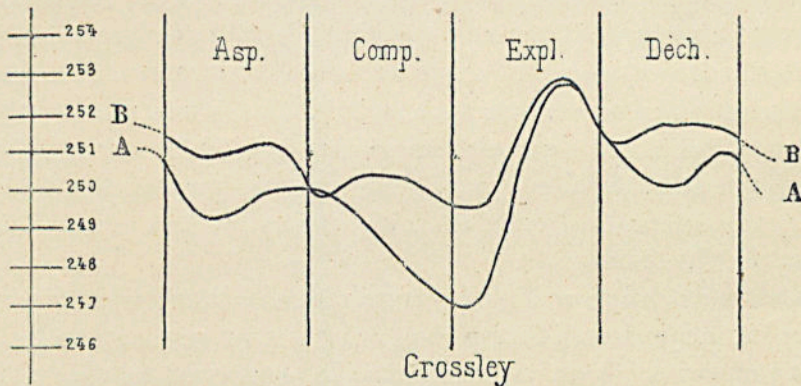


Fig. 130.

M. Ranson a fait certaines observations qu'il importe de mettre en lumière.

Une inflammation manquée⁽¹⁾ est toujours suivie d'un coup de piston où la pression maximum et la pression moyenne sont plus fortes. Serait-ce dû à l'état de propreté relatif du cylindre ? Ce serait un argument en faveur de l'expulsion des gaz brûlés.

1. Autrement dit un raté d'allumage, car un passage à vide ne produit pas le même effet.

L'effet d'une augmentation de vitesse est de réduire la pression moyenne ; M. de Pambour l'avait déjà signalé pour les moteurs à vapeur.

Quand la charge d'un moteur diminue subitement, il faut au régulateur un intervalle de temps sensible pour agir : le moteur fait deux ou trois tours avant que le régulateur soit intervenu.

Ces études de M. Ranson ont une grande importance théorique et pratique et elles contribueront certainement au perfectionnement des moteurs à gaz au point de vue de la régularité de leur marche.

Les appareils que nous venons de décrire permettent de relever à chaque instant la vitesse des moteurs ; ils répondent bien au but que les inventeurs s'étaient proposé, mais on pourrait reprocher aux cylindres à diapason d'être assez compliqués et aux enregistreurs Moscrop de n'être pas assez sensibles, ni assez exacts.

M. Dureau, de Rouen, s'est efforcé de supprimer les masses qui ralentissent ou exagèrent les indications des cyclomètres : d'après lui, il faut chercher la solution du problème dans une combinaison cinématique faisant intervenir et combiner deux vitesses, dont l'une soit constante et l'autre variable. Son appareil ⁽¹⁾ se compose de deux plateaux à friction à axes parallèles, tournant en sens inverse, renfermant entre eux un galet entraîné par son frottement contre les deux plateaux. Le mécanisme a trois centres situés sur une même ligne droite : le centre O du premier plateau P, le centre O' du second plateau P' et le centre C de l'alidade portant le galet. P est commandé par le moteur à étudier : P' reçoit un mouvement absolument régulier d'une petite machine auxiliaire : l'alidade du galet se tient perpendiculaire à la ligne des centres OO', quand les deux vitesses des plateaux sont égales, car le galet est sollicité de même dans les deux sens. Mais si le plateau P vient à marcher plus vite que P', le galet sera entraîné par lui : or, en avançant, il change de position par rapport aux centres O et O', en se rapprochant de O' et s'éloignant de O'' ; par ce fait, les vitesses tangentielles des points de contact se trouvent modifiées, l'une d'elles diminuant parce que le rayon se raccourcit, l'autre augmentant parce que le rayon s'allonge. Mais il existe une certaine position de l'alidade pour laquelle l'égalité des vitesses se rétablit : l'alidade s'y fixe et elle marque, par l'aiguille dont elle est munie, la proportionnalité qui existe entre les vitesses des deux plateaux. Tout cela est vraiment fort bien imaginé.

Mais il n'est point aisé de réaliser le mouvement *absolument régulier* du plateau régulateur : un mouvement d'horlogerie à échappement ne pouvait être accepté. M. Dureau a dû recourir à un moteur électrique, conservant sa vitesse malgré les variations de potentiel de la source qui l'alimente : il a bien fallu faire intervenir pour cela un diapason, dont la vibration, entretenue par une pile, peut changer d'amplitude, mais non de rythme. Le même moteur fait mouvoir aussi un tambour porte-papier, sur lequel l'aiguille du galet inscrit une courbe bizarrement ondulée dont on interprète sans peine les indications. Nous le répétons : tout cela est bien adroitement

1. Cet instrument a été décrit par M. Dwelshauvers-Dery dans son « Étude expérimentale dynamique de la Machine à vapeur, collection Léauté, 1894.

combiné, mais nous ne trouvons pas que ce soit simple. Il est à souhaiter que M. Dureau découvre le moyen d'éviter cette complication de moteur, de pile et de diapason, qui ne répond guère à son programme.

L'étude des variations cycliques de vitesse des moteurs a fait de grands progrès en ces derniers temps, sous la pression des électriciens, qui imposaient des conditions de plus en plus sévères aux constructeurs de machines utilisées pour la conduite des dynamos. On a commencé par définir rigoureusement le degré plus ou moins grand de régularité par un coefficient, qui a reçu le nom de *coefficient de régularité*, ou par son inverse, dit le *coefficient d'irrégularité*, que l'on considère de préférence.

Du fait de la variation de l'effort moteur et de la variation de l'angle de la bielle sur la manivelle, l'arbre de la machine prend, pendant la durée d'un tour, des vitesses angulaires oscillant entre une valeur maximum Ω_{\max} et une valeur minimum Ω_{\min} ; on appelle coefficient de régularité le quotient

$$K = \frac{2 \Omega_m}{\Omega_{\max} - \Omega_{\min}}$$

Ω_m étant la vitesse angulaire moyenne pendant ce tour (1). Le *coefficient d'irrégularité* a la valeur $\frac{1}{K}$ inverse de la précédente.

Mais voici une autre considération, qui complète la première. Si nous considérons une manivelle idéale accomplissant, d'un mouvement uniforme, un tour entier dans le même temps que la manivelle réelle accomplit un tour d'un mouvement varié, les deux manivelles formeront à chaque instant un angle qui variera de zéro à un maximum θ ; cet angle θ est appelé *l'angle d'écart*. Il est à remarquer que les électriciens attachent plus d'importance à la considération de θ qu'à celle de K ou de $\frac{1}{K}$; ces deux quantités dépendent évidemment l'une de l'autre, mais la fonction qui les relie est généralement très compliquée.

Le procédé du diapason, que nous avons décrit, donne bien les valeurs de Ω , mais on l'a trouvé insuffisant en bien des cas. En effet, pour apprécier $\frac{1}{K} = \frac{1}{200}$ avec une erreur de 10 0/0, il faudrait pouvoir mesurer la longueur d'un intervalle de sinusoïde à un millième près; or, avec une machine faisant 180 tours par minute, un diapason donnant 200 vibrations par seconde et marquant sa sinusoïde sur un tambour de 500 mm. de diamètre, tracerait une sinusoïde de 23,6 millimètres de longueur; il faudrait donc pouvoir mesurer cette longueur à 2 centièmes de millimètre

1. Quelques auteurs écrivent :

$$K = \frac{\Omega_m}{\Omega_{\max} - \Omega_{\min}}$$

mais la Société Internationale des Électriciens a adopté la valeur donnée dans le texte : nous nous y tiendrons.

près ; la méthode ne comporte évidemment pas une telle précision. Faisons observer d'ailleurs que les mouvements de déplacement de l'arbre du moteur le long de son axe enlèvent aux sinusoïdes la régularité et la symétrie dont on aurait besoin pour bien mesurer la longueur d'une courbe de sinusoïde. Malgré cela, le procédé du diapason est encore un des meilleurs et des plus pratiques.

M. Franke a perfectionné un appareil imaginé par M. Gœpel, qui pourrait être appliqué facilement aux moteurs à gaz (1). L'arbre du moteur est relié rigidement à un arbre portant un lourd volant cylindrique roulant sur billes qui est entraîné d'abord par le moteur et qui prend à un moment déterminé un mouvement propre, uniforme. Un crayon peut glisser longitudinalement le long de l'axe du tambour ; il participe au mouvement angulaire irrégulier du moteur ; mais une cordelette enroulée sur l'arbre le fait avancer ou reculer le long de la génératrice du tambour, suivant qu'il y a avance ou retard du moteur sur le tambour.

En reliant au moteur une dynamo à courant continu, avec excitation indépendante, on observe des variations de force électromotrice proportionnelles à la vitesse. Mais les oscillations propres au voltmètre influencent l'observation.

Les méthodes optiques, reposant sur l'emploi de procédés stroboscopiques, conviennent mieux que toutes les autres, parce qu'elles donnent directement les variations de θ ; mais elles exigent des dispositifs fort complexes et se prêtent mal à l'enregistrement des variations. On fixe sur l'arbre du moteur un disque percé de fentes radiales et éclairé par derrière ; on regarde à travers les fentes d'un second disque tournant d'un mouvement rigoureusement uniforme. L'image serait fixe, si le mouvement du moteur était lui-même uniforme ; en réalité, on la voit se balancer entre deux positions extrêmes apparentes, qui correspondent au double de l'angle d'écart maximum. On photographie les images sur un papier se déplaçant perpendiculairement à la direction du balancement. M. Cornu avait réalisé un dispositif donnant dans de bonnes conditions la solution pratique de ce problème (1).

On constate par ces diverses méthodes que le coefficient d'irrégularité des moteurs à gaz monocylindriques peut être abaissé à $\frac{1}{150}$; or, $\frac{1}{100}$ et même $\frac{1}{80}$ suffisent pour donner une lumière fixe ; mais on ne saurait tolérer $\frac{1}{60}$. Il est cependant des moteurs qui ne donnent que $\frac{1}{30}$: on s'en plaint et non sans raison.

Les moteurs à deux et quatre cylindres fournissent des résultats beaucoup meilleurs : on n'atteint pas les coefficients de $\frac{1}{274}$ des machines à vapeur compound, mais on n'en n'est pas si éloigné que quelques-uns le disent, et que d'autres le pensent. Comme la variation des vitesses dans le cycle est sensiblement en raison de $\frac{P\omega}{s}$ (P étant le

1. *L'Éclairage Électrique*, 16 novembre, 1901.

1. *Bulletin de la Société Internationale des Électriciens*, séance du 6 novembre 1901.

pois réduit du volant, ω la vitesse du moteur et s la surface du piston), on voit qu'on peut disposer dans une certaine mesure du coefficient d'irrégularité, et puis ce n'est en somme qu'une question de fonte.

Le critérium de la régularité est l'accouplement des alternateurs ; il a été réalisé avec succès à Embrach, à Montbijou et ailleurs, ainsi que nous le verrons plus loin.

Les constructeurs se trouvent fréquemment dans l'obligation de calculer les éléments de régularisation de leurs moteurs en vue de réaliser un coefficient d'irrégularité imposé à l'avance par un cahier des charges. M. Picou a indiqué le moyen suivant d'effectuer ce calcul d'une manière simple et correcte (1).

On part du diagramme d'indicateur.

Considérons un moteur à deux cylindres, travaillant avec une différence de phase d'une demi-période, et donnant

par suite une impulsion par tour de manivelle ; en admettant que le diagramme ait été relevé pour la première moitié du cycle dans un cylindre et pour la seconde dans l'autre, on obtient, en le développant sur une droite et en tenant compte du signe des efforts, la

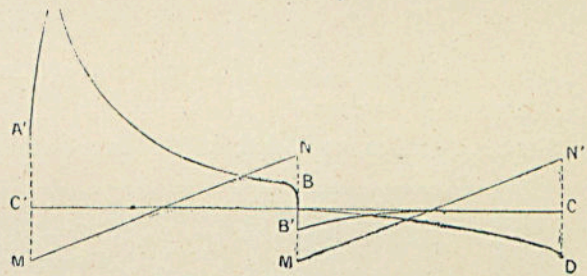


Fig. 131.

courbe de la figure 131. Les ordonnées représenteront en kilogrammes les forces exercées sur le piston, alors que les abscisses correspondent aux fractions de course. La somme algébrique des ordonnées donne la valeur de l'action totale des gaz sur les deux pistons.

Il faut y ajouter les forces d'inertie.

Soit m la masse des pièces en mouvement ; la force due à l'accélération est à chaque instant (fig. 132) :

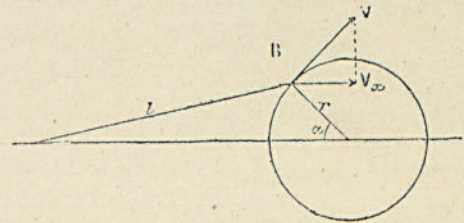


Fig. 132.

$$f = m \frac{dv_x}{dt} = \frac{m dv \sin \alpha}{dt} = m v \cos \alpha \frac{d\alpha}{dt} = \frac{m v^2}{r} \cos \alpha$$

Nous négligeons l'influence de l'obliquité de la bielle.

Les x du diagramme n'étant pas proportionnels aux temps et à α , mais aux déplacements du piston, cette formule doit être transformée.

On a

$$x = r (1 - \cos \alpha)$$

$$\cos \alpha = 1 - \frac{x}{r}$$

et

$$f = \frac{m v^2}{r^2} (r - x)$$

1 Cet intéressant travail a paru dans l'Industrie Électrique, n° 63, page 341.

Les valeurs de f sont représentées sur la figure 131 par les ordonnées des droites MN et M'N'.

Prenons un cas particulier pour exemple; soit un moteur pour lequel on aurait :

Diamètre des pistons.	340 millim.
Course	0 ^m , 66
Vitesse en tours par minute.	140
Poids des masses mobiles m	241 kg. par cylindre.

Il viendra par suite :

$$r = 0^m,33$$

$$v = 4^m,85 \text{ par seconde.}$$

$$m = \frac{241}{9,81} = 24,6$$

$$f = 1750 \left(1 - \frac{x}{r}\right)$$

Les ordonnées $c'M$, ON et OM', $c'N'$ sont égales à 1.750, ce qui fait 1^k,92 par centimètre carré de surface du piston.

Sur ces données, on établit le tableau ci-dessous :

x	Premier et deuxième temps du cycle	Troisième et quatrième temps du cycle	Efforts d'inertie	F	α	T
0	+ 3,5	+0,25	- 1,92	+ 1,7	0	0
0,05	+ 8,0	0	- 1,73	+ 6,3	25°, 50'	+ 2,7
0,1	+ 9,3	0	- 1,54	+ 7,8	37°, 00'	+ 4,7
0,2	+ 7,0	0	- 1,15	+ 5,9	53°, 10'	+ 4,7
0,3	+ 5,7	0	- 0,77	+ 4,4	66°, 40'	+ 4,5
0,4	+ 4,8	0	- 0,38	+ 4,4	78°, 30'	+ 4,3
0,5	+ 4,2	0	0	+ 4,2	90°, 00'	+ 4,2
0,6	+ 3,1	0	+ 0,38	+ 4,1	101°, 30'	+ 4,0

Dans ce tableau, x est évalué en fractions de la course; les efforts F sont ceux qui sont exercés par centimètre carré de surface du piston : T, l'effort tangentiel, est égal à $\frac{F}{\sin \alpha}$. Les nombres de la dernière colonne sont donc les ordonnées de la courbe des

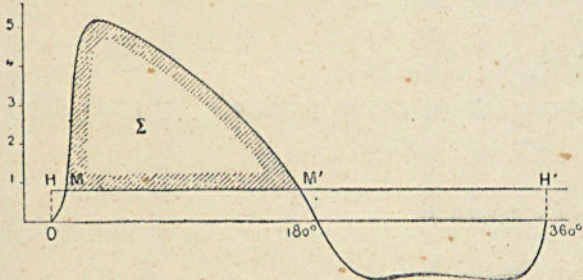


Fig. 133.

efforts tangentiels.

La courbe de la figure 133 fait voir leurs variations.

L'intégrale de cette courbe donne le travail moteur par tour de l'arbre; l'ordonnée moyenne est de 957 grammes par centimètre carré de surface du piston.

Aux points M et M' où la courbe coupe la droite HH' représentant un effort moyen résistant, il y a égalité entre les efforts moteur et résistant et ce sont les points où la vitesse est maximum et minimum. La surface Σ représente donc le travail que doit

emmagasiner le volant. Appelons ω'' et ω' les vitesses maximum et minimum et ω la vitesse moyenne ; le coefficient d'écart K sera défini par l'équation

$$K \omega = (\omega'' - \omega')$$

Mais

$$\frac{1}{2} (\omega''^2 - \omega'^2) I = \Sigma \quad ()$$

Donc

$$K = \frac{\Sigma}{I \omega^2}$$

Dans le cas particulier étudié, on avait :

$$\begin{aligned} \Sigma &= 1980 \text{ kilogrammètres.} \\ \omega^2 &= 215 \quad \text{---} \\ I &= 532 \quad \text{---} \end{aligned}$$

Il vient donc

$$K = 0,0173$$

Ainsi il y aura 1,73 % d'écart entre les vitesses angulaires extrêmes maximum et minimum.

Ce chiffre caractérise mathématiquement l'effet du volant et il permettra de préjuger à l'avance des conditions de marche qu'on réalisera.

Les variations du couple moteur dans les moteurs à quatre temps et les forces d'inertie font naître dans le bâti des réactions et des trépidations inconnues même dans les machines à vapeur marchant à la plus grande vitesse.

Les moteurs minuscules, qu'on monte sur les châssis des automobiles, occasionnent eux-mêmes, malgré leur faible masse, des chocs insupportables et provoquent des oscillations de leur support qui sont un des plus gros griefs invoqués contre ce moyen nouveau de locomotion ; il s'agirait de supprimer ces graves désagréments d'une machine qui possède par ailleurs tant et de si brillantes qualités.

Les effets de l'inertie des masses mobiles avaient déjà été déterminés depuis longtemps ; mais les actions causées par les quatre temps du cycle habituel des moteurs avaient été moins bien étudiées.

M. Crozet, ingénieur des Arts et Manufactures, a publié, en 1897, une analyse très fouillée de ces derniers effets, à laquelle nous empruntons les considérations qui suivent (2).

Dans les moteurs à quatre temps, dans lesquels il y a une course motrice sur quatre, l'aspiration, la compression, l'explosion et la détente développent sur la manivelle un effort variable qui se transmet au volant et tend à en modifier la vitesse ; par contre-coup, le bâti du moteur a une tendance à se déplacer en sens inverse du volant, d'autant plus que l'effort sur la manivelle a été lui-même plus grand. L'effort

1. I est le moment d'inertie $= \int m r^2$ par rapport à l'axe de rotation. M. Picou ne donne pas le diamètre des volants, mais il fait connaître le poids de la jante, égal à 4.850 kilogrammes.

2. « Étude sur les efforts qui font naître les trépidations dans les voitures automobiles à pétrole », par F. Crozet ; Paris 1897.

exercé sur l'arbre moteur peut être appelé le *couple utile* ou le *couple moteur*, tandis que celui qui ferait tourner le bâti en sens inverse serait dit le *couple de réaction*; ils sont toujours égaux entre eux en valeur absolue, mais ils sont essentiellement variables pendant l'accomplissement du cycle.

Le couple moteur est sensiblement nul pendant l'admission et l'échappement, il est positif pendant l'explosion et la détente, et négatif pendant la compression : le couple de réaction suit les mêmes phases en sens inverse.

Les trépidations sont dues surtout à ces variations des couples; la preuve en est dans le fait dûment vérifié que les chocs sont beaucoup plus intenses quand le moteur marche à vide que lorsqu'il est chargé; et pourtant, dans les deux cas, l'inertie des pièces en mouvement est la même.

Représentons schématiquement le moteur par sa bielle AB, et sa manivelle OB (fig. 134).

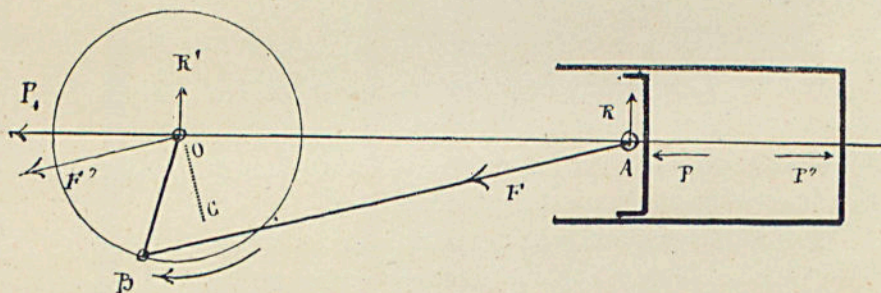


Fig. 134

L'explosion détermine sur le piston une pression P et une pression égale P' sur le fond du cylindre.

Or P se décompose en deux forces F et R, dirigées l'une suivant la bielle et l'autre perpendiculairement à l'axe du cylindre; ces deux forces peuvent être remplacées par les deux forces égales et parallèles F' et R' appliquées sur O au centre de l'arbre, et par les deux moments

$$F \times OC \text{ et } R \times OA$$

Mais F' et R' donnent une composante P, appliquée en O, égale, parallèle, mais opposée à P'; P' et P s'annulent donc, car P' se transmet par le bâti au point O.

Il reste par conséquent les moments $F \times OC$ et $R \times OA$; ces moments sont à tout instant variables.

Passons maintenant au calcul des efforts d'inertie.

Si M est la masse du piston, J son accélération, l'effort d'inertie π est égal à MJ; il s'exerce sur le centre de gravité du piston et peut se remplacer, comme la force P ci-dessous, par deux moments $F_1 \times OC$ et $R_1 \times OA$ et par une force π_1 , appliquée en O; mais cette force n'est point équilibrée, car il n'y a pas de pression opposée équivalente s'exerçant sur le fond du cylindre. Remarquons que $F_1 \times OC$ agissant sur l'arbre contribue au couple moteur, alors que $R_1 \times OA$ appartient au couple de réaction; π_1 appartient de même à ce couple. Les efforts d'inertie du piston donnent donc lieu à un

couple moteur d'inertie, à une réaction d'inertie et à une réaction variable π , appliquée en O et dirigée suivant l'axe du cylindre.

La bielle produit aussi des effets d'inertie.

On sait que le centre de gravité de la bielle décrit une ellipse, qui a pour grand axe, l'axe de la machine; la force d'inertie est dirigée suivant la tangente à cette courbe.

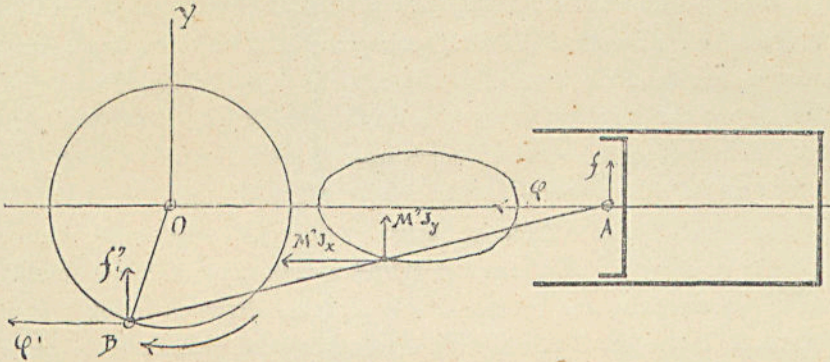


Fig. 435.

Appelons J_x l'accélération suivant l'axe des x et J_y celle qui s'exerce suivant l'axe des y ; le centre de gravité sera sollicité par les forces $M'J_x$ et $M'J_y$, M' étant la masse de la bielle. On peut remplacer ces forces par des forces f et φ appliquées à la crosse du piston et f' et φ' appliquées au bouton de manivelle : φ fait naître une réaction non équilibrée, et elle contribue aux couples moteurs et de réaction.

φ' donne une réaction suivant l'axe et contribue au couple moteur.

f donne une réaction suivant Y et contribue au couple de réaction.

f' donne aussi une réaction suivant Y , mais celle-ci contribue au couple moteur.

Bref : la résultante des efforts d'inertie de la bielle se réduit à un couple moteur et à un couple de réaction d'inertie, et à des réactions d'intensité variable appliquées en O suivant les axes X et Y .

Notons que ces effets sont peu considérables.

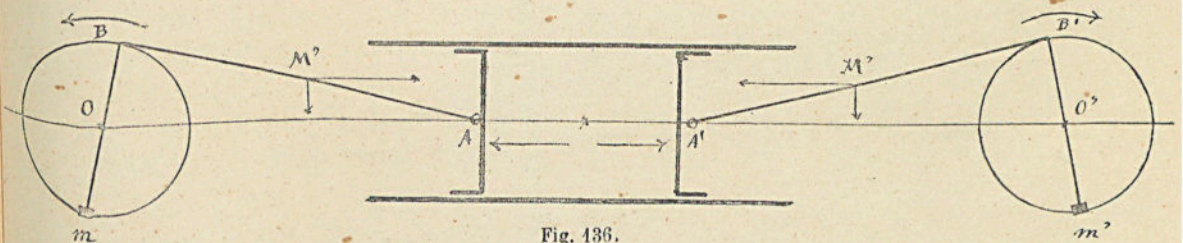


Fig. 436.

L'arbre coudé ou la manivelle non équilibrée a également une action sur le bâti du moteur; elle est due à la force centrifuge. On peut aussi la décomposer en deux autres, dirigées suivant l'axe des X et des Y .

En dernière analyse, les actions résultant des opérations du cycle et de l'inertie des masses en mouvement se réduisent à un couple résistant, et à des réactions appliquées au centre O , dirigées suivant l'axe et perpendiculairement à l'axe du moteur.

Tous ces efforts sont variables et subissent d'incessantes modifications d'intensité; M. Crozet en a tracé des courbes, qui sont très intéressantes. Ils tendent à soulever et à déplacer le bâti; leurs variations produisent les trépidations qui se transmettent aux supports et aux massifs de fondation.

Il propose divers moyens de les éviter.

Pour équilibrer un moteur, il faut équilibrer tous les efforts agissant sur le bâti.

On y arrivera en disposant deux arbres parallèles tournant en sens inverse, actionnés par un ou deux pistons, faisant naître des couples égaux, lesquels devront agir simultanément sur les deux arbres; il faudra encore que ces arbres soient solidaires, pour que le moteur ne se dérègle pas, que les mouvements d'inertie des volants soient égaux, que les arbres soient montés sur le même bâti, etc

Deux solutions principales ont été proposées: la première consiste dans l'emploi de deux pistons, se déplaçant dans un seul cylindre en sens inverse et actionnant deux arbres coudés tournant en sens inverse: ces arbres doivent être rendus solidaires l'un de l'autre pour que les manivelles conservent toujours le même calage. Tous les organes mobiles, pistons, bielles et manivelles (celles-ci équilibrées par des masses m) sont identiques de chaque côté; la chambre d'explosion est commune.

Il résulte de cette disposition: 1° que les couples de réaction s'équilibrent, étant à à tout instant égaux et de sens contraire; 2° que les réactions d'inertie des pistons s'équilibrent aussi, puisque tout est identique en eux, sauf qu'ils se meuvent toujours en sens inverse l'un de l'autre; 3° que les réactions d'inertie des manivelles sont équilibrées; 4° enfin que les réactions d'inertie des bielles $M'J_x$ s'équilibrent comme celles des pistons. Il n'y a que les réactions d'inertie des bielles $M'J_x$, qui ne s'équilibrent pas; celles-ci s'additionnent au contraire. Mais il est possible de les annuler aussi par une surcharge m' du contrepoids des manivelles.

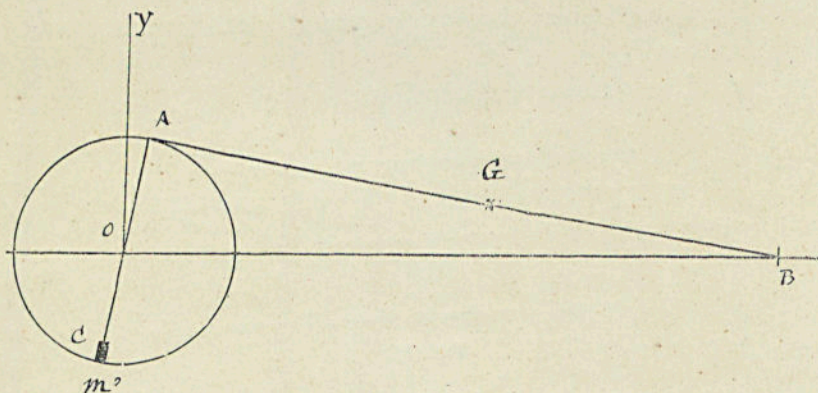


Fig. 137.

En effet, l'accélération suivant les Y de cette masse placée en C (fig. 137) est égale et de sens contraire à celle du point A, laquelle est K fois celle du point G où se trouve le centre de gravité de la bielle, de masse M' . Une masse $m' = \frac{M'}{K}$, placée en C, pro-

duiradonc la même réaction suivant l'axe des Y que la masse M' de la bielle concentrée en G. Donc, pour chaque bielle, une masse m équilibrera les réactions d'inertie.

Le moteur à deux pistons dans le même cylindre peut donc être mathématiquement équilibré quand les arbres sont solidaires.

Cette conclusion n'est plus exacte, quand le mouvement des deux pistons est transmis à un seul arbre par un jeu de balanciers et de bielles, comme on le fait le plus souvent ; mais on pourrait encore réaliser l'équilibre par des contrepoids judicieusement répartis.

M. Crozet a réalisé les mêmes conditions d'équilibre en juxtaposant deux cylindres au-dessus de deux arbres moteurs identiques disposés parallèlement et tournant en sens inverse, avec deux volants dont les moments d'inertie ont la même valeur. Les arbres moteurs sont solidarisés par un ensemble de roues dentées et de pignons, l'une des roues pouvant être utilisée pour la distribution. Pour qu'un tel moteur soit mathématiquement équilibré, il n'y a qu'à annuler une force provenant des réactions d'inertie du piston et de la bielle, et dirigée suivant l'axe de symétrie des deux cylindres : c'est encore une question de contrepoids.

Théoriquement, l'obliquité des bielles donne pour les vitesses du centre de gravité des pistons et des bielles une loi assez différente de la loi des vitesses du centre de gravité des contrepoids, mais cette différence est négligeable, quand les bielles ne sont pas trop courtes.

Ces études ne conduisent peut être pas à des conclusions pratiques immédiatement applicables, mais elles élucident une question à laquelle on n'avait pas prêté une attention suffisante jusqu'ici.

IV

Résultats d'Essais.

C'est par des essais bien faits et multipliés que se constituera la théorie du moteur à gaz : il faut donc apporter les plus grands soins possibles à relever correctement toutes les données expérimentales et il convient de ne perdre aucune occasion de soumettre une machine à cette épreuve (1).

MM. Slaby, Schöttler, Schröter et Meyer en Allemagne ; Kennedy, Unwin et Burs-

1. Il est de mode de dire du mal des essais officiels des moteurs : ces épreuves, préparées à l'avance, conduites par des hommes experts, surveillées avec grand soin, ne peuvent donner, affirme-t-on, que des résultats artificiels, bons tout au plus à tromper le public, attendu qu'un moteur ayant consommé 500 litres en essai, en dépense souvent 700 en marche industrielle courante.

Il est évident qu'un moteur plus ou moins bien soigné et abandonné à lui-même brûle plus de gaz qu'un moteur choisi pour être essayé ; il est évident aussi qu'une machine, fonctionnant à des charges diverses incessamment variables, consomme plus que dans une expérience poursuivie à charge constante et pleine ; il est évident encore qu'un ingénieur compétent tirera un meilleur parti d'un moteur qu'un ouvrier quelconque, dépourvu de connaissances pratiques et ne comprenant rien au fonctionnement de la machine.

Mais tout cela ne prévaut pas contre cette vérité que, de deux moteurs, c'est celui qui a donné les plus beaux résultats en essais comparés qui est le meilleur.

tall en Angleterre ; Tresca et Hirsch en France, ont publié des modèles du genre : nous sommes heureux de rendre hommage à l'habileté et à la compétence de nos savants et distingués collègues.

A la suite des nombreux essais qu'ils ont effectués, ils ont rédigé des procès-verbaux qui renferment de précieuses et très utiles indications ; il serait regrettable que ces données de l'expérience fussent perdues pour la science. Nous avons donc compulsé tous ces mémoires et nous en avons extrait les éléments principaux, que nous reproduisons ci-après, autant que possible dans l'ordre chronologique. Le premier essai que nous rapporterons remonte à 1861 ; il a été fait sur un moteur Lenoir et il porte la signature de Tresca.

Nous donnerons ensuite les résultats des expériences faites sur des moteurs Hugon, Langen et Otto, Wittig et Hees, etc. ; bien qu'on ne construise plus ces machines, les données de leur fonctionnement doivent être rappelées, pour apprécier mieux les progrès réalisés depuis lors. Les moteurs Otto ont été l'objet de savantes études que nous analyserons succinctement ; enfin nous passerons en revue les principaux modèles qui sont réputés maintenant les meilleurs. Ces procès-verbaux d'essais permettent de suivre l'évolution des moteurs à gaz ; nous les verrons grandir progressivement, améliorer leur rendement et développer leurs qualités, pour devenir enfin ce qu'ils sont aujourd'hui.

La comparaison des dimensions adoptées, des compressions pratiquées, des vitesses réalisées et des consommations relevées aux diverses époques de l'histoire des moteurs est extrêmement curieuse et particulièrement instructive.

1° *Procès-verbal des expériences faites sur un moteur Lenoir à air dilaté*, par H. Tresca, les 7 et 8 janvier 1861 (1).

Durée de l'expérience : 3 h. 32 minutes.

Diamètre du cylindre : 180 millimètres.

Course du piston : 0^m,100,

Vitesse : 130 tours par minute.

Travail au frein : 0,57 cheval.

Pression maximum : 4,87 atmosphères.

Cette valeur varie du reste considérablement avec le moment de la course où l'explosion se produit.

Teneur en gaz du mélange tonnant : $\frac{1}{10}$.

Chaleur emportée par l'eau de circulation : 0,53 de la chaleur totale.

Consommation par cheval-heure effectif : 3.476 litres (2).

1. *Annales du Conservatoire impérial des Arts et Métiers*, t. I, p. 849.

2. Le pouvoir calorifique du gaz consommé n'était jamais donné autrefois par les expérimentateurs et c'était une grave lacune de ces remarquables essais, que nous avons contribué à combler dès 1883.

2° *Procès-verbal des expériences faites sur un moteur Lenoir à air dilaté*, par H. Tresca, le 17 mars 1861 (1).

Durée de l'expérience : 5 heures.

Diamètre du cylindre : 240 millimètres.

Course du piston : 0^m,120.

Vitesse : 94 tours par minute.

Travail au frein : 0,90 cheval.

Teneur en gaz du mélange tonnant ; 7,5 0/0.

Pression maximum : 4 atm. 36.

Température des gaz de la décharge : 220°

Volume d'eau de circulation par cheval-heure : 120 litres.

Température de l'eau à la sortie : 90°.

Dépense d'huile : 36 grammes par heure.

La marche se ralentit après quinze minutes de marche, si l'on néglige de graisser abondamment.

On estime la dépense de la pile à 3 centimes par heure.

Consommation par cheval-heure effectif : 2.698 litres.

3° *Procès-verbal des expériences faites sur un moteur Hugon*, par H. Tresca, le 7 février 1866, à Paris, rue de Vaugirard (2).

Durée de l'expérience : 5 heures.

Diamètre du cylindre : 330 millimètres.

Course du piston : 0^m,320.

Vitesse : 53 tours par minute.

Travail au frein ; 2,07 chevaux.

Teneur du mélange : 1 volume de gaz pour 13 volumes d'air.

Pression explosive : 3,27 à 2,40 atmosphères.

Température des gaz de la décharge : 186°.

Consommation par cheval-heure effectif : 2.606 litres, allumage compris.

Dépense du brûleur : 264 litres par heure.

Température de l'eau de l'enveloppe : 42°.

4° *Procès-verbal des expériences faites sur un moteur Langen et Otto*, par H. Tresca, le 1^{er} septembre 1867, à Paris, à l'Exposition Universelle (3).

Durée de l'expérience : 30 minutes.

Diamètre du cylindre : 0^m,150.

Course variable.

Vitesse : 81 tours par minute.

Travail au frein : 0,46 cheval.

Consommation par cheval-heure effectif : 1.379 litres.

Dépense de gaz par le bec d'inflammation : 132 litres.

1. *Loc. cit.*, p. 867.

2. *Annales du Conservatoire impérial des Arts et Métiers*, t. VII, p. 67.

3. *Loc. cit.*, t. VII, p. 723.

Cette dépense du brûleur a été comprise dans la dépense totale de 1.379 litres ; la consommation est donc nette.

Le rapport de H. Tresca contient les lignes suivantes :

« L'action discontinue des organes, l'emploi d'encliquetages intermédiaires, le défaut de solidarité qui en résulte entre les principales pièces de la machine sont certainement des points qu'il conviendra d'améliorer dans l'avenir pour rendre tout à fait pratique cette machine de Langen et Otto. »

La quantité de chaleur enlevée à la machine par l'enveloppe d'eau n'atteint pas la $\frac{1}{17}$ partie de la chaleur totale de combustion du gaz.

5° *Résultats des expériences faites sur un moteur Langen et Otto*, par Meidinger, en 1868 (1).

Le tableau ci-dessous résume plusieurs semaines d'expériences.
Diamètre du cylindre : 150 millimètres.

Vitesse	Explosions	Travail au frein	Consommation par cheval-heure effectif
Tours par minute	Coups par minute	kgms.	litres
106	43	47,7	834
90	37	44,5	830
75	34	40,1	810
60	29	35,5	757
40	20	26,5	742

C'est parce que le piston n'est relié à l'arbre de couche que par intermittences que le nombre de tours n'est proportionnel ni au travail, ni au nombre de coups de piston.

6° *Résultats des expériences faites sur un moteur Otto*, par MM. Brauer et Slaby, à Berlin, le 21 mars 1878 (2).

Durée de l'expérience : 1 h. 30 minutes.

Diamètre du cylindre : 140 millimètres.

Course du piston : 0^m,280.

Puissance nominale : 2 chevaux.

Travail au frein : 2,08 chevaux.

Pression moyenne : 4^k,35 par centimètre carré.

Travail indiqué : 3,20 chevaux.

Travail indiqué à vide : 1,03 cheval.

Consommation par cheval effectif et par heure, allumage compris : 1.140 litres (3).

1. « Badische Gewerbehalle », cité par M. Schöttler, p. 31.

2. « Versuche über Brennmaterial Verbrauch », p. 24 et 25.

3. Sauf mention contraire, toutes les consommations seront désormais allumage compris : quand l'allumage sera électrique, nous le signalerons.

7° *Résultats des expériences faites sur un moteur Otto*, par les mêmes, à Erfurt, le 12 août 1878 (1).

Durée de l'expérience : 1 h. 32 minutes.
 Diamètre du cylindre : 170 millimètres.
 Course du piston : 0^m,345.
 Vitesse : 159,4 tours par minute.
 Puissance nominale du moteur : 4 chevaux.
 Travail au frein : 3,98 chevaux.
 Pression moyenne : 4 kil. 39 par centimètre carré.
 Travail indiqué : 6,03 chevaux.
 Consommation par cheval-heure effectif : 1.070 litres.
 Rendement organique : 0,65.

8° *Résultats des expériences faites sur un moteur Otto*, par MM. Brauer et Schöttler, le 5 septembre 1881, à l'Exposition d'Altona (2).

Durée de l'expérience : 65 minutes.
 Puissance nominale du moteur : 4 chevaux.
 Vitesse : 158,8 tours par minute.
 Travail au frein : 3,96 chevaux.
 Consommation par cheval-heure effectif : 912 litres.
 Les mêmes expérimentateurs, opérant sur un moteur de 12 chevaux, ont relevé une consommation de 975 litres par cheval-heure : ce second essai a aussi été fait sur une machine de l'exposition d'Altona.

9° *Résultats des expériences faites sur un moteur Otto*, par MM. Frese et Schöttler les 23 juillet et 10 décembre 1881, à l'Ecole Polytechnique de Hanovre.

Puissance nominale : 4 chevaux.

Numéro de l'essai	Durée de l'essai	Nombre de tours par minute	Passages à vide par minute	Travail au frein	Consommation par cheval heure	Température de l'eau de circulation
	minutes			chevaux	litres	
1	17	144,2	0	3,84	1089	—
2	21	155,8	17,6	2,88	1229	—
3	21	157,4	34,9	1,62	1825	—
4	24	157,9	48,1	0,34	5333	—
5	20	182,4	0	4,95	955	70°
6 (1)	20	160,0	3,0	4,34	1026	35°
7	25	159,5	1,7	4,33	973	71°
8	45	157,0	4,0	3,99	1031	70°
9	20	160,7	21,2	2,86	1148	70°
10	20	161,6	60,2	à vide	1170	70°

1 et 2. « Die Gasmachine », p. 48 et 49.

3. A noter que, dans les essais 6 et 7, la température de la paroi ayant augmenté de 35° à 71°, le nombre de passages à vide diminue et le rendement s'améliore.

Consommation d'eau par heure (n° 7) : 175 litres par heure.

Température de l'eau { à l'entrée . . 42°
 à la sortie . . 74°

10° *Résultats des expériences faites sur un moteur Wittig et Hees*, par MM. Schöttler et Brauer, à Altona, en 1881 (1).

Durée de l'essai : 40 minutes.
Diamètre du cylindre : 200 millimètres.
Diamètre du cylindre de compression : 165 millimètres.
Course des pistons : 0^m,180.
Puissance nominale du moteur : 4 chevaux.
Vitesse : 103 tours par minute.
Travail au frein : 3,75 chevaux.
Consommation par cheval-heure effectif : 1.240 litres.

11° *Résultats des expériences faites sur un moteur Kœrting-Lieckfeld*, par M. Schöttler (2).

Durée de l'essai : 30 minutes.
Diamètre du cylindre : 180 millimètres.
Diamètre du cylindre de compression : 150 millimètres.
Course des pistons : 0^m,360.
Puissance nominale du moteur : 3 chevaux.
Vitesse : 119 tours par minute.
Travail au frein : 2,18 chevaux.
Consommation par cheval-heure effectif : 1.275 litres.

12° *Procès-verbal des expériences faites par MM. Allard, Le Blanc, Joubert Potier et Tresca sur deux moteurs Otto*, à l'Exposition d'électricité, en 1881, à Paris (3).

1° Machine de 4 chevaux.

Diamètre du cylindre : 170 millimètres.
Course du piston : 0^m,340.
Vitesse : 155 tours par minute.
Travail indiqué : 5,26 chevaux.
Travail effectif : 3,94 chevaux.
Rendement organique : 0,74.
Consommation de gaz par cheval-heure effectif : 897 litres.

2° Machine de 10 chevaux : à deux cylindres opposés.

Diamètre des cylindres : 170 millimètres.
Course des pistons : 0^m,340.

1. Résultats cités par M. Schöttler, « Die Gasmachine », 4^e édition, p. 54.

2. Résultats cités par M. Schöttler, p. 56. Il s'agit ici d'un moteur Kœrting, du modèle primitif à deux temps, genre Clerk.

3. Expériences faites à l'Exposition d'Électricité, in-8° avec planches, Paris, Gauthier-Villars, 1883.

Vitesse : 161 tours par minute.
Travail effectif : 8,34 chevaux.
Consommation de gaz par cheval-heure effectif : 915 litres.
Température de l'eau à l'entrée du cylindre : 16°.
Température de l'eau à la sortie du cylindre : 79°,5.
Eau consommée par heure : 187 litres.

Chaleur emportée par l'eau : 1 187 calories par cheval soit le $\frac{1}{4}$ de la chaleur totale de la combustion du gaz.

13° *Résultats des expériences faites sur un moteur Otto*, par
M. A. Witz, le 8 juillet 1883, à Roubaix (1).

Durée de l'essai : 39 minutes.
Diamètre du cylindre 170 millimètres.
Course du piston : 0^m,340.
Vitesse : 159,6 tours par minute.
Puissance nominale : 4 chevaux.
Travail au frein : 3,7 chevaux.
Température du cylindre : 49°,9.
Consommation de gaz par cheval-heure effectif : 1 126 litres.
— d'eau — : 80 litres.
— de gaz à vide : 1 600 litres.
Pouvoir calorifique du gaz : 5292 calories par mètre carré.

14° *Résultats des expériences faites en 1883 sur un moteur Otto*
par M. Slaby (2).

Diamètre du cylindre : 171,9 millimètres.
Course du piston : 0^m,340.
Vitesse : 156,7 tours par minute.
Puissance nominale : 4 chevaux.
Pression moyenne : 3^k,72.
Travail effectif : 4,46 chevaux.
Travail indiqué : 5,11 chevaux.
Rendement organique : 0,87.
Consommation de gaz par cheval-heure effectif : 906 litres.
Passage à vide : 0 ; le moteur développait donc son travail maximum.

15° *Données relevées en travail courant sur un moteur*
Dugald Clerk, en 1884 (3).

Diamètre du cylindre : 178 millimètres.
Course du piston : 0^m,304.

1. J'ai publié ces résultats dans mes « Études sur les Moteurs à gaz tonnant », p. 64.

2. « Journal für Gasbeleuchtung », 1883, page 564.

3. Ces données ont été publiées par MM. Sterne et C. de Manchester, constructeurs de ce moteur.

Diamètre du cylindre compresseur : 178 millimètres.
 Course de son piston : 0^m,457.
 Puissance nominale : 6 chevaux.
 Vitesse : 150 tours par minute.
 Travail au frein : 8,2 chevaux.
 Travail indiqué : 11,6 chevaux.
 Rendement organique : 0,70.
 Compression préalable : 4,6 kilogrammes par centimètre carré.
 Pression maximum : 16,17 kilogrammes par centimètre carré.
 Consommation de gaz par cheval-heure effectif, allumage compris : 877 litres.
 Un moteur de 12 chevaux de force nominale a consommé 735 litres par cheval-heure effectif en produisant 20 chevaux au frein.

16° *Résultats des expériences exécutées sur un moteur Otto,*
 par MM. Brooks et Steward, à Hoboken (Amérique), en 1884 (1).

Diamètre du cylindre : 216 millimètres.
 Course du piston : 0^m,356.
 Volume de la chambre de compression : $\frac{38}{100}$.
 Puissance nominale : 7 chevaux.

Durée	30 minutes	30 minutes	25 minutes	30 minutes
Rapport du volume de l'air au gaz	—	7,0	7,0	7,7
Température de l'eau à l'entrée	21°	22°	23°	24°
Température de l'eau à la sortie	51°7	57°	89° 4	48°1
Tours par minute	163	160	149	160
Pression moyenne	4,24 atm.	3,8 atm.	3,85 atm.	3,5 atm.
Travail indiqué	5,4 chevaux	9,6 chevaux	8,7 chevaux	8,5 chevaux
Travail au frein	2,73 chevaux	7,5 chevaux	7,4 chevaux	6,3 chevaux
Rendement organique	0,50	0,78	0,85	0,74
Consommation par cheval-heure indiqué, allumage compris	$660 + \frac{200}{5,4} = 697$ lit	$685 + \frac{200}{9,6} = 706$	$687 + \frac{200}{8,7} = 710$	$703 + \frac{200}{8,5} = 727$
Consommation par cheval-heure effectif, allumage compris	$1310 + \frac{200}{2,7} = 1385$	$850 + \frac{200}{7,4} = 876$	$822 + \frac{200}{7,4} = 819$	$945 + \frac{200}{6,3} = 977$

17° *Résultats des expériences faites sur un nouveau moteur Lenoir à compression,* par H. Tresca, en mai 1885.

Diamètre du cylindre : 140 millimètres.
 Course du piston : 0^m,280.
 Vitesse : 180 tours par minute.

1. Ces expériences ont été publiées dans le *Van Nostrand Engineering Magazine*; j'en emprunte les données à l'ouvrage de M. G. Richard, qui les a reproduites à la page 143. Nos chiffres comprennent l'allumage.

Puissance nominale du moteur : 2 chevaux.
 Travail effectif mesuré au frein : 2 chevaux.
 Consommation par cheval-heure effectif : 655 litres.

*18° Résultats des essais faits à Rouen sur un moteur Simplex, au gaz de ville
 et au gaz pauvre, en novembre 1885, par M. A. Witz.*

Diamètre du cylindre : 200 millimètres.
 Course du piston : 0^m,400.
 Vitesse normale : 160 tours.
 Pouvoir calorique supérieur du gaz de ville : 5 400 cal.
 Pouvoir calorique supérieur du gaz Dowson : 1 350 cal.
 Consommation d'huile (Moehring) : 160 grammes par heure.
 Pression du gaz de ville : 20 millimètres d'eau en moyenne.
 Pression du gaz Dowson : 55 millimètres d'eau en moyenne.

Numéro	Durée	Charge effective du frein	Nombre de tours	Vitesse en tours par minute	Consommation de gaz	Consommation d'eau	Pression atmosphérique	Température du gaz	Température de l'eau à l'entrée	Température de l'eau à la sortie	Température des gaz à l'échappement	Pression moyenne	Travail indiqué	Travail effectif	Eau par cheval-heure effectif	Consommation de gaz par cheval-heure effectif	Consommation réduite à zéro et 760 ^{mm}	
EXPÉRIENCES DU 7 NOVEMBRE, SUR LE GAZ DE VILLE																		
	min.	kil. à vido	mèt.	lit.	lit.	mm.							kil.	chev.	chev.	litres	litres	litres
1	45		6846	152,1	1670	62	766	9°	10°3	57°	»	»	»	»	»	»	»	»
2	60	42,050	9258	154,3	4190	146	766	9	10 3	62	»	»	3,43	7,39	6,79	21,5	617	602
3	120	22,050	19342	161,2	10130	331	768	10	10 5	74	350°	»	4,05	9,10	8,79	19,9	577	562
4	60	57,050	9446	157,4	5580	183	769	10	10	78	»	»	»	»	9,41	19,6	593	579
EXPÉRIENCES DU 8 NOVEMBRE, SUR LE GAZ DOWSON																		
5	120	42,050	19668	163,9	36360	376	767	9	9	62	400	»	3,54	8,10	7,22	26,1	2518	2459
6	30	22,050	4761	158,7	6040	»	766	10	»	»	»	»	»	»	3,66	»	3300	3208
7	30	57,050	4773	159,1	7498	»	766	10	»	»	»	»	»	»	5,33	»	2813	2734

Gaz de ville : Consommation à vide, par heure 2 087 litres.

Compression préalable : 4^k,36.

Pression en fin de détente { essai n° 2 : 1^k,9.
 { essai n° 3 : 1^k,6.

La combustion était donc plus rapide dans l'essai 3 que dans l'essai 2 ; le mélange était plus riche dans ce dernier cas.

Gaz Dowson : Compression préalable : 6^k,80.

19° Résultats des expériences faites en décembre 1885, par M. Alfred Tresca, sur deux moteurs Lenoir, alimentés par un carburateur (1).

Force nominale.	2 chevaux	4 chevaux
Travail effectif en chevaux	1,961	4,152
Poids de gazoline à 0 ^k ,650 consommé par heure.	0 ^k ,773 gr.	1 ^k ,755 gr.
Volume de gazoline.	1 lit. 190	2 lit. 700
Consommation par cheval-heure effectif.	0 lit. 638	0 lit. 650

20° Expériences faites sur un moteur Durand, alimenté d'abord au gaz de ville, puis à l'air carburé.

	Gaz de ville	Air carburé
Durée de l'expérience.	2 heures	2 heures
Nombre de tours par minute.	185	180
Longueur du levier de frein.	1 ^m	1 ^m
Charge du levier	9 ^k ,500	11 ^k ,500
Travail effectif en chevaux.	2,45	2,88
Dépense de gaz ou de gazoline de densité 0,695.	712 litres	0 lit. 667

La puissance de ce moteur a été plus grande, quand on l'alimentait à l'air carburé.

21° Résultats du concours de la Société des Arts de Londres, en septembre 1888, sous la direction de M. le professeur Kennedy.

	Moteur Atkinson	Moteur Crossley	Moteur Griffin
Durée de l'essai à pleine charge.	6 heures	6 heures	6 heures
Puissance nominale du moteur.	6 chevaux	9 chevaux	8 chevaux
Vitesse moyenne.	131,1 tours.	160,1 tours.	198,1 tours.
— maxima.	132,7 —	161,8 —	199,8 —
— minimum.	129,2 —	155,8 —	192,7 —
Nombre moyen d'explosions.	121,6 —	—	129
Pression initiale.	11 ^k ,62	—	—
Pression moyenne.	3 ^k ,24	—	—
Travail indiqué en chevaux.	11,15 ch.	17,12 ch.	15,47 ch.
— effectif.	9,48 ch.	14,74 ch.	12,51 ch.
Rendement organique.	0,85	0,86	0,81
Consommation de gaz par cheval-heure indiqué.	526 litres.	575	634 litres
Consommation de gaz par cheval-heure effectif.	618 litres.	765	784 litres
Rendement thermique.	22,8 %	21,2 %	19,2 %

1. Bulletin de la Société d'Encouragement, 1886.

22° *Expériences faites sur un moteur Otto*, par MM. Edgard Kidwell
et Edwin Keller, à l'Université de Pensylvanie.

Puissance nominale : 7 chevaux.
Volume du cylindre : 12^l,29.
Volume des espaces nuisibles : 5^l,03.
Durée des essais : 3 h. 10 m.
Température du gaz à l'entrée : 18°.
Température de l'eau à l'entrée : 10°.
Température de l'eau à la sortie : 31°⁹.
Nombre de tours par minute : 161,6.
Explosions par minute : 73,97.
Travail en chevaux indiqués : 4 ch. 94.
Gaz consommé par cheval-heure indiqué : 625 litres.

23° *Essais d'un moteur Ravel*, fait en avril 1889, par M. Monnier
professeur à l'Ecole centrale.

Force nominale : 8 chevaux.

Dans le premier essai, on a fait varier la puissance développée en modifiant la charge du frein, la vitesse de la machine étant maintenue constante. Dans le deuxième, on a fait varier la puissance par le nombre de tours, et la charge du frein a été maintenue constante.

Durée de chaque essai : 30 minutes.

Nombre de tours par minute	Consommation de gaz par heure (litres)	Puissance indiquée (chevaux)	Puissance effective (chevaux)	Consommation de gaz par chev.-heure indiqué	Consommation de gaz par chev.-heure effectif
TABLEAU N° 1					
160	4.188	3,294	à vide	1.271	»
160,75	4.635	4,810	1,402	964	3.306
160,15	5.150	6,461	2,802	797	1.796
160,75	5.874	7,719	4,207	761	1.396
160,8	6.701	8,585	5,610	781	1.195
161,2	7.490	9,312	7,013	804	1.068
160	8.052	10,526	8,000	765	1.006
TABLEAU N° 2					
150	7.100	8,783	6,540	808	1.086
140	6.276	7,612	6,107	824	1.028
130	5.760	6,472	5,720	890	1.007
125	5.364	6,149	5,428	872	988
120	5.230	5,813	5,235	900	999

Ce bel essai présente la particularité fort curieuse que, dans la 2° série la consom-

mation par cheval-heure effectif a diminué lorsque le travail effectif développé a passé de 6,54 à 5,23 chevaux; en même temps la dépense rapportée au cheval-heure indiqué augmentait.

*24° Résultats des expériences faites à Solre-le-Château (Nord),
par M. A. Witz, sur un moteur Charon, les 13 et 14 avril 1889.*

Diamètre du cylindre : 180 millimètres.

Course : 0^m,360.

Vitesse normale : 166 tours.

Puissance nominale : 4 chevaux.

Pouvoir calorifique supérieur du gaz : 5.980 calories par mètre cube.

Longueur du bras de levier du frein : 1^m,005.

Numéro	Date	Durée		Charge effective du frein	Vitesse par minute	Consommation de gaz par heure	Température	Pression	Consommation réduite à zéro et 760 ^{mm}	Travail effectif	Gaz par chev.-heure effectif
		h.	h.								
1	13	3	à 3,20	à vide	167,8	1.404	12,5	736	1.500	0	
2	—	4,59	5,09	20 kg.	157,0	2.580	—	—	2.389	4,40	543
3	—	6,09	6,31	18 kg.	166,0	2.389	13	—	2.207	4,18	528
4	—	8,52	8,57	—	166,4	2.328	—	—	2.151	4,20	510
5	—	8,57	9,02	15 kg.	166,2	2.124	—	—	1.963	3,49	563
6	14	11,47	12,02	18 kg.	165,5	2.376	11,5	737	2.210	4,17	530

*25° Expériences de recette du moteur vertical Forest à l'arsenal maritime de
Brest, faites le 22 mars 1890, par M. Martin, maître principal de la marine.*

Puissance nominale : 16 chevaux.

Nombre de cylindres : 6.

Diamètre des cylindres : 160 millimètres.

Course des pistons : 0^m,340.

Durée de l'épreuve : 7 heures.

Nombre moyen de tours : 166,7 par minute.

Travail effectif : 16 ch. 67.

Dépense de pétrole par cheval-heure effectif : 458 grammes.

*26° Résultats des essais faits à Paris par M. Hirsch sur un moteur Lenoir,
le 24 mai 1890.*

Puissance nominale : 16 chevaux.

Nombre de cylindres : 2.

Diamètre des cylindres : 230 millimètres.

Course des pistons : $0^m,400$.
Compression : $2^k,5$.
Pression explosive maximum : 12 kilogrammes.
Avance à l'échappement : $\frac{1}{7}$.
Longueur du frein : $1^m,204$.
Poids effectif : $59^k,950$.
Nombre de tours moyen : 160.
Travail effectif : 16 ch. 13.
Gaz consommé par cheval-heure effectif : 601 litres.
Aucune correction de température ni de pression n'a été faite sur le volume des gaz.
Puissance calorifique supposée : 5.300 calories par mètre cube.

27^e Résultats des essais faits à Rouen, par M. A. Witz, sur un moteur Simplex (E. Delamare-Deboutteville et L. Malandin), alimenté au gaz Dowson, le 12 septembre 1890.

Ce moteur monocylindrique avait été exposé à Paris, en 1889 :
Puissance nominale : 100 chevaux indiqués.
Diamètre du cylindre : 573 millimètres.
Course : $0^m,950$.
Vitesse de régime : 100 révolutions.
Compression initiale : 6 kilogrammes.
Diamètre des volants : $3^m,600$.
Nombre de volants : 2.
Poids de chaque volant : 3.900 kilogrammes.
Durée de la marche : 23 h. 30 m.
Température du cylindre : $43^{\circ},5$.
Température des gaz de la décharge : 440° .
Vitesse moyenne : 100,8 tours par minute.
Diamètre de la poulie de frein : $1^m,700$.
Diamètre des cordes : 24 millimètres.
Charge totale du frein P : 706 kilogrammes.
Décharge moyenne p au dynamomètre : $78^k,830$.
Charge effective P— p : $627^k,170$.
Travail effectif en chevaux : 75,86.
Consommation d'anthracite par cheval-heure effectif : 516 grammes.
Consommation de coke par cheval-heure effectif : 96 grammes.
Consommation totale de combustible par cheval-heure effectif : 612 grammes.
Consommation totale d'eau par cheval-heure effectif : $68^l,687$.
Consommation totale d'huile par cheval-heure effectif : $3^gr,74$.
Consommation totale de graisse par cheval-heure effectif : $0^k,45$.
Travail indiqué au diagramme : 109,9 chevaux.
Rendement mécanique du moteur : 0,69.
Consommation totale de gaz par heure : $190^{m^3},920$.
Pression atmosphérique : 772 millimètres.
Température du gaz à l'entrée du moteur : $21^{\circ},5$.
Consommation réduite à 0° et 760 millimètres : $179^{m^3},760$.
Consommation par cheval-heure effectif : 2.370 litres.
Pouvoir calorifique supérieur du gaz à 0° et 760 millimètres : 1.487 calories.

28° Résultats d'une série d'essais faits par la Compagnie parisienne sur des moteurs Lenoir.

Communiqués par M. A. Lencauchez, à la Société des Ingénieurs civils, le 2 octobre 1891.

Puissance de la machine	Consommation horaire à 15° et 760 millim.		
	à vide	au frein	par cheval-heure effectif
2/3 cheval	280 litres	800 litres	—
2 chevaux	610	1460	730
2 —	620	1520	760
4 —	882	2760	690
4 —	1500 (?)	2900	725
6 —	1320	4260	710
6 —	1360	4380	730
8 — (4 cyl.)	1560	5640	705
8 —	1580	5750	718
8 — (2 cyl.)	2460	5625	703
12 —	2938	8470	706
12 —	3050	8600	717
16 —	3490	10434	652
16 —	2850	10430	652
24 —	4320	15300	638
24 —	5500	15350	640

Compression variable de 2,5 à 3 kilogrammes.

Pression explosive de 10 à 12 kilogrammes.

Différence de consommation des petits aux gros moteurs : 14 0/0.

Cette différence serait beaucoup plus grande avec des machines à vapeur : la remarque est de M. Lencauchez.

29° Résultats des essais faits sur un moteur Charon, chez MM. Delizy et Brassart, à Paris, par M. Chauveau, en mai, 1891.

Diamètre du cylindre : 210 millimètres.

Course du piston : 0^m,40.

Vitesse de régime : 160 tours.

Puissance nominale : 6 chevaux.

Diamètre du volant : 1^m,830.

Durée des essais : de 10 à 20 minutes.

Pouvoir calorifique du gaz : Inconnu.

Pression atmosphérique, température du compteur : Inconnues.

Compression variable de : 4,5 à 6,0 kilogrammes.

Pression explosive, variable de : 8,5 à 12 kilogrammes.

PUISSANCE développée	VITESSE en tours	CONSUMMATION de gaz par heure	CONSUMMATION de gaz par cheval-heure effectif
à vide	156,4	2.681 litres	—
—	164	2.220	—
—	164	2.210	—
—	164	2.160	—
2 ^{ch} ,02	166	2.550	1.262
2,81	165	2.550	909
3,89	160	2.940	756
4,25	158	2.910	685
4,46	166	2.940	659
5,71	158	3.660	612
6,38	158,28	3.960	620
6,53	157	3.920	600
6,60	157,2	3.810	577
7,48	158	4.380	586
8,24 (max.)	150	4.500	516 (incertain)

30° Essais faits sur un moteur Priestman, par M. le professeur Unwin, aux concours de Plymouth et de Hull en 1890 et 1891.

Diamètre du cylindre : 216 millimètres.

Course du piston : 0^m,305.

Diamètre de la pompe : 130 millimètres.

Course : 0^m,070.

Vitesse : 204,33 tours par minute.

Pression moyenne effective : 3^k,75.

Pression explosive : 10,6.

Pression finale : 0,25.

Compression : 2,45.

Volume de la chambre de compression : $\frac{37}{100}$ du cylindre.

Pétrole employé : Daylight : (D = 0,793).

Température ambiante : 15°.

Température du cylindre : 49°.

Température du vaporisateur : 142°.

Température de l'échappement : > 315°.

Air aspiré par kilogramme de pétrole : 33^k,4.

Travail indiqué : 9,369 H. P.

Travail effectif : 7,722.

Différence : 1,647.

Rendement organique : 0,824.

Dépense de pétrole par cheval-heure indiqué : 0^k,316.

Dépense de pétrole par cheval-heure effectif : 0^k,385.

Diamètre du volant de frein : 1^m,405.

Diamètre de la corde : 10 millimètres.

Diamètre de travail : 1,415.

Charge effective du frein : 38^k,85.

Ce même essai, répété avec de la Russoline de densité 0,823, a donné les résultats suivants :

Vitesse : 207,73 tours par minute.

Moteurs à gaz et à pétrole. — Wirtz.

Pression moyenne effective: 2^k,90.
 Pression explosive: 9^k,40.
 Pression finale: 0^k,17.
 Compression: 1^k,92.
 Température ambiante: 14°,5.
 Température du cylindre: 53°,5.
 Température du vaporisateur: 129°.
 Température de l'échappement: 300°.
 Air aspiré par kilogramme de pétrole: 31^k,7.
 Travail indiqué: 7,408 H. P.
 Travail effectif: 6,765.
 Différence: 0,643.
 Rendement organique: 0,91.
 Dépense de pétrole par cheval-heure indiqué: 0^k,390.
 Dépense de pétrole par cheval-heure effectif: 0^k,428.
 Charge effective du frein: 33,35.
 En marchant à vide, avec de la même Russoline, le même moteur a donné les résultats suivants:
 Vitesse: 187,3 tours.
 Pression moyenne effective: 0^k,4.
 Pression explosive: 0^k,67.
 Compression: 0,42.
 Température du cylindre: 40°,5.
 Température de l'échappement: 173°.
 Travail indiqué: 0,889 H. P.

31° *Essai fait à Chelsea, le 5 février 1892, sur un moteur Crossley, alimenté de gaz Dowson, par M. Dowson.*

Nombre de cylindres: 2.
 Diamètre des cylindres: 432 millimètres.
 Course des pistons: 0^m,610.
 Durée de l'essai: 8 heures.
 Vitesse moyenne en tours par minute: 155,73.
 Nombre d'Explosions $\left\{ \begin{array}{l} \text{Cylindre de droite: } 53,975. \\ \text{Cylindre de gauche: } 55,436. \end{array} \right.$
 Travail indiqué $\left\{ \begin{array}{l} \text{Cylindre de droite: } 59 \text{ H. P.} \\ \text{Cylindre de gauche: } 59,4. \end{array} \right.$
 Travail indiqué total: 118,7 H. P.
 Travail indiqué maximum: 173,6 H. P.
 Travail effectif maximum: 147,6 H. P.
 Pression du gaz au gazomètre: 41 millimètres d'eau.
 Pression de la vapeur à la chaudière: 3^k,37.
 Nature du combustible $\left\{ \begin{array}{l} \text{Anthracite Gwaun C° au gazogène.} \\ \text{Coke de gaz à la chaudière.} \end{array} \right.$
 Anthracite consommé par H P I et par heure: 279 grammes.
 Coke: 67 grammes.
 Eau de réfrigération du cylindre, par H P I et heure: 23 litres.
 Eau évaporée pour l'injection: 0^l,36.
 Eau de lavage du gaz: 0^l,50.
 Total 23^l,86.

Gaz consommé par H P I et par heure : 1,783 litres.
Anthracite consommé par mètre cube de gaz : 0^k,165.
Coke : 0^k,033.

32° *Essais faits sur un moteur Niel à l'École Municipale de physique et de chimie de Paris*, par M. A. Moreau, les 14, 15 et 23 janvier 1891 (1°).

Puissance nominale du moteur : 4 chevaux.
Diamètre du cylindre : 180 millimètres.
Course du piston : 0^m,36.
Longueur totale du cylindre : 0^m,695.
Longueur de la chambre de compression : 0^m,109.
Volume d'une cylindrée : 9^l,161.
Volume de la chambre de compression v : 3^l,322.
Volume total V : 12^l,483.

Rapport $\frac{v}{V}$: 0,266.

Rapport de compression : 0,352.
Vitesse : 160 tours par minute.
Diamètre de la poulie de frein : 1^m,500.
Diamètre de la corde : 0^m,015.
Travail effectif : 4 ch. 00.
Travail indiqué : 5 ch. 26.
Rendement organique : 0,75.
Pression de compression : 3^k,5.
Pression explosive : 12^k,0.
Température du cylindre : 75°.
Température de l'échappement : 400°.
Consommation de gaz par cheval-heure effectif : 825 litres.
Consommation du brûleur par heure : 190 litres.
Consommation d'eau par heure : 90 litres.
Consommation d'huile par heure : 48 grammes.

33° *Résultats d'essais faits à Birmingham sur les moteurs Crossley actionnant des dynamos*, par MM. Dowson, Lea et Thornberry, électriciens.

- 1° Moteur de 1/2 cheval nominal : dynamo A :
Travail effectif : 1,4 cheval.
Watts produits : 506.
Gaz par cheval heure effectif (H. P.) : 997 litres.
Gaz par kilowatt-heure : 2746 litres.
- 2° Même moteur ; dynamo B :
Travail effectif : 1,36 cheval.
Rendement organique du moteur : 0,80.
Watts produits : 450.
Gaz par cheval-heure effectif : 963 litres.
Gaz par kilowatt-heure : 3000 litres.
- 3° Même moteur : dynamo C :
Gaz par cheval-heure effectif : 963 litres.

1 *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, octobre 1891.

- Gaz par kilowatt : 2019 litres.
4° Moteur de 2 chevaux nominaux ; dynamo D :
Watts produits : 1173.
Gaz par kilowatt : 1574 litres.
5° Même moteur et même dynamo (sans ratés) :
Watts produits : 1500.
Gaz par kilowatt : 1455 litres.
6° Même moteur avec frein :
Nombre de tours par minute : 140.
Travail effectif : 2,77 chevaux.
Watts produits : 2066.
Gaz par cheval-heure effectif : 927 litres.

34° *Essais faits sur un moteur Atkinson alimenté de gaz Dowson, à Uxbridge,*
par M. Tomlinson, en février 1892.

Durée de l'essai : 6 heures.
Diamètre du cylindre : 335 millimètres.
Course du piston : 0^m,360.
Vitesse : 86 tours par minute.
Nombre de moteurs : 2.
Appareils commandés : Pompes.
Débit des pompes par heure : 47 mètres cubes.
Pression moyenne effective : 3^k,23.
Passages à vide par minute : 20,6.
Explosions : 22,4 sur 43.
Travail indiqué : 16,705 chevaux.
Dépense de combustible par cheval-heure indiqué : 0^k,455.
Dépense de combustible par cheval-heure en eau montée : 0^k,680.
Rendement organique de l'installation : 0,713.
Rendement thermique en chevaux indiqués : 0,178.
Rendement thermique en eau montée : 0,128.

35° *Essais faits sur un moteur Schleicher-Schumm, alimenté par un gazogène*
Taylor-Winand, par M. Spangler, mai 1892 (1).

Moteur genre Otto, à deux cylindres conjugués :
Diamètre des cylindres : 370 millimètres.
Course du piston : 0^m,635.
Vitesse : 160 tours par minute.
Volume de la chambre de compression : $\frac{28}{100}$ du cylindre.
Compression : 5^k,5.
Travail effectif : 92 ch. 5.
Rendement organique : 0,724.
Consommation par cheval-heure indiqué : 0^k,430 anthracite.
Consommation par cheval-heure effectif : 0^k,598 anthracite.
Rapport de l'air au gaz : 1,2 à 1 volume.

1. *Journal of the Franklin Institute*, citation faite d'après M. G. Richard. « Les Moteurs à gaz et à pétrole en 1892 ».

36° Résultats des essais faits sur un moteur Charon au bassin de la Pallée,
(port de la Rochelle), le 9 juin 1892, par MM. Modelski et Coustolle,
Ingénieurs des Ponts et Chaussées.

Puissance nominale du moteur : 25 chevaux.

Nombre de cylindres : 2.

Diamètre des cylindres : 280 millimètres.

Course du piston : 0^m,450 par minute.

Vitesse normale : 144 tours.

Bras de levier du frein : 2 mètres.

Consommation d'eau : 380 litres par heure.

Rendement organique : $\frac{30,33}{27,83} = 0,917$.

Durée des essais	Charge effective du frein	Nombre de tours par minute	Consommation de gaz		Température du compteur à gaz	Consommation par heure réduite à la température de 15°	Travail indiqué	Puissance effective sur l'arbre	Consommation de gaz par cheval et par heure à la température de 15°
			pendant la durée de l'essai	par heure					
min.	kil.		litres	litres		litres	chevaux	chevaux	litres
15	25	144	2.385	9.540	29°5	9.063	»	10 04	903
»	37,5	144	2.425	9.700	»	9.215	»	15.07	611
»	50	143	2.740	10.960	»	10.412	26.20	19.95	522
30	62,5	143	6 115	12 230	»	11 619	28.80	24 93	466
15	70	142 1/2	3.355	13.420	»	12.749	30.33	27.83	458
<i>Marche à vide</i>									
»	à vide	145	1.935	7.740	29°5	7.353	»	»	»
<i>Marche à vide avec un seul cylindre</i>									
»	à vide	145	1.197	4.788	29°5	4.549	»	»	»

37° Résultats des expériences faites au laboratoire du King's College en décembre 1892, par M. le professeur Capper, sur un moteur Crossley (').

Diamètre du cylindre : 216 millimètres.

Course du piston : 0^m,457.

Puissance nominale : 7 H. P.

Durée de l'essai : 2 heures.

Vitesse moyenne : 162,5 tours par minute.

Pression moyenne effective : 5^k,09.

Pression explosive : 15^k,9.

Nombre d'explosions par minute : 71,2.

Travail indiqué : 13,32 H. P.

Travail effectif : 11,33.

1. Cité d'après Bryan Donkin.

Longueur du bras de levier du frein : 0^m,838.
 Charge du frein (nette) : 60^k,692.
 Consommation de gaz par cheval-heure indiqué : 579 litres.
 Consommation de gaz par cheval heure effectif : 682 litres.
 Consommation par heure du brûleur : 168 litres.
 Température du compteur : 14°,4.
 Température du cylindre : 60°.
 Chaleur transformée en travail : 22,8 0/0.
 Chaleur emportée par l'eau de circulation : 38,9 0/0.
 Chaleur emportée par la décharge : 40,5 0/0.

38° *Essai d'un moteur Trusty à pétrole*, par M. W. Beaumont (1).

Puissance nominale : 4 chevaux.
 Diamètre du cylindre : 197 millimètres.
 Course du piston : 0^m,356.
 Tours par minute : 230 et 227.

	Pleins charge	Demi-charge
Puissance indiquée en chevaux.	6,20	5,15
Puissance effective en chevaux.	4,28	2,80
Rendement organique.	0,69	0,54
Consommation de pétrole par cheval-heure indiqué.	300 gr.	370 gr.
Consommation de pétrole par cheval-heure effectif.	440 gr.	590 gr.
Admissions par minute	99	88
Eau consommée par heure.	162 litres	180 litres
Chaleur convertie en travail effectif.	14 %	10,4 %
— — — — — indiqué.	20,3 »	22,9 »
Chaleur perdue à la décharge.	39,8 »	47,55 »
— — — — — par les parois.	19,3 »	18,75 »
— — — — — par les résistances pas- sives et la vaporisation du pétrole.	26,9 »	23,3 »

39° *Résultats des essais faits à Lille, le 27 octobre 1893,*
sur un moteur X. Crossley, par M. A. Witz.

Diamètre du cylindre : 335 millimètres.
 Course du piston : 0^m,53.
 Vitesse de régime : 160 tours.
 Frein à corde ; diamètre de la poulie : 1^m,761.
 Diamètre de la corde : 15 millimètres.
 Diamètre de travail : 1^m,776.

1. *Revue Industrielle*, 5 août, 1893.

No de l'essai	Conditions de l'essai	Durée	Vitesse moyenne N	Charge π au frein	Travail effectif	Nombre d'explosions	Pression moyenne P_m	Travail indiqué	Rendement organique
				kil.	ex		kil.	ex	
1	A vide	15	168,8	—	—	15	4,77	7,42	—
2	Avec transmission	30	160,0	—	—	20	5,52	11,50	—
3	Au frein	15	142,8	163,6	28,98	71,4	4,78	35,43	0,820
4	Id.	20	152,5	189,1	35,77	70,0	5,69	41,35	0,865
5	Id.	20	161,3	181,1	36,23	74,5	5,31	41,09	0,880
6	Id.	25	163,36	187,8	38,05	73,0	5,45	43,00	0,884
7	En éclairage	3 h.	150,68	—	28,54	75,3	4,45	34,81	0,820

No de l'essai	Pression atmosphérique	Température du compteur	Pouvoir calorifique du gaz par mètre cube à 0° et 760 millim.	Gaz consommé dans l'essai	Consommation par heure	Consommation réduite à 30° et 760 millim.	Consommation par cheval-heure indiqué	Consommation par cheval-heure effectif	<i>idem</i> brûleur déduit
	millim.		cal.	lit.	lit.	lit.	lit.	lit.	lit.
1	759,4	24°	5.024	1.418	5.672	5.210	704	—	—
2	757,0	id.	5.011	3.385	6.770	6.198	539	—	—
3	759,4	id.	5.024	5.042	20.170	18.525	523	639	632
4	757,0	id.	5.011	8.198	25.594	22.472	543	628	622
5	759,4	id.	5.024	8.173	24.519	22.522	548	622	616
6	757,0	id.	5.011	10.554	25.330	23.190	539	609	603
7	757,0	id.	5.011	60.660	20.220	18.511	532	648	641

$$\text{Rendement thermique effectif} = \frac{75 \times 60 \times 60}{0,603 \times 5011 \times 425} = 0,21.$$

40° Essais faits sur un moteur Crossley S A, alimenté au gaz Dowson, par M. Cavaillès, fabricant de draps à Montolieu (Aude), le 3 décembre 1893.

Puissance nominale du moteur : 18 chevaux.

Diamètre du cylindre : 292 millimètres.

Course du piston : 0^m,406.

Vitesse : 164 tours par minute.

Nombre d'explosions par minute : 64.

Pression moyenne sur le piston : 5^k,132.

Travail indiqué : 20 ch. 16.

Diamètre de la poulie et de la corde : 1^m,690.

Frein à cordes ; charge : 102 kilogrammes.

Frein à cordes ; décharge : 23 kilogrammes.

Frein à cordes ; charge nette : 79 kilogrammes.

Travail effectif : 15 ch. 22.

Rendement organique : 0,753.

Consommation de gaz par cheval-heure indiqué : 2.157 litres.

Consommation de gaz par cheval-heure effectif : 2.862 litres.

Combustible employé dans le gazogène : charbon maigre de Cransac.
 Forme du charbon : tout venant et fines.
 Teneur en cendres : 17 0/0.
 Combustible brûlé sous la chaudière : coke.
 Consommation totale de Cransac et de coke par mètre cube de gaz : 296 grammes.
 Consommation par cheval-heure indiqué : 638 grammes.
 Consommation par cheval-heure effectif : 847 grammes.

*41° Essais faits sur un moteur Simplex, alimenté au gaz pauvre,
 à Etrépany (Eure), par M. Bourdon, le 7 mars 1894.*

Diamètre du cylindre : 480 millimètres.
 Course du piston : 0^m,700.
 Vitesse de régime : 140 tours.
 Puissance nominale : 60 chevaux.
 Charbon consommé : maigre d'Anzin.
 Durée de l'essai : 4 h. 30^m.
 Poids de charbon brûlé : 170 kilogrammes.
 Frein employé : à cordes.
 Nombre de brins : 4.
 Diamètre de la poulie : 1^m,705.
 Diamètre de la corde : 28 millimètres.
 Diamètre de travail : 1^m,733.
 Nombre de tours : 138,6.
 Charge P : 410 kilogrammes.
 Décharge p : 37 kilogrammes.
 Charge effective : 373 kilogrammes.
 Travail effectif : 62 ch. 55.
 Consommation par heure effectif de charbon : 603^{gr},2.

*42° Résultats des essais faits sur un moteur Charon, le 7 avril 1894,
 à Marseille, par MM. Costa, Devaux, Roubieu et Vialet.*

Puissance nominale : 18 chevaux.
 Diamètre du cylindre : 230 millimètres.
 Course du piston : 0^m,420.
 Longueur du bras du frein : 1^m,50.

Numéros d'ordre	Charge du frein	Nombre de tours par minute	Consommation de gaz par heure	Température du compteur à gaz	Consommation par heure, réduite à la température de 14°; température moyenne de la France	Puissance effective	Consommation de gaz par cheval-heure
	kil		Litres		Litres	Chevaux	Litres
1	54	160	9.650	23°	9 264	18,14	510,7
2	60	160	10.300	23°	9 888	20,09	492,1
3	30	162	7.100	23°	6 816	10,26	665
4	à vide	163	5 370	23°	5.155,2		

43° Essais faits le 19 avril 1894, à Solre-le-Château (Nord), sur un moteur à gaz Charon de 50 chevaux,

par M. Allaire, Ingénieur de la Société des Industries Économiques

Puissance nominale : 50 chevaux.
 Nombre de cylindres : 2.
 Diamètre des cylindres : 350^m/_m.
 Course des pistons : 0^m,600.
 Vitesse normale : 150 tours par minute.
 Pouvoir calorifique du gaz : inconnu.
 Pression du gaz : 50 millimètres d'eau.

NUMÉROS DES ESSAIS	TRAVAIL EFFECTIF			TRAVAIL INDIQUÉ			RENDEMENT organique	CONSUMMATION DE GAZ à la température du compteur, soit 49°	
	Longueur du bras de levier du frein = 2 ^m ,515							Tare du ressort de l'indicateur = 2,5 ^{mm} p ^r 1 kg.	
	Charge	Révolutions	Travail	Pression moyenne	Révolutions	Travail		Par heure	Par cheval-heure effectif
	kilogr.	tours	chevaux	kilogr.	tours	chevaux	p ^r cent		
1	30	154,5	16,31	1,575	154,5	31,1	52,6	17.500	1.072
2	35	155	19,09	1,700	155	33,8	56,35	17.760	930
3	40	154	21,68	1,845	144	36,41	59,4	18.000	830
4	45	153,5	24,31	1,954	153,5	38,5	63,1	18.200	748
5	50	153	26,90	2,060	153	40,5	66,5	18.740	696
6	55	153	29,62	2,200	153	43,2	68,65	18.900	638
7	60	153	32,31	2,330	153	45,7	7,65	19.400	604
8	65	152,5	34,89	2,380	152,5	46,6	74,9	19.500	558
9	70	152	37,45	2,430	152	47,4	79	20.700	552
10	75	152	40,12	2,540	152	49,5	81	21.600	538
11	80	151,5	42,46	2,640	151,5	51,3	83	22.200	520
12	85	151	45,17	2,721	151	52,8	85,5	23.000	509
13	90	151	47,33	2,820	151	54,7	87,4	23.800	497
14	95	151	50,49	2,917	151	56,5	89,2	24.400	483
15	100	151	53,15	3,010	151	58,3	91,15	25.500	480

44° Résultats des essais faits par M. A. Witz sur deux moteurs Y Crossley alimentés au gaz Dowson, à Sabadell (Espagne), le 22 juin 1894.

	Moteur A	Moteur B
Diamètre du cylindre	0 ^m ,430	0 ^m ,431
Course du piston	0,607	0 ^m ,605
Diamètre de la poulie de frein	1,603	
Diamètre des cordes	0,20	
Diamètre de travail	1,623	
<i>Moteur A</i>		
Durée de l'épreuve	5 ^h ,30 minutes	
Charge P du frein	358 ^k ,5	
Décharge p	35,5	
Charge nette	323,0	
Révolutions par minute	164,362	

Explosions	73 ,6
Travail indiqué	77,46 chevaux
— effectif	60,18 —
Rendement organique.	0,78
<i>Moteur B</i>	
Travail indiqué.	68,77 chevaux
Travail effectif	56,75 —
Rendement organique.	0,82

*Résultats d'une journée de marche industrielle
avec ces deux moteurs A et B.*

Durée de l'épreuve : 11 h. 30 m.

Arrêts : 2 h. 22 m.

Durée de la marche : 9 h. 8 m.

Nature du charbon : anthracite Great Mountain Llanelly.

Travail indiqué total : 126 chevaux.

Travail effectif total : 100 ch. 66.

Consommation d'anthracite : 600 kilogrammes.

Consommation de coke : 70 kilogrammes.

Consommation par cheval-heure indiqué : anthracite 521 grammes.

Consommation par cheval-heure indiqué : coke . . . 46 »

567 grammes.

Consommation par cheval-heure effectif : anthracite 652 grammes.

Consommation par cheval-heure effectif : coke . . . 77 »

729 grammes.

45° Résultats du Concours de Moteurs à pétrole organisé à Meaux, en 1894,
par M. Ringelmann.

MOTEURS	TYPE	PISTON		Tours par minute	Explosions par minute	Travail effectif en chevaux	Consommation par cheval-heure effectif	Consommation à vide	Consommation de la lampe d'allumage par heure	Température de la décharge	Rendement thermique (1)	Rendement thermique (lampe comprise)	Variations de vitesse en plus et en moins
		Diamètre	Course										
		mill.	m.				gram.	gr.	gram.				
Hornsby .	mi-fixe	203	0,358	208,3	100,20	3,86	482	870	0	360°	11,9	?	10,3
				198,3	80,70	1,85	616			180	9,4	?	
Niel . . .	mi-fixe	182	0,360	183,3	45	6,23	307	821	165	128	20,5	18,7	8,3
				184,4	34	3,92	379			117	17,0	15,1	
Grob . . .	locom.	188	0,187	263,4	118,7	6,20	420	1900	?	213,6	14,1	13,7	13,9
				253,0	51,7	1,99	893			177	6,8	6,5	
Winterthur	mi-fixe	160	0,240	226,3	64,5	5,21	385	1085	?	244	15,4	14,9	8,3
				232,9	32,5	1,98	810			150	7,3	7,1	
Grob . . .	mi-fixe	188	0,187	311,0	95,5	7,34	271	427	74	305	22,1	21,2	8,0
				304,8	56,5	1,78	448			257	14,2	12,9	
Griffin . .	mi-fixe	154	0,304	212,5	47,6	4,11	361	840	167	123	17,7	15,2	5,7
				214,4	42,5	2,11	552			114	12,2	10,4	
Merlin . . .	locom.	170	0,170	283,1	129,9	4,80	347	410	70	224,6	17,3	16,6	5,9
				294,3	74,5	2,29	438			198	14,1	13,1	
Niel . . .	locom.	182	0,360	177,5	63,2	6,38	700	?	198	232	8,6	8,2	6,1
				175,5	39,4	1,96	1679			140	3,6	3,3	

(1) Lampe non comprise.

46° Principaux résultats du Concours de Berlin organisé en 1894,
entre moteurs à pétrole par MM. Hartmann et Schöttler.

Pouvoir calorifique inférieur du pétrole américain employé : 10.767 calories.
Densité : 0,797.

MOTEURS	PISTON		Puissance du moteur	Vitesse en tours	Travail effectif	Consommation par cheval-heure	Consommation à vide par cheval nominal
	Diamètre	Course					
	mm.		Chevaux		Chevaux	Grammes	Grammes
Daimler . .	175	0 ^m ,280	4	240	3,25	609	150
Otto	155	0,240	4	230	4,00	575	260
Dürkopp . .	175	0,280	4	230	4,46	585	480
Hille	130	0,230	3	240	3,12	450	230
Koerting . .	175	0,275	4	220	4,15	600	210
Robey	153	0,229	2	300	1,82	1.190	?
Altmann . .	280	0,400	12	200	12,10	423	270
	230	0,400	8	180	8,16	378	370
Swiderski .	250	0,250	10	250	10,00	375	160
Langensiepen.	220	0,260	8,5	280	7,82	518	450

Comparaison des consommations pour diverses charges.

MOTEURS	Demi-charge		Charge entière		Charge maximum
	Travail	Consomma- tion	Travail	Consomma- tion	Travail
	Chevaux	Grammes	Chevaux	Grammes	Chevaux
Daimler	1,69	735	3,25	609	3,34
Otto	2,09	787	4,00	575	4,44
Dürkopp	2,24	947	4,46	585	5,30
Hille	1,53	720	3,12	450	4,10
Koerting	2,15	726	4,15	600	5,24
Robey	0,97	980	1,82	1.190	2,68
Altmann	6,37	634	12,1	423	16,78
Swiderski	5,00	500	10,00	375	10,75

47° Principaux résultats du Concours de Moteurs à pétrole de Cambridge, organisé le 21 juin 1894, par MM. Capper, Ewing et Grenville.

MOTEURS	PISTON		PUISSANCE	VITESSE en tours par minute.	TRAVAIL effectif	Consommation par cheval- heure effectif		CONSOMMATION à vide	RENDMENT organique
	Dia- mètre	Courso				Lampe comprise	Lampe non comprise		
Britannia	190 ^{mm}	0 ^m ,330	7 chev.	235	6 ^h ,64 4,47	680 ^{gr} 690	— 607 ^{gr}	650 ^{gr}	0,74
Campbell	190	0,305	6	240	4,48 2,74	— 544	— —	615	0,80
Clarke-Chapman	190	0,318	6	350	—	—	—	—	—
Crossley	178	0,381	7,5	210	7,03 3,80	372 600	313 —	—	0,88
Fielding et Platt	210	0,406	8	170	5,88 3,76	— —	— —	—	—
Hornsby	254	0,381	8	230	8,47 4,48	444 685	— —	—	0,83
Samuelson	203	0,305	8	240	—	—	—	—	—
Capitaine (Tolch)	184	0,190	5	300	—	—	—	—	—
Wells (Premier)	210	0,381	4	165	6,62 3,50	522 753	467 650	—	0,89
Trusty	171	0,330	5	250	4,95 2,56	508 680	463 600	—	0,73
Knight et Weyman	190	0,356	6	250	6,21	—	—	—	—

Pouvoir calorifique inférieur du pétrole employé (Russolène : 10 313 calories.
(1 litre équivaut à 970 litres de gaz de Londres).

Densité : 0,8239.

Flash Point : 30°.

Une comparaison instructive a été établie entre deux huiles : la Russolène et la

Broxburne et elle a montré l'influence de la nature du pétrole sur les résultats obtenus.

CHALEUR	MOTEUR CROSSLEY	
	Russolène (10.313 calories)	Broxburne (10.277 calories)
Transformée en travail effectif	16,7	17,5
Transformée en travail indiqué	18,9	19,2
Emportée par l'eau	24,0	20,7
Emportée par les gaz de la décharge, etc.	57,1	60,1
	100,00	100,00

48° Résultats des expériences faites à Paris, par M. A. Witz, en décembre 1894, sur un moteur-gazogène Bénier.

Diamètre du cylindre moteur : 300 millimètres.
 Course du piston : 0^m,4395.
 Diamètre de la pompe à air : 400 millimètres.
 Diamètre de la pompe à gaz : 290 millimètres.
 Course des pistons : 0^m,209.
 Vitesse de régime : 150 tours.
 Puissance nominale : 15 chevaux.

I. — MARCHÉ A L'ANTHRACITE
 (8.000 calories).

Date de l'essai : 27 novembre 1894.
 Durée : 12 heures.
 Vitesse moyenne en tours par minute : 150,79.
 Charge moyenne du frein : 22^k,350.
 Poids mort : 8^k,650.
 Charge nette : 31^k,000.

Travail effectif : 14 ch. 59.
 Pression moyenne des diagrammes : 2^k,65.
 Travail indiqué : 27 ch. 60.
 Compression : 4^k,54.
 Pression explosive : 7^k,26.
 Rendement organique : 0,53.

Consommation totale de charbon. . . 133 kilogrammes.
 Charbon non brûlé retiré du cendrier . . . 8 »
 Dépense réelle de charbon. 125 kilogrammes.
 Cendres. 10 »
 Dépense de charbon pur 115 kilogrammes.

Dépense totale d'eau (au laveur 4^{m3},032, au cylindre 6^{m3},048) : 10^{m3},080.
 Consommation de charbon par cheval-heure effectif : 714 grammes.
 (En charbon pur, cendres déduites) : 657 grammes.
 Consommation d'eau par cheval-heure effectif : 57 litres.

Température de la paroi externe du gazogène : 177°.
Température du laveur : 40°.
Température du gaz arrivant au cylindre : 20°.
Température du cylindre : 69°.
Température des gaz d'échappement : 300°.
Température de l'eau froide d'alimentation : 11°.
Pouvoir calorifique supérieur du gaz pauvre par mètre cube : 1 149 calories.
(à 0° et 760 millimètres, vapeur d'eau condensée.)

Bilan de la marche à l'anhracite.

Chaleur emportée par l'eau de réfrigération : 1.334 calories.
Chaleur emportée par l'eau du laveur : 986 calories.
Chaleur emportée par l'eau utilisée : 635 calories.
Chaleur emportée par la décharge et par toutes les autres pertes (par différence) :
2.757 calories.
Chaleur disponible de 714 grammes d'anhracite : 5.712 calories.
Rendement thermique effectif : 11,3 0/0.

II. — MARCHÉ AU COKE.

Le coke brûlé dans cet essai était du coke cassé, de la Compagnie Parisienne du Gaz, il donnait environ 10 0/0 de cendres. Nous avons constaté qu'il renfermait 6,5 0/0 d'eau. L'hectolitre pesait 44 kilogrammes.

Pouvoir calorifique supérieur : 6.800 calories.

Date de l'essai : 22 décembre 1894.

Durée : 10 h. 25 m.

Vitesse moyenne en tours par minute : 147,18 tours.

Charge moyenne du frein. 23^k,350.

Poids mort 8^k,630.

Charge nette. 32^k,000.

Travail effectif : 14 ch. 70.

Consommation totale de coke . . . 113 kilogrammes.

Cendres. 11 »

Dépense de coke, cendres déduites. 104 kilogrammes.

Consommation de coke par cheval-heure effectif : 752 grammes.

En coke, sec et pur, eau et cendres déduites : 636 grammes.

Pouvoir calorifique supérieur du gaz par mètre cube (à 0° et 760 millimètres, vapeur d'eau condensée) : 1.035 calories.

Le bilan de la marche au coke s'établit comme il suit :

Chaleur utilisée : 635 calories.

Chaleur disponible de 752 grammes de coke : 5.113 calories.

Rendement définitif : 12,4 0/0.

Prix comparatif du combustible consommé { anthracite. . . 0 fr. 025.
par cheval-heure effectif. } coke de coke. 0 fr. 021.

Dépense d'huile, par cheval-heure effectif :

Valvoline : 3 grammes.

Huile minérale ordinaire : 10 grammes.

Tours par minute (vitesse de régime) : 175 tours.
 Vitesse relevée dans l'essai : 177,0.
 Impulsions par minute 82,7.
 Passages à vide : 5,8.
 Pression moyenne : 4,63 kilogrammes.
 Travail indiqué : 17,21 chevaux.
 Travail effectif : 14,56
 Rendement organique : 0,85.
 Consommation de pétrole par cheval-heure effectif : 373 grammes.
 Température de la décharge : > 550.
 Chaleur transformée en travail : 0,196.
 — emportée par l'eau de réfrigération : 0,354.
 — — par les gaz de la décharge : 0,450.

51° *Résultats des essais sur deux moteurs Tangye*, par M. A. Witz,
 à l'Hotel de Ville de Roubaix, le 26 janvier 1895 (*).

Diamètre des pistons : 292 m/m, 1.
 Course : 0^m, 4572.
 Vitesse de régime : 178 tours par minute.

MOTEUR I

Durée de l'essai : 5 heures, 30 minutes.
 Vitesse moyenne : 171,92 tours.
 Explosions par minute : 72,71.
 Pression moyenne aux diagrammes : 28 ch. 67.
 Consommation de gaz par cheval-heure indiqué : 522 litres.

MOTEUR II (identique au premier).

Durée de l'essai : 40 minutes.
 Vitesse moyenne : 172,15 tours par minute.
 Explosions par minute : 82,02.
 Pression moyenne aux diagrammes : 6^k, 56.
 Travail indiqué : 36 ch. 60.
 Consommation de gaz par cheval-heure indiqué : 444 litres.
 Huile par cheval-heure indiqué : 6 gr. 80.
 Eau par cheval-heure indiqué : 30 litres.
 Rendement organique : 0,87.

La différence des résultats obtenus avec deux moteurs, identiques de tout point, est due uniquement à ce que le moteur II recevait un mélange plus riche ; ce dosage était donc plus avantageux ; les chiffres suivants en témoignent.

	Compression	Pression explosive
Moteur I	4 ^k , 95	16 ^k , 63
Moteur II	4 ^k , 55	20 ^k , 34

1. Le pouvoir calorifique de ce gaz n'a point été déterminé dans cet essai contrairement à notre habitude, par ce que le contrat portait que la qualité du gaz serait celle qui correspond aux conditions photométriques prévues par le cahier des charges de la Compagnie Desclée frères, qui éclaire Roubaix ; la vérification a donc porté sur l'exécution de cette clause, qui a été satisfaite. On peut en inférer que le gaz avait un pouvoir supérieur de 5 250 calories environ par mètre cube à 0° et 760 millimètres, vapeur d'eau condensée.

Un essai a été fait en marche combinée des deux machines, et il a conduit aux relevés ci-dessous.

Durée de l'épreuve : 4 heures.

Nombre de révolutions par minute	{ Moteur I : 154,58.
	{ Moteur II : 150,27.
Nombre d'explosions par minute.	{ Moteur I : 70,06.
	{ Moteur II : 70,71.
Pression moyenne	{ Moteur I : 5 ^k ,77.
	{ Moteur II : 6 ^k ,32.
Travail indiqué	{ Moteur I : 27 ch. 53.
	{ Moteur II : 34 ch. 19.
	Travail total : 61 ch. 72.

Watts moyens produits : 28,618.

Consommation de gaz par kilowatt-heure : 988 litres.

52° *Résultats des expériences faites à Zurich, en 1895, sur un moteur Crossley, alimenté de gaz pauvre, par M. Meyer.*

Diamètre du cylindre : 429 millimètres.

Course du piston : 0^m,607.

Nombre de tours normal par minute : 160.

Puissance nominale : 50 chevaux.

Durée des expériences	9 ^h ,43 ^m	7 ^h ,44 ^m	8 ^h ,14 ^m
Nombre moyen de tours par minute.	169,0	165,4	159,1
Nombre d'explosions	60,4	77,5	58,1
Pression moyenne	4 ^k ,29	4 ^k ,18	4 ^k ,52
Travail indiqué.	51 ^{ch} ,1	63 ^{ch} ,7	51 ^{ch} ,6
Travail effectif	40,9	57,6	43,6
Rendement organique.	0,80	0,90	0,84
Charbon par cheval- heure indiqué	{ gazogène 480 ^k	{ gazogène 500 ^k	{ gazogène 470 ^k
	{ chaudière 50	{ chaudière 60	{ chaudière 70
Charbon par cheval- heure effectif	{ gazogène 600	{ gazogène 550	{ gazogène 560
	{ chaudière 70	{ chaudière 70	{ chaudière 80
Gaz à 0° et 760 ^{mm} par cheval-heure effectif	2.500 lit.	2.500 lit.	—
Pouvoir calorifique inférieur du gaz.	1.290 cal.		

53° *Résultats d'un essai de réception d'un moteur Charon fait par M. A. Witz, à Solre-le-Château (Nord) le 18 février 1895.*

Diamètre du cylindre : 185 millimètres.

Course du piston : 0^m,360.

Vitesse de régime : 162 révolutions par minute.

Frein à bascule.

Longueur du bras du levier : 0^m,998.

Pouvoir supérieur du gaz : 5.727.

Moteurs à gaz et à pétrole. — Witz.

Pression atmosphérique : 741 millimètres.

Température moyenne du compteur : 8°,6.

Pression au compteur : 40 millimètres.

N°	Durée de l'essai	Nombre de tours	Gaz consommé	Charge nette du frein
1	30 minutes	4.832	1.126 litres	21 kilogrammes
2	30 »	4.846	1.113 »	20 »
3	60 »	9.762	2.199 »	19 »
4	30 »	4.872	904 »	15 »
5	30 »	4.916	751 »	10 »
6	10 »	1.634	210 »	5 »
7	10 »	1.628	194 »	0 »

Le calcul de ces données conduit aux résultats suivants :

N°	Vitesse moyenne	Consommation horaire		Travail en chevaux effectifs	Dépenses par cheval-heure effectif
		Consommation brute	A 45° et 760 m/m		
1	161,1	2.256 litres	2.250 litres	4,71	478 litres.
2	161,5	2.226 »	2.220 »	4,50	493 »
3	162,7	2.197 »	2.193 »	4,31	509 »
4	162,4	1.808 »	1.803 »	3,39	532 »
5	163,9	1.502 »	1.498 »	2,23	657 »
6	163,4	1.260 »	1.256 »	1,14	1.102 »

54° Résultats d'expériences faites à Solre-le-Château, les 4 et 5 mars 1895, par M. A. Witz, sur un moteur Charon à deux cylindres.

Diamètre des cylindres : 380 millimètres.

Course des pistons : 0^m,600 millimètres.

Vitesse de régime : 153 tours par minute.

Frein à bascule.

Longueur du bras de levier : 1^m,792.

Poulie à irrigation, jante lubrifiée à l'huile.

Expériences du 4 mars.

Pression atmosphérique : 732 millimètres.

Pouvoir calorifique supérieur du gaz à 0° et à 770 millimètres : 5.842 calories

N° de l'essai	Durée de l'essai	Charge nette	Nombre de tours	Consommation de gaz	Température du compteur
1	1 heure	162 ^k , 5	9.134	27 ^{m³} , 600	6°, 6
2	2 ^h , 30 ^m	157, 5	22.998	64, 985	4, 9

Expériences du 5 mars.

Pression atmosphérique : 736 millimètres.

Pouvoir calorifique supérieur du gaz : 5.591 calories.

N ^o de l'essai	Durée de l'essai	Charge nette	Nombre de tours	Consommation de gaz	Température du compteur
3	1 heure	137 ^k , 5	4.652	24 ^{m³} , 750	2°, 2
4	—	107, 5	4.626	23, 410	4
5	—	77, 5	4.613	20, 820	5

Un dernier essai a été fait en n'utilisant qu'un seul cylindre :

6	30 minutes	37 ^k , 5	2.293	7 ^{m³} , 300	5°, 5
---	------------	---------------------	-------	----------------------------------	-------

Les résultats des calculs effectués sur ces données sont réunis dans le tableau synoptique suivant :

Numéro de l'essai	Charge nette k	Vitesse en tours par minute	Travail effectif en chevaux	CONSOMMATION DU GAZ			
				Horaire		Par cheval-heure effectif	
				Brute m ³	à 0° et 760 ^{mm} m ³	à 0° et 760 ^{mm} litres	en gaz à 2250 c. litres
1	162, 5	152, 23	61, 89	27,605	25,965	419	466
2	157, 5	153, 22	60, 42	25,994	25,594	407	453
3	137, 5	155, 07	53, 35	24,750	23,781	446	475
4	107, 5	154, 20	41, 48	23,410	22,342	539	574
5	77, 5	153, 77	29, 82	20,820	19,799	663	706
<i>Par un cylindre</i>							
	37, 5	152, 87	14, 35	14,600	13,858	964	1.026

La température des cylindres a varié de 89° dans le premier essai, à 69° dans le quatrième essai.

La température des gaz de la décharge s'est maintenue à 220°.

C'est à l'allure de 153,32 révolutions par minute, correspondante à un travail effectif de 60 ch. 42, que ce moteur donne le meilleur rendement; il ne consomme alors que 453 litres de gaz à 0° et 760 millimètres, ayant un pouvoir calorifique de 5.250 calories.

Rendement thermique effectif : 0,267.

55° *Essais faits sur un moteur Otto*, par MM. Haber et Weber
à Carlsruhe, en 1895.

Diamètre du piston : 171 millimètres.

Course : 0^m,34.

Vitesse normale : 238 tours.

Puissance nominale : 4 chevaux.

Type : à tiroir.

Chaleur reçue : 4.735 calories.

Chaleur dépensée.	{	transformée en travail	}	indiqué : 777 calories.
				effectif : 636 calories.
		emportée.		par l'eau : 2.400 calories.
				par la décharge : 1.558 calories.

Rendement thermique effectif : 13,4 %.

Consommation à vide : 1.310 litres.

Consommations en travail variable

Travail indiqué	Travail effectif	Consommation par cheval-heure effectif
chevaux	chevaux	litres
2,61	1,19	1.733
3,41	2,15	1.123
3,97	3,06	1,013
4,84	3,96	936

55° bis. *Résultats des essais faits au Cap Janet*, par MM. Stapter et Parvillée, sur un moteur Niel alimenté de gaz mixte Fichet et Heurtey, le 22 janvier 1896.

Diamètre du cylindre : 300 millimètres.
 Course du piston : 0^m,48.
 Nombre de tours par minute : 180.
 Diamètre des volants : 1^m,705.
 Diamètre intérieur du gazogène Taylor (Fichet et Heurtey) : 0^m,600.
 Surface de chauffe de la chaudière Field : 2 mètres carrés.
 Circonférence du frein, cordes comprises : 5^m,4349.
 Charge nette : de 91 kilogrammes à 104.
 Travail effectif (176 à 180 tours) : de 19,35 à 22,73 chevaux.
 Pression du gaz à la sortie du gazogène : 6 centimètres d'eau.
 Explosions par minute : 83 au plus.
 Durée de l'essai : 7 h. 30 m.
 Puissance moyenne : 22 ch. 01.
 Nature du charbon brûlé : coke à 10 de cendres et 4 d'humidité.
 Poids consommé : 128 kilogrammes.
 Consommation par cheval-heure effectif : 775 grammes.
 Cendres et humidité déduites : 666 grammes.

56° *Essai fait à Bâle*, le 9 avril 1896, par M. E. Meyer, sur un moteur alimenté de gaz pauvre.

Puissance nominale : 160 chevaux effectifs.
 Nombre de cylindres : 2.
 Diamètre des cylindres : 520 millimètres.
 Course des pistons : 0^m,760.
 Volume par cylindrée : 161^l,4.
 Chambre de compression : 41^l,9.
 Vitesse de régime : 140 tours par minute.
 Durée de l'essai : 10 heures.
 Vitesse moyenne en tours par minute : 137,74.
 Pression moyenne. { Premier cylindre : 3^k,52.
 { Deuxième cylindre : 3^k,70.
 Moyenne des moyennes : 3^k,61.
 Travail indiqué total : 178 ch. 3.
 Eau consommée par heure pour réfrigération. { Premier cylindre 1.950 litres.
 { Deuxième cylindre 2 130 litres.
 Température de cette eau : 9°,3.

Elévation de température de l'eau. } Premier cylindre : 38°,9.
 } Deuxième cylindre : 35°,3.
 Chaleur emportée par l'eau par heure : 151.100 calories.
 Eau de réfrigération consommée par cheval-heure indiqué : 22^l,9.
 Coke consommé. } au gazogène : 1.024 kilogrammes.
 } à la chaudière : 112 kilogrammes.
 Travail en eau montée : 131 ch. 9.
 Rapport du travail indiqué au travail en eau montée : 0,74.
 Consommation de coke par cheval- } dans le gazogène 0^k,574.
 heure indiqué } dans la chaudière : 0^k,063.
 } totale : 0^k,637.
 Consommation de coke par cheval- } dans le gazogène : 0^k,776.
 heure en eau montée } dans la chaudière : 0^k,085.
 } totale : 0^k,861.
 Consommation totale de coke par cheval-heure effectif : 0^k,740.
 Nature du coke : coke de gaz (Charbon de la Sarre).
 Pouvoir calorifique inférieur du coke par kilogramme : 7.338 calories.
 Pouvoir calorifique inférieur du gaz par mètre cube : 1.202 calories.
 Eau consommée par le } par heure : 1.042 litres.
 gazogène } par cheval-heure indiqué 5^l,85.
 Consommation de gaz par cheval-heure indiqué : 2.721 litres.
 Travail en eau montée par kilogramme de coke : 313.000 kilogrammètres.

Dans cette remarquable installation, le moteur commande par dix câbles de coton (de 50 millimètres de diamètre) une pompe à trois cylindres, mesurant 260 millimètres de diamètre et ayant 0^m,70 de course ; la vitesse de la pompe est de 60 tours par minute. On peut admettre que la pompe donne un rendement mécanique de 92 0/0 ; la transmission par câbles absorbe d'ailleurs environ 4 0/0 ; enfin le moteur a un rendement organique de 84 0/0. On a donc en définitive $0,92 \times 0,96 \times 0,84 = 0,74$: c'est le rapport trouvé entre le travail en eau montée et le travail indiqué par le moteur.

Le bilan de la machine s'établit comme il suit :

Chaleur emportée par l'eau de réfrigération.	25,9 0/0
Chaleur emportée par les gaz de la décharge et perdue par rayonnement.	54,8
Chaleur transformée en travail (indiqué)	19,3.
	100,0

57° *Essais comparatifs faits à Berlin en 1896 (avril à juin) par M. Pétréano, sur les consommations d'un moteur Pétréano de 4 chevaux en divers combustibles* (1).

Combustibles	Pouvoir calorifique	Consommation par cheval-heure indiqué	Prix (en Allemagne)	
			par unité	par cheval-heure indiqué
Gaz d'éclairage.	5.000 par M ³ .	380 à 450 litres.	12°,5 par m ³	5 à 6 cent.
Alcool à 90°.	6.000 par kilog.	320 à 400 gr.	25 cent. p. kg	10 —
— à 80°.	5.279 —	450 à 500 —	21 —	10 à 13 —
Benzol	2.400 —	190 à 200 —	37,5 —	6,5 —
Benzine	1.200 —	240 à 260 —	25 —	6 à 7 —
Pétrole (D=0,8)	10.500 —	255 à 280 —	21 —	5 à 7 —
Pétrole brut.	11.000 —	240 à 270 —	12,5 —	12,5 —

1. Ces chiffres sont extraits d'une communication faite par M. Pétréano à la Société allemande d'Agriculture, sous le titre « Vortrag über spiritus Gasmotoren und Vorführung eines solchen » ; ce travail a été inséré dans le tome XII du « Jahrbuch der Deutschen Landwirtschafts-Gesellschaft », 1897.

*58° Résultats des essais faits à l'usine des tramways de Lausanne
du 7 septembre au 6 décembre 1896, sous la direction de M. Palaz.*

Moteurs : Crossley.

Gazogènes : Taylor (Fichet et Heurtey).

Charbon employé : Anzin ou Charleroi criblé à 15 millimètres.

	Consommation de combustible	Kilowatts-heures produits
	kilogr.	kw.
Septembre.	23.181	24.283, 2
Octobre	45 267	47.871, 8
Novembre et décembre.	49 348	59.212, 9
Totaux	<u>117.746</u>	<u>131.367, 9</u>
Moyenne par kilowatt-heure		882 grammes.
Rendement de la dynamo.		0,89
Consommation par cheval-heure électrique.		649
— — effectif		577

Ces chiffres ont été relevés en marche industrielle pendant trois mois en tenant compte des périodes d'allumage et d'arrêt, et des consommations de nuit et de jour des gazogènes au repos.

*59° Résultats des essais de concours faits à Tervueren (Bruxelles)
en juillet 1897, sur moteurs et locomobiles à pétrole.*

	Moteurs			Locomobiles		
	Nugel et Hermann (Gnôme)	Capitaine	Société française de Vierzon	Swiderski	Société française de Vierzon	Hille
Puissance nominale.	5 chevaux	4 chevaux	4 chevaux	8 chevaux	8 chevaux	10 chev.
Diamètre du cylindre	200 ^m / _m	160 ^m / _m	180 ^m / _m	240 ^m / _m	250 ^m / _m	220 ^m / _m
Course du piston	0 ^m , 190	0 ^m , 170	0 ^m , 180	0 ^m , 240	0 ^m , 350	0 ^m , 400
Nombre de tours par mi- nute.	300	320	320	260	220	240
Poids du moteur	1 050 kil.	630 kil.	800 kil.	2.450 kil.	4.000 kil.	4.250 kil.
Consommation horaire (sur piston à vide).	1.430 gr.	740 gr.	1.590 gr.	1.670 gr.	2.180 gr.	1.140 gr.
Travail effectif	5 ^{ch} , 1	4 ^{ch} , 5	5 ^{ch} , 4	8 ^{ch} , 2	9 ^{ch} , 0	9 ^{ch} , 1
Vitesse relevée	288 tours	334 tours	354 tours	274 tours	219 tours	240 tours
Consommation (sur piston. par { à la lampe. 486 gr. 511 gr. 593 gr. 484 gr. 402 gr. 568 gr.						
cheval-heure { totale.	130 —	130 —	250 —	—	220 —	65 —
	616 —	641 —	843 —	—	622 —	633 —
Prix du moteur.	2.500 fr.	2.275 fr.	2.500 fr.	5 000 fr.	5.400 fr.	7.000 fr.

*60° Résultats des essais faits le 17 février 1897, sur un moteur Diesel,
par M. Schröter.*

Diamètre du cylindre : 250 millimètres.

Course du piston : 0^m,3985.

Diamètre du compresseur d'air : 70 millimètres.

Course du compresseur d'air : 0^m,200.
Longueur du levier de frein : 1^m,274.

	Plaine-charge		Demi-charge	
Nombre de tours à la minute . . .	171,8	154,3	154,1	158,0
Travail moteur indiqué en chevaux.	27,85	24,77	17,71	17,72
— compresseur —	1,29	1,17	1,14	1,20
— net	26,56	23,60	16,57	16,52
Charge du frein en kilogrammes.	65	65	35	35
Travail effectif en chevaux . . .	19,87	17,82	9,58	
Rendement organique	0,748	0,785	0,578	0,596
Durée de l'essai en minutes . . .	60	60	60	60
Consommation de pétrole par cheval-heure indiqué en grammes .	185	180	191	195
Consommation de pétrole par cheval-heure effectif	247	238	278	296
Chaleur transformée en travail indiqué	33,7 0/0	34,7 0/0	33,9 0/0	37,9 0/0
Chaleur transformée en travail effectif	25,2	26,2	22,5	22,6
Chaleur emportée par l'eau . . .	39,0	40,3	45,1	43,3
— — par la décharge des gaz	27,3	25,0	16,0	18,8
Température des gaz de la décharge	404°	378°	260°	260°

Densité du pétrole à 24° : 0,7895.

Provenance : Amérique.

Pouvoir calorifique supérieur par kilogramme : 10.935 à 11.120 calories.

Le rendement thermique effectif du moteur ressort donc, pour un pouvoir moyen de 11.015 calories, à :

$$\frac{270.000}{11.015 \times 0,238 \times 425} = 24,2 \text{ 0/0 } (')$$

Température de l'eau de circulation } à pleine charge : 22°,27.
à demi-charge : 19°,87.

Eau consommée à pleine charge : 1300 litres à l'heure.

61° *Expériences faites à l'usine électrique de la gare de Tergnier, les 14 et 15 mai 1897, sur un moteur Charon, à deux cylindres, par MM. Ranciat et Descamps.*

Diamètre des cylindres : 360 millimètres.

Course des pistons : 0^m,600.

Puissance : 60 chevaux.

Température ambiante : 16°.

Hauteur barométrique : 0^m,770.

Longueur du bras de levier du frein (équilibré) : 1^m,810.

Pression du gaz au compteur : 38 à 40 millimètres d'eau.

1. M. Schröter a annoncé un rendement meilleur en prenant pour pouvoir calorifique du pétrole son *pouvoir inférieur*, obtenu en retranchant les calories correspondantes à la condensation de l'eau de combustion.

ESSAI AU FREIN

	1 ^{er} essai	2 ^e essai	3 ^e essai	4 ^e essai
Durée de l'essai	1 heure	1 heure	1 heure	1 heure
Charge effective du frein .	79 kil.	106 kil.	132 kil.	158 kil.
Nombre de tours par minute	155	155	154	154
Consommation de gaz pendant l'essai en litres . .	24.180	24 410	25.940	28.920
Travail effectif en chevaux.	30.8	41.53	51	61.65
Consommation par cheval-heure en litres. . . .	785	587.7	503	469

	Essai	litres	litres		
Eau de circulation.	} n° 1.	740	à l'heure, soit	24	
		2.	1110	— —	27
		3.	1200	— —	23,5
		4.	1.500	— —	24,3

En travail électrique :

EXPÉRIENCE N° 1

	Compteur électrique	Compteur à gaz
A 9 ^h , 50 ^m	3 873 kilowatts.	33.400 litres.
10, 50 ^m	3.900 —	58 580 —
Différence =	$27 \times 8,35 = 22 \text{ kw.}, 545.$	Différence = 25.580 —
Le kilowatt est donc donné par	$\frac{25\ 580}{22.545} = 1.135$	litres de gaz.

EXPÉRIENCE N° 2

	Compteur électrique	Compteur à gaz
A 11 ^h , 6 ^m	3.906 kilowatts.	65.000 litres.
12, 6 ^m	3.946 —	94.030 —
Différence =	$40 \times 8,35 \text{ kw.}, 400$	Différence = 29.030 —

Le kilowatt est donc obtenu à la charge normale de 60 chevaux, avec

$$\frac{29\ 030}{33.400} = 865 \text{ litres.}$$

Le pouvoir calorifique du gaz n'est pas connu.

62° Procès-verbal des essais faits à Gisors (Eure), le 15 février 1898, sur un moteur Charon marchant au gaz Riché, par MM. Lemerle, Patoureau, Jacquin, Riché, etc.

Puissance du moteur : 12 chevaux.
 Diamètre du cylindre : 290 millimètres.
 Course du piston : 0^m,460.
 Nombre de tours par minute : 160.
 Pression au gazomètre : 50 millimètres d'eau.
 Il eut été utile de déterminer le pouvoir du gaz.

1° Frein de Prony à bascule.

Longueur du bras de levier	2 ^m ,02
Tare du frein	5 ^k ,500

Durée des essais	Charges réelles du frein	Nombre de tours par minute	Travail effectif	Consommation par cheval-heure effectif
1 heure	30 ^k ,0	164,5	13 ^{ch} ,95	807 ^{lit} ,4
1 —	14,5	168	6,87	1.171,0
30 minutes	22,5	167	10,46	892,9

2° Frein à cordes.

Diamètre du volant	1 ^m ,800
Diamètre de la corde	0,030
30 minutes	15 ^k ,0 170 3 ^{ch} ,25 1.901 lit.

63° Résultats des essais faits à Londres, le 23 mai 1898, sur un moteur Crossley marchant au gaz Riché (1) par M. Rössler, ingénieur de la Incandescent gas Light C° ;

Frein : à cordes.

Diamètre de la poulie = D : 1^m,400.

Diamètre de la corde = e : 0^m,020.

P et p : charge et décharge du frein ;

n : nombre de tours par minute.

Durée minutes	P kil.	p	n	Travail effectif chev.	Consommation de gaz par cheval-heure effectif litres
15	31,500	5,500	222	5,72	990
15	29,150	5,000	226	5,41	1.018
15	24,900	4,000	224	4,63	1.280
15	16,000	2,000	224	3,10	1.521
15	10,000	1,000	200	1,78	1.906
15	5,500	1,500	216	0,85	3,495
30	à vide	à vide	218	0	

64° Résultats des essais faits en marche industrielle, sur un gazogène Pierson, installé à l'imprimerie L. Danel à Loos (Nord), les 18, 19 et 20 juin 1898, par M. A. Witz.

Ces essais avaient pour objet de déterminer la puissance et la consommation de ce gazogène dans les conditions normales et habituelles de son fonctionnement.

Charbon employé : Braisette Lagrange d'Anzin.

Hauteur de la cuve du gazogène : 1^m,300.

Diamètre : 0^m,500.

Surface de chauffe de la chaudière : 2 mètres carrés.

L'appareil ne comporte ni surchauffeur de vapeur, ni réchauffeur d'air : on exige une épuration complète du gaz.

1. Nous empruntons ces chiffres à l'ouvrage de MM. Vigreux et Bardolle : « Le Gaz Riché », Paris, Masson, 1898.

Première journée : 18 juin.

Durée du travail : 11 heures, y compris 1 heure d'arrêt des moteurs.

Consommation de charbon : 186 kilogrammes.

Consommation de coke : 41^k,5.

Consommation d'eau : 206 kilogrammes.

Production du gaz : 896,4 M³ à 0° et 760 millimètres.

Pouvoir calorifique du gaz : 1208 calories.

Arrêt, feux couverts :

Durée de l'arrêt : 37 heures.

Consommation de charbon : 84 kilogrammes.

Consommation de charbon par heure : 2^k,3.

Deuxième journée : 20 juin.

Durée du travail : 11 heures, y compris 1 heure d'arrêt des moteurs.

Consommation de charbon : 204 kilogrammes.

Consommation de coke : 35^k,5.

Consommation d'eau : 174 kilogrammes.

Production de gaz : 892,0 M³ à 0° et 760 millimètres.

Pouvoir calorifique du gaz : 1283 calories.

65° *Résultats principaux des essais faits à la Société Cockerill à Seraing, les 19 et 20 juillet 1898, sur un moteur Simplex alimenté par des gaz de hauts fourneaux, par M. A. Witz.*

Ce moteur était alimenté par les hauts fourneaux de la Société Cockerill, sans qu'on se préoccupât de leur allure, qui était l'allure courante.

Le moteur avait les dimensions suivantes :

Diamètre du cylindre : 0^m,800.

Course du piston : 1^m,000.

Vitesse de régime : 105 tours par minute.

Diamètre du frein, corde comprise : 1^m,546.

Circonférence : 4^m,857.

L'essai a duré 24 heures durant lesquelles on a relevé les chiffres moyens ci-dessous :

Vitesse moyenne en tours par minute : 105,20.

Charge moyenne nette du frein : 1595^k,45.

Travail effectif moyen : 181 ch., 16.

Nombre moyen d'admissions : 47,00 par minute.

$$\text{Proportion} = \frac{47}{52,6} = 89,3 \text{ 0/0.}$$

Cinq essais de consommation ont donné les moyennes notées dans le tableau synoptique ci-joint.

Consommation à 0° et 760 ^m / _m par heure	Charge du frein	Vitesses en tours par minute	Travail effectif	Pouvoir calorifique du gaz	Consommation par cheval-heure effectif
m ³	k.		Chevaux	calories	m ³
576	1.619,5	104,32	182,34	1.001	3,159
605	1.618	105,90	184,94	978	3,271
611	1.626	102,20	179,36	993	3,407
616	1.574	105,40	179,06	987	3,440
618	1.551	109,54	183,38	999	3,370
Moyennes : 605	1.597,7	105,47	181,82	981	3,329

Les consommations d'eau ont été les suivantes par cheval-heure effectif.

Aux scrubbers : 30 litres.

Au cylindre : 72 litres.

La dépense de lubrifiant a été de 15 grammes d'huile et de 2,3 grammes de graisse solide par cheval-heure effectif.

66° *Expériences faites sur un moteur Crossley le 1^{er} février 1898, par M. C. Hopkinson, à Manchester.*

Diamètre du cylindre : 406,4 millimètres.

Course du piston : 0^m,5334.

Nombre de tours : 210 par minute.

Durée de l'essai : 3 heures.

	Travail électrique	Travail effectif	Consommation de gaz	
			par cheval-heure électrique	par cheval-heure effectif
	Chevaux		Litres	Litres
1 ^{re} heure . .	56,7	63,0	470	423
2 ^e — . .	57,24	63,9	467	421
3 ^e — . .	57,64	64,0	465	419

Les chevaux sont de 75,9 kilogrammètres par seconde.

Le pouvoir du gaz a été estimé à 5740 calories; il est regrettable qu'il n'ait pas été l'objet d'une détermination exacte.

67° *Résultats des essais effectués le 4 septembre 1898, sur un moteur Charon et un gazogène Taylor à aspiration, par M. Fischesser.*

Diamètre du cylindre : 430 millimètres.

Course du piston : 0^m,630.

Puissance nominale au gaz de ville : 43 chevaux effectifs.

Charbon : anthracite. Composition	{	carbone fixe	=	91,75
		carbone volatil	=	6,25
		cendres	=	2
				<hr/>
				100,00

Pouvoir calorifique probable : 8290 calories.

Frein de Prony : à bascule.

Longueur du bras de levier : 1^m,50.

Charge nette : 116 kilogrammes.

Nombre de tours par minute : 153,8.

Durée de l'essai : 4 heures.

Anthracite consommé : 65 kilogrammes.

Travail effectif : 37, 188 chevaux effectifs.

Consommation par cheval-heure effectif : 437 grammes.

68° *Résultats des expériences faites à Differdange, les 5 et 6 octobre 1898, par M. A. Witz, sur un moteur de la Compagnie Berlin-Anhalt.*

Diamètre du cylindre : 430 millimètres.

Course du piston : 0^m,700.

Nombre de tours par minute : 160,6.

Pouvoir calorifique supérieur du gaz : 1046 calories.

Compression : 8^k,5.

Pression explosive maximum : 17 kilogrammes.

Nombre d'admissions : 91 0/0.

Kilowatts produits : 41,250.

Travail effectif = $\frac{41250}{640} = 64,45$ chevaux.

Gaz consommé par cheval-heure effectif : 2825 litres.

Rendement thermique effectif : 21,5 0/0.

69° *Essais de consommation faits à Cannes, le 23 novembre 1899, par M. Dubiau, ingénieur de l'Association des propriétaires d'appareils à vapeur du Sud-Est, sur un moteur Crossley.*

Diamètre du cylindre : 470 millimètres.

Course du piston : 0^m,615.

Nombre de révolutions par minute : 200.

Nombre d'explosions : 79 = 72 0/0.

Frein : à cordes.

Diamètre de la poulie de frein : 1^m,682.

Diamètre du câble : 0,050.

Diamètre efficace : 1^m,732.

Charge du frein 471^k,0

Décharge au dynamomètre. 34,6

Charge nette 436,4

Travail effectif : 105,536 chevaux.

Consommation moyenne de gaz par cheval-heure effectif : 497,4 litres.

Il est regrettable que, dans cet essai, on n'ait relevé ni la pression du gaz, ni sa température, ni surtout son pouvoir calorifique.

Travail indiqué : 117,850 chevaux.

Rendement organique 0,895.

A la même vitesse de 200 tours, le moteur a développé 116,8 chevaux effectifs par 86 explosions par minute et 120,9 chevaux par 88 explosions.

70° *Expériences faites à Seraing, les 20 et 21 mars 1900, par M. Hubert, sur un moteur Delamare-Deboutteville et Cockerill.*

Diamètre du cylindre : 1300 millimètres.

Course du piston : 1^m,400.

Frein : à câbles.

Diamètre de la poulie : 3^m,010.

Largeur totale des câbles : 0^m,600.

Épaisseur des câbles : 0,032.

Diamètre utile du frein : 3,042.

Charge nette du frein : 2869 kilogrammes.

Nombre moyen de tours par minute : 94,37.

Travail effectif : 575,00 chevaux.

Compression : 9^k,5.

Pression moyenne aux diagrammes 6^k,975.

Nombre d'admissions par minute : 41,90.

Travail indiqué : 786,16 chevaux.

Rendement organique : 0,7314.

Température des gaz } l'admission : 9°.
 } à l'échappement : 508°.

Température de l'eau de réfrigération { à l'entrée : 7°,86.
 } à la sortie : 33°,17.

Pouvoir calorifique supérieur du gaz (détermination par M. Witz) : 984,4 calories.

Consommation de gaz par { cheval-heure indiqué : 2556 litres.
 } cheval-heure effectif : 3495 —

Consommation d'eau par cheval-heure effectif { au cylindre : 56,8 litres.
 } au piston. . 12,7 —

Rendement thermique { indiqué : 25,2 0/0.
 } effectif : 18,3.

Ce moteur a pu développer 670 chevaux effectifs par 99,2 admissions 0/0.

71° *Résultats des expériences faites sur un moteur Stockport, par M. Mathot, le 24 avril 1900, à Namur.*

Diamètre du cylindre : 330 millimètres.

Course du piston : 0^m,480.

Puissance nominale : 50 chevaux effectifs par 220 tours à la minute.

Compression : 5^k,5.

Pression explosive : 25 à 30 kilogrammes.

Pression moyenne au diagramme : 6^k,00.

Diamètre du volant : 2^m,450.

Diamètre de la corde du frein : 20 millimètres.

Diamètre du frein : 2^m,470.

Charge 120^k

Décharge. . . . 3^k,5

Charge nette. . . 116^k,5.

Nombre de tours par minute : 220.

Nombre d'explosions : 94 0/0.

Travail effectif : 50,2 chevaux.

Consommation de gaz par cheval-heure effectif à 0° et 760 millimètres : 443,2 litres.

Consommation à demi-charge : 553,9 litres.

Le pouvoir du gaz n'a pas été mesuré.

72° *Expériences faites sur un moteur Millot, les 14 et 15 mai 1900, à Montereau, par M. A. Witz.*

Diamètre du cylindre : 185 millimètres.

Course du piston : 0^m,185.

Frein : à cordes.

Diamètre du volant. . . 0^m,896

-- des cordes . . . 0^m,010

— efficace . . . 0^m,906.

Pétrole : oriflamme.

Densité à 12° : 0,810.

Pouvoir calorifique supérieur : 11038 calories.

Nombre de tours par minute : 324,19.

Durée de l'essai : 3 heures.

Charge du frein : 26^k,29.

Travail effectif : 5,39 chevaux.

Température du cylindre : 100°.

Eau vaporisée par heure dans l'enveloppe : 7.77 grammes.

Consommation de pétrole par cheval-heure effectif : 339 grammes.

La température du cylindre étant de 53°, la consommation de pétrole a monté à 378 grammes : l'influence de la paroi est donc manifeste.

Résultats des essais effectués sur un groupe électrogène Charon — Société alsacienne, le 12 juin 1900, à Fives, par M. A. Witz.

Diamètre du cylindre : 430 millimètres.

Course du piston : 0^m,630.

Nombre de tours par minute : 153,7.

Dynamo : 110 volts, 260 ampères.

Kilowatts développés : 22,264.

Travail effectif : $\frac{22,264}{0,618} = 36,03$ chevaux.

Pouvoir calorifique supérieur du gaz : 5192 calories.

Consommation { par cheval-heure effectif : 516 litres.
par kilowatt-heure : 835 litres.

73° *Expériences faites à Cassel (Nord), le 28 août 1900,*
sur un gazogène Pierson et des moteurs Crossley, par M. A. Witz.

Gazogènes : soufflés du système Pierson.
 Moteurs : Diamètre du cylindre : 292 millimètres.
 Course du piston : 0^m,5334.
 Nombre de tours par minute : 170.
 Durée de l'essai : 6 heures.

Service : station centrale de tramway, avec batterie d'accumulateurs.

Pouvoir supérieur du gaz : 1.243 calories.

Charbon du gazogène : braisette Lagrange, d'Anzin (30/50). (Cendres = 10 0/0 ; humidité = 1 0/0.)

Poids de l'hectolitre : 76^k,5.

On a brûlé dans le foyer de la chaudière des fines d'anthracite et les escarbilles extraites par criblage des cendres du gazogène.

		NOMBRE		Pression moyenne kil.	Travail indiqué chevaux
		de tours	d'admissions		
Moteurs .	A	165,82	68,31	5,98	32,40
	B	166,42	63,25	5,51	27,68

Travail total effectif : 50 ch. 96.

Rendement organique : 0,85.

Kilowatts moyens : 31,282.

Consommation de charbon par cheval-heure effectif : 659 grammes.

Consommation de charbon par kilowatt : 1.073 grammes.

Quantité d'eau vaporisée par kilogramme de charbon au gazogène : 1^k,35.

Pression de la vapeur : 4^k,5.

Vapeur produite par kilogramme de menus et d'escarbilles : 4 kilogrammes.

Les gazogènes et moteurs ne travaillaient pas à pleine charge.

74° *Résultats des essais faits par MM. Handcock et Dykes, sur un gazogène*
Dowson et un moteur Stockport, à Gravesend, le 27 septembre 1900.

Durée de l'essai : 36 heures.

Travail électrique moyen : 40,85 kilowatts.

Chevaux effectifs moyens : 64,4 kilowatts.

Watts par cheval-heure effectif : 634.

Consommation d'anthracite. } par kilowatt-heure : 844 grammes.
 } par cheval-heure effectif : 535 grammes.

Consommation de coke. . . } par kilowatt-heure : 137 grammes.
 } par cheval-heure effectif : 87 grammes.

Consommation totale de combustible. { par kilowatt-heure : 981 grammes.
 } par cheval-heure effectif : 622 grammes.

Le moteur et le gazogène ne travaillaient guère qu'aux trois quarts de leur charge.

75° *Essais faits sur un moteur Campbell au pétrole en 1900,*
par M. Richard Stanfield.

Pétrole : Russolène à 0,824.

Puissance calorifique : 10.334 calories.

Numéro de l'essai	Durée	Nombre par minute		Pression moyenne au diagramme	Travail		Rendement organique	Consommation de pétrole	
		de tours	d'explosions		indiqué	effectif		par cheval-heure indiqué	par cheval-heure effectif
	heures			kilog.			grammes	grammes	
I	4	210,26	80,17	4,81	17,68	14,95	0,845	324	383
II	2	213,05	48,24	4,34	10,70	8,58	0,802	384	438
III	1	217,00	17,00	3,83	2,98	—	—	508	—
IV	1/2	207,80	93,2	4,64	20,06	17,86	0,890	311	350

76° Résultats des expériences faites par M. Goslich en 1900 sur l'alcool carburé (' à divers titres.

Nature de l'alcool	Travail effectif en chevaux	Nombre de tours par minute	Consommation en grammes par cheval-heure effectif	Économie par rapport à l'alcool pur
Allemand pur à 86°	8,809	225,0	420 gr.	—
Carburé 95 %	8,887	227,0	407 »	3,6 %
— 90	8,910	227,6	387 »	8,0
— 85	8,889	227,3	381 »	9,0
— 80	8,938	228,3	373 »	12,0
— 75	8,887	227,0	385 »	8,0
— 70	8,903	227,4	411 »	7,0

77° Résultats des essais faits sur un moteur Forward le 10 janvier 1901, par M. Mathot, à Anvers.

Diamètre du cylindre : 272 millimètres.
 Course du piston : 0^m,511.
 Nombre de révolutions par minute : 196.
 Nombre d'explosions : 93 0/0.
 Pouvoir calorifique supérieur du gaz : 5.618 calories.
 Pouvoir inférieur : 5.030 calories.
 Diamètre de la poulie de frein : 1^m,683.
 Travail effectif : 38 ch. 7.
 Consommation de gaz par cheval-heure effectif : 496 litres.
 Pression du gaz dans la conduite : 28 millimètres d'eau.
 Ce moteur a pu développer 41 chevaux effectifs.

1. *Journal des distillateurs Allemands*, cité par M. Périssé, Société des Ingénieurs Civils, 5 juillet 1901.

78° *Résultats des expériences effectuées à Paris, les 2 et 3 avril 1901,*
sur un moteur-gazogène Bénier, par M. A. Witz.

Moteur à gaz à deux temps, gazogène à aspiration.
Diamètre du cylindre moteur : 440 millimètres.
Course du piston : 0^m,650.
Frein : de Prony, levier en dessous.
Longueur du bras de levier : 2^m,507.
Charge nette : 95^k,3.
Durée de l'essai : quinze heures.
Nombre moyen de tours par minute : 126,62.
Travail effectif normal : 42 ch. 24.
Combustible : charbon d'Anzin.
Consommation par cheval-heure effectif : 694 grammes sans aucun décompte.
Ce moteur a pu développer, en surcharge, plus de 46 chevaux, après avoir marché douze heures en charge normale.
Il avait été pris en pleine marche industrielle ; après un arrêt de quinze heures, pendant lesquelles on avait consommé 1^k,380 de charbon par heure pour entretenir le feu, le moteur a été soumis à cette épreuve de quinze nouvelles heures consécutives, auxquelles se rapportent les chiffres ci-dessus.

79° *Expériences faites sur un moteur Cockerill à Seraing,*
le 25 mai 1901, par M. N. François.

Diamètre du cylindre : 600 millimètres.
Course du piston : 0^m,800.
Nombre de tours : 156 par minute.
Frein : de Prony, à bascule.
Gaz : de hauts-fourneaux.
Pression du gaz : 62^{mm},5 d'eau.
Compression : 7^k,5.
Pression explosive maximum : 22 kilogrammes.
Pression à fin de détente : 3 kilogrammes.
Régularité cyclique : $\frac{3,5}{100}$.
Travail effectif maximum : 139 ch. 5.
Travail effectif normal (85 admissions 0/0) : 107 chevaux.
Travail indiqué maximum : 184 ch. 4.
Rendement organique : 0,76.
Consommation de gaz par cheval-heure effectif : 3.340 litres.
Poids du volant : 11.650 kilogrammes.
Le pouvoir du gaz n'a pas été déterminé : il devait être voisin de 980 calories.

80° *Observations faites sur un groupe électrogène Winterthur-Ærlikon,*
par le directeur des usines d'Embrach, en 1901.

L'installation comprend trois moteurs à gaz pauvre de 100 chevaux et un moteur de 40 chevaux, qui actionnent chacun par courroie un alternateur triphasé d'Ærlikon.
Durée de la journée de travail : 11 heures.

Voltage moyen : 220 volts.
 Cos φ : 0,7.
 Rendement des génératrices : 0,90.
 Perte par la courroie : 4 0/0.
 Rendement total : 0,86.

	Juin	Juillet	Août
Ampères-heures totaux	77.811	81.432	83 827
Kilowatts réels	20.700	21 600	22.400
Chevaux-heure effectifs	32.600	34 000	35.400
Anthracite { aux gazogènes	16.191 ^k	15.244 ^k	16 474 ^k
consommé. { aux chaudières	2.447	1 943	1.662
Consommation totale	18.638	17.187	18.136
Consommation par cheval-heure effectif .	572 ^{gr}	505 ^{gr}	513 ^{gr}

Cette consommation renferme toutes les dépenses d'allumage, d'arrêts et autres.

81° *Résultats des expériences faites le 10 novembre 1901,*
sur un nouveau moteur Niel à Evreux, par MM. A. Morceau et A. Witz.

Diamètre du cylindre : 350 millimètres.
 Course du piston : 0^m,480.
 Frein : à cordes.
 Diamètre de la poulie de frein. 2^m,220.
 Diamètre des cordes. 0^m,034.
 Diamètre efficace. 2^m,254.
 Circonférence : 7^m,081.
 Compression préalable : 12 kilogrammes.

MARCHE A VIDE

Nombre de tours par minute : 219,06.
 Consommation de gaz par heure : 9.640 litres.
 Pression atmosphérique : 763 millimètres.
 Pression du gaz en eau : 36 millimètres.
 Température du gaz : 10°.
 Consommation à 0 et 760 millimètres : 9.331 litres.
 Volume d'eau de la réfrigération à l'heure : 255 litres.
 Température de l'eau à l'entrée de l'enveloppe : 12°.
 Température de l'eau à la sortie : 67°.
 Calories emportées par l'eau : 14.025.

MARCHE A PLEINE CHARGE

Durée de l'essai : une heure trois quarts = 105 minutes.
 Nombre de tours par minute : 213,36.
 Consommation de gaz rapportée à l'heure : 20.987 litres.
 Pression atmosphérique : 763 millimètres.
 Température du gaz : 10°,35.
 Consommation à 0 et 760 millimètres : 20.143 litres.
 Volume d'eau de réfrigération à l'heure : 419 litres.

Température de l'eau à l'entrée de l'enveloppe : 42°,5.
 Température de l'eau à la sortie : 71°,5.
 Calories emportées par l'eau par heure : 24.721.
 Charge nette au frein : 137^k,083.
 Travail effectif en chevaux : 46,02.
 Consommation de gaz par cheval-heure effectif : 439 litres.
 Pouvoir calorifique supérieur du gaz : 5.664 calories.
 Calories transformées en travail effectif : 635,3.
 Calories emportées par l'eau : 537.
 Calories disponibles : 2.486.
 Travail indiqué en chevaux : 53,54.
 Rendement organique : 0,859.
 Consommation de gaz par cheval-heure indiqué : 376 litres.

BILAN DU FONCTIONNEMENT

Pertes par réfrigération du cylindre.	0,216.
Pertes par la décharge des gaz et le rayonnement	0,388.
Pertes par les frottements.	0,141.
Rendement thermique effectif	0,255.
	1,000.

82° Résultats du Concours général des moteurs à alcool tenu à Paris, du 16 au 24 novembre 1901.

MOTEURS	Données de construction		Nature de l'alcool	Nombre de tours par minute	Travail effectif en chevaux	Alcool consommé par cheval-heure effectif	Température du cylindre	OBSERVATIONS
	diamètre	course						
Fritscher et Houdry . . .	85 ^{mm}	0 ^m ,160	pur	430,5	1,20	917 ^{gr}	60°,8	horizontal, allumage électrique par pile.
—	—	—	50 %	422,4	1,277	645	55°,4	horizontal, allumage électrique par pile.
Japy frères . . .	145	0 ^m ,160	pur	307,8	3,75	565	56°,5	horizontal, allumage électrique par pile.
—	—	—	50 %	307,3	3,78	409	34°,5	horizontal, allumage électrique par pile.
Merlin . . .	135	0 ^m ,240	pur	268,5	2,81	750	55°,1	horizontal, allumage électrique par pile.
—	—	—	50 %	278,8	2,92	529	48°,8	horizontal, allumage électrique par pile.
C ^{ie} Otto . . .	155	0 ^m ,240	pur	239,3	6,04	615	68°,5	horizontal, allumage par magnéto ; compression = 6 ^t .
—	—	—	50 %	239,5	6,05	435	81°,5	horizontal, allumage par tube.
Pruvost . . .	180	0 ^m ,360	pur	222,5	9,41	507	53°,1	horizontal, allumage par tube.
—	—	—	50 %	221,1	9,58	379	41°,8	horizontal, allumage par tube.
Brouhot et C ^{ie} .	240	0 ^m ,400	pur	181,2	14,68	491	68°,2	horizontal, allumage par tube.
—	—	—	50 %	180,7	16,11	382	82°,2	horizontal, allumage par magnéto.
Winterthur . .	290	0 ^m ,450	50 %	197,5	23,8	355	72°,4	horizontal, allumage par magnéto.

83° Expériences faites par M. Hubert, en novembre 1901, aux établissements Cockerill (Serang), sur un moteur Cockerill au gaz de hauts fourneaux.

Diamètre du cylindre : 850 millimètres.
 Course du piston : 1 mètre.

Frein : à bascule.
 Longueur du bras de levier : 1^m,654.
 Diamètre de la poulie à irrigation : 0^m,753.

Charge du frein	Nombre de tours par minu'o	Travail effectif en chevaux	Pouvoir calorifique du gaz	Consommation de gaz par cheval-heure effectif (en litres)	Pression moyenne au diagramme	Travail indiqué en chevaux	Rendement organique	RENDEMENT thermique		Température des gaz à la décharge
								indiqué	effectif	
0 ^k	101,37	0	925	0	0,4515	57,70	0		9 %	418°
232, 1	101,33	54,47	898	9.338	0,7950	101,59	0,536	7,6%	14,1	495
482, 1	100,90	112,66	901	5 094	1,1876	151,10	0,745	13,8	18,4	521
732, 1	100,00	169,35	860	3 856	1,6347	204,87	0,828	19,1	23,1	553
932, 1	99,64	215,10	970	3 445	1,9113	241,21	0,892	19,0	21,3	590
932, 1	99,74	215,31	928	3.418	1,9139	246,89	0,872	20,0	23,0	598

Compression préalable maximum : 10^k,7.
 Pression explosive : 16^k,75.
 Distribution à admission variable.

Le pouvoir du gaz est le pouvoir supérieur à volume constant ; il a été déterminé par M. Witz dans son laboratoire de Lille, à l'aide de la bombe eudiométrique.

84° *Résultats des expériences faites sur un moteur Letombe, le 28 décembre 1901, aux ateliers de Fives-Lille, par M. A. Witz.*

Moteur triplex : diamètre des cylindres = 600 millimètres.
 : course des pistons = 0^m,800.

Gazogène Letombe.

Combustible : braisette d'Anzin.

Frein : à cordes :

Diamètre de la poulie, pris au centre des brins : 3^m,540.

	A pleine charge	A demi-charge
Nombre de tours par minute	131,01	133,63
Charge nette du frein	919 ^k ,7	473 ^k ,0
Travail effectif en chevaux	294,51	156,19
Pouvoir calorifique supérieur du gaz .	1.357 calories	1.296
Consommation par cheval-heure effectif	2.145 litres	2 515

85° *Résultats des expériences faites sur un moteur Tangye à Birmingham, les 4, 5 et 7 avril 1902, par M. A. Witz.*

Diamètre du cylindre : 253^{mm},9.

Course du piston : 0^m,4826.

Frein : de Prony, levier inférieur.

Longueur du bras de levier : 1^m,983.

Essai de durée

	8 premières heures	9 ^e heure
Nombre de tours par minute	193,68	191,62
Nombre d'explosions	89,00	95,53
Pression moyenne avec diagramme	6 ^k ,018	6 ^k ,130
Travail indiqué	29,018 chev.	31,800
Charge nette du frein	46 ^k ,267	51 ^k ,256
Travail effectif.	24,824 chev.	27,210
Pouvoir calorifique supérieur du gaz	5 444 calories	5.448
Consommation { par chev.-heure indiqué.	411 litres	410
{ — — effectif	482 —	479
Rendement organique	0,85	0,85
Rendement thermique. { indiqué	28,4 0/0	28,4
{ effectif	24,2 0/0	24,3

Essais de consommation

	à pleine charge	à charge maximum
Durée de l'essai	1 heure	1 heure
Nombre de tours par minute	189,83	201,50
Nombre d'explosions	94,73	99,40
Pression moyenne aux diagrammes.	5 ^k ,89	6 ^k ,80
Travail indiqué.	30,296 chevaux	36,706
Charge nette du frein	50 ^k ,349	57,606
Travail effectif	26,481 chevaux	32,156
Pouvoir calorifique supérieur du gaz.	5.510 calories	5.398
Consommation { par ch.-h. indiqué.	405 litres	426
de gaz { — — effectif.	464 —	486
Rendement organique.	0,87	
Rendement thermique. { indiqué.	28,5 0/0	27,6
{ effectif.	24,9 0/0	24,2

Voici quelques données utiles à connaître pour apprécier le fonctionnement de ce moteur.

Compression	5 ^k ,84	7 ^k ,10
Pression explosive.	22,00	26,30
Pression moyenne	6,22	6,76
Valeur de γ en détente.	1,350	1,320
Température du cylindre	69°	65°
— des gaz de la décharge	»	524

Bilan du fonctionnement d'un essai

Chaleur transformée en travail effectif	23,9
— perdue en résistances passives.	13,6
— emportée par l'eau de réfrigération	35,3
— — par les gaz de la décharge	23,0
— perdue par rayonnement	4,2
	<hr/> 100,0

Ces expériences ont fait ressortir des conditions excellentes de rendement et de fonctionnement, correspondantes à une compression modérée et à une vitesse qui n'est nullement exagérée, excluant tout surmenage.

86° *Essais faits sur des moteurs et gazogènes Wintherthur, les 6, 7 et 8 mai 1902*, par MM. Allaire et Durang, à l'usine de Saint-Ouen des Tramways de la Seine.

Un moteur 100 chevaux à un cylindre; un moteur 200 chevaux, à deux cylindres.
Diamètre des cylindres : 520 millimètres.
Course des pistons : 0^m,760.
Nombre de tours par minute : 160.
Compression : 11^k,6.
Pression explosive : 19^k,4.
Pression moyenne aux diagrammes : 4^k,9.
Dynamôs de 146 et 280 ampères par 500 volts.
Gazogènes soufflés à injecteur de vapeur.
Combustible : anthracite Bonne-Espérance (15/22).
Pouvoir calorifique : 7.859 calories (5,5 de cendres).

1° *Groupe de 100 chevaux.*

Durée de l'essai : 9 heures.
Travail électrique : 64.514 watts.
Travail effectif : $\frac{64.514}{615} = 104 \text{ ch. } 83.$

Anthracite par cheval-heure effectif.	}	au gazogène :	329 grammes.
		à la chaudière :	66 »
Total . . .			395 grammes.

2° *Groupe de 200 chevaux.*

Durée de l'essai : 9 heures.
Travail électrique : 128,010 kilowatts.
Travail effectif : 208 ch. 15.

Anthracite par cheval-heure effectif.	}	au gazogène :	342 ^{gr} ,5
		à la chaudière :	55 ,5
Total . . .			398 grammes

Un essai de 8 heures des deux groupes accouplés a conduit à une consommation de 594^{gr},5 par cheval-heure effectif; 362 grammes au gazogène et 32^{gr},5 à la chaudière.

*87° Résultats du Concours international de moteurs à alcool
tenu à Paris du 24 mai au 1^{er} juin 1902.*

MOTEURS	Données de construction		Nature de l'alcool	Nombre de tours par minute	Travail effectif en chevaux	Alcool consommé par chev.-heure effectif		A vide	OBSERVATIONS
	Dia-mètre	Course							
	mm.	mm.				gr.	gr.	gr.	
Bronhot et C ^{ie} .	100	0,200	50 %	293	1,83	551	551	426	
C ^{ie} Duplex.	120	0,160	pur	247	1,86	788	1.192	812	
Aster . . .	105	0,120	50 %	1.143	6,14	387	494	1 083	Moteur à grande vitesse.
Winterthur .	155	0,220	50 »	346	5,15	326	399	327	
Pruvost . . .	180	0,360	50 »	185	8,35	337	395	644	
Brouhot et C ^{ie} .	240	0,400	50 »	203	16,34	233	308	2 598	
Beaupré . . .	185	0,185	pur	330	6,39	709	1.011	1.892	Locomobile.
Beaupré . . .	185	0,185	50 %	334	5,00	—	—	2.514	Locobatteuse.
Bardon. . . .	100	0,120	pur	756	15,42 ⁽¹⁾	140 ⁽¹⁾	(¹)221	1.792	Groupe électro-gène.

1. Ces consommations sont rapportées à l'hectowatt-heure ainsi que le travail.

*88° Essai d'un moteur Winterthur effectué à Bruxelles
le 4 juin 1902, par M. Mathot.*

Diamètre du cylindre : 270 millimètres.
 Course du piston : 0^m,430.
 Frein : de Prony à bascule.
 Longueur du bras de levier : 1^m,50.
 Charge nette : 54^k,5.
 Nombre de tours par minute : 200.
 Travail effectif : 22 ch. 9.
 Nombre d'explosions par minute : 96.
 Compression préalable : 12 kilogrammes.
 Pression explosive : 31 kilogrammes.
 Pression finale : 1^k,6.
 Pression moyenne au diagramme : 5^k,3.
 Pouvoir calorifique supérieur du gaz : 5.300 calories.
 Consommation de gaz par cheval-heure effectif : 385 litres.
 Rendement organique : 0,82.
 Rendement thermique effectif : 31 0/0.

ESSAI A VIDE

Nombre de tours par minute : 206.
 Nombre d'explosions : 22.
 Consommation de gaz : 2.613 litres.
 Ce même moteur a fourni le cheval-heure effectif de gaz pauvre, par 368 grammes d'antracite Bonne-Espérance, en développant 20 ch. 2 ; son rendement organique fut trouvé égal à 0,79.

89° *Résultats des expériences faites sur un moteur Letombe,*
le 16 juillet 1902, aux ateliers de Fives-Lille, par M. A. Witz.

Ces expériences sont le complément de celles qui ont été effectuées le 28 décembre 1901, dont les résultats ont été consignés ci-dessus (1).

Durée de l'essai : 10 heures.
Frein : de Frony à bascule.
Longueur du bras de levier : 3 mètres.
Charge nette : 516 kilogrammes.
Nombre de tours par minute : 135,56.
Combustible : anthracite de Charleroi.
Travail effectif net : 290 chevaux.
Consommation par cheval-heure effectif : 372 grammes.
Pouvoir calorifique supérieur de gaz : 1.318 calories.
Compression : 8^k,3.
Température des cylindres : 55° à 65°.
Température des gaz de la décharge : 347°.

90° *Essais faits à Bruxelles, le 3 novembre 1902, sur un moteur*
et gazogène par aspiration Winterthur, par M. Mathot.

Diamètre du cylindre du moteur : 310 millimètres.
Course du piston : 0^m,450.
Compression préalable : 8 kilogrammes.
Combustible : anthracite Bonne-Espérance (15/22).
Composition (C = 85,90 ; H = 3,10 ; O et Az = 4,50 ; Cendres = 6,50).
Pouvoir calorifique inférieur : 7.820 calories.
Durée de l'essai : 7 heures.
Nombre de tours moyen par minute : 221.
Nature du frein : frein de Prony à bascule.
Longueur du bras de levier du frein : 1^m,353.
Charge nette. . { durant 6 heures 76 kilogrammes.
 { durant la dernière heure. 90 kilogrammes.
Travail effectif. { durant 6 heures 30 ch. 4
 { durant la dernière heure. 36 chevaux.
Travail effectif moyen : 31 ch. 2.
Consommation d'anthracite par cheval-heure effectif : 318^g,50.
Dépression à l'aspiration : de 0^k,2 à 0^k,3.
Pouvoir calorifique supérieur du gaz à pression constante : 1.221 calories.
Rendement thermique effectif total : 23,7 0/0.
Nombre d'explosions relatif, à pleine charge : 82 0/0.
Pression moyenne au diagramme : 5^k,82.
Travail indiqué durant les 6 premières heures : 38 chevaux.
Rendement organique correspondant : 0,80.

Ce même moteur, alimenté de gaz de ville, estimé à 5.800 calories, a consommé 437 litres par cheval-heure effectif à pleine charge et 567 litres à demi-charge ; il a développé 40 chevaux par 95 0/0 d'explosions.

1. Voir page 484

91° Résultats des essais faits sur un moteur Catteau, à Roubaix
les 9 et 28 février 1703, par M. A. Witz

Diamètre du cylindre : 230 millimètres.
Course du piston : 0^m,460.
Freins : de Prony, à levier inférieur, équilibré.
Longueur du bras de levier : 1^m,473.
Poulie de frein : à irrigation intérieure.
Diamètre de la poulie : 80 centimètres.
Largeur de la jante : 15 centimètres.

Durée de l'essai min.	Consommation de gaz à 0° et 760 ^{mm} en litres rapportée à l'heure	Nombre de tours par minute	Nombre d'admissions par minute	Pouvoir calorifique du gaz	Charge du frein	Travail effectif en chevaux	Admissions pour cent	Consommation par cheval-heure effectif	
								litres de gaz	Calories
20	1757	207,6	21,0	5423	à vide	—	20,4	—	9528
20	1672	200,7	17,3	5647		—	17,2	—	9441
20	1656	217,6	19,8	5588		—	18,2	—	9254
60	4110	201,5	49,25	5423	21 ³ / ₅₀	8,91	48,9	461	2494
30	4971	195,5	59,57	5423	29,10	11,72	60,9	425	2297
60	6266	210,27	90,62	5588	37,05	16,02	86,2	391	2195
180	6716	199,87	89,31	5647	41,15	16,92	89,4	397	2242
120	6431	206,75	98,94	5784	41,10	17,48	95,7	368	2128

L'allumage étant électrique, les chiffres de consommation sont à considérer comme déterminés à allumage déduit.

Les résultats de ces essais méritent d'arrêter l'attention. Ils montrent d'abord que la consommation en litres de gaz d'un moteur ne constitue nullement une constante (1); la consommation en calories varie elle-même de 9254 à 9528. D'autre part, la consommation, relevée à pleine charge, de 368 litres par cheval-heure effectif correspond à un rendement thermique effectif de 29,8 pour cent.

Pression de compression moyenne : 13 kilogs.

— explosive — :

Rendement organique à pleine charge : 0,832.

V

Calculs d'établissement des moteurs.

Deux problèmes se posent dans la pratique :

Voici le premier: une machine étant donnée, et connaissant le diamètre du piston, sa course, le nombre de tours par minute et la nature du gaz qui l'alimente, dire quelle est sa puissance.

1. Voir à ce sujet ce que nous avons dit page 382.

Le second est réciproque du premier: un ingénieur reçoit la commande d'une machine d'une puissance déterminée et il cherche à calculer le diamètre du cylindre D , la course du piston C et le nombre de tours n nécessaire par minute, pour obtenir la puissance requise.

Il faudrait savoir résoudre ces deux problèmes aisément, rapidement et avec une exactitude suffisante; or on peut se demander si les théories générique et expérimentale exposées ci-dessus sont d'une application immédiate dans ce cas.

Nous sommes malheureusement obligés de répondre à cette interrogation par la négative.

L'aveu paraît humiliant pour la science; il ne faudrait cependant pas être injuste au point de lui reprocher la complication des problèmes qu'on lui pose.

Remarquons d'ailleurs que la question est mal résolue pour la machine à vapeur; il serait étonnant qu'elle le fût mieux pour le moteur à gaz, qui est né un siècle plus tard et dont le cycle est bien plus complexe.

Il est facile de se rendre compte des difficultés spéciales que présente le calcul des moteurs à gaz.

Le constructeur de machines à vapeur fixe lui-même la pression de vapeur qu'il emploiera, il connaît aussi la dépression produite au condenseur; de plus, il se donne le degré de détente qu'il veut réaliser pour obtenir le meilleur effet. Rien de tout cela n'est fourni au constructeur de moteur à gaz; la pression explosive dépendra de la richesse variable du gaz combustible et de la quantité de comburant dans laquelle il sera dilué; on ne connaît pas davantage la détente qui aura lieu, car elle dépendra de l'allumage et de l'explosion. De plus le régime de combustion est tributaire de nombreuses conditions, parmi lesquelles la compression préalable est la plus effective: la diffusion du combustible dans le comburant, la forme de la chambre d'explosion, la vitesse du piston, l'action de la paroi sont d'autres éléments dont il ne faut pas méconnaître l'influence.

Pour la machine à vapeur, Poncelet avait prescrit de calculer le travail d'un coup de piston en traitant la vapeur comme un gaz soumis à la loi de Mariotte: il appliquait la loi $p v = \text{constante}$. Pour les moteurs à gaz, la loi est beaucoup moins simple car elle est exprimée par la formule $p v^\gamma = \text{constante}$, dans laquelle γ varie entre de grandes limites. La loi est par conséquent d'une application pénible et, de plus, elle est incertaine.

Toutes les perturbations du cycle sont plus ou moins troublantes dans le cylindre à vapeur, mais on arrive à en tenir compte dans une certaine mesure: pour le moteur à gaz, elles défient le calcul et ne peuvent être exprimées par un paramètre constant, jouant le rôle de coefficient de réduction.

Bref: les deux problèmes posés ci-dessus doivent-êtré considérés comme insolubles pour les moteurs à gaz. Ce n'est pas, ainsi qu'on pourrait le croire, un échec de la théorie de ces moteurs, c'est une conséquence forcée de l'établissement et de la constitution des moteurs à explosion.

Pour la machine à vapeur, Poncelet, de Pambour, Tredgold, Rankine ont donné

aux ingénieurs des formules permettant facilement le calcul de la puissance d'une machine à vapeur ; leur valeur scientifique est discutable, mais elles sont vraiment pratiques et suffisamment exactes.

En moteurs à gaz, on ne peut espérer de trouver des formules du même genre ; tout au plus, sera-t-il possible d'établir des règles grossièrement empiriques.

Voici néanmoins une série de considérations sur lesquelles on pourrait baser le calcul des dimensions d'un moteur à gaz d'une puissance effective déterminée : nous envisagerons d'abord les moteurs à quatre temps.

Un moteur étant donné, et toutes choses se trouvant égales d'ailleurs, il y a corrélation entre les pouvoirs calorifiques du gaz et les pressions moyennes aux diagrammes, ainsi que le prouve le tableau ci-dessous :

Pouvoir calorifique du gaz	Pression moyenne du diagramme pour mélange normal
— calories	— kil.
1.040	3,26
1.100	3,75
1.200	4,55
1.300	5,15
1.360	5,28

De ces chiffres, il ressort évidemment que la pression moyenne croît beaucoup avec la richesse du mélange ; cette croissance est même d'abord plus rapide, puisqu'une augmentation du pouvoir de 31 0/0 donne une croissance de 61 0/0 dans la pression moyenne.

La pression moyenne indiquée augmente avec la pression dans la conduite : ainsi quatre diagrammes ayant été pris sous des pressions de 10, 25, 30 et 50 millimètres d'eau dans la conduite, la pression moyenne dans le cylindre s'est élevée respectivement à 2^k,40, 2^k,50, 2^k,75 et 2^k,85.

La pression moyenne est fonction de la teneur du mélange en gaz combustible, dans une certaine limite, aussi longtemps que l'air ne fait pas défaut et que le gaz n'est pas dilué à l'excès dans des gaz inertes.

La pression moyenne dépend surtout de la compression préalable ; c'est un des facteurs les plus efficaces de la poussée moyenne exercée sur le piston ; il faut considérer en même temps l'action des parois, leur température, la vitesse du piston, la longueur de la détente, l'avance plus ou moins grande à l'allumage et à l'échappement, la contrepression à décharge, la température du mélange admis, etc.

Tous ces éléments et d'autres encore étant définis ou choisis, il est possible à un praticien de tracer le diagramme probable qu'on relèverait sur le moteur ainsi constitué.

Il pourra en déduire la pression moyenne correspondante, p_m , à l'aide du planimètre, ou autrement. Dès lors, le travail indiqué, développé par coup de piston moteur, est connu en fonction de la section du piston et de sa course ; par le nombre de tours, on calcule la puissance indiquée ; en faisant une hypothèse sur le nombre de

passages à vide et sur le rendement organique, on évalue enfin la puissance effective, avec une approximation fort acceptable.

C'est le procédé de calcul que j'ai indiqué dans la première édition de ce traité et que j'ai employé avec avantage en des cas nombreux de ma pratique d'ingénieur : le procédé se simplifie quand on appelle à son secours l'observation des faits.

Dans les conditions les meilleures à tous égards, en faisant détoner un mélange très riche composé d'air et gaz de ville, dans une chambre débarrassée des gaz brûlés par un balayage énergique, la compression atteignant 12 kilogrammes au moins, il est possible d'obtenir quelquefois une pression moyenne au diagramme de 7^k,2; je considère cette valeur, comme un maximum : on ne la dépasserait pas sans inconvénients graves. Je n'ai rencontré cette pression moyenne que bien rarement; par contre, on constate assez souvent 6^k,5, et on obtient fréquemment 6 (1).

Un constructeur peut se proposer de réaliser cette pression moyenne de 6 kilogrammes dans ses moteurs : en supposant 85 0/0 d'admissions et en prenant, à pleine charge, un rendement organique égal à 0,85, on aura donc

$$\mathcal{G}_s = \frac{scn \times 6 \times 0,85 \times 0,85}{2 \times 60 \times 75} = 0,0004817 scn$$

A noter que la section s est exprimée en centimètres carrés, la course c en mètres et n en révolutions par minute.

Avec du gaz pauvre, d'un pouvoir de 1.300 calories environ, la valeur à adopter p_m est égale à 4^k,75 environ; la formule devient (2).

$$\mathcal{G}_s = 0,000381 scn$$

Je serais disposé à admettre le même coefficient pour les moteurs à pétrole (huile lampante).

Dans les moteurs alimentés d'air carburé par la gazoline (éther de pétrole), la puissance est un peu supérieure; pour l'alcool, elle croit encore et peut être considérée comme presque équivalente à celle que donne le gaz de ville : la compression peut en effet être plus considérable dans ces derniers moteurs.

J'ai calculé, sur ces bases, la puissance d'une série de moteurs au gaz de ville riche, ayant un pouvoir supérieur à volume constant égal à 5.500 calories environ : je la donne ci-après comme exemple des règles que je viens de formuler.

1. Il y a quinze ans, lors de la publication de la première édition de cet ouvrage, on escomptait une pression moyenne de 4^k,25; mais on ne comprimait qu'à 4 kilogrammes.

2. Au gaz pauvre un moteur ne rend donc que les $\frac{8}{40}$ du travail disponible avec le gaz de ville.

Puissance effective en chevaux	Diamètre du cylindre en centimètres	Course du piston <i>c</i> en mètres	Nombre de tours par minute <i>n</i>	Vitesse linéaire du piston en mètres par seconde	Section du piston en centimètres carrés <i>s</i>	Valeur du produit <i>s c n</i>
1	75	0,170	300	1,70	44,179	2.253
2	100	0,210	270	1,89	78,540	4.452
3	120	0,240	260	2,08	113,097	7.057
4	130	0,260	250	2,17	132,733	8.628
8	175	0,325	225	2,43	240,53	17.589
12	210	0,360	205	2,46	346,38	25.561
18	250	0,420	185	2,59	490,87	38.140
24	280	0,470	172	2,69	615,75	49.778
30	310	0,510	165	2,80	754,77	63.513
40	350	0,575	155	2,97	962,11	85.748
50	380	0,625	148	3,08	1134,1	104.903
60	410	0,670	144	3,21	1320,3	128.267
75	450	0,730	135	3,29	1590,4	156.734
100	510	0,800	130	3,47	2042,8	212.451
125	565	0,875	120	3,50	2507,2	263.256
150	615	0,925	115	3,54	2970,6	315.997

Il importe d'observer que les moteurs de notre tableau seraient trop faibles, si le gaz de ville avait le pouvoir de 5.000 calories qu'on rencontre quelquefois : d'ailleurs ces chiffres ne sauraient prétendre à une rigoureuse exactitude ; nous avons supposé une forte compression et une grande vitesse, conformément à nos théories (1).

M. Ringelman a proposé une autre méthode de calcul, qu'il est de notre devoir de faire connaître.

Ce savant ingénieur suppose une huile de pétrole à 11.000 calories : 1 gramme de ce liquide peut donc développer $425 \times 11 = 4.675$ kilogrammètres. Il faut 11,7 litres d'air pour brûler ce gramme de pétrole ; mais en donnant un excès d'air et en tenant compte de la dilatation, on arrive à un volume de 16,3 litres par gramme de pétrole.

M. Ringelmann attribue au moteur à pétrole un rendement thermique effectif de 15 à 20 0/0 ; de sorte que le travail réellement disponible par gramme de pétrole n'est guère que de 700 à 935 kilogrammètres.

Calculons le poids de pétrole consommé : si nous appelons V le volume du cylindre

1. Pour permettre d'apprécier le progrès réalisé en quinze ans, nous reproduisons ci-dessous une série de dimensions que nous avons publiée dans notre première édition, dans l'hypothèse d'un bon gaz de ville. La comparaison des dimensions relatives des moteurs est significative. Le cylindre de deux chevaux d'alors en fait quatre aujourd'hui.

Puissance effective	Nombre de tours par minute	Diamètre du cylindre	Course du piston
4 cheval	200	105 ^{m/m}	0 ^m ,210
2 chevaux	185	133	0,270
4 —	175	160	0,320
6 —	170	185	0,370
8 —	165	200	0,400
12 —	155	245	0,490
18 —	145	290	0,580

en litres, le volume de mélange carburé par cylindrée, donc le gaz carburé brûlé par explosion, est égal à $\frac{V}{16,3} = 0,06135 V = p$.

Avec 10 0/0 de passages à vide, le nombre d'explosions faites par seconde sera, en appelant n le nombre de révolutions de la machine $\frac{0,90 \times n}{2 \times 60} = 0,0075 n = n'$.

Dès lors, le poids de pétrole P employé par seconde est $P = n' p$ et le travail \bar{c} développé par seconde, estimé en kilogrammètres, sera pour le moins.

$$\bar{c} = 700 \times P$$

La puissance en chevaux de 75 kilogrammètres \mathcal{Q} sera par suite égale à

$$\mathcal{Q} = \frac{700 \times P}{75} = 0,0133 \times 700 \times P$$

Comme application de ce qui précède, prenons un moteur établi sur les données suivantes :

Diamètre du piston : 170 millimètres.

Course du piston : 0^m,170 millimètres.

Nombre de tours par minute : 300.

Rendement : 15 0/0.

En effectuant les calculs, nous obtenons :

V Volume engendré par le piston (en décimètres cubes) : 3,86.

p Poids du pétrole à employer par explosion (en grammes) : 0,2368.

n' Nombre d'explosions par seconde : 2,25.

P Poids de pétrole à employer par seconde (en grammes) : 0,5328.

\bar{c} Puissance disponible en kilogrammètres par seconde : 372,96.

\mathcal{Q} Puissance disponible en chevaux-vapeur : 4,96.

Consommation de pétrole, au cylindre, en kilogrammes, par heure : 4,918.

Consommation de pétrole, au cylindre, en kilogrammes, par cheval-vapeur : 0,386.

M. Hospitalier a donné une formule empirique spécialement utilisable pour le calcul des moteurs à essence : d'une statistique faite par lui, il a conclu que pour déterminer la puissance d'une machine en poncelets (100 kilogrammètres par seconde) il n'y a qu'à multiplier le double du volume du cylindre *en litres* par le nombre de tours à la seconde et de diviser par 10 ; on passe à la puissance en chevaux en divisant la puissance en poncelets par 0,75. En transformant la formule Hospitalier, on trouve, pour n tours à la minute,

$$\mathcal{Q} = 0,0044 V n$$

Cette formule est d'accord avec celle de M. Ringelmann : elle donne des résultats

1. M. Ringelmann a exposé cette théorie dans le *Motocycle* et la *Locomotion Automobile* ; sa formule peut s'écrire sous une forme plus pratique. En effet, appelant V le volume en litres d'une cylindrée, et n le nombre de tours par minute, on trouve :

$$\mathcal{Q} = 0,0043 V n$$

M. Thomer a proposé d'augmenter la valeur du paramètre, pour mieux correspondre aux faits actuels.

inférieurs à celle que nous avons adoptée pour tenir compte des derniers et remarquables progrès des moteurs à gaz : à notre avis, il faudrait écrire :

$$Q = 0,0048 V n$$

Mais on ne peut se servir de ces formules qu'en vue d'obtenir une indication générale et il faut les accompagner d'expresses réserves, relativement à la qualité du gaz.

Pour les moteurs à alcool, on pourrait se guider d'après la série donnée ci-dessus pour les moteurs à gaz. Voici en effet quelques données empruntées à un bon constructeur.

Puissance effective	Diamètre du piston	Course du piston	Nombre de tours par minute
3 chevaux	120 mm.	0 ^m ,200	250
15 —	230 —	0,360	200
30 —	290 —	0,450	190

Les moteurs à gaz à double effet peuvent être considérés sans erreur comme des moteurs à deux cylindres (1) ; ils bénéficient d'une légère amélioration du rendement organique.

La société de Deutz attribue une puissance de 500 chevaux à un moteur à double effet de 825 millimètres de diamètre et 1 mètre de course, faisant 135 révolutions par minute.

Le moteur Letombe de 300 chevaux mesure 600 millimètres de diamètre et 0^m,800 de course ; il fait 135 tours.

Pour les moteurs à deux temps, il convient de faire les calculs de puissance d'après les diagrammes prévus, en attribuant à la machine un rendement organique plus faible que pour les moteurs à quatre temps. Les indications ci-dessous pourront servir de base.

Moteur Dugald Clerk.

Puissance : 8 chevaux.

Nombre de tours : 150 par minute.

Diamètre du cylindre de travail : 178 millimètres.

Sa course : 0^m,304.

Diamètre du cylindre compresseur : 178 millimètres.

Sa course : 0^m,457.

1. Voici les dimensions des moteurs Lenoir primitifs, à double effet, sans compression :

Puissance	4/2 cheval	4	2
Vitesse.	130 tours	94	53
Diamètre du cylindre	180 m/m	240	330
Course du piston.	120 m/m	120	320

Le moteur atmosphérique Langen et Otto d'un demi-cheval avait 150 millimètres de diamètre de cylindre et une course variable ; sa vitesse normale était de 70 tours par minute.

Moteur Benz.

Puissance : 2 chevaux.

Nombre de tours : 150 par minute.

Diamètre du cylindre de travail : 140 millimètres.

Sa course : 0^m,280.

Moteur Bénier.

Puissance en chevaux	Piston moteur		Piston compresseur d'air; diamètre	Compression	Nombre de tours par minute
	Diamètre	Course			
15	340 mm	0 ^m ,480	480	3 ^k ,25	145
40	440	0,650	600	»	127

MM. Kœrting et von Eichelhaeuser ont remis en vogue les moteurs à deux temps en les alimentant de gaz de hauts-fourneaux et en leur faisant développer de grandes puissances.

Voici quelques dimensions de ces remarquables machines.

Moteur Kœrting.

Puissance effective : 500 chevaux.

Diamètre du cylindre à double effet : 635 millimètres.

Course du piston moteur : 1^m,100.

Diamètre des cylindres compresseurs : { pour l'air : 750 millimètres.
pour le gaz : 690 millimètres.

Course des pistons compresseurs : 0^m,300.

Nombre de révolutions par minute : 90.

Le moteur de 700 chevaux a 750 millimètres de diamètre sur 1^m,300 de course.

Moteur von Eichelhaeuser.

Puissance effective : 300 chevaux 600 chevaux.

Diamètre du cylindre : 480 millimètres 775 millimètres.

Course du piston à double effet : 0^m,800 0^m,950.

Nombre de tours par minute : 175 100.

Nous terminerons enfin cette revue des dimensions des moteurs en citant quelques dimensions du moteur Gardie à combustion et du moteur Diesel.

Moteur Gardie.

Puissance effective : 25 chevaux.

Cylindres moteurs : au nombre de deux.

Diamètres de ces cylindres : 250 millimètres.

Course des pistons : 0^m,400.

Nombre de tours par minute : 200.

Un seul cylindre compresseur :

Diamètre : 225 millimètres.

Course : 0^m,300.

Pression de l'air : 12 kilogrammes.

Moteur Diesel.

Puissance effective : 20 chevaux.

Diamètre du cylindre moteur : 250 millimètres.

Course du piston : 0^m,3985.

Diamètre du compresseur : 200 millimètres.

Sa course : 0^m,200.

Nombre de tours par minute : 170.

FIN DU TOME 1

TABLE DES CHAPITRES

Préface de la quatrième édition	Page
Principales publications de l'auteur sur les moteurs à gaz	V
	VII

CHAPITRE PREMIER

HISTOIRE DES MOTEURS A GAZ

I. Période d'invention.	2
II. Période d'application	8
III. Période d'expansion.	32

CHAPITRE DEUXIEME

CLASSIFICATION DES MOTEURS A GAZ

I. Définition des divers types de moteurs.	57
--	----

CHAPITRE TROISIÈME

CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES SUR LES MACHINES THERMIQUES

I. La chaleur, source d'énergie.	61
II. Variations thermiques des gaz	63
III. Du cycle des machines thermiques et de leur rendement.	71
IV. Parallèle entre les diverses machines thermiques.	77

CHAPITRE QUATRIÈME

ÉTUDE SUR LES GAZ COMBUSTIBLES

I. Gaz d'éclairage, dit gaz de ville.	83
II. Étude des divers gaz combustibles obtenus par distillation.	116
III. Air carburé	121
IV. Gaz à l'eau	130
V. Les alcools	137
VI. Les pétroles.	154

	Pages
VII. Les gaz mixtes ou pauvres	162
VIII. Monographie des gazogènes	191
1° gazogènes soufflés à injecteur	192
2° gazogènes soufflés à ventilateur	220
3° gazogènes soufflés à haute pression	231
4° gazogènes à aspiration	235
5° gazogènes à combustion renversée	247
IX. Gaz acétylène	254
X. Gaz de hauts fourneaux	263

CHAPITRE CINQUIÈME

THÉORIE GÉNÉRIQUE DES MOTEURS A GAZ

274

I. Définition des quatre types théoriques	275
II. Rendements théoriques comparés des quatre types	281
III. Étude du cycle à détente incomplète (Beau de Rochas-Otto)	291
IV. Étude du cycle à compression et admission variable (Charon)	295
V. Étude du cycle à admission variable et surcompression (Letombe)	297
VI. Étude du cycle Diesel	299
VII. Étude de divers autres cycles proposés	304
VIII. Influence des variations de c et de γ	312
IX. Diagrammes entropiques	313

CHAPITRE SIXIÈME

THÉORIE EXPÉRIMENTALE DES MOTEURS A GAZ

324

I. Imperfections des cycles réels	326
II. De l'action de la paroi sur les combustions	334
III. Des divers régimes de détonation et de combustion	343
IV. La théorie expérimentale devant les faits	363

CHAPITRE SEPTIÈME

ESSAIS DES MOTEURS

I. Mesure du travail indiqué, du travail effectif et du rendement organique	384
II. Essais de puissance et de consommation	414
III. Essais de vitesse et de régularité	419
IV. Résultats d'essais	435
V. Calculs d'établissement des moteurs	489
Table des chapitres	499
Index alphabétique des Matières	501

INDEX ALPHABÉTIQUE

DES MATIÈRES CONTENUES DANS LE PREMIER VOLUME

	Pages		Pages
A		A	
Acétylène.	254	Calorimètre Junkers.	92
Action de paroi.	340, 373, 378, 384	— Slaby	98
Adiabatiques.	69	Carburateur Brayton.	19
Air nécessaire à la combustion des gaz		— Daimler.	124
106, 379, 418		— Dalamare-Deboutteville et	
Air carburé	121	Malandin	123
Alcools	137	— Durand.	123
Allumage.	344, 346	— Fessard.	127
Allure des gazogènes	170	— Gauthier-Wehrlé.	125
Analyse des gaz.	99	— Kœrting	127
— des pétroles	155	— Longuemare	127
— des alcools.	143, 145	— Mignon et Rouart.	122
Atkinson (Travaux de M.).	354, 359	— Mors	126
Atmosphériques (Machines)	15, 58	— Otto.	123
		— Pétréano	129
		— Piéplu	122
		— Schrab	123
		— Southall	128
		— Tenting.	123
		Carburation de l'alcool.	143
		Chaleurs de combustion des gaz	87, 101
		— — des pétroles.	157
		— — des charbons	184
		— — des gaz de hauts	
		fourneaux.	266
		Chaleurs spécifiques des gaz	65
		Classification des moteurs.	57
		Clerk (Dugald) (Travaux de M.)	110, 359
		Coke (Gazogènes au)	177, 186
		Combustion (Moteurs à)	283, 288
		— des mélanges tonnants.	343
		— incomplète	330, 356, 373
		— lente	350, 372
		Composition des gaz de ville	84
		— des gaz pauvres	173
		— des pétroles	155
		— des alcools	145
		— des gaz de hauts fourneaux.	268
		Compoundage	307
B			
Balayage des gaz brûlés	396		
Beau de Rochas (Cycle de)	291		
Bilans des pertes	374, 380		
Bombes Berthelot, Mahler, etc.	96		
Bombe eudiométrique Witz	94		
Boulvin (Etudes de M.)	314		
C			
Calculs d'établissement des moteurs.	489		
Calorimètre Hartley.	90		

	Pages
Compression préalable	286, 293, 359, 369
— isothermique	308
— variable Charon.	295
Consommations à vide	383
Courbes de détente et de compression	346
— d'aspiration et de décharge.	332
Correction des diagrammes de M. Schroter	399
Crozet (Correction des effets d'inertie)	431
Cycles de Carnot	73
— de Stirling et d'Ericsson	76
— des moteurs des 4 types	276
— — Beau de Rochas-	
Otto	291
— — Charon	295
— — Diesel	299
— — Heirman.	304
— — Letombe.	297
— — Marius et Brellier	310
— — Marmonnier.	310
— — Vermand.	308
Cyclomètre Manlove, Alliott et Co	424

D

Dénaturation des alcools	141
Dépression Niel.	287
Détente adiabatique	69
— isothermique	69
— complète	277
— incomplète	291
Diagrammes théoriques	277
— réels	327
— entropiques	313
— Bryan Donkin	403
Diesel (Cycle)	299
Dilution des gaz.	108, 362, 369, 372, 491
Diffusion dans les mélanges tonnants	357, 374
Dimensions des moteurs	493
Dissociation	113
Dosage des mélanges (Influence du).	294
Dowson	163, 191

E

Eau injectée dans les gazogènes.	171	179
Entropie		314
Epurateurs de gaz		272

	Pages
Enregistreur Mathot	393
Enrichissement des gaz.	106
Essais des moteurs.	414, 419, 435
Expulsion des gaz brûlés	352, 355
Expériences Witz sur l'action de paroi.	335, 345
Expériences Ranson sur la vitesse cyclique	424

F

Formules de rendement	283
— des puissances et dimensions.	492
Frein dynamométrique de Prony	404
— à cordes	406
— à bascule	405
— Bourdon	407
— Carpentier	410
— Dwelshauvers-Dery.	411
— Ringelmann	408

G

Gaz d'éclairage dit gaz de ville	83
— naturel	120
— de bois	117
— de goudrons	120
— de tourbe	116
— de pétrole	119
— pauvre ou mixte	162
— à l'eau	130
— de hauts fourneaux	263
Gaz comprimé	121
Gaz brûlés (Influence des).	353
Gas Engine Research Committee	367, 395, 416
Gazogènes en général	162
— soufflés à injecteur.	191
— Bayenthal	219
— Crossley.	219
— Deutz	204
— Dowson	192
— Fichet et Heurtey	194
— Kitson et Walker	202
— Mond.	215
— Pierson	207
— Wilson	203
— Winand.	201

	Pages		Pages
Gazogènes soufflés à ventilateur	220	Indicateurs Rosenkranz.	391
— Buire-Lencachez	220	— Tabor	387
— Deutz au lignite	228	— Wayne.	389
— Duplex	228	Indicateur optique Perry	391
— Hovine et Breuillé	231	— Hospitalier et Car-	
— Lafond	230	pentier	392
— Pœtter	230	Inertie (Effets d')	429
Gazogènes soufflés à haute pression	231	Influence des parois.	334
— Gardie	233	Installation des indicateurs	400
Gazogènes à aspiration.	235	Irrégularité (Coefficient d').	427
— Arbos	235	Isodiabatiques	75
— Bénier.	236	Isothermiques	69
— Deutz	244	Ledebur (Travaux de M.)	170, 267
— Lencachez	239	Lencachez (Travaux de M.).	118, 162, 168
— Pierson	241	Lenoir.	26
— Rex	246	Limites de combustibilité des mélanges.	344
— Taylor.	238	Lois expérimentales de la détente des	
— Winterthur	246	gaz	346, 361
Gazogènes à combustion renversée.	247		
— Deschamps	254	M	
— Duff (Mason).	253	Machines atmosphériques	15, 58, 283
— Faugé-Chavanon.	253	— thermiques	71, 77
— Loomis	253	Mélanges tonnant	109, 113
— Riché.	247	Mesure du travail	384
— Thwaite	251	Meyer (Travaux de M.).	177, 187, 371, 378
— Zahn	252	Moscrop (Appareil).	421
Gazogènes à l'eau	131		
— Delwick-Fleischer	135	N	
— Goodyear.	133	Notions de thermodynamique.	61
— Strache	134		
— Strong.	132	O	
Goudrons (gaz de)	120	Onde explosive	344
Grover (Expériences de M.)	353	Otto.	14, 291
H		P	
Hauts fourneaux (gaz de)	263	Parallèle entre les machines thermiques.	77
Histoire des moteurs	I	Pertes par circulation d'eau et par la dé-	
		charge	330, 374
I		Pétrole	154
Imperfections des cycles réels	326	Point d'éclair Abel.	160
Indicateurs de Watt	387		
— Crossby	388		
— Lefebvre	388		
— M'Innes-Dobbie	390		

	Pages
Pouvoirs supérieur et inférieur	88, 102
— à volume constant ou à pression constante	189
Pouvoirs caloriques des gaz de ville.	87, 101
— des pétroles	156
— des alcools.	143
— des gaz pauvres.	176
— des charbons.	194
— des gaz de hauts fourneaux	
Pouvoir éclairant du gaz, fonction du pouvoir calorimétrique	105
Pression d'amenée du gaz	491
Pressions explosives,	110, 112, 329 349, 360, 137
Procès-verbaux d'expériences.	436
Produits de combustion des gaz	107 368, 418
Puissance des moteurs,	384
— indiquée.	385, 401
— effective.	385, 405
— calculée	492

R

Rapport des chaleurs spécifiques des gaz.	65
Réducteurs de course	394
— Meyer	395
— du gas Engine Committee.	395
— Mathot	396
Régénérateurs de chaleur	80 305
Régimes divers de détonation et combus- tion	343
Rendements thermiques des moteurs	81
— théoriques des 4 types	281, 290
— générique.	76
— organique.	76, 386, 414
— des gazogènes	182
— des transmissions	413
Résultats d'essais des moteurs,	435
Ringelmann (formules de M.).	381, 421, 493

S

	Pages
Salanson et Debuchy (Recherches de MM.)	353
Schöttler (Travaux de M.).	303, 348, 366
Slaby (Etudes de M.)	347, 365
Stratification des gaz	351
Surcompression Letombe.	297

T

Tarage des compteurs de gaz.	417
— des indicateurs.	397
Température et explosibilité des mé- langes	115
Températures de combustion des gaz	107, 110
— des gaz de l'échappement.	415
— du cylindre et de son enve- loppe	367, 373
Théorie générique des moteurs	275
— expérimentale des moteurs.	324
— du gazogène	164
Thermodynamique (Principes de).	61
Tranches (Théorie des).	351
Travail effectif	385, 405
— indiqué	401

U

Unités anglaises.	397
---------------------------	-----

V

Valeurs de γ	65, 285, 347
Variations de c et γ	312
Variations thermiques des gaz	63
Vermand (Travaux de M.).	110, 308, 312
Vitesses de détente.	341
— du piston	345

