

Ed. MARCOTTE  
LES  
MOTEURS  
A  
COMBUSTION

COLLECTION ARMAND COLIN N° 77

24/2 DE 92

LIBRAIRIE  
ARMAND COLIN



≡ 12<sup>f</sup> ≡

$$\frac{cs}{mp}$$
$$\sqrt{\frac{cs^2 + pm^2}{cs^2}}$$
$$\sqrt{1 + \frac{pm^2}{cs^2}}$$
$$pm + cs$$

264



$$h_1 = \frac{m}{h_2}$$

$$\frac{\sqrt{h_1 + h_2}}{h_1}$$

cos z



*Les Moteurs*  
à  
*combustion*

DU MÊME AUTEUR :

---

*Les Moteurs à explosion.* (Collection Armand Colin.)

*Résumé des Connaissances scientifiques utiles aux Aviateurs.* (Dunod.)

*Les Matériaux des Constructions mécaniques et aéronautiques.* En collaboration avec M. Béréhère. (Dunod.)

*Cours de Moteurs d'Aéronautique à l'École des Travaux Publics.* (Eyrolles.)

*Communications scientifiques et faits industriels (1922-1923).* (Payot.)

*La Lumière intensive. — Les Phares et les Projecteurs.* (Payot.)

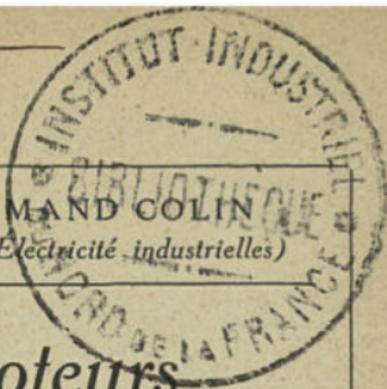
*Les Lignites et leurs applications industrielles.* (Gauthier-Villars.)

*Le Béton armé.* (Garnier.)

84

N° 77

DE 92



COLLECTION ARMAND COLIN  
(Section de Mécanique et Électricité industrielles)

# Les Moteurs à combustion

par

**Edmond MARCOTTE**

Ingénieur Conseil (I. C. F.)

Professeur à l'École spéciale des Travaux Publics  
Ancien Chef du Service des Ateliers de Moteurs  
de l'Aviation Militaire.

37 figures



LIBRAIRIE ARMAND COLIN  
103, Boulevard Saint-Michel, PARIS

1926

Tous droits réservés

Tous droits de reproduction,  
de traduction et d'adaptation  
réservés pour tous pays.

Copyright 1926, by Max Leclerc et C<sup>ie</sup>.



## PRÉFACE

---

*La pratique a consacré deux principaux types de moteurs à combustion interne : les moteurs à explosion, dans lesquels on brûle les combustibles gazeux industriels, ou des liquides volatils dont le nombre des molécules diminue pendant la combustion, et les moteurs à combustion proprement dits, ou moteurs Diesel, qui brûlent des combustibles liquides lourds, donnant tous une augmentation du nombre des molécules.*

*En général, ces derniers moteurs brûlent les combustibles dans une course de dilatation sous pression continuellement décroissante, en présence d'air comprimé séparément dans une course préalable.*

*Les moteurs à explosion font l'objet d'un livre spécial.*

*Dans le présent ouvrage, on se propose d'étudier les moteurs Diesel et leurs applications à poste fixe, à bord de navires ou sur voies ferrées.*

*Après avoir défini leurs caractères généraux, les cycles à quatre et à deux temps et comparé ces cycles, nous exposons les règles pratiques pour la conduite et les essais ; nous étudions les dispositions générales de l'installation des moteurs fixes ; nous examinons ensuite comment ont été réalisées les qualités spéciales nécessaires aux moteurs marins et comment on a pu appliquer aussi les moteurs Diesel à la traction sur voies ferrées.*

*Les moteurs de faible puissance, les moteurs légers, les moteurs à injection mécanique ou solide, ceux qui travaillent suivant un cycle mixte, sont étudiés dans un chapitre spécial.*

*Un autre chapitre est consacré tout entier aux moteurs semi-Diesel qui fonctionnent presque sur le cycle à explosion, mais qui peuvent consommer des huiles lourdes et dont la simplicité est très appréciée, particulièrement pour la propulsion des bateaux de pêche.*

*Dans un dernier chapitre, nous groupons les considérations les plus intéressantes sur les combustibles et la combustion, les lubrifiants et la réfrigération, ce qui permet des comparaisons utiles pour le choix d'un moteur.*

*L'examen des progrès que l'on peut espérer dans la réalisation des moteurs à huile lourde termine cet ouvrage, où nous avons eu le souci de présenter les applications les plus récentes en les rattachant à des principes généraux qui permettent de faire l'examen critique de tous les moteurs de ce genre.*

---

# LES MOTEURS A COMBUSTION

---

## CHAPITRE PREMIER

### CARACTÈRES GÉNÉRAUX DESCRIPTION D'UN MOTEUR DIESEL A QUATRE TEMPS

---

**Définition du moteur à combustion.** — Dans les moteurs ordinaires à gaz, essence, pétrole, on comprime dans le cylindre, à une pression relativement faible, de l'air carburé (mélange tonnant d'air et de combustible volatilisé) qui, au contact d'un dispositif convenable d'allumage, produit une explosion entraînant le mouvement du piston.

Dans le moteur à combustion *on comprime l'air pur* dans le cylindre à une pression telle, que sa température permette l'inflammation du combustible ; celui-ci *brûle au fur et à mesure* de son introduction, sans explosion et par conséquent sans augmentation brusque de pression.

On distingue trois groupes principaux de moteurs à combustion.

Les moteurs Diesel, qui fonctionnent à une pression assez élevée pour assurer l'auto-allumage du combustible sans agent extérieur, forment les deux premiers groupes.

Dans les moteurs Diesel ordinaires, l'insufflation du combustible se fait à l'aide de l'air comprimé par un compresseur séparé ou, le plus souvent, actionné par le moteur lui-même.

Dans les *moteurs Diesel à injection mécanique* (1), l'in-

---

(1) Appelés quelquefois « *super-Diesel* » par comparaison avec les *semi-Diesel*.

jection du combustible est obtenue par des moyens mécaniques, sans insufflation d'air.

Les moteurs *semi-Diesel* ont reçu ce nom parce qu'ils fonctionnent, comme les premiers, par injection du liquide combustible dans le cylindre où de l'air est préalablement comprimé, mais moins que dans le moteur Diesel.

Il en résulte que la température, à la fin de la compression, serait insuffisante pour enflammer le combustible, si toutes les parois du cylindre étaient refroidies comme dans les moteurs ordinaires. On ménage donc en général, dans ces moteurs, une paroi non refroidie, de forme appropriée et que les combustions successives entretiennent au rouge. Le moteur ne pouvant marcher que lorsque cette paroi est assez chaude, il est indispensable de la chauffer préalablement de l'extérieur ; cela demande un certain temps, pendant lequel on ne peut se servir du moteur, sauf lorsqu'un dispositif spécial permet sa mise en marche immédiate avec de l'huile plus légère que l'huile de combustion ordinaire.

A cette nécessité d'user d'une huile de démarrage n'échappent pas, en général, les moteurs Diesel ; mais en marche normale, tous ces moteurs, qu'ils soient à insufflation d'air ou à injection mécanique, brûlent les mêmes huiles lourdes bon marché et sans danger, si bien que ce livre pourrait s'intituler *Moteurs à huiles lourdes*. Les moteurs en question peuvent d'ailleurs fonctionner très bien avec des huiles plus légères.

**Division de l'ouvrage.** — Nous allons étudier successivement les moteurs Diesel ordinaires, les moteurs Diesel à injection mécanique et les moteurs semi-Diesel.

Les moteurs des deux premières catégories présentent, sauf en ce qui concerne l'injection, de telles ressemblances que l'on peut, dans certains cas, transformer assez facilement un moteur à insufflation d'air en un moteur à

injection mécanique. Ce que nous dirons des moteurs Diesel s'appliquera donc en général à tous ces moteurs.

Les moteurs semi-Diesel, au contraire, sont d'une construction et d'un fonctionnement un peu spéciaux ; nous serons donc obligés de les examiner à part.

**Différences entre les moteurs Diesel et semi-Diesel. —**

Tous ces moteurs, consommant des huiles à faible prix, sont généralement économiques.

Les moteurs Diesel, fonctionnant à compression élevée, sont les meilleurs au point de vue du rendement ; mais les fortes pressions exigent des organes très robustes, les dispositifs de compression d'air et d'insufflation du combustible sont d'une exécution difficile. Leur fabrication est donc coûteuse et leur fonctionnement doit être surveillé de près. Ces moteurs sont donc avantageux surtout dans les installations de grande puissance.

Dans les autres cas, on peut préférer un moteur plus simple, plus rustique, plus facile à conduire, malgré son rendement moins élevé, si la fabrication et l'achat coûtent moins cher. C'est ainsi que les moteurs à explosion l'emportent pour beaucoup d'applications sur les moteurs Diesel, et cela justifie la grande extension des moteurs semi-Diesel sur les bateaux de pêche, particulièrement dans les pays scandinaves.

Simplicité et faible prix d'achat sont les qualités que les semi-Diesel doivent à leur compression modérée. Moindre consommation et plus grande aptitude à brûler les combustibles liquides les plus lourds, tels sont les avantages des compressions élevées des moteurs Diesel. La coexistence de ces deux groupes de moteurs est donc parfaitement logique, et l'on ne peut dire que les uns soient préférables aux autres ; cela dépend de ce qu'on veut en faire.

**Historique.** — Bien que les huiles lourdes soient les combustibles les plus avantageux, les premiers essais de moteurs à combustion ont été effectués à l'aide de combustibles gazeux.

Ces moteurs comportaient deux réservoirs : un pour l'air, un autre pour le gaz, et l'on comprimait séparément ces deux éléments à la pression voulue. On pouvait ainsi régler, suivant l'effort à exercer, les masses respectives introduites dans le cylindre. On se servait, pour l'admission dans le cylindre, d'une sorte de grand chalumeau dont le débit dépendait de la pression des gaz ainsi introduits, qui brûlaient en entrant, puis se détendaient. A la course suivante du piston, les gaz brûlés étaient refoulés au dehors.

Ces moteurs à gaz sont venus trop tôt, à une époque où les connaissances thermodynamiques et pratiques étaient trop rudimentaires pour qu'on pût arriver à une réalisation satisfaisante ; mais, sur le principe que nous venons de rapporter, on pourrait construire des moteurs à gaz (1) d'une conduite aisée, d'un démarrage instantané, d'un réglage facile et étendu de la puissance, avec faculté de changer à volonté le sens de la marche.

Quoi qu'il en soit, actuellement, tous les moteurs à combustion utilisent exclusivement des combustibles liquides.

Le premier d'entre eux, le moteur *Capitaine*, du nom du constructeur qui l'a inventé, brûlait du pétrole lampant qui était injecté dans le cylindre au moyen d'un jet d'air comprimé à une pression légèrement supérieure à celle de l'air pur, préalablement comprimé dans le cylindre par le piston.

C'est évidemment l'origine des Diesel actuels ; le cycle était convenable, mais la faiblesse de la compression ne

---

(1) Nous verrons au chapitre IX, p. 197, une objection tirée du mauvais rendement du gaz d'éclairage, en particulier dans le moteur Diesel.

procurait pas un rendement satisfaisant ; d'autre part, l'insuffisance des dispositifs de pulvérisation causait une consommation exagérée de combustible. Il faut penser que l'inventeur avait à imaginer, pour modifier ces deux points défectueux, une série de moyens matériels qui ont été obtenus progressivement et laborieusement dans les réalisations successives de Diesel, lequel partait d'ailleurs d'idées assez différentes (1).

Diesel se proposait de réaliser, sous le nom de « cycle rationnel », un cycle se rapprochant autant que possible de celui de Carnot.

On sait que, dans ce dernier cycle, l'apport de chaleur se fait à température constante. A cet effet, Diesel modérait l'injection du combustible, afin que la détente due au déplacement du piston pendant la combustion provoquât un refroidissement compensant, au fur et à mesure, l'apport de chaleur provenant de la combustion.

Diesel espérait aussi dépasser le rendement de 70 % à l'aide d'une très forte compression initiale et d'une détente aussi prolongée que possible. Il pensait, de cette façon, abaisser la température de fonctionnement à tel point qu'il fût devenu inutile d'employer un système de refroidissement. Il voulait même que la température finale fût plus basse que la température ambiante.

Rien ne s'oppose, en effet, à la prolongation de la détente et à l'abaissement de température qui en résulte, si ce n'est une perte notable de rendement ; car pour abaisser au-dessous de la température ambiante la température intérieure, il faut dépenser du travail.

En outre, on pouvait penser, à l'époque dont il s'agit, que la suppression des pertes de chaleur dues à la circu-

---

(1) L'idée d'effectuer la combustion à pression constante a été indiquée par Joule en 1851 (*Philosophical Transactions*) ; le *Ready-Motor Brayton* qui réalisait le cycle de Joule fut exposé à Philadelphie en 1876.

lation de l'eau de refroidissement pouvait conduire à une augmentation correspondante du travail utile.

Jusqu'à présent on constate, au contraire, que si l'on diminue la perte de chaleur par refroidissement, on augmente la perte de chaleur par les gaz d'échappement.

Cela provient surtout des dimensions considérables qu'il faudrait donner au cylindre pour obtenir une détente assez prolongée ; les grandes surfaces de frottement qui en résulteraient causeraient des pertes importantes.

Diesel fut donc amené à modifier profondément ses premières conceptions. Il avait espéré pouvoir utiliser non seulement du pétrole brut, mais aussi du *charbon pulvérulent*, ce qui ne semble pas impossible, en effet, mais n'a jamais encore donné de résultat pratique (1).

Finalement, lorsqu'en 1897 sortait des ateliers Krupp le premier moteur Diesel utilisable, cet engin n'avait plus, du cycle proposé par l'inventeur, que le nom. Il se rapprochait davantage du moteur Capitaine ; mais utilisait des pressions élevées permettant l'auto-allumage.

On a pris l'habitude de donner, aux cycles des moteurs de ce genre, le nom de cycle de Diesel, que ces moteurs soient à quatre temps ou à deux temps. Nous allons décrire, pour fixer les idées, le moteur Diesel à quatre temps.

### MOTEURS DIESEL A QUATRE TEMPS

**Dispositif général.** — Un moteur Diesel comprend un ou plusieurs cylindres ; quand il y en a plusieurs, ils travaillent tous de la même façon. Aussi suffit-il de décrire un moteur monocylindrique, pour faire comprendre le fonctionnement d'un moteur Diesel.

Un *cylindre* est constitué, en principe, par un récipient

---

(1) Les frères Niepce, avaient en 1806, réalisé un petit moteur brûlant de la poudre lycopode.

métallique à fortes parois, refroidies par une circulation d'eau, comme dans les moteurs à explosion, et dont l'intérieur est soigneusement usiné de façon à constituer une surface cylindrique aussi parfaite que possible. A l'un des bouts, à la partie supérieure lorsque le cylindre est vertical, suivant la disposition généralement adoptée, une coiffe qu'on appelle *culasse*, également refroidie par circulation d'eau, l'obture solidement ; cette culasse est percée d'un certain nombre d'orifices, quatre, le plus souvent.

Au centre, un orifice sert à l'injection du combustible pulvé-

risé ; à côté se trouve l'arrivée d'air comprimé qui assurera la mise en marche. Dans un plan perpendiculaire à celui de la fig. 1, se trouvent deux soupapes, non repré-

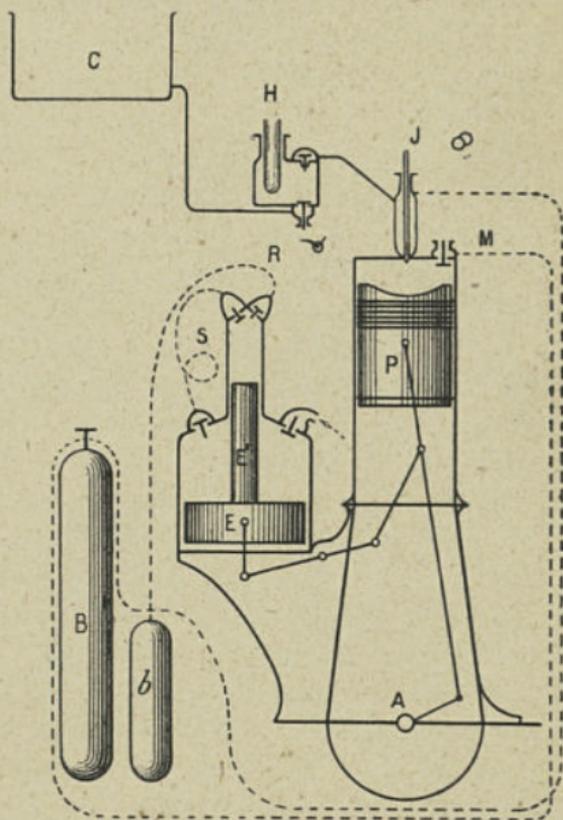


FIG. 1. — DISPOSITIF D'UN MOTEUR A QUATRE TEMPS.

C, réservoir à combustible. — R, régulateur d'injection. — H, piston de la pompe d'injection. — J, aiguille d'injection. — M, soupape de mise en marche. — P, piston du moteur. — A, arbre-moteur. — E, E', pistons du compresseur d'air à deux étages. — S, serpentin pour le refroidissement de l'air. — B, b, bouteilles d'air comprimé.

sentées, qui permettent, en temps opportun, la sortie des gaz brûlés et l'admission d'air pur.

Le *piston* est une masse également cylindrique qui peut glisser très exactement dans le cylindre, dont il obture à peu près hermétiquement la cavité. Une garniture élastique formée de plusieurs bagues coupées, dites *segments*, entoure le piston et s'applique exactement contre le cylindre de façon à constituer une fermeture hermétique.

Une *bielle* s'articule, d'une part sur un axe fixé suivant un diamètre du piston et, d'autre part, sur une manivelle ou sur un arbre coudé dit *vilebrequin*, ou *arbre-moteur*, ou *arbre-manivelle*, maintenu par des paliers solidement fixés autour desquels il peut tourner.

Ainsi le mouvement alternatif du piston, suivi par le pied de bielle, peut se transformer, à l'autre extrémité de la bielle, en un mouvement circulaire continu.

La machine est complétée par quelques autres organes indispensables.

On voit en H le piston plongeur de la pompe qui refoule, tous les deux tours du moteur (nous allons voir la raison de cette périodicité), la charge nécessaire et suffisante d'huile combustible dans l'appareil de pulvérisation autour de l'aiguille d'injection J.

Le réglage de la quantité de combustible injectée tous les deux tours s'obtient de diverses manières. L'une des plus simples et des plus employées consiste dans l'emploi d'un levier R, entraîné par un mouvement alternatif et qui oscille autour d'un point que le régulateur peut faire monter ou descendre ; ce levier maintient levée la queue de la soupape d'aspiration de l'huile pendant un temps plus ou moins long, et il ne l'abandonne que lorsque le piston H n'a plus, à la fin de sa course, que la quantité voulue de liquide à refouler.

L'air comprimé nécessaire à la pulvérisation de ce liquide est fourni par un compresseur à plusieurs étages,

actionné par le moteur même (c'est du moins le dispositif le plus usuel). On sait que la compression de l'air produit beaucoup de chaleur ; si l'on voulait comprimer directement l'air atmosphérique jusqu'à la pression de 75 atm. parfois indispensable à la pulvérisation du combustible, la température atteinte serait telle que ce combustible s'enflammerait dans le pulvérisateur autour de l'aiguille d'injection, avant son entrée dans le cylindre. On est donc bien obligé d'effectuer la compression en plusieurs étages, c'est-à-dire au moyen de plusieurs cylindres munis de pistons ; l'air, comprimé dans un premier cylindre, est admis dans un second cylindre qui en réduit encore le volume, et ainsi de suite jusqu'à la pression voulue ; entre deux cylindres consécutifs, l'air passe dans un serpentin entouré d'eau où il se refroidit. Dans la plupart des moteurs, la compression se fait ainsi en trois ou quatre étages ; deux pistons seulement sont représentés dans la fig. 1. Sur cette figure on peut voir que ces pistons sont solidaires ; que leurs diamètres diffèrent notablement, puisque l'étage supérieur ne doit comprimer qu'un volume d'air déjà réduit dans l'étage inférieur ; on voit, en outre, le balancier actionné par la bielle motrice qui commande l'ensemble des deux pistons. Dans certains cas, ces pistons sont accouplés à une manivelle spéciale placée en bout de l'arbre moteur ; il est plus rare de trouver des compresseurs actionnés par un moteur indépendant.

La pression de l'air est régularisée par une bouteille métallique intercalée dans le circuit qui conduit l'air comprimé au pulvérisateur. Le débit des compresseurs est plus grand que la quantité d'air juste nécessaire à la pulvérisation ; on emmagasine donc l'air en excès, dans une série de grandes bouteilles B, pour l'utiliser au moment de la mise en marche.

La soupape de mise en marche M, ainsi que l'aiguille

d'injection J, sont commandées par un *arbre à cames* commandé lui-même par l'*arbre-moteur*, la commande de la soupape de mise en marche par l'air comprimé étant supprimée dès que le moteur est mis en route.

Nous en savons assez pour examiner maintenant les quatre temps, c'est-à-dire les quatre courses de notre piston en mouvement alternatif. Ajoutons cependant que chaque course correspond à un demi-tour de la manivelle ou de l'*arbre-moteur* ; il en résulte qu'un cycle s'effectue en deux tours.

**Cycle d'un moteur Diesel à quatre temps.** — *Premier temps : aspiration d'air pur.* — Les fonds du piston et du cylindre sont aussi rapprochés que possible ; puis le piston

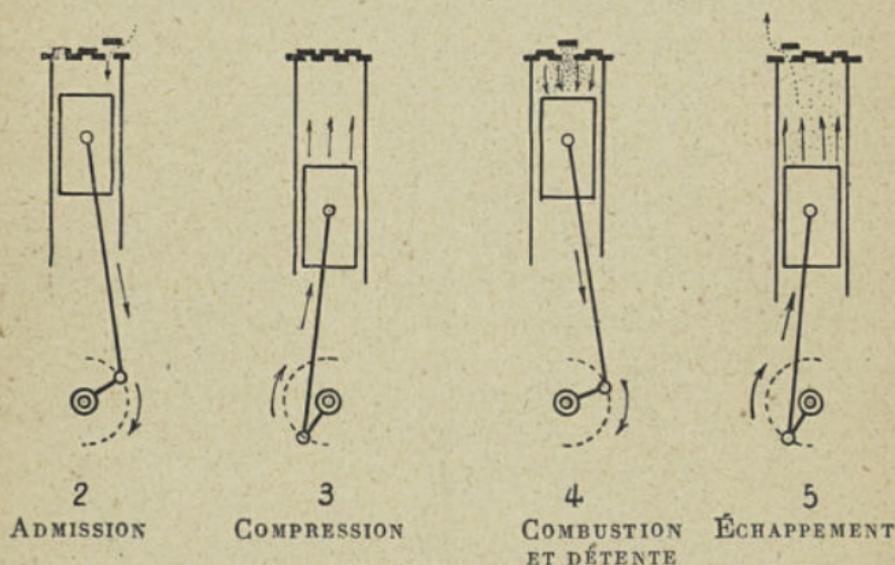


FIG. 2, 3, 4 et 5. — CYCLE D'UN MOTEUR DIESEL A QUATRE TEMPS.

s'écarte (fig. 2), dégaine, et ferait le vide au-dessus de lui si la soupape qui permet l'accès de l'air atmosphérique ne s'ouvrait, remplissant ainsi pendant cette première course généralement descendante, du piston, la capacité maximum du cylindre.

*Deuxième temps : compression de l'air.* — Arrivé à la fin de sa course descendante, le piston revient en arrière (fig. 3), comprimant devant lui l'air emprisonné par la fermeture de la soupape d'admission, laquelle se produit à ce moment. Cette compression énergique réduit à un très faible espace, au fond du cylindre, le volume de l'air et produit, en même temps, une élévation de température qui va être suffisante pour enflammer spontanément le combustible pulvérisé, injecté au commencement du temps suivant.

La compression de l'air, à ce moment, est de 30 à 40 kg par  $\text{cm}^2$ .

*Troisième temps : injection, combustion, détente.* — C'est alors que l'aiguille d'injection, soulevée par un levier commandé et déclenché, à l'aide d'une série d'organes intermédiaires, par le piston même, laisse passer l'huile combustible. Cette huile, la pompe à huile l'a répandue et divisée dans une série de toiles mécaniques ou de trous en chicane ; l'air comprimé sous très forte pression, parfois jusqu'à 70 kg par  $\text{cm}^2$  et qui est fourni par le compresseur et emmagasiné dans la bouteille d'insufflation va la précipiter, sous forme de très fines gouttelettes, dans l'air chaud comprimé dans le petit espace qui reste à ce moment, entre les fonds de cylindre et de piston, espace que l'on appelle chambre de combustion.

L'aiguille qui permet ainsi l'injection reste soulevée pendant le premier dixième environ de la course descendante du piston. Au fur et à mesure de leur arrivée dans la chambre de combustion, les gouttelettes s'enflamment et brûlent très vite dans un excès d'air.

La pression tendrait donc à monter comme dans les moteurs à explosion (d'autant plus que l'air d'insufflation arrive à une pression très supérieure à la compression préalable de l'air par le piston), si l'injection n'était pas

modérée convenablement et si le mouvement descendant du piston, augmentant la capacité offerte aux gaz, ne venait abaisser cette pression.

La conception théorique — combustion à pression constante — n'est cependant jamais très exactement réalisée : suivant la manière et le réglage de l'injection, pendant la phase où, simultanément, le combustible est injecté et brûlé, la courbe des pressions peut monter ou descendre.

Quoi qu'il en soit, dès l'instant où l'aiguille d'injection, abandonnée par le levier qui la soulevait et sollicitée par un puissant ressort, vient fermer l'orifice, appelé *brûleur*, qui laissait passer le combustible, la pression ne peut plus que décroître : le volume laissé libre par le piston augmente rapidement et les gaz s'y détendent, poussant énergiquement le piston (fig. 4). Ce temps est donc le seul temps efficace pendant lequel le moteur reçoit une impulsion.

Pendant le temps précédent, le moteur consommait de la puissance pour comprimer l'air. Il en consommait moins au premier temps pour aspirer cet air et vaincre les frottements, mais il en consommait cependant.

Ainsi, bien que les fig. 2 et 4 soient analogues (le piston exécutant dans les deux temps représentés le même mouvement qui l'éloigne du fond du cylindre), il n'est pas possible de confondre le premier et le troisième temps. Dans le premier, le piston ne peut exécuter son mouvement que grâce à une énergie extérieure, emmagasinée dans le lourd *volant* du moteur ; dans le troisième, au contraire, il est sollicité par l'impulsion interne et énergique provenant de la dilatation des gaz brûlés, impulsion qui va en diminuant avec la détente progressive de ces gaz. Nous ne constatons pas, là, l'impulsion violente des moteurs à explosion ; mais l'effort produit est tout aussi énergique, à cause de la forte pression sous laquelle se fait la combustion.

De même qu'on ne peut confondre, malgré l'identité des mouvements du piston, le premier et le troisième temps, de même le second est différent du quatrième, bien qu'ils ramènent tous deux le piston vers le fond du cylindre.

*Quatrième temps : échappement.* — Le piston qui avait été chassé jusqu'au bout de sa course, est entraîné par le volant, la manivelle et la bielle, et recommence à s'enfoncer dans le cylindre pendant que s'ouvre, au fond, l'orifice qui n'avait pas servi jusqu'à présent. Par cette soupape, commandée également par l'arbre à cames, les gaz brûlés sont chassés vers l'extérieur (fig. 5).

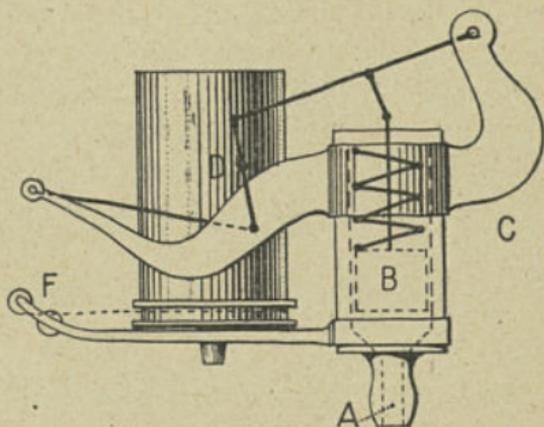


FIG. 6. — PRINCIPE D'UN INDICATEUR DE PUISSANCE.

A, tubulure de communication avec le fond de cylindre. — B, petit piston rappelé par un ressort et recevant la pression des gaz. — C, support du dispositif inscripteur articulé. — D, crayon. — F, dispositif d'entraînement du tambour portant le diagramme.

Le cycle recommence ensuite, et tous les deux tours se retrouve le même état initial.

Les *comes* qui commandent les leviers soulevant les soupapes ne doivent ainsi faire qu'un tour par cycle ; elles sont donc fixées sur un arbre qui doit tourner exactement à la demi-vitesse du moteur, ce qui s'obtient facilement à l'aide d'engrenages démultiplicateurs.

**Diagramme du moteur Diesel à quatre temps.** — Si l'on fait communiquer le fond du cylindre avec un petit

piston rappelé en sens inverse par un ressort (fig. 6), chaque position du piston est la mesure (à une échelle convenable) de la pression intérieure du cylindre.

Un crayon fixé sur un levier lié à ce dynamomètre peut donc tracer sur un cylindre, dont les déplacements angulaires sont proportionnels aux déplacements alternatifs du piston moteur, un diagramme dont chaque point

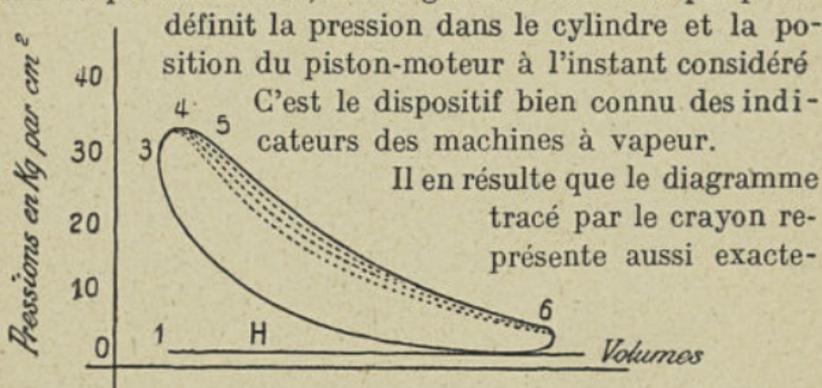


FIG. 7. — DIAGRAMME RÉEL D'UN MOTEUR DIESEL A QUATRE TEMPS.

Les lignes ponctuées de 4 à 6 sont les modifications que l'on peut obtenir en faisant varier la masse de combustible injecté ; on voit que le travail diminue d'une manière sensiblement proportionnelle à la consommation : il est donc beaucoup plus facile de faire varier la puissance d'un moteur Diesel que d'un moteur à explosion, en conservant un rendement raisonnable.

ment que possible les variations de la pression intérieure dans les différents temps du cycle.

Le diagramme ainsi obtenu a l'allure de la courbe représentée par la fig. 7.

La ligne horizontale H représente la pression atmosphérique.

L'inspection de ce diagramme va nous permettre de résumer ce que nous avons dit des quatre temps du cycle.

La ligne 1 représente l'aspiration d'air pur (qui se fait en réalité sous une légère dépression) ; le retour du piston avec soupape d'admission restant ouverte jusqu'à la pression H, puis compression d'air pur, est représenté par la courbe qui s'élève au-dessus de la ligne atmosphérique jusqu'en 3, où commence l'injec-

tion de combustible ; la combustion se produit aussitôt, non pas rigoureusement à pression constante, mais avec un maximum en 4 très voisin de 3 et ensuite, le plus généralement, avec une légère diminution, suivie en 5 d'une détente qui occupe les neuf dixièmes du troisième temps ; en 6 l'échappement s'est ouvert, accélérant la baisse de pression, de sorte que pendant la course rétrograde, quatrième temps, la contre-pression ne dépasse guère que de très peu la pression atmosphérique.

Le diagramme que nous venons d'examiner permet de se rendre compte du bon fonctionnement du moteur et particulièrement des mécanismes qui règlent la levée des soupapes et de l'aiguille d'injection. Nous y reviendrons plus loin.

**Réglage de la puissance.** — Dans presque tous les moteurs actuels, on préfère ne jamais modifier la levée de l'aiguille d'injection ; il en résulte qu'on injecte chaque fois la même quantité d'air surcomprimé. On ne peut donc régler la puissance suivant les besoins qu'en faisant varier la quantité de liquide combustible introduite à chaque levée de l'aiguille.

Cela est possible parce qu'à chaque introduction, la masse de combustible est de beaucoup inférieure à celle que l'air, contenu dans la chambre de combustion, pourrait brûler. Ce très grand excès d'air permet donc de *surcharger* momentanément le moteur, c'est-à-dire d'en accroître la puissance quand cela est nécessaire, puisqu'on peut, pendant quelque temps, brûler plus de combustible que la quantité correspondant à la puissance normale. Cette dernière, nous le verrons, est choisie pour obtenir le maximum de rendement effectif.

Nous avons déjà dit comment on peut faire varier la quantité de combustible injecté en limitant le volume refoulé par la pompe H (fig. 1). La soupape qui aspire le combustible dans le réservoir se termine par une queue qui traverse un presse-étoupe ; la pièce R qui

monte et qui descend avec le piston-moteur, et qui oscille autour d'un point que le régulateur peut faire monter ou descendre, maintient soulevée cette queue pendant un temps plus ou moins long, de sorte que le piston plongeur ne peut refouler le combustible autour de l'aiguille d'insufflation que lorsque la pièce R abandonne la queue de la soupape ; la course utile du piston plongeur se trouve donc modifiée par le *régulateur*, afin que la masse de combustible injectée au commencement de chacun des troisièmes temps du cycle soit toujours proportionnelle à la charge.

**Mise en marche.** — Nous avons supposé jusqu'à présent que le moteur était en marche normale.

Le lancement d'un moteur Diesel est une opération plus difficile que le lancement d'un moteur à explosion. Il faut, en effet, vaincre, même au démarrage, la haute compression indispensable à l'échauffement suffisant de l'air pour l'inflammation spontanée du combustible pulvérisé.

Aussi la mise en marche des moteurs Diesel ne peut se faire qu'au moyen d'air comprimé.

Nous avons vu (fig. 1) que les bouteilles B permettaient d'emmagasiner, pendant la marche du moteur, l'excédent d'air d'insufflation comprimé à haute pression. On a toujours soin, avant d'arrêter un moteur Diesel, de remplir les bouteilles de démarrage à la pression voulue.

Quand le moteur ne comporte, comme celui que nous décrivons, qu'un seul cylindre, on peut, en maintenant ouverte la soupape d'échappement, le faire tourner assez facilement, en s'aidant au besoin de leviers, jusqu'à ce que le piston soit à la position correspondant au commencement de la détente. On ferme alors la soupape d'échappement et l'on met en prise la came qui commande la soupape M de mise en marche. Une première impulsion

motrice est ainsi obtenue ; elle se répète tous les deux tours à la même position. La vitesse du moteur s'accélère ; on met en route l'appareil d'injection de combustible, et le fonctionnement normal s'établit. Dès lors, on supprime la commande de la soupape M, afin que cette soupape, restant sur son siège, empêche toute dépense inutile d'air comprimé.

**Appareil de pulvérisation et d'injection.** — Il n'est pas nécessaire d'insister sur l'intérêt que présente, dans tous les moteurs à combustion interne, la pulvérisation la plus parfaite possible du combustible liquide.

Cela est indispensable au mélange intime entre le combustible et l'air carburant. Sa finesse de pulvérisation a le triple avantage : d'augmenter la surface totale de contact entre le combustible et le comburant ; de faciliter la suspension des gouttelettes dans l'air ; de réduire le temps nécessaire à la combustion complète, faute de quoi l'on ne pourrait que déplorer des dépôts charbonneux dans le cylindre et sur le piston.

La pulvérisation est d'autant plus difficile, dans le cas des moteurs Diesel, que le combustible y est plus lourd, c'est-à-dire moins volatil ; elle y est cependant beaucoup plus nécessaire que dans les moteurs à explosion, non seulement à cause de cette circonstance, mais encore parce que la combustion doit se faire au fur et à mesure de l'injection du liquide dans le cylindre. Il faut empêcher absolument que les gouttelettes ne viennent frapper les parois ; il n'y a pas d'autre moyen que de diminuer la masse de chacune d'elles, de manière que leur vitesse soit atténuée, ce qui leur donne le temps de rencontrer, avant les parois, des masses successives d'oxygène capables d'assurer la combustion intégrale souhaitée.

Il faut bien se représenter que la combustion ne peut être instantanée, même avec une très grande finesse de

pulvérisation, et qu'il faut laisser aux gouttelettes un temps suffisant pour brûler. C'est pourquoi — c'est du moins l'une des raisons majeures — les moteurs Diesel ne peuvent tourner très vite.

Au fond du cylindre se trouve une petite pièce d'acier percée d'un trou et appelée *brûleur* (fig. 8). Ce trou est généralement obturé par l'aiguille A. Autour de cette

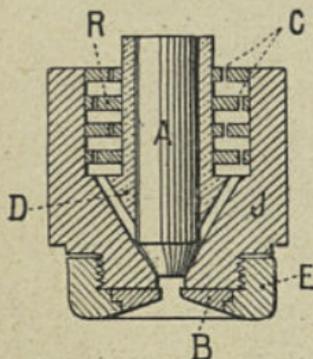


FIG. 8. — APPAREIL DE PULVÉRISATION ET D'INJECTION.

A, aiguille. — B, brûleur. — E, écrou. — R, rondelles. — C, chicanes de ces rondelles. — J, enveloppe ou corps du pulvérisateur. — D, garniture en bronze.

aiguille, au-dessus du brûleur et rapporté comme lui dans la culasse du cylindre, se trouve le *dispositif de pulvérisation* ; il comporte un amoncellement de toiles métalliques ou, le plus souvent, de rondelles métalliques percées de trous en chicane et qui sont imprégnées, à chaque coup de piston de la pompe à combustible, d'une quantité

d'huile dosée par le régulateur. L'air surcomprimé chasse cette huile toutes les fois que l'aiguille d'injection démasque l'orifice du brûleur. A sa partie supérieure, l'aiguille traverse un *presse-étoupe* et se termine par

une *embase* que soulève, en temps opportun, un levier de commande L (fig. 9) ; en temps normal, l'aiguille est appuyée vers le bas contre l'orifice du brûleur par un ressort à boudin assez puissant pour résister à toutes les pressions qui peuvent se produire dans le cylindre.

Le levier qui soulève l'aiguille est commandé par une came calée sur un arbre qui tourne à la demi-vitesse du moteur. Cette came est très petite, on peut le voir sur la fig. 9. Pour régler avec précision la hauteur de levée de l'aiguille, on emploie généralement le dispositif suivant.

Le levier se compose dans sa branche horizontale de deux parties réunies par un joint incliné (dont la bride est visible sur la figure) ; il est donc facile de modifier la hauteur de cette branche. La levée de l'aiguille varie, suivant les moteurs, entre 3 et 8 millimètres.

Dès que l'aiguille est soulevée, l'air surcomprimé, qui chemine à travers les chicanes, pulvérise le liquide dont il entraîne les gouttelettes dans le cylindre en passant dans le brûleur.

Celui-ci comporte parfois plusieurs canaux divergents, afin d'éviter que les gouttelettes ne forment un jet analogue à un dard de chalumeau. Quand le brûleur n'est percé que d'un seul trou, les bords en sont arrondis afin de briser le jet.

Mais que le brûleur soit à un ou plusieurs trous, il est soumis à une température très élevée et, bien qu'il soit d'un acier spécial, on doit le remplacer assez fréquemment ; c'est pourquoi cette pièce est souvent en deux parties. En tout cas, la rondelle percée d'un trou à bords arrondis, constituant le brûleur, est maintenue par un écrou à l'extrémité de l'appareil d'injection ; celui-ci est à son tour encastré dans la culasse du moteur. Ces organes délicats peuvent ainsi être visités et remplacés au besoin.

L'on s'ingénie à diviser autant que possible le jet de gouttelettes finement pulvérisées qui sort du brûleur ; cependant, lorsque le piston est plat, il est difficile d'empêcher un certain nombre de molécules liquides de l'atteindre — il n'y a, en effet, pas plus de 2 cm entre le brûleur et le piston, au moment où l'injection commence — et la combustion des molécules liquides contre le piston y provoque des brûlures qui le mettent hors de service.

Aussi vaut-il mieux ne pas employer des pistons plats, mais au contraire creuser la face active autant qu'on le peut. Il est d'ailleurs indispensable de refroidir le piston des moteurs Diesel.

**Constitution du cylindre et du piston. Refroidissement.** —  
La fig. 9 représente l'un des dispositifs les plus employés.

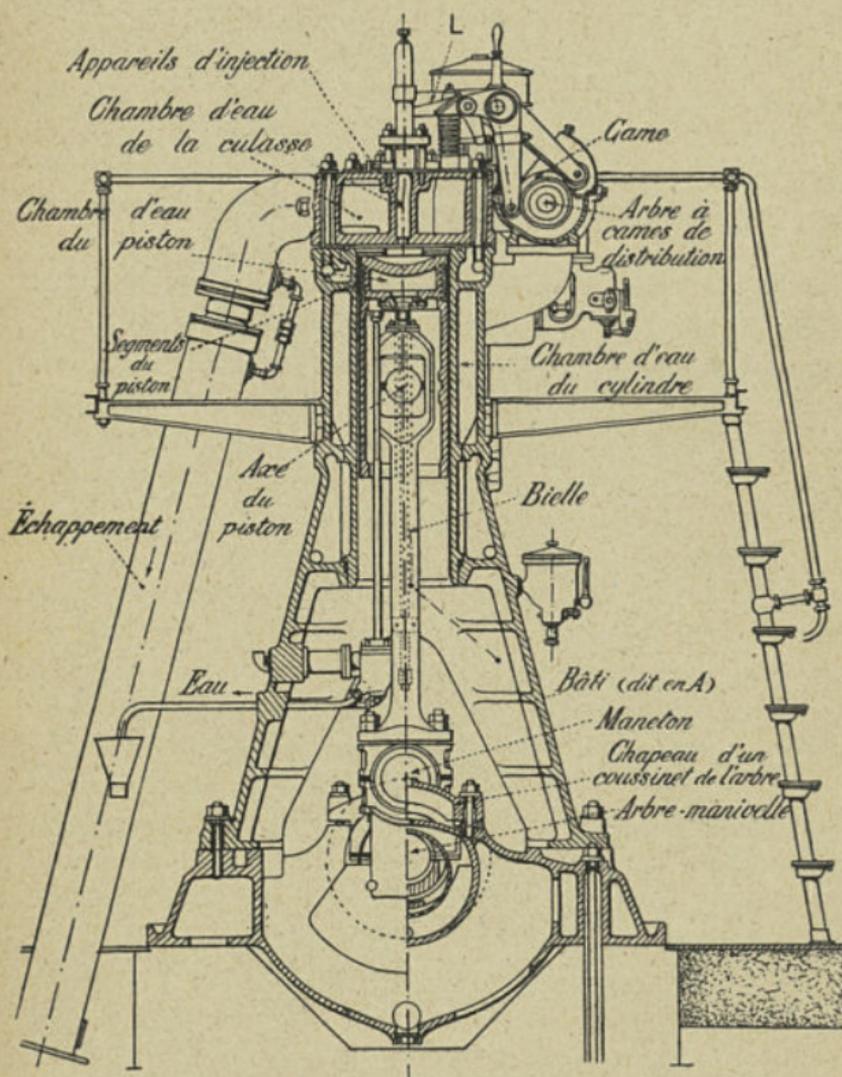


FIG. 9. — CONSTITUTION D'UN MOTEUR DIESEL.

S'il est facile de refroidir les parois des cylindres et de la culasse en faisant circuler de l'eau dans des cavités ménagées lors de la coulée de ces pièces, comme on le fait

pour les moteurs à explosion, il est plus malaisé de refroidir intérieurement une pièce en mouvement comme le piston ; aussi cherche-t-on à s'en dispenser dans les moteurs à simple effet, dont le diamètre ne dépasse pas 350 mm.

Il faut bien remarquer que les conditions d'échauffement des moteurs à explosion et des moteurs à combustion sont assez différentes. Dans les moteurs à explosion, l'échauffement des parois (ou du moins la transmission de chaleur à travers les parois) ne se fait guère qu'au quatrième temps, pendant l'échappement ; les actions thermiques n'ont, pendant le reste du cycle, que des effets *pelliculaires* sur la paroi : les gaz, pendant l'explosion et la détente, sont relativement en repos. Dans les moteurs Diesel, au contraire, l'injection provoque un jet violent qui produit des tourbillons intenses, particulièrement contre la paroi du piston.

On ménage donc, dans le piston, un double fond dans lequel on fait arriver l'eau par un tube guidé dans une couronne située près de la base du piston ; ce tube d'amenée d'eau se recourbe pour pénétrer, par l'intermédiaire d'un presse-étoupe dans lequel il coulisse, dans la chambre d'eau douce qui entoure le cylindre. L'eau revient dans cette chambre par un tube semblable et diamétralement opposé. Ces tubes sont désignés par le nom de *trombones*.

Dans les moteurs marins, la chambre d'eau douce est elle-même refroidie par de l'eau de mer. Il n'est pas possible d'employer cette eau pour le refroidissement du piston, où elle déposerait trop de sel. On emploie parfois l'huile pour refroidir les pistons, mais le refroidissement par eau est le plus efficace (voir p. 210).

**Groupement des cylindres.** — Le moteur monocylindrique que nous venons de décrire est du type *vertical* ; le cylindre, situé à la partie supérieure, s'appuie sur un bâti,

soit directement, soit par l'intermédiaire de jambes de force. Nous avons dit comment le mouvement vertical alternatif du piston se transformait, grâce à la bielle, en un mouvement circulaire et continu du vilebrequin. Celui-ci est fixé dans des paliers, ménagés sur le bâti et munis de coussinets convenablement graissés, qui adoucissent les frottements.

Ce dispositif, qui rappelle celui des marteaux-pilons, est le plus généralement adopté. Quand la puissance désirée est plus forte que celle que l'on obtiendrait facilement avec un cylindre, on juxtapose, parallèlement, un certain nombre d'éléments verticaux analogues chacun à un moteur monocylindrique, mais comportant un seul bâti, un seul arbre avec le nombre correspondant de coussinets et de manetons, c'est-à-dire de parties coudées formant chacune un vilebrequin où vient agir la bielle de chaque cylindre.

On emploie aussi, mais plus rarement, la disposition horizontale, très fréquente au contraire dans les moteurs à gaz.

Dans les gros moteurs, on a trouvé avantageux, dans certains cas, de faire travailler les pistons sur leurs deux faces, réalisant ainsi dans chaque cylindre deux chambres de travail. Les fonds de ces cylindres à *double effet* sont munis de presse-étoupes spéciaux qui servent au passage des tiges du piston.

Que la multiplication des chambres de travail soit obtenue par l'emploi de cylindres à double effet ou, suivant les errements habituels, par la multiplication même des cylindres, on arrive ainsi à constituer, avec des éléments moins encombrants, un couple plus régulier et à équilibrer les forces d'inertie alternatives, ce qui a pour effet de diminuer les trépidations.

En pratique, les constructeurs préparent d'avance, en série, les cylindres, pistons et autres organes élémentaires ;

lorsqu'ils reçoivent commande d'un moteur de puissance déterminée, ils montent ces éléments sur un bâti approprié ; ils disposent l'arbre et les mécanismes de manière que les temps moteurs, c'est-à-dire tous les troisièmes temps des diverses chambres de travail, se succèdent à intervalles réguliers pendant un cycle de travail, soit  $720^\circ$  ou deux tours de l'arbre, lorsqu'il s'agit d'un moteur à quatre temps.

Cette règle ne comporte qu'une seule exception pour les moteurs à deux cylindres à simple effet où les combustions consécutives devraient être séparées par  $360^\circ$ . L'équilibrage exige que les manivelles soient à  $180^\circ$  l'une de l'autre, c'est-à-dire diamétralement opposées, ce qui donne alternativement des intervalles de  $180^\circ$  et de  $540^\circ$ . Il en serait de même dans un moteur comportant un seul cylindre à double effet.

La multiplication des cylindres est avantageuse non seulement pour la régularité du couple moteur, mais encore pour l'équilibrage des pièces en mouvement alternatif.

S'il est facile, en effet, d'équilibrer à l'aide de contrepoids qui ramènent le centre de gravité sur l'arbre et suppriment tous les couples dus à la force centrifuge, les pièces dissymétriques mais en rotation continue, cette correction n'est pas possible pour les pièces en mouvement alternatif comme le piston. Lorsque l'on emploie cependant des contrepoids pour contre-balancer les forces d'inertie de cette dernière pièce, on crée des forces d'inertie perpendiculaires au mouvement ; ce ne peut être avantageux que si l'on est bien certain que les forces perpendiculaires causeront moins de trépidations que celles qui s'exerceraient suivant l'axe.

On s'assure un bon équilibrage en disposant les cylindres à simple effet en nombre pair, parallèlement les uns aux autres.

On a construit des moteurs où deux pistons marchent en sens inverse dans un seul cylindre ; la chambre de travail se trouve entre ces pistons, dont les inerties se contrebalancent parfaitement à chaque instant. Gobron-Brillé le fit pour des moteurs à quatre temps et à explosion, Junkers pour des moteurs Diesel à deux temps.

Ce dispositif séduisant n'a pas rempli toutes ses promesses, à cause des difficultés de réalisation mécanique et surtout à cause de son encombrement.

Nous avons maintenant une idée assez claire du dispositif le plus communément employé dans la construction des moteurs Diesel à quatre temps. Nous allons voir, dans le chapitre suivant, les dispositions générales des moteurs Diesel à deux temps ; cela nous permettra de comparer ces deux types de moteurs et d'étudier le rendement des moteurs Diesel en général.

---

## CHAPITRE II

### DESCRIPTION D'UN MOTEUR DIESEL A DEUX TEMPS

---

**Dispositif général.** — Le dispositif général des moteurs à deux temps est le même que celui des moteurs à quatre temps, à tel point que nous pourrions nous servir de la fig. 1 en répétant à peu près tout ce que nous avons dit du compresseur, de l'insufflation d'air, de la pulvérisation du combustible, de la combustion même. Nous allons donc, dans ce chapitre, nous borner à faire ressortir les dissemblances entre ces deux types de moteurs Diesel.

Nous ferons remarquer, tout de suite, une différence pratique assez intéressante entre les moteurs à deux temps à explosion et à combustion. A la fin du second temps, après la combustion et la détente, les gaz brûlés sont, dans les premiers moteurs, balayés par de l'air carburé ; il en résulte que, pour que ce balayage soit parfait, on envoie toujours un excès d'air carburé : pendant l'échange des gaz brûlés et des gaz frais, il y a donc toujours une fuite de combustible. Cet inconvénient n'existe pas dans le Diesel, puisque le balayage se fait à l'aide de l'air pur.

Il n'en reste pas moins une dépense supplémentaire d'énergie due à la nécessité de comprimer un peu cet air de balayage (la pompe que l'on emploie à cet effet est une complication du moteur Diesel à deux temps) ; par contre, on gagne, relativement au quatre temps, les frottements

mécaniques des deux courses supprimées : aspiration et échappement. La compensation n'est pas absolument parfaite ; mais elle se rapproche plus de la perfection que dans les moteurs à explosion à deux temps. En gros, l'on peut dire que le rendement des Diesel à deux temps n'est que de 2 à 4 % inférieur à celui des quatre temps.

La complication qui résulte de l'adjonction d'une *pompe de balayage* et la faible perte sur le rendement sont compensées par la possibilité de réduire, de moitié à peu près, l'encombrement et le prix d'achat à puissance égale, puisque la combustion d'une même quantité de combustible, dégageant la même énergie, dans un même cylindre, se fait deux fois plus souvent — toutes les deux courses du piston au lieu de toutes les quatre, — c'est-à-dire que le cycle n'exige plus deux tours, mais un seulement.

Il en résultera une différence essentielle dans les commandes des soupapes et de l'injection ; l'arbre qui porte les cames nécessaires à la commande des obturateurs devra tourner à la vitesse même du moteur ; c'est une question de choix des engrenages démultiplicateurs qui n'offre aucune difficulté.

Les soupapes d'échappement sont supprimées et remplacées par des orifices, ménagés dans la paroi du cylindre et découverts par le piston au bout de chacune de ses courses descendantes (nous supposons que le moteur est vertical). On pourrait, comme on le fait dans les moteurs à explosion, et comme nous le verrons pour le moteur semi-Diesel, faire entrer l'air de balayage par des orifices voisins de ceux de l'échappement ; mais, pour que le balayage soit parfait, il faut que l'air traverse le cylindre de part en part ; on le fait donc arriver par un certain nombre de soupapes, trois le plus souvent, réparties dans la culasse autour de l'appareil de pulvérisation et d'injection. Ces soupapes sont évidemment commandées par le même arbre à cames, tournant à la vitesse du moteur.

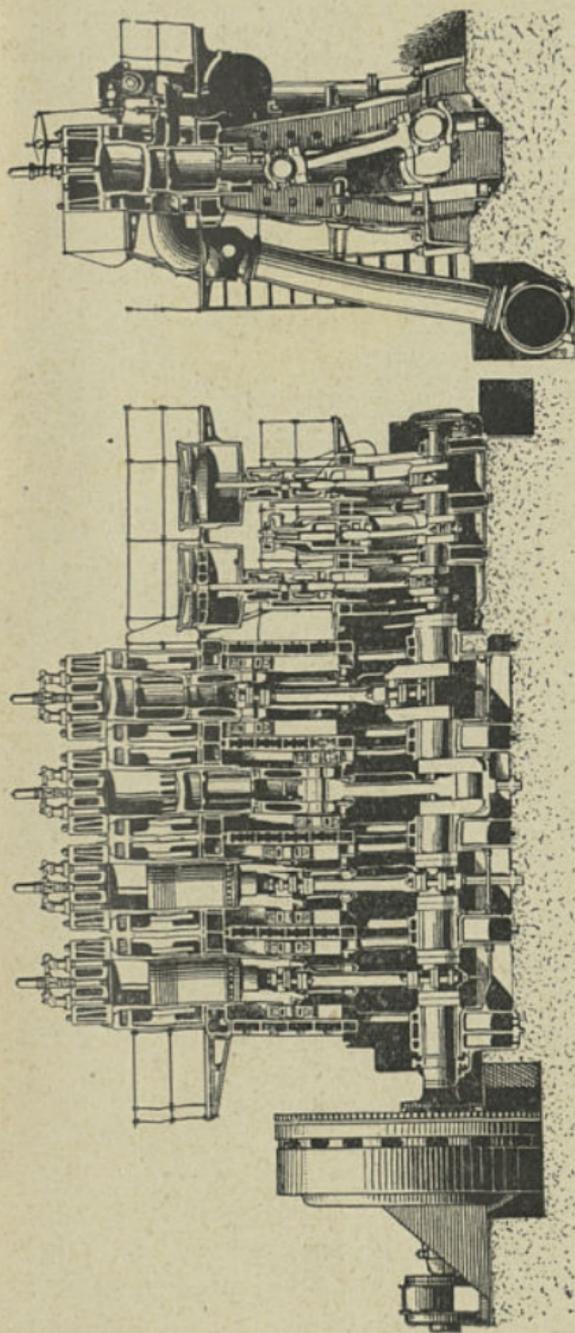


FIG. 10. — COUPES LONGITUDINALE ET TRANSVERSALE D'UN MOTEUR DIESEL DE GRANDE PUISSANCE (1500 CH.) INSTALLÉ A POSTE FIXE.

*Coupe longitudinale.* — A gauche, le volant calé sur l'arbre-moteur dont on aperçoit les coudes sur lesquels agissent les bielles ; les quatre cylindres à gauche (les deux premiers, tels qu'ils se présentent ; les deux autres, coupés) sont les cylindres moteurs. A droite du groupe des quatre cylindres, les compresseurs d'air.

*Coupe transversale* (suivant l'axe de l'un des cylindres). — On y retrouve le bâti, supportant les paliers de l'arbre-moteur et des jambettes inclinées, analogues à celles d'un marteau-pilon, supportant les cylindres. On voit très distinctement, dans une position oblique, une bielle dont le pied (en haut) est articulé au piston et la tête (en bas) est articulée au maneton de l'arbre-moteur.

La canalisation de gros diamètre (à gauche) sert à l'échappement des gaz brûlés.

La soupape de démarrage est commandée de même par cet arbre ou par un autre dispositif tournant à la même vitesse que le moteur.

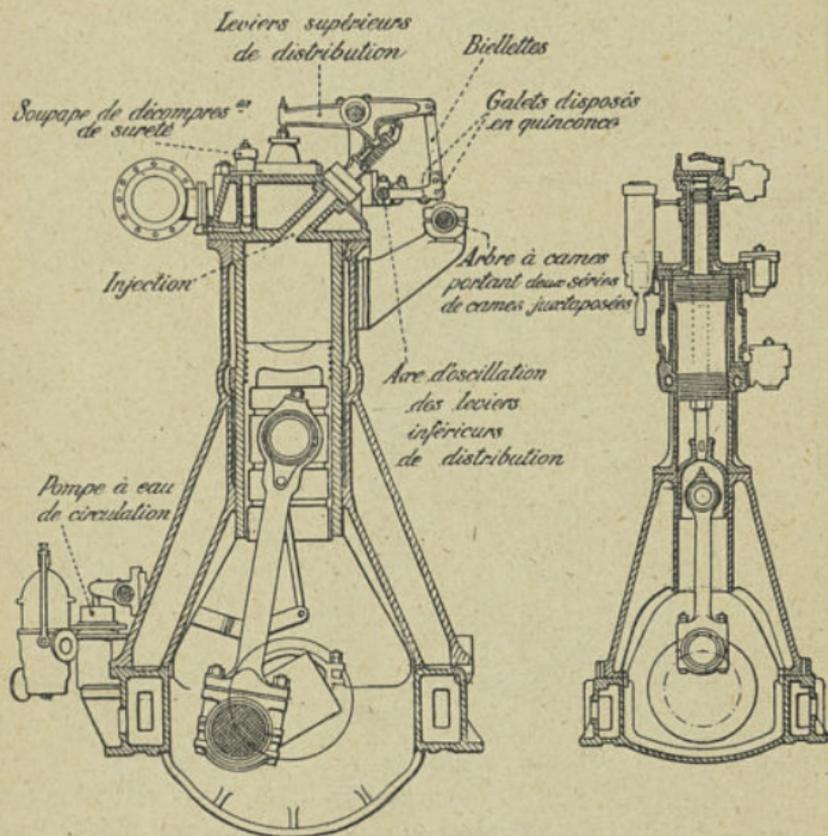


FIG. 11. — COUPES TRANSVERSALES D'UN MOTEUR MARIN DIESEL-NORMAND.

A gauche : coupe suivant l'axe d'un cylindre moteur ;  
A droite : coupe suivant l'axe d'un compresseur.

On voit que, pour la fabrication, il y a peu de différences entre les moteurs Diesel à quatre temps et à deux temps. La puissance des seconds, lorsque les *alésages* (diamètres intérieurs des cylindres) et les *courses* (chemins parcourus par le piston, deux fois le rayon de manivelle)

sont identiques, cette puissance est à peu près le double de celle des premiers, avec des rendements économiques voisins. On s'explique la grande faveur des moteurs Diesel à deux temps, d'une part, lorsque l'on veut réaliser des puissances considérables (fig. 10), d'autre part, lorsqu'il est indispensable de réduire l'encombrement comme cela se présente à bord des navires (fig. 11).

Si la puissance n'est pas exactement doublée, à encombrement égal, cela provient des pertes de rendement dont nous venons de parler et, aussi, de la nécessité de prolonger la course du piston pour laisser au balayage le temps de se produire, comme nous l'allons voir en étudiant le cycle.

Bien que l'air, au commencement de la compression, se trouve à la pression de balayage, c'est-à-dire un peu au-dessus de la pression atmosphérique, la prolongation de la course conduit finalement à une petite réduction de la pression moyenne dans le cylindre.

**Cycle d'un moteur Diesel à deux temps.** — Nous allons décrire le cycle Diesel à deux temps sans entrer dans tous les détails que nous avons déjà donnés pour le cycle à quatre temps, particulièrement sur l'injection et la combustion simultanées suivies de détente, qui se font dans des conditions analogues. Nous supposons que, dans notre moteur vertical, le piston est au haut de sa course, ayant comprimé au-dessus de lui, dans le faible espace qui reste libre entre le piston et le fond de cylindre, l'air de balayage.

*Premier temps : injection, combustion, détente et balayage* (fig. 12). — Les phénomènes qui se déroulent sont, pendant la plus grande partie de la course descendante du piston, exactement les mêmes que ceux que nous avons décrits dans le troisième temps des moteurs Diesel à quatre temps, page 13.

Mais la course du piston est ici un peu plus grande, pour permettre à cet organe de découvrir des orifices d'échappement ménagés dans la paroi latérale du cylindre. A ce moment, la pression s'abaisse très rapidement dans le cylindre, jusqu'au voisinage de la pression atmosphérique. Presque aussitôt, la soupape d'admission de l'air

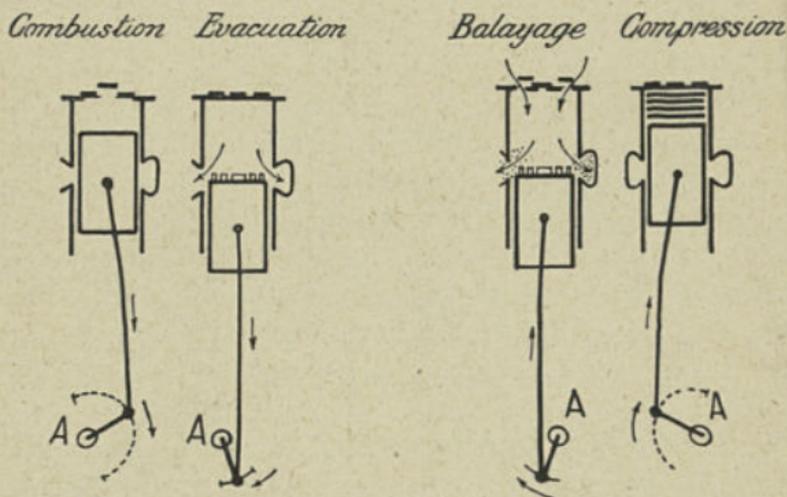


FIG. 12. — CYCLE D'UN MOTEUR DIESEL A DEUX TEMPS.

A gauche : injection et combustion ; à droite : détente, évacuation et commencement du balayage.

FIG. 13. — CYCLE D'UN MOTEUR DIESEL A DEUX TEMPS.

A gauche : balayage ; à droite : compression de l'air.

s'ouvre, la pompe ou le ventilateur de balayage envoie dans le cylindre un violent courant d'air, un peu au-dessus de la pression atmosphérique, qui chasse tous les gaz brûlés.

*Deuxième temps : balayage puis compression d'air pur* (fig. 13). — Arrivé à l'extrémité de sa course, le piston, sollicité par la manivelle et l'inertie des pièces en rotation, revient en arrière, tandis que le balayage se poursuit,

aussi bien au retour qu'à l'aller de la petite course supplémentaire du piston, au delà des orifices d'échappement dont nous venons de parler ; de sorte que, au moment où le piston, remontant, referme ces orifices latéraux d'échappement, le cylindre ne contient plus que de l'air pur.

A partir de ce moment, la compression de cet air par le piston se passe exactement comme dans le moteur à combustion à quatre temps.

Nous avons déjà fait observer que, pendant le balayage, il n'y a échange des gaz brûlés qu'avec de l'air pur, et, par conséquent, aucune perte de combustible, mais seulement une perte d'énergie ; celle emmagasinée dans l'air de balayage par le ventilateur, environ 10 % de l'énergie du moteur ; cette perte d'énergie est compensée partiellement, nous le savons, par la suppression de deux courses sur quatre et des résistances passives correspondantes.

Les fig. 12 et 13 représentent respectivement les deux temps du cycle en question, que l'étude du diagramme va nous permettre de préciser.

**Diagramme d'un moteur Diesel à deux temps.** — Si nous faisons tracer par l'indicateur le diagramme des pressions dans le cylindre, en fonction des positions du piston, nous obtenons un diagramme (fig. 14) tout à fait comparable au diagramme de la fig. 7).

Ce qui diffère, c'est tout d'abord la suppression des deux lignes voisines de la ligne atmosphérique, et qui enregistreraient les deux courses : l'une, initiale, d'admission d'air pur ; l'autre, finale, d'échappement des gaz brûlés, supprimées dans le moteur à deux temps.

A part cela, la seule différence qu'on puisse apercevoir, c'est l'existence, dans le diagramme de ce dernier moteur, au début de l'évacuation, d'un affaissement très rapide des pressions, accusant l'échappement, et, simultanément, le balayage qui dure dans la course de retour, jusqu'au

point à partir duquel le piston, en remontant, couvre les orifices d'échappement. L'aller et le retour de la course supplémentaire de balayage est figuré par la languette qui termine à droite ce diagramme.

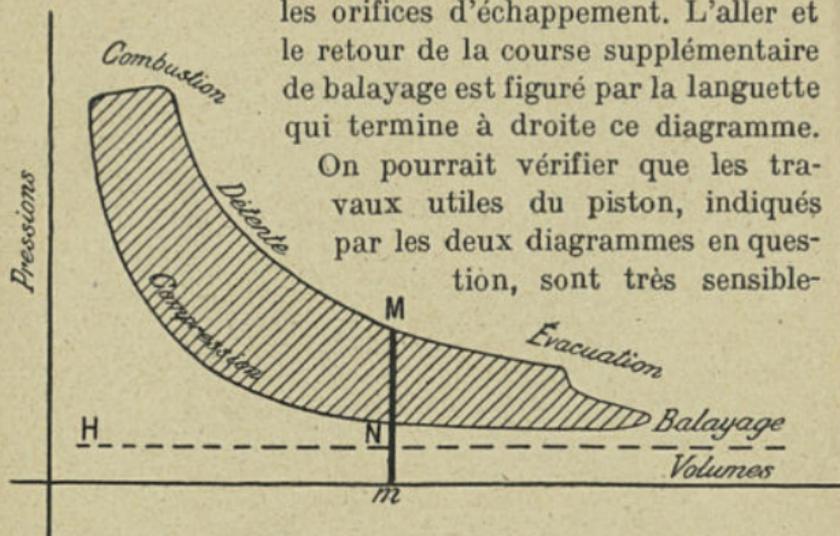


FIG. 14 — DIAGRAMME D'UN MOTEUR DIESEL A DEUX TEMPS.

N. B. — Comme dans tous les diagrammes des moteurs, l'aire hachurée est une mesure du travail utile. En effet, en un point quelconque, et pour un déplacement du piston correspondant à la grosseur du trait  $MNm$ , le travail est représenté par l'aire  $MN$ , différence entre les aires  $Mm$  et  $Nm$  qui représentent respectivement le travail utile (dans la course active) et le travail des résistances nuisibles (dans la course rétrograde).

La somme des surfaces, telles que  $MN$ , est évidemment l'aire hachurée comprise dans le diagramme.

ment équivalents. Ces diagrammes sont les diagrammes réels tracés par la pointe de l'indicateur sur l'enregistreur que nous avons décrit (fig. 6).

## CHAPITRE III

### COMPARAISON DES CYCLES

---

**Diagramme théorique d'un moteur à combustion.** — Pour déterminer les dimensions d'un moteur projeté, à quatre temps ou à deux temps, il est facile de relever, sur les moteurs qui fonctionnent déjà, des diagrammes qui permettent de mesurer la pression moyenne. La puissance à réaliser s'obtient donc en choisissant convenablement la cylindrée (volume total du cylindre) et le nombre de tours par minute.

Dans un moteur à combustion, ce nombre de tours ne peut varier beaucoup pour un combustible donné et pour un appareil pulvérisateur déjà réalisé, car la vitesse linéaire du piston dépend de la vitesse de combustion; cependant, on doit diminuer le nombre de tours, quand l'alésage augmente. On remarque généralement que, pour des moteurs de même constitution, *le produit du nombre de tours par l'alésage est à peu près constant.*

Quand on veut créer un modèle nouveau, on ne peut calculer la pression moyenne qu'en traçant un diagramme *théorique*. On diminue ensuite d'un tiers la puissance ainsi trouvée, pour avoir une idée de la puissance que le moteur développera effectivement.

Nous allons donc expliquer comment l'on peut tracer le diagramme théorique des moteurs à combustion.

Dans ce tracé, on suppose que la combustion se fait à pression rigoureusement constante. On obtient ainsi la figure 15 ; les prolongements en traits interrompus du diagramme montrent le supplément de travail que l'on pourrait obtenir en prolongeant la détente.

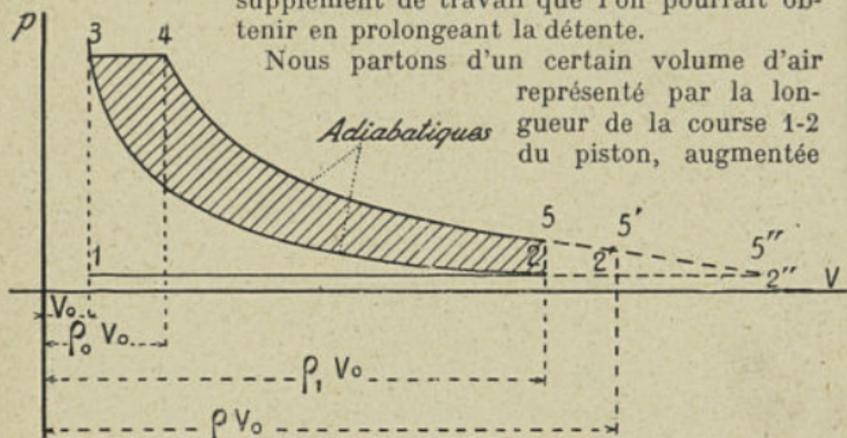


FIG. 15. — DIAGRAMME THÉORIQUE DES MOTEURS A COMBUSTION. Travail supplémentaire recueilli en allongeant la course.

de l'espace mort ou épaisseur de la chambre de combustion 0-1 ; nous comprimons cet air et nous supposons que, pendant cette compression, les parois n'apportent ni ne retirent aucune chaleur ; la courbe 2-3 qui représente ce temps est donc une *adiabatique* dont l'équation est (voir Thermodynamique) :

$$p v^\gamma = \text{constante.}$$

Cette équation nous permet de tracer l'adiabatique et de déterminer notamment la pression  $p_3$  correspondant au point 3. En effet,

$$p_2 v_2^\gamma = p_3 v_3^\gamma, \quad \text{d'où : } p_3 = \left(\frac{v_2}{v_3}\right)^\gamma p_2.$$

La pression  $p_2$  est connue, c'est la pression atmosphérique ; le rapport des volumes  $v_2$  et  $v_3$ , c'est le *taux de compression* du moteur, que l'on désigne ordinairement par  $\rho$ . On a donc :

$$p_3 = p_2 \rho^\gamma,$$

c'est-à-dire que la pression en 3, en fin de compression, est égale au produit de  $p_2$  par le rapport des volumes élevé à la puissance  $\gamma$ .

Ce calcul se fait aisément à l'aide de logarithmes ; il suffit d'écrire :

$$\log \left(\frac{p_3}{p_2}\right) = \gamma \log \rho.$$

On démontre en Thermodynamique que le travail de compression (ou de détente) le long d'une adiabatique est égal à l'énergie interne au point le plus élevé, multipliée par la quantité

$$1 - \frac{1}{\rho^{\frac{1}{\gamma}}}$$

On sait que l'expression de l'énergie interne (1) d'un gaz, tirée de l'équation générale des gaz,  $p\nu = RT$ , dans laquelle  $R = EP(C - c)$ , est la suivante :

$$U = \frac{p\nu}{\gamma - 1}$$

Rappelons aussi que  $\gamma$ , rapport  $\frac{C}{c}$  des chaleurs spécifiques à pression constante  $C$  et à volume constant  $c$ , est pris généralement pour 1,3, lorsqu'il s'agit de gaz comme ceux des moteurs à combustion, qui contiennent en grande proportion de l'acide carbonique et de la vapeur d'eau ; nous pouvons conserver cette même valeur pour l'air. Nous aurons ainsi :

$$U = \frac{p\nu}{0,3}$$

ou, si l'on veut exprimer les pressions en kilogrammes par centimètre carré et les volumes en litres, il faut multiplier par 10, soit :

$$(1) \quad U = \frac{10p\nu}{0,3} = 33,33p\nu \text{ kilogrammètres.}$$

**Accroissement de volume dû à la combustion.** — Pendant la combustion, représentée sur le diagramme par 3-4, il y a un apport de chaleur  $Q$ , en même temps que le volume se dilate de 3 à 4.

Appliquons l'équation fondamentale de la Thermodynamique : le travail de dilatation des gaz est la différence entre la quantité d'énergie apportée sous forme de chaleur et la variation d'énergie interne mécanique de ces gaz :

$$\mathfrak{E} = 427Q - (U_4 - U_3).$$

---

(1) L'énergie interne peut aussi s'exprimer par l'expression  $U = EcPT$ , très simple, mais très difficilement applicable parce que les vraies valeurs de  $P$  (poids de la masse gazeuse), de  $c$  (chaleur spécifique à volume constant) et de  $T$  (température absolue) sont généralement inconnues.

Soit  $v_0$  le volume de la masse d'air emprisonnée, au-dessus du piston, au moment du commencement de la combustion du liquide injecté, c'est-à-dire au point mort haut. Supposons que cette combustion multiplie par  $k$  le volume initial ; l'augmentation cherchée, du volume des gaz, est donc :

$$(k - 1)v_0.$$

étant inconnu, nous nous proposons de trouver une autre expression de cet accroissement.

En prenant comme unités le litre et le kilogramme par centimètre carré, et en remarquant que la pression  $p_3$  ne varie pas pendant la combustion, on peut voir :

1° Que le travail  $\mathfrak{E}'$  de dilatation est égal à dix fois le produit de cette pression  $p_3$  par la variation exprimée ci-dessus, du volume

$$\mathfrak{E}' = 10p_3(k - 1)v_0.$$

2° Que la variation  $v_4 - v_3$  de l'énergie interne est égale (par application de la formule 1) à 33,33 fois le même produit :

$$v_4 - v_3 = 33,33p_3(k - 1)v_0.$$

La somme de ces deux quantités  $\mathfrak{E}$  et  $v_4 - v_3$  (exprimées en kilogrammètres) est égale à 427Q. On a donc :

$$427Q = 43,33p_3(k - 1)v_0,$$

d'où

$$(k - 1)v_0 = \frac{427}{43,33} \frac{Q}{p_3} = 9,85 \frac{Q}{p_3}.$$

L'augmentation cherchée du volume est donc  $9,85 = \frac{Q}{p_3}$ .

**Travail d'un cycle à combustion.** — Nous savons que ce travail est représenté, à une échelle convenable, par l'aire comprise à l'intérieur du diagramme théorique 2, 3, 4, 5 que nous envisageons actuellement. Mais, dans ce dernier cas, il est beaucoup plus facile de calculer le travail du cycle en ajoutant, au travail  $\mathfrak{E}'$ , effectué pendant la combustion et la dilatation à pression constante qui s'ensuit, le travail  $\mathfrak{E}''$  de détente (de 4 à 5), et en retranchant le travail  $\mathfrak{E}'''$  de compression initiale de l'air pur.

Le travail total  $\mathfrak{E}$  est donc :  $\mathfrak{E}' + \mathfrak{E}'' - \mathfrak{E}'''$ .

Nous avons déjà exprimé  $\mathfrak{E}'$ .

$\mathfrak{E}''$  s'effectuant suivant une adiabatique (4-5) est égal au produit de l'énergie interne au point le plus élevé  $33,33 p_3 k v_0$  par

$1 - \frac{1}{\rho^{0,3}}$ ; mais ici, le coefficient de détente n'est pas  $\rho$  mais  $\frac{\rho}{k}$ , les gaz ayant déjà été dilatés dans le rapport  $k$ , au moment où commence la détente. On a donc :

$$\mathfrak{C}'' = 33,33 p_3 k v_0 \left( 1 - \frac{k^{0,3}}{\rho^{0,3}} \right).$$

Le coefficient de compression est, au contraire,  $\rho$  et :

$$\mathfrak{C}''' = 33,33 p_3 v_0 \left( 1 - \frac{1}{\rho^{0,3}} \right).$$

Finalement après simplifications,

$$\mathfrak{C} = 43,33 p_3 v_0 (k - 1) - 33,33 p_3 v_0 \frac{1}{\rho^{0,3}} (K^{1,3} - 1).$$

**Rendement du cycle à combustion ; comparaison avec le cycle à explosion.** — Il résulte, de l'expression précédente du travail  $\mathfrak{C}$  du cycle, le calcul immédiat du *rendement thermique* de ce cycle (rapport de  $\mathfrak{C}$  à l'énergie thermique exprimée en kilogrammètres), si l'on remarque que la première partie de l'expression de  $\mathfrak{C}$  est précisément égale à 427Q (formule 2).

Le rendement  $r$  est donc :

$$r = 1 - \frac{1}{\rho^{0,3}} \frac{k^{1,3} - 1}{1,3 (k - 1)}.$$

Cette formule du rendement thermique théorique du cycle à combustion montre que le rendement de ce cycle diffère de  $1 - \frac{1}{\rho^{0,3}}$ , rendement du cycle à explosion, par l'expression fractionnaire qui termine la formule précédente.

Il est facile de démontrer que cette expression fractionnaire est plus grande que l'unité, et il en résulte que le rendement d'un cycle à combustion paraît moindre que celui d'un cycle à explosion.

Cela n'est vrai que si les compressions sont égales. Mais nous savons que le degré de compression possible dans les moteurs à combustion est le double ou le triple du taux de compression dans les moteurs à explosion ; car la compression, dans ces derniers moteurs, est limitée par le

risque d'*auto-allumage* ou de *détonation* du mélange, alors que les moteurs à combustion, qui ne compriment que de l'air, n'ont pour limite que la résistance mécanique de leurs organes.

Le moteur à combustion est donc en réalité — et de beaucoup — le meilleur moteur au point de vue du rendement.

On augmenterait encore un peu le rendement en prolongeant la détente, suivant le pointillé de la fig. 15 ; on peut admettre que l'expression du nouveau rendement serait la même formule, dans laquelle  $\rho$  représenterait le rapport entre le nouveau volume à la fin de la détente ; cela n'est pas tout à fait exact, puisque le cycle à détente prolongée augmente bien la détente, mais non la compression. Cependant, l'allongement de la course procure une amélioration du rendement du cycle.

Il n'en est pas de même de l'allongement de course qui, dans les moteurs à deux temps, est nécessaire au balayage du cylindre.

**Pression moyenne.** — On parle souvent de la pression moyenne d'un diagramme. C'est la pression hypothétique qui, agissant sur le piston d'une façon égale et continue pendant toute la course motrice, produirait le même travail que celui qui est enregistré par le diagramme.

Soit  $\mathfrak{E}_i$  ce travail indiqué en kilogrammètres, et  $p_m$  la pression moyenne. Le volume de la cylindrée, d'après les conventions ci-dessus, est  $(\rho - 1)v_0$  et, puisque  $v_0$  est compté en litres, le travail correspondant est  $10p_m(\rho - 1)v_0$ .

Par conséquent, si au moyen d'un diagramme réel nous calculons le travail  $\mathfrak{E}_i$ , nous aurons :

$$p_m = \frac{\mathfrak{E}_i}{10(\rho - 1)v_0} \quad \text{kg par cm}^2.$$

Nous pourrions aussi partir du diagramme théorique, mais il est plus commode de prendre, pour base du calcul, la masse  $m$  de combustible introduite dans chaque cycle.

Si l'on appelle  $u$  le pouvoir calorifique utile du combustible, soit environ 93 % du pouvoir calorifique inférieur, le nombre de kilogrammètres fournis sous forme de chaleur est  $427mu$ .

Le rendement thermique théorique du cycle que nous venons de calculer est  $r$  ; le rendement du diagramme usuel est inférieur, à cause de la diminution de la surface qui résulte d'imperfections pratiques ; le coefficient de réduction se tient généralement aux environs de 0,85. On a donc :

$$\mathfrak{C}_1 = 0,85r427mu = 363rmu \text{ kilogrammètres,}$$

ce qui nous permet de prévoir la pression moyenne en divisant ce nombre par 10 fois le volume de la cylindrée en litres.

La considération de la pression moyenne est parfois commode pour la comparaison de plusieurs moteurs.

**Rendement thermique efficace.** — Mais ce qui intéresse davantage les acheteurs d'un moteur Diesel, le rendement thermique *effectif*, ne peut être calculé qu'après constatation, aux essais, de la consommation d'huile par cheval-heure effectif ; cela exige la mesure de la puissance (nous indiquerons plus loin le principe des méthodes pratiques employées).

La consommation d'huile lourde à 10 000 calories variant de 180 à 210 g. par cheval-heure effectif, la quantité de chaleur transmise est de 1 800 à 2 100 calories.

Un cheval-heure vaut  $75 \times 3\,600 = 270\,000$  kilogrammètres et son équivalent thermique est

$$\frac{270\,000}{427} = 633 \text{ calories.}$$

Le rendement thermique effectif d'un moteur Diesel est  $\frac{633}{1\,800 \text{ à } 2\,100}$ , soit 0,35 à 0,40 environ, alors que le même rendement pour les moteurs à explosion est de 0,18 à 0,21.

*Prix du kilowatt-heure.* — Le Syndicat d'applications industrielles des combustibles liquides a proposé une for-

mule qui permet à l'exploitant de se faire une idée du prix de l'énergie produite.

Soit A la valeur de l'huile d'allumage aux 100 kg,

C la valeur du combustible aux 100 kg,

G la valeur de l'huile de graissage aux 100 kg,

E la valeur de l'eau de refroidissement au m<sup>3</sup>,

D le prix de l'approvisionnement en pièces de rechange, matières de nettoyage, chiffons, etc.

On fera le calcul suivant :

Huile d'allumage .....	A × 0,00013
Huile combustible .....	C × 0,0025 à 0,0034
Huile de graissage .....	G × 0,00006 à 0,00011
Eau de refroidissement .....	E × 0,025
Approvisionnements .....	D × 0,001

*Prix de revient du kilowatt-heure.* — Nous donnons cette formule empirique sous toutes réserves et nous conseillons, chaque fois que l'on aurait à commander un moteur industriel ou un moteur marin, de préciser, dans un cahier des charges, les diverses consommations et de les vérifier au cours d'essais prolongés.

Cependant nous ferons remarquer que, dans cette formule du prix de revient du kilowatt-heure, n'entre pas l'amortissement du prix du moteur, de ses accessoires, du bâtiment ou des installations nécessaires à son logement. On devrait tenir compte de tout cela, si l'on avait à choisir entre un moteur Diesel et un moteur à vapeur, par exemple.

## CHAPITRE IV

### LA PRATIQUE DU MOTEUR DIESEL. LES ESSAIS

---

**Fonctionnement normal.** — Nous avons exposé, dans les chapitres précédents, les principes du fonctionnement des moteurs à combustion. Poursuivant l'étude générale des faits qui s'appliquent à tous les moteurs Diesel, nous allons maintenant examiner les manipulations et les soins dont ces moteurs doivent être l'objet ; les moyens de remédier aux pannes, et les dispositions essentielles des appareils employés pour les essais de puissance et de réception que doivent subir ces engins avant d'être mis en service, quelle que soit leur destination ; nous nous réservons de revenir plus loin (p. 75) sur certaines règles spéciales.

*Avant le lancement.* — La première opération consiste à *virer*, c'est-à-dire à faire tourner le volant, de manière à amener le cylindre et les différentes cames et soupapes dans la position où l'injection pourrait commencer si l'on n'avait soin, par une manœuvre convenable des leviers, d'empêcher que l'injection suive immédiatement le démarrage. Au contraire, le levier de mise en marche étant placé dans la situation dite *de départ*, la soupape pour l'admission d'air de lancement est alors en contact avec le galet qui soulève cet obturateur, afin d'introduire l'air comprimé dans le cylindre aussitôt qu'on le voudra.

On a eu soin, préalablement, de vérifier tous les appareils, aiguilles, galets, soupapes, dont le jeu pourrait avoir été modifié pendant l'arrêt et, particulièrement, les appareils de graissage.

La conduite entre le réservoir et la soupape à combustible doit être purgée. La pompe à combustible doit être mise en ordre de marche : le levier étant en position d'amorçage, le combustible doit sortir par le pointeau du clapet qui aboutit à la culasse ; cette vérification terminée, on doit fermer ce pointeau.

Un papillon permet d'ouvrir l'aspiration du compresseur ; un autre, la circulation d'eau de refroidissement.

On règle à l'aide de vannes la pression dans les bouteilles d'insufflation et de démarrage. Le levier de distribution est, nous l'avons vu, dans la position de départ : le moteur est prêt à être lancé.

*Lancement et mise en marche.* — On met alors en communication la bouteille d'insufflation et les bouteilles de démarrage, et l'on ouvre la vanne de mise en marche. Le moteur part aussitôt.

Au bout de quelques tours, on injecte le combustible et, dès que l'on a constaté que les cylindres « ont donné », on ferme la vanne qui donnait accès à l'air comprimé.

Le moteur tourne alors à vide et l'on profite de l'excès de puissance disponible à ce moment pour recharger la bouteille d'insufflation, puis les bouteilles de démarrage ; on ferme ces dernières dès qu'elles sont à la pression voulue, et l'on règle les vannes du régulateur de la pompe de compression d'air (compresseur à plusieurs étages) de façon que la pression d'insufflation se maintienne à une valeur convenable lorsque le moteur tourne à sa vitesse normale, dite « de régime ».

Dans les moteurs qui doivent brûler de l'huile de goudron de houille, des résidus de naphte ou du mazout et, en

général, des huiles lourdes, avant d'admettre le combustible normal, on doit alimenter à l'aide d'huile plus légère et de point d'inflammabilité plus bas, dite huile d'allumage ou de démarrage, jusqu'à ce que le moteur soit assez chaud, ce qui exige cinq minutes environ.

*Marche normale.* — Pendant la marche, la surveillance du mécanicien doit s'exercer notamment sur l'échappement, le graissage, les températures de l'eau de circulation à la sortie des culasses et des pistons et, particulièrement, sur la pression de la bouteille d'insufflation.

Lorsque cette pression est trop faible, le combustible brûle mal, il y a des fumées à l'échappement ; si elle est trop élevée, le moteur *cogne*. Entre la production de suie à l'échappement et le « cognement », il y a une juste mesure à observer. La pression d'insufflation doit varier avec la charge, c'est-à-dire avec le travail fourni par le moteur, et avec le combustible : il faut d'autant plus de pression qu'on produit plus de travail avec une huile plus lourde. Une pression de 40 kg par  $\text{cm}^2$  est suffisante pour la marche à vide, alors qu'à pleine charge, si l'on brûle du mazout, la pression doit atteindre 70 kg par  $\text{cm}^2$ . La bouteille d'insufflation et le réservoir du réfrigérant d'air doivent être purgés de temps en temps.

L'échappement doit être invisible, ou tout au plus légèrement gris, sinon la combustion est imparfaite : il faut régler la pression d'insufflation et, si cela ne suffit, l'injection du combustible.

Dans les moteurs marins, le réglage se fait à la main et selon la vitesse que l'on veut obtenir. Suivant la charge, on obtient un fonctionnement convenable, en faisant varier l'injection du combustible, la pression d'insufflation, et en manœuvrant le levier de l'aiguille à combustible. Le réglage de la vitesse s'obtient en agissant sur la pompe à combustible et sur le réglage de l'admission.

Quant à la circulation d'eau, il vaut mieux refroidir un peu trop que pas assez ; on la règle, dans les différents circuits, de façon que la température de sortie de l'eau ne dépasse pas

- 45° pour les soupapes ;
- 45° à 50° pour les enveloppes de cylindres ;
- 50° pour les culasses ;
- 55° pour les pistons.

*Arrêt du moteur.* — Avant l'arrêt, on décharge le moteur pendant quelques minutes et, si le combustible employé est peu fluide, on doit lui substituer du pétrole pendant cinq minutes de marche à vide, afin de remplir de ce liquide toutes les canalisations jusqu'aux pulvérisateurs, pour permettre le démarrage ultérieur.

L'arrêt se fait alors de la façon suivante : on ferme l'arrivée du pétrole, on attend que les explosions aient cessé, on place le levier de commande de la distribution à la position arrêt, et l'on ferme l'air d'insufflation. Lorsque le moteur a cessé de tourner, on ferme le refoulement du compresseur d'air, on arrête le graissage et, quelques minutes plus tard, l'eau de circulation. On a désamorcé les pompes à combustible et purgé les collecteurs d'air.

**Pannes des moteurs Diesel. Remèdes.** — Lorsque les moteurs sont bien réglés et bien surveillés, les incidents de marche sont rares ; cependant il est indispensable, lorsque l'un d'eux se produit, de pouvoir diagnostiquer très vite ses causes, afin de remettre en marche le plus tôt possible.

L'examen des pannes va d'ailleurs préciser les notions que nous avons acquises jusqu'à présent. Notre étude sera relative tout spécialement aux moteurs à quatre temps ; mais les moteurs à deux temps donnent lieu, à très peu près, aux mêmes incidents, sauf, bien entendu, ceux qui intéressent les soupapes d'échappement ; car, dans ces

derniers moteurs, nous avons vu que les soupapes sont remplacées par des orifices débouchant directement dans les cylindres. Les moteurs à deux temps, par contre, peuvent donner lieu à des incidents dus aux appareils de balayage.

On peut, tout d'abord, distinguer les pannes qui se produisent dès le lancement des pannes ou des incidents qui s'observent en marche.

*Pannes au lancement.* — Le lancement peut, ou ne pas avoir lieu, ou se faire en sens inverse, ou s'arrêter après quelques tours, ou encore ne pas être suivi d'allumage.

Lorsque, les manœuvres de lancement étant correctes, le moteur ne démarre pas, on peut s'attendre généralement à trouver coincées les soupapes de mise en marche ; plus rarement, on trouvera de l'eau dans un ou plusieurs cylindres. La panne peut provenir aussi de l'insuffisance de l'air comprimé, d'un freinage excessif du moteur ou d'un défaut d'étanchéité des pistons par encrassement.

Si de l'air sort des chambres d'aspiration et que cette observation soit bientôt suivie de l'arrêt du moteur, on peut regarder le collecteur d'échappement : les soupapes sont restées fermées ou bien le collecteur est obstrué. Le moteur s'arrête aussi lorsqu'une soupape de lancement reste ouverte continuellement.

Il arrive plus souvent que, la vitesse de régime étant atteinte, le combustible étant injecté, l'allumage ne se produise pas ; cela peut provenir d'une insuffisance, ou de combustible, ou d'air, ou de réchauffage, à moins que les leviers de lancement ne soient pas très exactement devant l'indication « marche », seule position qui assure le soulèvement suffisant des aiguilles d'injection (nous disons, les aiguilles, car nous supposons qu'il s'agit d'un moteur polycylindrique).

Les leviers de distribution étant en bonne place, l'allu-

mage peut rater s'il n'y a pas assez de pétrole dans les pulvérisateurs ; il suffit alors de lancer plusieurs fois le moteur à l'air comprimé, ce qui peut purger les pompes à pétrole ; si cela ne suffit pas, on refoulera le pétrole aux pulvérisateurs avec la pompe à main.

Mais s'il sort une fumée blanche par les robinets témoins du collecteur d'échappement, on est certain que l'alimentation en combustible est suffisante et l'on devra vérifier le détendeur d'insufflation ou la soupape du réservoir d'insufflation, mal réglés ou coincés.

Si tout cela est en ordre, observez le pétrole ; s'il contient de l'eau, il ne reste plus qu'à vider les tuyautages et à purger les réservoirs, à moins que le défaut d'allumage ne vienne, tout simplement, de l'insuffisance de la température de l'air à la fin de la compression ; cela se produit souvent l'hiver, lorsque, la salle des machines étant trop froide, le point d'allumage du pétrole est trop élevé. Si l'on peut entraîner le moteur mécaniquement ou électriquement pendant quelques minutes, il s'échauffera, ce qui déclanchera l'allumage.

*Ralentissement en marche.* — Le plus souvent, la diminution de puissance qui provoque le ralentissement vient d'une insuffisance d'insufflation d'air ; il faut agir sur le régulateur de pression ou sur le débit du compresseur à l'aide du papillon d'aspiration de la première phase de compression.

Il arrive aussi, le pétrole étant trop bas dans le réservoir, que les pompes à combustible aspirent de l'air : il faut remonter le niveau.

Lorsqu'on observe de violents allumages et des crachements de la soupape de sûreté, on peut vérifier l'aiguille du cylindre correspondant : on est presque sûr de la trouver coincée.

Si le ralentissement ne provient pas des causes qui

précédent, il est dû sans doute à des fuites ou à des coincements des soupapes d'aspiration ou d'échappement, des clapets des pompes à combustible. Il arrive parfois aussi que les ressorts du régulateur de vitesse, ayant perdu une partie de leur élasticité, s'affaissent et qu'ainsi le régulateur commande trop le clapet de décharge de la pompe à combustible, c'est-à-dire intervienne trop tôt, pour une vitesse inférieure à celle qui est prévue.

Le ralentissement peut aussi indiquer le commencement du grippage du piston ou d'un palier. Dans ce dernier cas, le moteur ne tarde pas à stopper.

*Panne complète en marche.* — Si la panne n'est pas due à un grippage, c'est que le pulvérisateur, le grain ou brûleur sont bouchés, ou encore que les soupapes ne fonctionnent plus, que la compression de l'air est insuffisante par suite de fuites, que la pression d'insufflation est trop faible. Il arrive aussi que le moteur soit trop chargé ou que, les pompes à combustible étant désamorçées, le combustible fasse défaut.

*Allumage défectueux.* — Lorsqu'un ou plusieurs cylindres n'allument pas, on peut penser à une insuffisance de compression ou de combustible.

Dans le premier cas, une des soupapes de la culasse est coincée ou fuit ; dans le second, la pompe à combustible ne fonctionne pas, à moins que ce ne soit l'aiguille d'injection. Il arrive aussi que l'aiguille d'injection ne ferme pas. Le fonctionnement de cette aiguille est un point délicat dans les moteurs Diesel.

*Le moteur cogne.* — Les chocs peuvent se produire lorsque le piston est au point mort d'allumage, ou bien en un autre point de la course, ce qui est généralement plus grave.

Lorsque le choc se produit en un point quelconque de la course, cela vient du jeu exagéré d'un piston, d'une des articulations des bielles ou d'un palier, ou, le plus souvent, de ce qu'un piston moteur, un piston compresseur ou un palier commence de chauffer. Il faut donc arrêter immédiatement.

Lorsque le choc est au point mort d'allumage, il provient d'une injection exagérée ou incorrecte, à moins que le mauvais allumage ne soit dû à la médiocre qualité du pétrole. On vérifiera donc successivement :

la pression d'insufflation, qui peut être trop forte ;

les trous du diffuseur, qui peuvent être agrandis par l'usure ;

la came d'injection et l'aiguille, dont le réglage incorrect peut donner des allumages intempestifs (les allumages prématurés proviennent souvent de fuites à l'aiguille ou d'un coincement qui empêche la fermeture de cet organe) ;

la qualité du pétrole, et particulièrement son point d'éclair.

*Fumées noires à l'échappement.* — Les fumées à l'échappement indiquent une combustion imparfaite due à des causes multiples que nous ne pouvons qu'énumérer ; les explications que nous avons déjà données au sujet des incidents précédents permettront au lecteur de comprendre comment agissent ces causes.

- 1° Surcharge du moteur provoquant un ralentissement ;
- 2° insuffisance de la pression d'insufflation ;
- 3° fuites à l'aiguille d'injection ;
- 4° fuites à l'une des soupapes de la culasse ;
- 5° encrassement des pulvérisateurs ou usure de leurs surfaces de contact, c'est-à-dire de leurs « portages » ;
- 6° agrandissement des trous des diffuseurs ;
- 7° mauvais combustible ;
- 8° obstruction partielle du collecteur d'échappement ;

9° encrassement des fentes des chambres d'aspiration d'air, qui diminue la quantité d'air aspiré ;

10° mauvais réglage des galets et des cames ;

11° irrégularité dans la répartition du combustible entre les cylindres. Il faut alors refaire le réglage des pompes.

**Moyens de remédier au mauvais fonctionnement de certains organes.** — Nous venons d'examiner la plupart des incidents de marche qui peuvent se produire, de discuter leurs causes et d'indiquer les vérifications successives qui permettent de les localiser.

On refera correctement les réglages défectueux ; on nettoiera ou l'on remplacera les organes encrassés ou abîmés. En général, il est beaucoup plus difficile de connaître la cause d'une panne ou d'un incident que d'y remédier.

Cependant, lorsque le mauvais fonctionnement d'un organe complexe, comme le compresseur, la pompe de circulation d'eau, peut être incriminé, il faut encore rechercher ce qui pêche dans le mécanisme en question. Nous indiquons, ci-après, comment on peut poursuivre ces dernières investigations.

*Insuffisance du débit d'un compresseur.* — L'insuffisance provient de fuites, d'encrassements ou du mauvais fonctionnement des clapets :

- 1° Les soupapes, encrassées fortement, fuient ;
- 2° un clapet est cassé, ou ses ressorts sont cassés ou avachis ;
- 3° le montage des soupapes est incorrect ;
- 4° les segments des pistons, étant coincés ; provoquent des fuites ;
- 5° les réfrigérants d'air sont encrassés ;
- 6° les faisceaux tubulaires de ces réfrigérants fuient ;
- 7° les espaces neutres sont trop forts.

*Mauvais fonctionnement de la pompe de circulation d'eau.* — On peut alors observer des battements, au ma-

nomètre de refoulement ou aux reniflards, qui montrent que l'un des corps de pompe ne fonctionne pas. On peut aussi entendre des chocs à chaque course.

Les battements proviennent de l'une des causes suivantes :

1<sup>o</sup> coincement ou rupture de l'un des clapets, à moins qu'il ne s'agisse que de corps étrangers interposés entre les clapets et les sièges ;

2<sup>o</sup> rupture de l'une des tiges d'appui des soupapes.

Les chocs à chaque course proviennent généralement des reniflards d'air qui sont encrassés, ou dont les ressorts sont trop tendus.

*Fuites au piston moteur.* — Il arrive que l'air fuie fortement dans le carter ; cela ne peut provenir que du défaut d'étanchéité des segments du piston, coincés par suite d'un graissage trop abondant ou de l'emploi d'une huile de mauvaise qualité, ou encore d'emballements fréquents du moteur.

*Fuite à la soupape de sûreté.* — Il s'agit, ou d'une fuite au siège, ou d'un avachissement du ressort. On peut être tenté, pour éviter cette fuite, d'appuyer la soupape sur son siège au moyen de la vis spéciale ; mais on met ainsi la soupape hors d'action. S'il n'y a pas urgence à continuer la marche, ce qui ne peut se présenter d'ailleurs que dans les bateaux sous-marins, il faut arrêter ou roder le siège de soupape.

*Coincement empêchant la fermeture de la soupape d'échappement.* — Si cela provient d'une rupture du ressort ou de la soupape, il n'y a qu'à remplacer l'un ou l'autre ; mais assez souvent, le coincement provient tout simplement de ce que les vis des brides ont été trop fortement serrées, ou de dépôts d'huile brûlée qui collent

la soupape dans son guide. La soupape chauffe alors fortement et il peut se produire des explosions dans le collecteur d'échappement. On peut essayer de décoller le guide en le graissant au pétrole ; mais il vaut mieux arrêter et réparer.

**Conclusion à tirer de l'étude précédente.** — Cette revue pratique des incidents de marche, les détails que nous ne pouvions pas ne pas signaler feront comprendre que, sous une apparente simplicité, le moteur Diesel cache bien des complications que les vendeurs ne mentionnent pas toujours dans leurs catalogues. C'est une raison pour exiger des essais sérieux et prolongés suivant les principes que nous allons indiquer.

Mais nous allons d'abord donner quelques conseils relatifs à l'entretien, surtout en ce qui concerne les aiguilles.

**Entretien.** — Il y a, dans l'entretien d'un moteur Diesel, des règles qui sont communes avec celles que l'on doit observer dans toutes les machines, et nous n'insisterons pas sur les soins à observer pour éviter le desserrage d'un écrou, d'une clavette, d'une goupille ; sur le graissage à l'arrêt, afin d'éviter la rouille ; sur la réfection des joints non étanches ; sur le rattrapage des jeux que prennent par usure les articulations particulièrement aux paliers, têtes et pieds de bielles ; sur le rodage des soupapes et clapets et sur le nettoyage des filtres à combustible. Par exemple, tout mécanicien sait bien que, si une articulation dégage de la fumée (ou seulement est trop chaude), il faut exagérer le graissage : pour un palier, on verse de l'huile par le trou du chapeau de palier ; pour une bielle, on augmente le débit d'huile correspondant de la rampe de graissage. On revient à l'alimentation normale en huile dès que l'échauffement cesse. On emploie généralement, comme lubrifiant, une huile minérale à

point d'inflammabilité élevé (200°) exempte d'acide et de matières résineuses, ayant un bon pouvoir lubrifiant.

Le programme d'entretien dépend de la durée des périodes ininterrompues de marche, de la fréquence des ralentissements ou décharges partielles, des surcharges accidentelles, de l'huile combustible employée, etc.. Si nous supposons une marche régulière de dix heures par jour, on pourra espacer de la manière suivante les visites :

toutes les semaines : les aiguilles, pulvérisateurs et grains ;

tous les quinze jours : les soupapes d'échappement ;

tous les mois : les soupapes d'aspiration et de mise en marche ;

tous les deux mois : les clapets et pompes à pétrole ;

tous les trois mois : les pistons des compresseurs (il faut, bien entendu, visiter les organes du compresseur dès que les manomètres indiquent des variations sur la marche normale) ;

tous les six mois : les pompes à huile et à eau ; les pistons-moteurs.

Il est bien évident que ce programme ne peut être satisfaisant que si le moteur marche bien et régulièrement. Si une articulation a tendance à chauffer (ou commence à prendre trop de jeu) on la visitera à la fin même de la séance de travail où l'on s'est aperçu de cela.

Lorsqu'on « reprend » le jeu, c'est-à-dire lorsqu'on procède à un nouvel ajustage correct des pièces qui tournent l'une contre l'autre (axes, tourillons, coussinets, bagues, etc.), la longueur de l'articulation — par exemple la distance comprise entre l'axe de l'arbre-moteur et le centre d'articulation du maneton et de la tête de bielle, distance appelée « rayon de manivelle », ou encore la longueur même de la bielle — la longueur de l'articulation peut être modifiée ; cela fait que la distance du piston

au fond de cylindre, en fin de course supérieure, varierait assez pour troubler le fonctionnement du moteur, puisque c'est de cette distance que dépend le taux de compression.

Il est essentiel de conserver aux chambres de compression leur hauteur initiale, ce qui est d'ailleurs très facile : il suffit de placer des cales modifiant la longueur de bielle dans le sens nécessaire.

S'il y a des visites qui s'imposent (visite des articulations et rattrapage du jeu que l'on a constaté, visite aux garnitures des pompes à combustible, resserrage du presse-étoupe qui les maintient ou, s'il y a lieu, remise en place des garnitures), d'autres visites ne doivent être faites qu'à de très longs intervalles ; mais il faut y penser, au moins tous les ans.

Les pots d'échappement seront nettoyés tous les ans, ainsi que les enveloppes d'eau du moteur. Pour ces dernières, on les remplit d'une solution composée d'une partie d'acide chlorhydrique dans trois parties d'eau ; il suffit d'une nuit pour dissoudre ainsi les dépôts formés. On rincera ensuite convenablement et l'on établira, après remontage, une circulation d'eau aussi active que possible pendant un quart d'heure.

*Vérification de l'étanchéité des aiguilles.* — Les vérifications d'étanchéité, particulièrement des aiguilles, seront beaucoup plus fréquentes.

On met le moteur en ordre de marche, mais on vire le volant de façon qu'aucune came de commande des aiguilles ne soit en contact avec les galets. On met, d'autre part, chaque cylindre en communication avec l'air libre en ouvrant les robinets qui permettent, quand on veut prendre un diagramme, de faire communiquer le cylindre et l'indicateur ; mais on retire les indicateurs.

Si maintenant on admet l'air aux aiguilles, tout ce qui sort par les robinets en question provient de fuites. Les

aiguilles étant vérifiées, on passe ensuite à tous les joints d'air et presse-garnitures et l'on repère les fuites. On purge la canalisation d'air comprimé et l'on rode les aiguilles qui fuient ; on resserre ou l'on refait les presse-garnitures défectueux.

Le rodage des aiguilles, comme celui des soupapes, peut se faire à l'aide de sable pulvérulent très fin, sable de fonderie humecté d'eau ou d'huile. Il faut prendre soin de monter dans son guidage le clapet que l'on veut roder, et de bien enlever toute trace de sable après l'opération.

*Montage d'une aiguille.* — Nous savons que, sur culasse, se trouve rapportée une boîte dite boîte d'aiguille, qui supporte le guidage et sa garniture.

Avant le montage, il faut s'assurer qu'aucun des goujons de fixation de la boîte d'aiguille sur la culasse n'est faussé, et qu'il est possible de bien centrer l'ensemble ; que le guide d'aiguille s'ajuste et porte exactement sur la boîte d'aiguille ; que le piston-guide du ressort de rappel de l'aiguille coulisse bien dans le contre-siège ; que l'aiguille elle-même coulisse à frottement doux dans le guide, même lorsque sa garniture est serrée ; que le jeu entre le pulvérisateur (qui entoure l'aiguille) et l'aiguille est de un dixième de millimètre et enfin, que l'extrémité de l'aiguille est bien rodée (on touche légèrement de rouge la portée et l'on retire l'aiguille après un petit déplacement angulaire sur son siège). Il est bien évident que le tout doit être très propre.

Le montage se fait alors dans l'ordre suivant : on visse le grain, on met en place la boîte d'aiguille dans la culasse et l'on emboîte le guide avec le pulvérisateur et son ressort. Le contre-siège et le presse-garniture étant ensuite posés, on introduit enfin l'aiguille et le piston-guide, en ayant soin de placer convenablement la rotule et l'extrémité du levier de commande.

On serrera ensuite alternativement les écrous de la même quantité, jusqu'au blocage, et l'on vérifiera le portage et le frottement doux de l'aiguille. Il est essentiel, dans tous les montages de Diesel, de bloquer les écrous, de placer les freins et goupilles qui empêchent le desserrage ; il faut quand même que les articulations ou les mouvements alternatifs des tiges — des aiguilles dans le cas actuel — soient tout à fait libres, mais sans jeu. Tout étant normal, on monte le ressort de rappel et l'on règle le jeu entre le galet et le tourteau des cames, suivant les indications données par le constructeur.

Nous en savons maintenant assez pour comprendre toutes les manœuvres nécessaires aux essais de puissance et de rendement.

**Diagnostic fondé sur l'inspection des diagrammes.** — Mais, sans même faire les essais de puissance, on peut avoir une idée des qualités d'un moteur en observant l'échappement. Sauf au moment où l'on change de régime ou de charge, moment pendant lequel le régime permanent de combustion n'est pas établi, l'échappement doit être incolore, c'est l'indice d'une combustion complète.

Cette indication n'est cependant pas suffisante : il faut encore que le diagramme des pressions, relevé à l'indicateur, soit largement épanoui pendant la période de combustion et affiné pendant la course de détente ; il faut, en outre, un bon indicateur dont les pièces aient la moindre inertie et dont le ressort soit autant que possible soustrait à l'action directe de la chaleur des gaz. On a créé des modèles d'indicateurs dans lesquels le ressort formant dynamomètre est placé au-dessus et à l'extérieur du cylindre qui reçoit l'action des gaz, de sorte que les déformations du ressort, qui reste relativement froid, ne tiennent qu'aux variations de pression que l'on veut enregistrer.

Sur la fig. 16, nous avons indiqué en traits interrompus

le diagramme correct (voir aussi fig. 7, 14 et 25), en traits noirs, différentes bosses ou pointes relatives à des imperfections. Le crochet 1 est l'indice d'une trop forte avance à l'injection ; la dentelure 2 est provoquée par le retard à l'injection, dont l'effet ne s'est manifesté dans la pointe suivante qu'après une première détente de l'air ; la languette 3 indique la présence de l'huile de graissage dans le cylindre ; cette huile a provoqué la

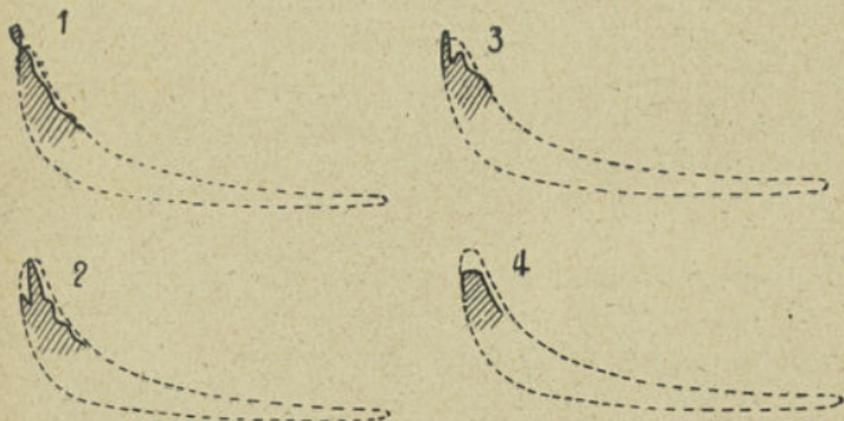


FIG. 16. — ENSEIGNEMENTS A TIRER DE LA LECTURE DES DIAGRAMMES.

formation d'un mélange tonnant, qui a déformé le diagramme à la manière de l'injection prématurée 1, mais sans former de boucle. Enfin, l'ordonnée maximum trop faible 4 prouve que le cylindre n'aspire pas assez d'air frais.

Ces exemples montrent combien sont intéressants ces diagrammes pour l'auscultation des moteurs en service.

La prise de diagrammes est intéressante aussi pendant les essais, et particulièrement pour l'examen des conditions de fonctionnement en surcharge, aux trois quarts, à la moitié ou même au quart de la charge, modifications de puissance obtenues en faisant varier la masse de combustible injecté et, dans une certaine mesure, l'insuffla-

tion d'air. Lorsque ces opérations se font correctement, les diagrammes s'amincissent avec les diminutions de charge, la courbe de compression reste immuable, mais les courbes de combustion et de détente s'affaissent, conservant d'ailleurs la même allure ; l'aspect du diagramme ne change pas, mais l'aire qu'il délimite diminue.

On sait que cette aire représente le travail développé sur le piston pendant un cycle, travail dit *indiqué*. En divisant ce travail par la consommation de combustible, d'huile lubrifiante et d'eau de réfrigération, on aurait les consommations spécifiques par cheval-heure, compte tenu du temps pendant lequel on observe les consommations.

Il faut noter que les consommations par cheval indiquées sur les diagrammes sont inférieures aux consommations effectives. En effet, le travail développé sur le piston n'est pas transformé tout entier en travail utile : une partie sert à vaincre les résistances passives du moteur ; l'autre, disponible sur l'arbre pour actionner une machine quelconque : hélice, alternateur, etc., est celle qui importe le plus. On ne peut la mesurer qu'à l'aide de dynamomètres ou freins.

**Freins dynamométriques.** — Le frein de *Prony*, le plus ancien, est classique. Sur une poulie ou sur un volant qui tourne avec l'arbre, sont placés des sabots dont on peut régler le serrage. Ces sabots tendent à entraîner un levier horizontal à l'extrémité duquel on suspend un poids.

On serre les sabots sur la poulie, jusqu'à ce que le frottement causé par la rotation de cette poulie, entraînée par le moteur, amène le levier dans une position horizontale ; et l'on s'arrange pour que l'équilibre s'établisse, entre les forces agissantes, pour une position horizontale du levier.

Ainsi, le *couple résistant*, exactement égal au couple-

moteur, se mesure par le *produit du poids par la longueur du bras de levier*. En multipliant ce couple par la vitesse angulaire, on a la puissance en kilogrammètres par seconde, d'où l'on déduit le nombre de chevaux effectifs.

On emploie plus souvent une *dynamo-génératrice* qu'on entraîne avec le moteur, et dont on mesure le courant à l'aide de voltmètres, d'ampèremètres et de wattmètres. La puissance effective du moteur qui la fait tourner s'en

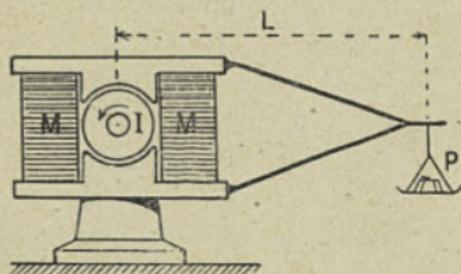


FIG. 17. — DYNAMO-DYNAMOMÈTRE.

P, poids. — L, bras de levier. — I, induit calé sur l'arbre du moteur à essayer. — M, bobines de l'inducteur.

déduit immédiatement, si l'on connaît le rendement de la dynamo.

Le *dynamo-dynamomètre* est une génératrice analogue, mais dont les inducteurs, montés sur billes, peuvent tourner autour de l'axe

de l'induit. A ces inducteurs est attaché un levier analogue à celui du frein de Prony (fig. 17); ils jouent le même rôle que les sabots de ce frein, mais avec une grande précision et des facilités de réglage.

On pourrait employer aussi le *moulinet Renard* ou le *banc-balance*; mais ces appareils ne sont commodes qu'avec les moteurs à explosion, à propos desquels nous les avons étudiés.

*Avantages et inconvénients des freins.* — Les freins du genre Prony sont assez précis et assez commodes pour les moteurs de faible puissance tournant à des vitesses modérées; mais on ne peut les employer, en général, pour les moteurs Diesel de grande puissance, particulièrement

dans les essais de longue durée, car les sabots de ces freins s'échaufferaient beaucoup trop, malgré une active circulation d'eau.

Les dynamos sont très pratiques pour les essais prolongés des moteurs de grande puissance ; il est facile d'obtenir, en marche, des variations de charge et d'utiliser le courant produit pendant l'essai. Ces appareils n'ont pas les mêmes avantages pour la détermination précise de la puissance à chaque instant. En effet, le rendement d'une dynamo est variable avec la température ambiante et surtout avec la vitesse ; les appareils de lecture eux-mêmes (ampèremètre, voltmètre, wattmètre) manquent de précision.

Les mesures sont plus exactes à l'aide des dynamo-dynamomètres, dans lesquels le rendement de la dynamo n'intervient pas, puisque le couple-moteur se mesure directement. Il y a lieu, toutefois, de tenir compte des pertes par frottements dans les paliers et de l'induit dans l'air ; mais ces pertes, qui sont très faibles (environ 0,2 cheval pour 100), peuvent être mesurées d'une manière assez exacte, si l'on fait préalablement tourner l'induit à vide, aux différentes vitesses de l'essai ; il est ainsi facile de porter sur un abaque les puissances absorbées par ces frottements parasites aux différentes vitesses. Aussi les dynamo-dynamomètres sont-ils très répandus.

Nous allons donner maintenant le principe de dynamomètres très pratiques pour les essais d'endurance et assez précis pour les mesures de puissance.

*Dynamomètres Heenan et Froude.* — Ces dynamomètres sont fondés sur le même principe que le frein de Prony et le dynamo-dynamomètre ; mais, au lieu d'utiliser les frottements sur les sabots de frein, comme dans le premier, ou les réactions électro-magnétiques, comme dans le second, on utilise de l'eau qu'on fait circuler entre un

rotor, monté sur l'arbre du moteur à essayer, et une enveloppe, folle sur cet arbre, portant un poids à l'extrémité d'un bras de levier.

Par suite des réactions de l'eau dans les alvéoles du stator et du rotor, entre lesquelles s'établit une circulation

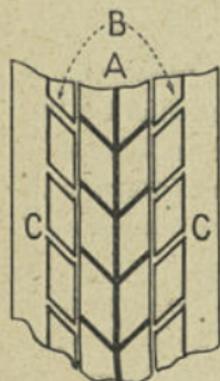


FIG. 18. — DÉVELOPPEMENT DES CANAUX DU ROTOR A ET DU STATOR B (DYNAMOMÈTRE HEENAN ET FROUDE).

C, canaux du stator ; les canaux du rotor sont représentés en traits pleins forts.

provoquée par une série de cloisons obliques ménagées dans les canaux annulaires de ces deux pièces (fig. 18), on conçoit que le mouvement de rotation du rotor puisse tendre à entraîner l'enveloppe, en la faisant tourner sur ses paliers, et que cette réaction soit en relation directe avec le travail développé sur l'arbre du rotor. La mesure de cette réaction permet donc d'évaluer la puissance du moteur : il suffit de caler un levier sur le stator et de faire agir l'extrémité de ce levier sur une bascule, un dynamomètre ou des poids.

La pression sous laquelle l'eau doit être amenée dépend du nombre de tours, mais n'est jamais excessive ; la consommation est de 13 litres d'eau environ par cheval-heure ; on règle l'arrivée de manière que l'eau quitte le frein vers 65°. Le dynamomètre doit être toujours rempli d'eau, mais on peut faire varier la surface de travail et, par conséquent, diminuer la charge du moteur soumis à l'essai en couvrant, à l'aide d'un système de vannes interposées entre le stator et le rotor, un certain nombre de compartiments, qui sont ainsi mis hors du circuit ; il est bien évident que le dynamomètre absorbe sa puissance maximum lorsque les vannes sont complètement ouvertes.

Les freins Froude sont ainsi disposés, qu'il suffit, pour calculer la puissance  $W$ , de lire au peson, à l'extrémité du levier du stator, la traction  $P$  en kilogrammes et de mesurer la vitesse angulaire  $N$  en tours par minute, à l'aide d'un tachymètre. La longueur du bras de levier est choisie afin que la constante  $k$  de la formule.

$$W = \frac{P \times N}{k},$$

soit un nombre rond (600 par exemple, dans le modèle de 500 HP).

Il faut remarquer que HP, abréviation d'un *horse-power*, représente 1,0139 cheval-vapeur. On doit donc s'informer, et si la constante  $k$  de l'appareil se rapporte à des puissances évaluées en HP, il faut la modifier pour avoir les puissances en chevaux-vapeur. Par exemple, au lieu de  $k = 600$ , on prendra :

$$k' = \frac{600}{1,0139} \quad \text{d'où} \quad \frac{1}{k'} = 0,00169.$$

La formule deviendra donc :

$$W = 0,00169PN.$$

**Programme d'un essai.** — Il est indispensable de contrôler dans les ateliers du constructeur, avant de prendre livraison d'un moteur, les différentes caractéristiques garanties par le marché : puissance, vitesse angulaire, consommations à pleine charge, à demi-charge, aux trois quarts de charge, marche en surcharge. Les consommations sont relatives au combustible, à l'huile de graissage et à l'eau de réfrigération.

Les essais à faire subir au moteur sont d'ordinaire définis minutieusement dans un cahier des charges.

La rédaction de ce cahier des charges est ainsi une tâche très délicate ; elle doit être précédée de négociations avec les principaux constructeurs, afin de n'introduire

que des clauses de réalisation facile. Il serait illusoire de trop demander, car on évincerait ainsi les constructeurs soucieux de leurs responsabilités. Si, pour une application spéciale, on devait se montrer particulièrement exigeant, il faut bien penser que ces exigences se payent cher et ne rien demander d'inutile.

Voici les consommations moyennes sur lesquelles on peut actuellement compter :

	PLEINE CHARGE	3/4 DE CHARGE	1/2 CHARGE
--	---------------	---------------	------------

*Fonctionnement avec huile de pétrole.*

Consommation d'huile de pétrole à 10 000 calories, par cheval-heure.	185 à 210 g suivant la puissance du moteur.	200 à 220 g suivant la puissance du moteur.	220 à 240 g suivant la puissance du moteur.
--	--	--	--

*Fonctionnement avec huile de houille.*

Consommation d'huile de houille.	205 à 220 g	215 à 225 g	230 à 250 g
Consommation d'huile d'allumage.	5 %	7 %	10 à 15 %

La consommation d'huile de graissage est variable, suivant la puissance du moteur et sa vitesse de rotation. Généralement, elle est comprise entre 5 g et 8 g par cheval-heure.

La consommation en eau pour le refroidissement du moteur varie, suivant la puissance, de 12 l à 25 l par cheval-heure.

Il convient, en tout cas, de faire garantir les consommations de combustible rapportées au cheval effectif (mesuré au frein) et non au cheval indiqué (calculé d'après le diagramme). D'une part, la consommation au cheval-heure effectif est ce qui importe le plus dans la pratique ; d'autre part, le calcul de la puissance en partant du diagramme n'est pas très précise et pourrait donner lieu à des discussions.

Il importe de définir très exactement les caractéristiques de l'huile employée. Si l'on peut dire, en gros, que la consommation en grammes par cheval-heure, pour un combustible quelconque, correspond à la consommation pour un combustible à 10 000 calories divisée par le nombre de calories du combustible envisagé, il y a des qualités de fluidité, d'homogénéité et de pureté relative qui peuvent modifier l'influence du pouvoir calorifique.

Le mieux est d'exiger un essai prolongé et continu (une semaine par exemple) avec le combustible dont on veut se servir et qu'on est certain d'obtenir à bon prix ensuite. Au cours de cet essai, on déterminera les puissances et les consommations aux différentes charges. Il sera bon de terminer par un essai en surcharge pour une valeur et une durée consenties par le constructeur.

L'essai du moteur aux ateliers du constructeur ne dispense pas d'un essai après transport et montage aux lieux d'emploi, où l'on doit retrouver les mêmes caractéristiques.

Nous allons voir, dans le chapitre suivant, comment ce moteur pourra être installé.

## CHAPITRE V

### MOTEURS DIESEL DU TYPE FIXE. DISPOSITION GÉNÉRALE D'UNE INSTALLATION

---

**Développement de l'emploi du moteur Diesel à poste fixe.** — L'apparition du moteur Diesel avait soulevé de vives critiques, qui s'appuyaient sur certains incidents et accidents survenus au fur et à mesure de l'augmentation de la puissance par cylindre. C'est le lot de tous les perfectionnements industriels. Longtemps les marins ont regretté la marine à voiles, et lorsque les machines à vapeur se sont imposées et sont devenues indispensables, les turbines à vapeur, qui étaient à leurs débuts, ont eu des adversaires obstinés. Actuellement, tous les techniciens sont d'accord pour reconnaître que les turbines sont les seules machines applicables économiquement, lorsqu'on veut développer de très grandes puissances, par exemple dans les supercentrales électriques.

Mais, même dans ces installations considérables, le moteur Diesel peut être utile comme moteur de secours.

Après vingt ans de perfectionnements successifs, cette machine paraît aussi parfaite qu'on peut le désirer. Les constructeurs français ont agi avec sagesse en mettant au point des moteurs de plus en plus puissants.

Il était difficile d'atteler sur un même arbre un grand nombre de cylindres et de pistons. La fabrication d'un arbre-vilebrequin à nombreuses manivelles est fort déli-

cate ; un trop grand nombre d'attelages multiplie les risques d'avaries et rend la surveillance moins commode. On a donc cherché à augmenter la puissance par cylindre, et l'on est arrivé pratiquement aujourd'hui à 750 chevaux-vapeur. On a atteint 2 000 chevaux avec un cylindre d'essai de 1 m. de diamètre, permettant une course de 1 m. 10 et fonctionnant suivant le cycle à deux temps à la vitesse de 150 tours par minute.

La vitesse possible diminue avec la puissance par cylindre et, pour chaque application, on pourra être conduit à une formule différente de réalisation. C'est ainsi qu'un constructeur français s'est ingénié à réaliser, non sans mal, un moteur qui, tournant à 500 tours par minute, peut s'accoupler directement avec une génératrice électrique. Cela n'a pu être réalisé que par une multiplication du nombre des cylindres ; cependant, les résultats sont si satisfaisants que le même constructeur cherche à augmenter encore la vitesse et à la porter aux environs de 700-800 tours, ce qui serait encore plus avantageux pour la commande directe des alternateurs.

Plus généralement, les progrès sont recherchés dans la voie de la simplicité, de la sûreté, de l'endurance, avec une puissance par cylindre aussi élevée que possible.

Il semble bien que, soit pour l'augmentation des vitesses, soit pour celle des puissances, on ne puisse se dispenser de recherches méthodiques et progressives, et que tout bond trop important soit extrêmement dangereux. Nous ne voyons d'ailleurs aucune impossibilité à l'augmentation des vitesses, pourvu que l'équilibrage, les aciers et le graissage soient étudiés préalablement ; la plus grande difficulté vient de la pulvérisation et de la combustion elle-même.

**Applications à poste fixe.** — Si le moteur Diesel s'est beaucoup répandu dans les transports maritimes et flu-

viaux, si l'on songe à lui pour certains transports terrestres et même aériens, son emploi sur les navires, les sous-marins, les locomotives et peut-être à bord des avions pose encore quelques problèmes (nous les examinerons dans les chapitres qui suivent), alors que la fabrication courante actuelle donne des moteurs dont l'emploi à poste fixe est très satisfaisant.

Le moteur à huile lourde à combustion interne est devenu un excellent moteur de petite ou de moyenne centrale électrique ; même dans les grandes centrales hydro-électriques ou à vapeur, il est tout à fait recommandable comme moteur de secours : il permet de réduire le prix du kilowatt en limitant, à chaque instant, la production d'énergie à la quantité strictement nécessaire. Il occupe relativement peu de place, d'où grosse économie de bâtiments. Le moteur Diesel est un bon soutien de secteur électrique.

Dans toutes les usines où une mise en route rapide s'impose, il est avantageux d'avoir un moteur Diesel, d'autant plus qu'on bénéficie, en même temps, d'une réduction de personnel. Les usines d'élévation des eaux, les usines productrices d'air comprimé peuvent être équipées avec des moteurs Diesel.

Il faut cependant reconnaître que ces engins doivent être conduits et surveillés par un personnel exercé, et qu'on s'exposerait à de graves mécomptes en prenant à la lettre les affirmations de certains catalogues, qui assurent que n'importe qui peut devenir un bon conducteur de moteur à combustion. On doit donc développer l'enseignement du moteur Diesel dans les écoles professionnelles, ainsi que dans les écoles d'ingénieurs. C'est la rareté du personnel compétent qui fait qu'on s'exagère les difficultés de l'entretien de ce moteur.

Il y a aussi une question de prix, dont l'importance est très grande : prix de revient trop élevé des installations

et des combustibles liquides, qui s'aggrave, pour ces derniers, de taxes et surtaxes de douanes et octrois. C'est pour améliorer autant que possible ces conditions peu favorables à nos industries, que fut créé le Syndicat d'applications industrielles du moteur Diesel.

Les constructeurs de machines et de turbines à vapeur ne peuvent redouter sérieusement la concurrence du Diesel. Les machines à vapeur restent indispensables dans toutes les industries où la vapeur peut être employée à d'autres fins qu'à la force motrice : teintureries, blanchisseries, usines pour le travail du bois, usines à produits chimiques, dans les exploitations où le charbon est à pied d'œuvre, etc., et dans tous les cas où il faut de très grandes puissances ; mais même dans ces diverses applications, le moteur Diesel constitue un bon moteur de secours.

Nous allons maintenant passer rapidement en revue les principaux types disponibles.

**Caractéristiques des moteurs Diesel de fabrication courante.** — Bien que certaines maisons construisent des moteurs horizontaux, la plupart des moteurs disponibles sont verticaux, comme ceux que nous avons décrits.

Chaque maison a généralement adopté des dimensions types pour les éléments, cylindres, pistons, etc. ; elle obtient les puissances demandées par une juxtaposition de plusieurs cylindres reposant sur le même bâti et attaquant le même arbre.

Ce principe de fabrication est excellent ; il facilite l'établissement des prix de revient, l'interchangeabilité des organes de moteurs entre eux et leur remplacement facile.

Il serait fastidieux de donner la nomenclature des principaux types actuellement offerts aux industriels ; nous nous contenterons d'indiquer quelques caractéristiques.

*La Société générale de constructions mécaniques* (E. Garnier et Faure-Beaulieu) construit des moteurs à quatre

temps. Ceux du type A, qui tournent entre 200 et 214 tours par minute, développent 60, 120, 180 ou 240 chevaux, avec 1, 2, 3 ou 4 cylindres ; de même il y a 4 moteurs du type B qui tournent entre 180 et 187 tours par minute et qui développent 100 chevaux par cylindre.

*La Société des moteurs Chaléassière* offre une gamme très étendue de moteurs à quatre temps et à deux temps. La puissance des premiers s'étend de 25 à 650 chevaux, et celle des seconds, de 750 à 3 000 chevaux. Les cylindres ont 240, 310, 370, 500, 550, 620 et 700 mm de diamètre ; on les juxtapose par deux, trois ou quatre éléments. On ne prend six cylindres de 620 ou de 700 mm que pour arriver respectivement à des puissances de 2 250 ou 3 000 ch. La Société Chaléassière construit aussi des moteurs horizontaux de 25 à 500 ch avec 1 à 4 cylindres de 250 à 500 mm de diamètre. Les vitesses décroissent de 250 tours par minute pour des moteurs de 25 chevaux, à 170 tm pour ceux de 500 ch et à 130 tm pour ceux de 2 000 et 3 000 ch.

*La Compagnie Thomson-Houston* va de 35 à 2 880 ch, avec des moteurs à deux temps et à quatre temps qui sont, soit de la série normale tournant de 250 à 140 tm, soit de la série accélérée, de 350 à 215 tm, mais seulement jusqu'à 1 000 ch. Cette Compagnie emploie 1, 2, 3, 4, 6 et 8 cylindres.

*Les Etablissements Carels (de Gand)* construisent des moteurs à quatre temps de 85 à 1 500 ch, tournant de 187 à 150 tm ; des moteurs du même cycle, mais qui tournent un peu plus vite, de 250 à 225 tm pour des puissances de 100 à 340 ch ; des moteurs à deux temps, de 1 165 à 2 000 ch, tournant de 167 à 125 tm suivant les puissances. Tous ces moteurs comportent 1, 2, 3, 4, 5 ou 6 cylindres.

*La Société suisse Winterthur* construit des moteurs verticaux, à allure lente (270 à 165 tm), de 30 à 400 ch, à

allure accélérée (375 à 215 tm), de 120 à 1 050 ch. et des moteurs horizontaux (220 à 200 tm) de 40 à 170 ch.

*La Compagnie Sulzer* présente un très grand nombre de types. Signalons les moteurs d'une série qui s'étend de 100 à 1 000 ch et qui sont étudiés spécialement en vue de réaliser, soit des machines destinées à la commande mécanique de transmissions, soit des machines pour accouplement direct de génératrices électriques ; le nombre de tours par minute ne dépasse pas 300, cependant. Cette compagnie a livré également des moteurs à deux temps de 1 000 à 3 600 ch et se déclare prête à construire des moteurs atteignant la puissance de 7 500 ch.

*Les chantiers et ateliers Augustin Normand* construisent des moteurs dont les puissances normales s'étagent entre 40 et 1 280 ch. avec 1, 2, 3, 4, 6 et 8 cylindres, la vitesse angulaire variant entre 300 et 150 tours par minute.

*MM. Schneider et C<sup>ie</sup>* construisent des moteurs verticaux à deux temps, de 4 cylindres pour les puissances allant de 480 à 1 200 ch, de 6 cylindres pour les puissances de 1 500 à 3 600 ch. Cette Maison construit en outre des moteurs horizontaux à quatre temps, à *double effet* : 2 cylindres accouplés en tandem donnent 1 500 ch, 4 cylindres, en tandem jumelé, donnent 3 000 ch ; ces derniers moteurs tournent à 107 tm.

*La Société Dujardin et C<sup>ie</sup>* offre des moteurs à vitesse modérée dont le bâti présente la forme d'A, et des moteurs à vitesse accélérée comprenant un bâti fermé et munis d'un graissage forcé. La puissance des différents types est obtenue par la juxtaposition de 1, 2, 3, 4 et 6 cylindres ayant des puissances unitaires de 15 à 200 ch. La vitesse de rotation varie, suivant le type, de 250 à 140 tm.

*La Société des Moteurs à gaz et d'industrie mécanique* construit des moteurs dont l'alsage s'étagé entre 260 et 520 mm. et qui comprennent 1, 2, 3, 4 ou 6 cylindres, de sorte que les puissances vont de 35 à 1 080 ch.

*La Société des Etablissements Delaunay-Belleville* construit des moteurs à bâti ouvert (forme d'A) de 40 à 360 ch, et à bâti fermé de 200 à 1 000 ch. Ces moteurs sont spécialement étudiés pour fonctionner avec des génératrices accouplées directement, bien que les vitesses soient assez faibles (240 à 150 tm).

Les moteurs Diesel construits par la Maison *Renault*, semblent mieux répondre aux exigences de l'accouplement direct, la vitesse angulaire atteignant 500 tours par minute, ce qui est assurément la plus grande vitesse réalisée (1) normalement par des moteurs Diesel.

Quel que soit le moteur employé, le dispositif d'une installation fixe se présente toujours de la même façon.

#### **Disposition générale d'une installation de moteur Diesel.**

— Le moteur doit être installé dans une salle assez grande et bien éclairée, afin que les organes auxquels on doit donner des soins soient facilement accessibles.

On fera, par exemple, une construction en béton armé. Les fondations, à l'endroit qui doit recevoir le moteur, seront renforcées afin de constituer un massif très solide et de grande masse.

On a souvent à placer, en même temps, plusieurs moteurs dont l'un peut servir de secours, chacun d'eux étant attelé directement (ou indirectement à l'aide d'une courroie) avec une génératrice de courant électrique ; on devra alors disposer dans la salle des machines le tableau de couplage des alternateurs ou génératrices et les dispositifs de répartition du courant.

Pour nous borner à ce qui fait l'objet de notre livre, nous ne parlerons que des accessoires du moteur à combustion proprement dit.

---

(1) 7 moteurs de 400 chevaux l'un, actionnant directement 7 pompes multicellulaires Rateau à l'usine de refoulement de Longueville des eaux de la ville de Paris.

La position du moteur étant choisie pour le mieux de sa conduite et de son entretien, on placera dans un angle de

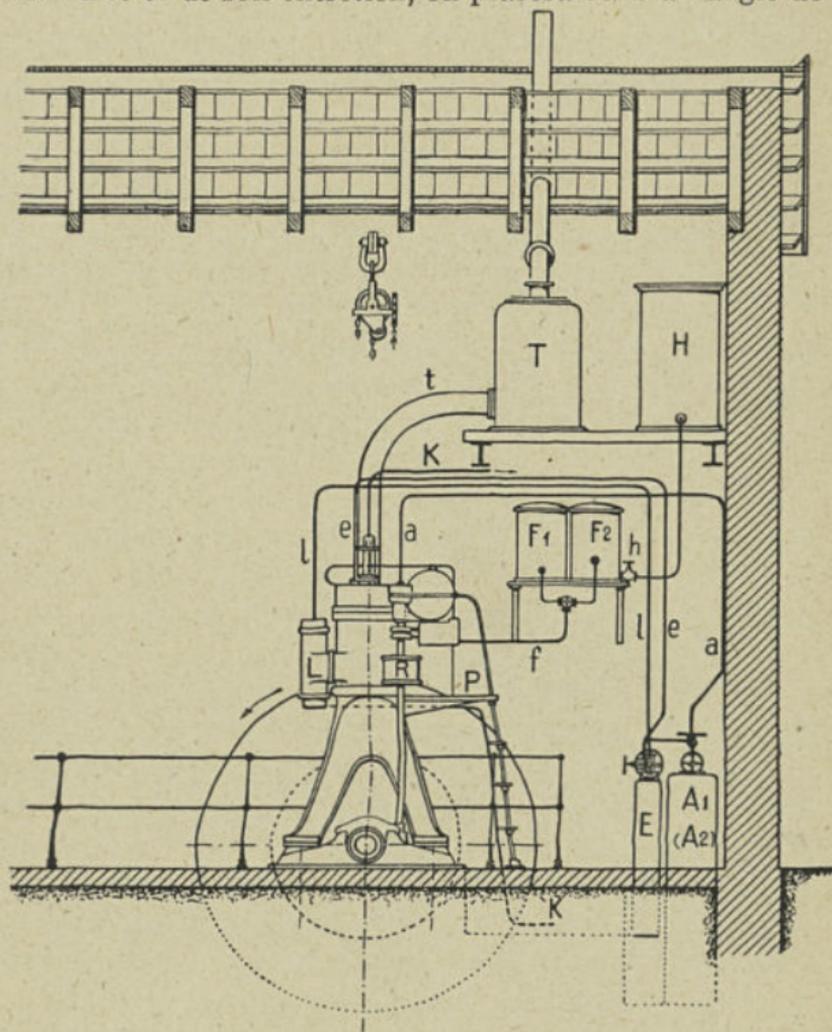


FIG. 19. — INSTALLATION D'UN MOTEUR DIESEL A POSTE FIXE.

$A_1$ ,  $A_2$  bouteilles d'air comprimé pour le démarrage. —  $a$   $a$ , conduite d'air. —  $E$ , bouteille d'insufflation. —  $e$ , conduite d'insufflation. —  $H$ ,  $F_1$ ,  $F_2$ , réservoirs à combustible. —  $n$ ,  $f$ , canalisations pour le combustible. —  $t$ , conduite d'échappement. —  $T$ , pot d'échappement.

la pièce (fig 19) les réservoirs de démarrage contenant l'air comprimé nécessaire. De ces réservoirs partira une conduite

aboutissant à la soupape de démarrage. Le réservoir d'insufflation est évidemment à côté des réservoirs de démarrage, et la conduite d'insufflation qui aboutit à l'aiguille est presque parallèle à la conduite de démarrage.

Sur une console peuvent être placés, non loin l'un de l'autre, le réservoir principal pour la provision nécessaire de combustible et le pot d'échappement ; cette disposition est favorable à l'usage d'un réchauffeur, et indispensable lorsqu'on veut consommer de l'huile lourde de goudron de houille. Au-dessous de cette console, contre le mur, on fixera les réservoirs à combustible, entre lesquels on installera un tuyau d'intercommunication d'où partira la conduite à combustible. Il va sans dire qu'il faut interposer des filtres dans le circuit du combustible.

Il ne restera plus qu'à installer la conduite d'eau réfrigérante, la conduite d'échappement et la cheminée.

Il est bien évident que, lorsqu'on veut marcher au goudron, il y aura, au-dessous de la tablette portant le réservoir principal de combustible, sur une console spéciale, trois réservoirs-filtres : un pour le combustible normal, c'est-à-dire l'huile de goudron, un autre pour l'huile d'allumage, gas-oil ou pétrole lampant, et un troisième pour l'huile de graissage ; chacun de ces réservoirs-filtres, de même que le réservoir principal, peut être rempli par des pompes à main appliquées au-dessous d'eux, contre la muraille. L'huile de graissage, après avoir parcouru les divers circuits de graissage du moteur, est ressemblée dans un réservoir inférieur placé dans une fosse et muni d'un filtre permettant le réemploi de l'huile qui est, pour cela, élevée dans le réservoir supérieur à l'aide d'une pompe à main.

La description plus détaillée d'une installation de moteur Diesel nous paraît inutile, car chaque modèle présente quelques particularités ; il faut aussi tenir compte de la disposition des locaux disponibles. Mais, ce qui paraît

indispensable, c'est l'aménagement, sous le toit du bâtiment, d'un pont roulant pour le montage et le démontage. Il faut aussi, lorsque la quantité disponible d'eau de refroidissement est faible, prévoir un réfrigérant.

**Dispositif de refroidissement.** — Nous savons, en effet, que les cylindres, les culasses, les pompes à air, les fonds de piston et même, dans certains cas, les tiges (moteurs à double effet que nous n'avons pas encore examinés) doivent être refroidis au moyen d'une circulation d'eau.

Il faut examiner avec soin l'eau qu'on utilisera, car les dépôts et les incrustations qu'elle peut occasionner empêcheraient la transmission de la chaleur et pourraient corroder les pistons, fissurer les culasses, etc. En général, il faut rejeter l'emploi direct d'une eau ayant plus de 20° hydrotimétriques. Il faut rejeter l'eau contenant de l'huile, même en faible quantité.

L'épuration des eaux est une question compliquée que nous ne pouvons traiter dans ce livre ; le problème varie évidemment avec la nature, la quantité des sels à éliminer et avec la teneur de l'eau en gaz carbonique. Rappelons cependant que certains dispositifs permettent de retenir les dépôts et de les localiser en des points où l'on peut les extraire. Cette épuration, généralement insuffisante, doit être complétée par l'ébullition pendant trois quarts d'heure environ ; une grande partie des sels se déposent dans la petite chaudière qu'on emploie à cet effet, et qu'on peut chauffer à l'aide des gaz de l'échappement des moteurs Diesel ; on racle le tartre à la faveur de trous d'homme disposés dans cette chaudière.

Mais les procédés chimiques sont plus efficaces. On emploie souvent la chaux pour précipiter les bicarbonates de calcium et de magnésium, puis la soude pour enlever les sulfates. La réaction dure deux heures et demie ; elle commence

dans un réservoir où l'on s'ingénie au contraire à empêcher les remous, afin de faciliter le dépôt des sels précipités et leur rassemblement dans le fond.

Quand on doit ainsi épurer l'eau, ou quand il y a pénurie, on fait circuler l'eau de refroidissement dans un circuit fermé qui comprend un réfrigérant, de sorte que la consommation est limitée à la quantité d'eau qui s'évapore, soit 3 % environ du volume mis en circulation.

Le dispositif est simple : à 5 m environ au-dessus de la tubulure d'entrée d'eau dans les chemises des cylindres, on place un réservoir d'eau froide, en charge par conséquent sur le moteur. L'eau chaude qui sort à la partie supérieure des culasses retombe, par une canalisation munie d'un robinet de réglage, dans un entonnoir qui permet de s'assurer *de visu* de l'existence du courant de réfrigération ; par cet entonnoir, elle gagne une bêche à eau généralement aménagée dans le sol de la chambre des machines. Une pompe de circulation la reprend et l'élève au sommet (à 6 m. environ du sol) d'un réfrigérant à cheminée et à pluie, d'où elle retombe froide dans une bêche située au-dessous. Une seconde pompe de circulation la porte de cette bêche dans le réservoir supérieur.

Si l'on ne dispose pas d'une installation de ce genre, et lorsque l'eau est chargée de sels, il est indispensable de rincer les chambres de refroidissement du moteur avec de l'acide chlorhydrique ordinaire à 33 % d'eau, étendu de son volume d'eau et même, lorsque les dépôts sont épais, on devra laisser séjourner cette solution pendant plusieurs heures ; on la remplacera même au besoin, afin que les croûtes dures puissent se désagréger et se détacher.

Mais il faut ensuite avoir soin de rincer avec une solution de soude ou d'eau de chaux toutes les surfaces qui ont été en contact avec l'acide chlorhydrique, puis avec de l'eau fraîche, afin d'éviter l'attaque du métal.

**Moteurs Diesel à double effet.** — Le refroidissement doit être plus énergique dans le moteur à double effet.

Ces moteurs ne sont pas très en faveur (voir la liste que nous avons donnée p. 71, des principaux types de moteurs de fabrication courante).

Théoriquement, cette solution est pourtant séduisante.

Si l'on fait travailler les deux faces du piston au lieu d'une seule, on a une meilleure répartition du travail. Si l'on emploie sur chaque face le cycle à deux temps, il y a toujours une face qui reçoit un travail utile, de sorte que chaque course est une course motrice. On peut évidemment employer plusieurs cylindres en parallèle (c'est-à-dire côte à côte), ou en tandem (c'est-à-dire dans le prolongement l'un de l'autre, de sorte que la même tige relie les deux pistons).

On ne gagne pas beaucoup sur la matière ou l'usinage du cylindre : le cylindre d'un moteur à double effet doit être, en effet, à peu près de longueur double de celle d'un cylindre à simple effet (il ne serait rigoureusement de même longueur que si le piston était réduit à un disque sans épaisseur, et il s'en faut de beaucoup) ; le piston occupe à peu près la moitié du cylindre, lequel comporte, en outre, des lumières d'échappement centrales.

Aux deux extrémités du cylindre, des plateaux portent des aiguilles d'insufflation et les soupapes ; d'un côté, dans un presse-étoupe, passe la tige du piston.

Ce que nous avons dit des moteurs à deux temps à simple effet nous permettra de comprendre, sans nouvelle figure, le fonctionnement d'un moteur à double effet. Pour fixer les idées, nous prendrons le cas d'un moteur vertical.

Supposons que le piston, se déplaçant vers son point mort bas, découvre à ce moment les lumières d'échappement : au-dessus du piston pressent les gaz brûlés et détendus dans la course qui se termine ; au-dessous, l'air comprimé entre cette face et le fond inférieur du cylindre.

Il reste actuellement un tiers environ de la course descendante à parcourir. Le mouvement continue vers le bas en raison de l'inertie de l'ensemble du système mobile ; les lumières d'échappement se découvrent, les gaz s'y précipitent sous l'action de l'air de balayage provenant de la pompe et qui est introduit par une soupape spéciale. Les produits de la combustion sont ainsi complètement chassés et, au-dessus du piston, le cylindre est plein d'air pur.

Au-dessous, l'air comprimé renfermé dans le petit espace mort est prêt à recevoir et à brûler le combustible pulvérisé qui va être injecté par l'air comprimé. La combustion se produit, poussant le piston qui remonte en comprimant de l'autre côté l'air pur introduit.

Lorsque le piston, remontant ainsi, a parcouru 70 % de sa course, sa face inférieure, à son tour, découvre les lumières d'échappement, comme, dans la course précédente, les avait démasquées la face supérieure. Des phénomènes identiques à ceux que nous avons déjà décrits se produisent en sens inverse, au voisinage du point mort haut.

Qu'y a-t-il de plus, au point de vue mécanique, dans un moteur à double effet ? Peu de chose, mais une chose très gênante, la tige du piston.

Dans un moteur à simple effet, le cylindre n'est pas fermé par le bas (nous supposons qu'il s'agit de moteurs verticaux). On articule directement le pied de bielle à l'axe du piston, chose impossible dans un moteur à double effet dont le cylindre est fermé par deux fonds ; on ne peut que percer l'un d'eux d'un orifice muni d'un presse-étoupe étanche et qui permet seulement le mouvement alternatif d'une tige, placée dans l'axe commun au piston et au cylindre et liée rigidement au premier ; c'est sur cette tige, et non directement sur le piston, que l'on articulera le pied de bielle. Cette tige sera, c'est évident, convenablement guidée ; cela se fait facilement, et depuis longtemps,

pour les machines à vapeur ou les moteurs à gaz à double effet ; mais elle doit être beaucoup plus refroidie, ce qui est difficile.

Le refroidissement des moteurs Diesel à double effet est particulièrement délicat, non seulement dans la tige creuse du piston, dans le piston lui-même, mais également, dans les chemises du cylindre et de la culasse, à cause de l'intensité de la réfrigération, qui doit être au moins le double de ce qu'elle est dans un moteur à simple effet. Les pompes de circulation, devant être plus puissantes, seront encombrantes.

Les pompes de compression de l'air le sont également : leur volume est comparable à celui des cylindres moteurs, si bien qu'en définitive les avantages de poids et d'encombrement qu'on pouvait attendre du travail sur les deux faces du piston sont loin d'être réalisés.

Il y a encore d'autres désavantages.

Le passage de la tige du piston affaiblit les culasses ; les garnitures pour l'étanchéité du presse-étoupe souffrent beaucoup des pressions et des températures élevées et durent peu. D'autre part, du côté de la tige, on ne peut placer l'aiguille d'insufflation dans l'axe du fond de cylindre ; cela gêne à tel point la combustion, qu'on a dû placer, sur le même fond, une seconde aiguille, symétrique de la première par rapport à l'axe ; nouvelle complication.

Pour toutes ces raisons, le moteur Diesel à double effet ne semble pas, en définitive, plus avantageux qu'un moteur à simple effet. Cependant, plusieurs constructeurs poursuivent la délicate réalisation d'un moteur à double effet susceptible d'être un bon moteur d'atelier. On peut penser qu'ils y arriveront, tandis que l'emploi d'un moteur à double effet sur les bateaux semble, en tout cas, moins recommandable, non seulement à cause de la complexité, mais aussi à cause des grandes dimensions des cylindres, des compresseurs, qu'il est beaucoup

moins facile de loger à bord que les organes correspondants d'un moteur à simple effet. C'est pourquoi nous ne parlons des moteurs à double effet que dans le présent chapitre consacré aux moteurs fixes.

Ce n'est d'ailleurs que tout à fait exceptionnellement que l'on emploie des moteurs à double effet. Les moteurs à simple effet pour la force motrice, l'éclairage, les pompes à eau ou les compresseurs d'air ont un bon rendement économique.

Nous avons donné, page 42, une formule qui permet de calculer le prix du kilowatt-heure. Nous allons, d'une autre manière, calculer le prix de revient, en prenant pour exemple un moteur de 370 chevaux.

**Calcul du prix de revient de l'énergie produite.** — Dans cet exemple, les prix élémentaires que nous indiquons pour le matériel, les huiles, la main-d'œuvre varieront évidemment avec les circonstances, et notre calcul ne peut donner qu'un ordre de grandeur de la dépense.

La dépense totale comprend : les frais d'installation, les frais fixes annuels et les consommations.

#### INSTALLATION

Moteur .....	280 000 fr
Alternateur .....	60 000
Accessoires .....	12 000
Fondations (100 m <sup>3</sup> de béton à 19 f.)..	19 000
Montage .....	16 500
	<hr/>
	387 500 fr

#### FRAIS FIXES ANNUELS

Amortissement en 15 ans au taux de 6 % (soit 10 % du capital engagé) ....	38 750 fr
Personnel } 1 mécanicien .....	8 000
} 1 aide .....	7 000
Pièces de rechanges, ingrédients .....	5 000
	<hr/>
	58 750 fr

Supposons que notre moteur tourne 350 jours par an, chaque jour pendant 15 heures ; il développera annuellement :

$$370 \times 350 \times 15 = 1\,950\,000 \text{ ch-h.}$$

Les frais fixes par ch-h seront donc ..... 0,030

#### CONSOUMMATIONS PAR CH-H

Combustible à 275 fr la tonne, consommation de 190 g par ch-h	$0,19 \times 0,27 \dots$	0,051
Huile de graissage à 3 fr le kg, consommation de 3 g par ch-h	$0,003 \times 3 \dots \dots \dots$	0,009
Total des frais par cheval-heure	.....	0,090

Si nous admettons pour l'alternateur un rendement de 0,9, le prix du kilowatt-heure sera :

$$\frac{0,09 \times 1\,000}{736 \times 0,9} = 0,135.$$

Pour dresser une évaluation complète et précise, il faudrait tenir compte des prix d'achats du terrain, du bâtiment, des dispositifs accessoires d'épuration d'eau, etc., qui seraient nécessaires. On serait ainsi en mesure de faire un choix entre les diverses solutions que l'on peut adopter. Il en résulterait que la centrale d'une usine serait très souvent munie de moteurs Diesel, si l'on ne devait pas tenir compte d'autre chose que du prix de revient.

**Discussion des aptitudes du moteur Diesel comme moteur fixe.** — Dans les houillères ou dans les mines de lignite, il paraît assez sage de consommer le combustible solide à l'état naturel ou pulvérisé pour chauffer des chaudières qui alimentent des turbines à vapeur. Dans un établissement métallurgique où l'on dispose des gaz des hauts fourneaux ou des fours à coke, on prendra des moteurs à gaz. Cependant les usines à gaz et cokeries (bien que cela puisse paraître paradoxal) ont souvent avantage à prendre des moteurs Diesel comme moteurs

principaux : il suffit de distiller le goudron obtenu en même temps que les gaz et le coke pour avoir à bon compte les huiles nécessaires et vendre, en outre, les autres produits de cette distillation.

Mais si dans une cokerie, par exemple, on préfère utiliser pour la force motrice le charbon qui va aux fours à coke, il faut en tout cas prendre comme force motrice de secours une source étrangère à ce circuit normal d'utilisation, afin que le secours ne soit pas illusoire.

Le moteur Diesel convient bien à cela. Car, lorsqu'il s'agit d'une installation de secours, ou même d'appoint périodique, d'autres facteurs que le prix de revient entrent en jeu : la rapidité de la mise en marche, la possibilité d'assurer le fonctionnement en cas de grève, avec l'aide des ingénieurs et contremaîtres. En effet, la mise en marche d'un moteur Diesel peut se faire en une ou deux minutes ; la mise en parallèle de deux groupes, en deux ou trois minutes, suivant l'habileté du mécanicien.

Quant à la continuité des services que l'on peut attendre d'un moteur bien conduit, elle a dépassé toutes les espérances. M. Paul Dufour, chef des travaux au Conservatoire des Arts et Métiers, a cité, au Congrès international des combustibles liquides de 1922 (numéro spécial de *Chimie et Industrie*, page 307), l'exemple d'un moteur Diesel de 1 500 ch qui assura, dans l'une des usines de la Compagnie des Forges et Aciéries de la Marine et d'Homécourt, un service de 4 878 heures en un an, soit plus de 16,5 heures consécutives de travail moyen. A deux reprises, ce moteur avait dû tourner sans aucun arrêt pendant soixante jours, c'est-à-dire pendant 1 450 heures consécutives ; cette performance est remarquable, si l'on pense qu'à la suite de ces périodes de travail ininterrompu, il continua d'assurer, chaque jour, un service de 12 à 22 heures par jour.

**Points faibles du moteur Diesel.** — Puisque nous nous en référons au Congrès des combustibles liquides, nous ne pouvons pas ne pas signaler certaines faiblesses du moteur Diesel, qui ont été exposées, au même congrès, par M. R. E. Mathot.

La lenteur relative de la combustion, par rapport à la rapidité que l'on peut constater dans les moteurs à explosion, est due à la résistance offerte par les petits éléments de formes très variables qui sont disposés dans la tuyère, afin de favoriser la pulvérisation et de retarder l'afflux d'huile combustible.

On sait que, pour vaincre cette résistance, on insuffle l'air fourni par un compresseur à deux ou trois phases, qui fait corps avec la machine. La pression de l'air d'insufflation doit être d'autant plus forte que l'on veut employer une huile plus réfractaire à la combustion ; cela, parce que la résistance du pulvérisateur augmente à raison même de la compression de l'air dans le moteur.

Si, pour brûler les huiles lourdes, il faut élever cette compression, ce n'est pas absolument pour assurer l'inflammation du mélange combustible (cette compression n'est pas beaucoup plus élevée pour une huile très lourde que pour une huile plus légère), c'est parce qu'il faut disposer d'un excès de température en prévision du refroidissement qui se produit lorsqu'il y a l'air d'insufflation à 80 kg de pression va se détendre dans l'air comprimé à 40 kg.

Ainsi, il faut élever la pression dans le cylindre pour parer au refroidissement dû à la détente de l'air d'insufflation ; on doit aussi augmenter la pression de ce dernier, non seulement pour vaincre les résistances du pulvérisateur, mais encore parce que la pression dans le cylindre est augmentée. Il en résulte un excès de chaleur coûteux et produit en pure perte.

Or, il est très onéreux de comprimer l'air à 80 kg. On sait, en effet, que le travail de compression augmente

beaucoup plus vite que la pression ; en réalité, l'air d'insufflation absorbe ainsi 10 % environ du travail effectif du moteur.

En outre, le compresseur à 2 ou 3 cylindres est une machine compliquée, dont le prix entre pour un dixième environ dans le prix de revient du moteur, et qui exige des soins et une surveillance spéciale.

Lorsque l'huile de graissage s'accumule en certains points du compresseur, au contact de l'air chaud à haute pression, une explosion peut se produire et causer un accident mortel.

Le pulvérisateur est un organe délicat qu'il faut adapter à chaque combustible ; la boîte de bourrage qui l'empêche de fuir ne reste étanche aux pressions élevées que si elle est bien entretenue. Lorsqu'il y a des fuites, le mécanicien serre son bourrage à l'excès, ce qui peut bloquer le pointeau dans la position ouverte ; l'injection prématurée dans le cylindre où règne une pression de 35 kg peut provoquer, non plus une combustion simple, mais une explosion donnant des pressions de l'ordre de 80 kg. Il faut donc construire le moteur en prévision de cet incident, ce qui en augmente le prix.

Cependant, plus de vingt ans de perfectionnement ont abouti à des réalisations remarquables. Nous avons rapporté plus haut un des exemples d'endurance des moteurs Diesel ; nous verrons que les applications aux sous-marins renforcent encore la confiance que l'on peut avoir.

Les moteurs Diesel atteignent d'ailleurs aux puissances maxima des machines à vapeur, puisqu'il existe des unités de 6 000 chevaux.

Il existe aussi des moteurs de puissance très réduite que nous examinerons dans un chapitre spécial, en même temps que les moteurs à injection mécanique, qui suppriment les compresseurs d'air et une partie des inconvénients que nous venons de signaler.

La réduction de la consommation, qui résulte de l'emploi des hautes compressions, peut donc être étendue aux moteurs de faible puissance (de l'ordre de 10 ch). Il faut faire observer cependant que, malgré cette réduction de la consommation d'huile, le prix de l'énergie reste élevé à proportion de celui du combustible. On peut espérer que celui-ci baissera, mais on peut évidemment s'attendre aussi à des perfectionnements dans la récupération des chaleurs perdues, le bilan thermique d'un Diesel ordinaire pouvant s'établir comme suit :

## CALORIES

1° transformées en travail ou absorbées par les frottements .....	43
2° perdues par l'échappement .....	22
3° perdues par la circulation d'eau .....	33
4° perdues par rayonnement .....	2
	100

L'article 1 ne comprend pas — il s'en faut — que du travail utile ; mais il paraît bien difficile de supprimer les résistances passives.

On peut, au contraire, tenter la récupération d'une partie des pertes accusées par les articles 2 et 3, et pour terminer ce chapitre sur les moteurs fixes, nous allons exposer une tentative heureuse, appelée à un grand succès.

**Récupération des chaleurs perdues.** — La machine Still est la combinaison, dans le même cylindre, d'un moteur à injection mécanique de combustible dans l'air comprimé et d'une machine à vapeur. Sur l'une des faces du piston se développe, comme dans le Diesel, l'impulsion motrice des gaz de combustion ; l'autre face est soumise à l'action de la vapeur produite par la récupération d'une fraction de la chaleur des gaz brûlés et de la circulation d'eau.

Le cycle est établi de telle façon que ces deux actions motrices ne se contrarient pas, mais s'additionnent.

Sans entrer dans le détail du mécanisme, nous pouvons en faire comprendre l'économie.

L'enveloppe du cylindre est maintenue à la température de 180° C. correspondant à une pression de vapeur de 10 kg par cm<sup>2</sup>, qui contrebalance ainsi partiellement la pression intérieure du cylindre, tout en assurant une répartition uniforme de la température sur toute sa surface ; ainsi les dilatations, restant sensiblement égales, fatiguent le moins possible le métal.

La vapeur qui agit sur la face externe du piston est surchauffée à ce contact ; en même temps le piston est refroidi, ce qui constitue un double avantage.

Du côté combustion, les gaz brûlés dans le cylindre sont évacués à une température plus élevée que dans les moteurs ordinaires ; cela n'a pas d'importance, puisque ces gaz sont utilisés, d'abord dans un générateur de vapeur et ensuite pour le réchauffage de l'eau de circulation avant son entrée dans l'enveloppe où elle se vaporise. Dans ce dernier circuit « eau-vapeur », réchauffé par les gaz brûlés, se trouve, en outre, un petit générateur auxiliaire de vapeur, d'une capacité convenable pour former volant de vapeur en marche normale, et pour assurer le démarrage moyennant l'emploi, à ce moment, d'une somme de chaleur extérieure (brûleur à pétrole), qu'on met en action après un arrêt prolongé.

Il en résulte que le moteur Still peut démarrer en charge et peut soutenir, pendant un temps prolongé, un travail double de son travail normal. Cela se conçoit facilement : d'un côté du piston, le moteur, véritable machine à vapeur, participe des qualités de ces machines.

C'est aussi l'explication de sa grande souplesse.

Quant à son rendement, il est bien meilleur que ceux des machines à vapeur ou même des moteurs à combus-

tion, à cause de la récupération thermique des chaleurs ordinairement perdues avec les gaz d'échappement. Ce rendement atteint 40 %.

Si nous ajoutons que ce moteur est sorti de la phase expérimentale et qu'il se construit en unités présentant une gamme étendue de puissances, on pourra penser que l'on se trouve en présence d'une formule très séduisante pour les moteurs à combustion sans insufflation d'air.

Ainsi l'avenir du moteur Diesel et des moteurs qui en dérivent, dans les emplois à poste fixe, paraît bien assuré. Nous allons voir que les applications sur les navires paraissent présenter encore plus d'intérêt.

---

## CHAPITRE VI

### MOTEURS MARINS DU CYCLE DIESEL CHANGEMENT DE MARCHE

---

**Qualités d'un moteur marin.** — Les moteurs utilisés pour la propulsion des navires de guerre ou de commerce font un service assez rude qui ne souffre aucune défaillance ; la qualité primordiale d'un moteur marin est donc la sécurité qu'il doit offrir en toutes circonstances.

Il doit, en outre, être économique (prix de revient et prix d'exploitation modérés), faciliter la manœuvre du bateau, n'être ni trop lourd, ni trop encombrant, se monter, s'entretenir et se conduire facilement, enfin, se prêter au fonctionnement des services auxiliaires.

Ce que nous savons déjà des moteurs Diesel nous permet de prévoir les principaux avantages de l'application de ces moteurs dans la marine.

**Avantages de l'application des moteurs Diesel dans la marine.** — Le premier avantage, incontestable, c'est la suppression des chaudières et la réduction des soutes à combustible.

En poids, la consommation du Diesel en combustible liquide est le quart environ de la consommation des machines à vapeur en charbon. Si l'on songe que cette consommation se trouve supprimée pendant les escales, on peut juger de l'augmentation considérable du rayon d'action que permet un moteur Diesel par rapport à une

machine à vapeur, si les soutes à combustible restent de même capacité. Si le rayon d'action n'a pas besoin d'être augmenté, on peut accroître beaucoup le chargement du navire.

Dans les deux cas, la suppression des chaufferies conduit à une importante réduction de personnel. D'autre part, la consommation de combustible est à peu près indépendante de l'adresse du personnel restant.

La mise en marche immédiate du moteur Diesel supprime le travail préparatoire d'allumage des chaudières, de réchauffage des machines et les pertes de temps qui en résultent. L'approvisionnement du combustible s'opère très vite, à l'aide de pompes ou d'air comprimé ; le transport entre les soutes et le moteur se fait de même, supprimant ainsi les poussières de charbon.

La combustion totale du combustible dans le moteur supprime radicalement la fumée.

L'admission du combustible dans le moteur se réglant facilement et vite, il est possible de régler aussi la vitesse, même par gros temps, alors que les hélices émergent de temps en temps.

La température modérée qui peut exister dans la salle des machines, grâce au renouvellement abondant de l'air, facilite le travail du personnel en supprimant le travail pénible de la chauffe.

**Construction des moteurs Diesel marins.** — Le principe de la constitution du moteur ne varie pas ; tout au plus peut-on constater quelques légères modifications d'exécution chez certains constructeurs.

Le seul problème important à résoudre, pour l'application du moteur Diesel à la propulsion des navires, consistait dans le changement de marche. On pouvait l'assurer, soit en renversant le sens de rotation de l'hélice à l'aide d'un dispositif approprié, le moteur tournant dans

un sens invariable, soit en changeant directement le sens de rotation du moteur à l'aide d'un double jeu de cames montées sur l'arbre de distribution. Nous indiquerons plus loin, à titre d'exemple, deux dispositifs très souvent employés, mais nous allons d'abord faire quelques remarques au sujet des organes des moteurs Diesel marins.

*Culasse.* — On reconnaît, nous l'avons déjà dit, du premier coup d'œil un moteur à deux temps ou un moteur à quatre temps : il suffit de regarder la culasse.

Le moteur à quatre temps comporte au moins cinq soupapes : aspiration, échappement, injection de combustible, soupape spéciale pour le lancement à air comprimé et soupape de sûreté.

Le moteur à deux temps ne comporte que trois soupapes : la soupape de sûreté et deux autres, celle pour l'injection du combustible et la soupape de lancement à l'air comprimé, suffisantes en principe.

Cependant, pour empêcher les deux phases qui se produisent simultanément (échappement des gaz brûlés et remplissage d'air frais) de se gêner mutuellement, on ajoute le plus généralement, sur la culasse, pour l'admission d'air de balayage, une ou plusieurs soupapes spéciales ou plutôt un tiroir supplémentaire, qu'on ne peut voir le plus souvent car il est masqué par le tuyautage de l'air de balayage. On sait, en effet, que le moteur à deux temps comporte une pompe de compression spéciale, dite pompe de balayage, destinée à comprimer légèrement l'air qui doit remplir cet office.

La culasse est à double paroi, pour la circulation de l'eau ; on conçoit qu'une pièce qui supporte des pressions et des températures élevées et qui doit, en outre, porter les logements et les attaches d'un certain nombre de soupapes, soit d'une exécution difficile, et cela, d'autant plus qu'on devra y loger un plus grand nombre de soupapes.

Actuellement, les constructeurs paraissent avoir complètement surmonté les difficultés en faisant usage de boîtes de soupapes rapportées, ce qui simplifie beaucoup le tracé de la culasse et permet d'exécuter avec sécurité cette pièce de fonderie.

Nous avons vu, d'ailleurs, que l'emploi d'un moteur à pistons opposés supprimerait complètement la culasse ; toutefois ce type n'est pas répandu dans la marine.

**Remarque sur l'évolution du moteur Diesel marin.** — A ce sujet, nous devons faire observer, tout de suite, que les premières applications du Diesel à la propulsion des navires ont été relatives aux sous-marins, et qu'ainsi le problème se compliquait par la double nécessité de mettre au point un moteur nouveau, et d'adapter ce moteur à un programme sévère : installer dans l'espace le plus réduit la plus grande puissance possible avec un poids minimum. Ces obligations, impérieuses à bord d'un sous-marin, ne se présentent pas avec autant de nécessité à bord d'un navire de commerce, et il semble que les progrès du moteur de commerce aient ainsi été retardés, parce que le moteur de sous-marin a servi de prototype aux moteurs marins, alors que le moteur pour la marine de commerce aurait pu être directement étudié en partant du moteur Diesel fixe.

C'est ainsi que le moteur de sous-marin ressemble à un gros moteur d'automobile, tandis que le moteur de commerce actuel est plus semblable à une machine à vapeur (bâti séparés et dégagés, installation de glissières pour alléger le rôle du piston, etc.), forme qui se prête le mieux à la surveillance.

Dans la marine, comme à terre, on a dû augmenter l'alésage pour augmenter la puissance. Par exemple, sur le « Glenapp », un moteur de 1 m 10 de course avec 8 cylindres de 75 cm d'alésage développe 3 000 ch.

Pour reculer encore la limite supérieure de la puissance et pour résoudre en même temps le problème difficile du refroidissement de la culasse, en présence de l'augmentation considérable du flux de chaleur à évacuer par les parois, quand on veut accroître le travail au-dessus d'une certaine limite, on a eu recours au moteur à deux pistons opposés agissant dans le même cylindre.

Ainsi la culasse est supprimée ; mais pour transmettre à l'arbre-manivelle le mouvement du piston supérieur, il faut passer par l'intermédiaire d'un balancier ou d'une traverse, ce qui est une complication mécanique. Sur le navire « Yngaren » on peut voir cependant un moteur « Doxford » bâti de cette façon et qui développe 700 chevaux dans chacun de ses 4 cylindres de 58 cm d'alésage, de 2 m 30 de course, avec pistons opposés travaillant suivant le cycle à deux temps.

Mais si l'on se résigne à cette complication mécanique, ne vaut-il pas mieux employer le moteur Still dont nous avons examiné les qualités à la fin du chapitre précédent ? C'est une heureuse et ingénieuse combinaison du moteur à vapeur et du moteur Diesel.

On vient de terminer l'installation, sur un cargo britannique, d'un moteur de ce genre qui développe 1 500 ch environ par cylindre. Si ce moteur, grâce à son excellent rendement, confirme les espérances que nous avons exprimées, il s'imposera dans tous les cas où l'on ne reculera pas devant la complication de la machinerie.

La simplicité est cependant une vertu pour les engins destinés à la marine. C'est ainsi que le moteur à double effet paraît n'avoir reçu qu'une application, sur un bateau marchand construit en Allemagne et remis par la Commission des réparations à une firme anglaise, qui en est d'ailleurs satisfaite (moteur Blohm et Voss).

Ayant maintenant signalé des moteurs exceptionnellement appliqués sur les navires, nous allons revenir aux

moteurs Diesel des types usuels qui équipent actuellement près de 2,5 % du tonnage brut total de la marine mondiale. Les statistiques ne donnent pas une excellente idée de l'effort français à ce sujet ; par exemple, en 1921, année où 105 navires de 293 000 t, munis de moteurs Diesel, ont été lancés dans divers pays, il n'a rien été fait en France.

**Pistons.** — Dans les moteurs des sous-marins, moteurs rapides, réduits en hauteur et comme écrasés, les espaces morts sont très faibles ; le fond de piston, très rapproché du diffuseur d'injection, se trouve soumis à un jet de liquide enflammé agissant comme un chalumeau, brûlant le piston. On a eu ainsi à déplorer de nombreuses ruptures.

Dans les moteurs plus lents que l'on emploie dans la marine marchande, on a augmenté la course (1), de sorte que l'espace mort devient raisonnable. Le refroidissement par circulation d'eau dans le piston est devenu d'ailleurs plus efficace, car on n'a pas hésité à amincir un peu pour cela les parois du fond du piston.

**Soupapes.** — On a éprouvé peu de difficultés au sujet des soupapes, même pour les soupapes d'échappement, qui sont dans une situation délicate à cause de la température élevée des gaz qui les traversent, et de la nécessité de leur donner de grands diamètres. On les fait en acier au tungstène. Cependant, au bout d'un temps plus ou moins long, elles peuvent être légèrement voilées ou avoir besoin d'être rodées ; il faut donc les surveiller.

Un défaut d'étanchéité, même important, d'une soupape d'échappement ne peut d'ailleurs causer aucun acci-

---

(1) On peut compter que la course d'un moteur est d'environ un sixième de la hauteur du compartiment dans lequel il est placé. Il y a donc une différence notable, à ce point de vue, entre un navire de commerce et un sous-marin.

dent, mais la compression ne pouvant se maintenir dans le cylindre, celui-ci ne travaille plus.

**Compresseurs.** — Les clapets des compresseurs rapides donnent lieu à plus de difficultés (il est bien difficile de faire des organes à la fois légers et résistants), mais ceux des moteurs lents se comportent bien.

On se souvient qu'un compresseur joue un double rôle : d'abord, celui de fournir l'air d'insufflation (à 70 kg si l'on pulvérise du gas-oil), puis de faire le plein des réservoirs de lancement (30 kg).

Ce qui est compliqué, c'est la compression à 70 kg que l'on effectue en deux ou trois phases ; et c'est dans cette opération que le rôle des clapets est bien délicat.

La suppression de l'insufflation et son remplacement par l'injection dite « solide » (injection sous la pression de 300 kg par  $\text{cm}^2$  environ, au travers d'ajutages de très faibles sections) réduisent beaucoup les difficultés de compression, puisque le compresseur n'a plus à assurer que l'alimentation des réservoirs de lancement à pression modérée (30 kg au maximum). Il est bien évident, toutefois, que la pompe à combustible capable d'exercer la pression de 300 kg par  $\text{cm}^2$  envisagée ci-dessus est un organe de construction difficile. Les deux systèmes ont leurs partisans ; mais l'insufflation paraît plus efficace pour la combustion parfaite, particulièrement des combustibles les plus lourds.

En tout cas, les compresseurs doivent être d'un accès facile, notamment les serpentins refroidisseurs. Les moteurs marins ont généralement, à cet effet, un compresseur indépendant ; mais sur les navires marchands il semble qu'il y ait assez de place disponible pour que le compresseur soit en bout d'arbre, comme pour les moteurs fixes.

Quoi qu'il en soit, les règlements du Lloyd's Register stipulent qu'un deuxième compresseur doit être installé

à bord, même lorsqu'il existe deux moteurs Diesel ayant chacun un compresseur suffisant pour alimenter les deux moteurs ; on concède seulement, dans ce dernier cas, que le compresseur de secours puisse être un peu plus faible.

Lorsqu'on emploie l'injection solide et qu'il ne subsiste qu'un petit compresseur pour le remplissage des réservoirs d'air de lancement, les mêmes règlements exigent un autre petit compresseur mû par un moteur à vapeur ou à pétrole qui ne réclame pas d'air comprimé pour le démarrage.

La sécurité est donc ainsi tout à fait garantie.

**Réservoirs d'air.** — Le Lloyd's Register exige, en outre, que la capacité des réservoirs d'air permette, sans recharge, douze lancements consécutifs du moteur.

Bien que la pression des réservoirs d'air de lancement ne dépasse pas beaucoup le « timbre » des chaudières marines à tubes d'eau, on a eu à déplorer un certain nombre d'explosions. On écartera tout danger si l'on observe les prescriptions suivantes : choix et essais rigoureux de l'acier, dimensionnement très large des épaisseurs, emploi de réservoirs forgés d'un bloc ou constitués par des tôles rivées ou soudées à la forge par recouvrement, dispositifs de drainage et d'assèchement efficaces, empêchant toute présence d'huile dans ces réservoirs (il convient, évidemment, de se garder contre toute production d'un mélange tonnant dans ces réservoirs).

Nous allons maintenant examiner, au point de vue de la sécurité, les autres organes d'un moteur Diesel marin.

**Sécurité.** — Nous avons déjà donné des explications sur les incidents de marche d'un moteur Diesel ordinaire ; il ne semble pas que la fréquence de ces incidents puisse être plus grande sur les moteurs marins que sur les moteurs ordinaires.

Un montage initial défectueux ne saurait causer un accident, car le Diesel ne démarre que si le montage est correct. Par exemple, si les engrenages de commande de l'arbre à cames ne sont pas dans leur situation normale, l'injection du combustible ne se fera pas ou sera incomplète, et le moteur ne partira pas. On ne peut penser, d'autre part, que le jeu pris par les articulations puisse dérégler la machine après un fonctionnement plus ou moins long : les surfaces de portage sont largement calculées, l'usure reste très faible si le graissage est suffisant.

C'est donc le graissage qu'il faut particulièrement surveiller. Cela semble assez facile dans les moteurs modernes qui comportent un graissage forcé. Le mécanicien n'a, en définitive, qu'à surveiller la pression de refoulement des pompes à huile (manomètres) et la température de celle-ci (thermomètre). Le circuit de l'huile comprend des filtres doubles, installés de telle façon qu'il est possible de nettoyer un élément sans rien arrêter, et des refroidisseurs ramenant l'huile à la température initiale du circuit. Il ne reste donc que deux causes d'accident : rupture ou obstruction d'un tuyautage d'huile ; panne de la pompe et rupture ou obstruction de la circulation d'eau de refroidissement.

La malveillance exceptée, une obstruction est difficilement explicable. Comment un corps étranger pourrait-il s'introduire dans le tuyautage d'huile, et surtout traverser les filtres ? Les crépines de prise d'eau à la mer garantissent de même la circulation d'eau de refroidissement.

Les ruptures des tuyautages ne peuvent se produire (si ces tuyautages ont été essayés hydrauliquement après montage, à une pression double de la pression de marche) que par cisaillement d'un joint ou d'une brasure par suite de vibrations excessives.

Il arrive, en effet, que les lignes d'arbres très courtes des machines placées à l'arrière vibrent en synchronisme

avec les impulsions qu'elles reçoivent, dans la zone des allures normales du moteur. Cela est très dangereux, et il est inconcevable qu'on puisse adopter des dimensions respectives du moteur et de la ligne d'arbre qui permettent cette désastreuse résonance mécanique. Il suffit d'ailleurs d'augmenter le diamètre de la ligne d'arbres pour changer la période propre de vibration et, par conséquent, pour reporter l'allure critique hors des allures normales.

Quand, dans les machines à allure lente, où ce synchronisme ne peut en général se présenter, on supprime le carter de façon à laisser voir le mécanisme de la partie basse, c'est-à-dire les paliers et les têtes de bielle, et qu'ainsi les mécaniciens peuvent surveiller ces organes en les tâtant à la main, il est possible de remplacer le graissage sous pression par le graissage ordinaire par pesanteur.

Ainsi le moteur Diesel à allure lente (moteur de 1 000 ch tournant à 100 tours environ par minute), qu'on emploie beaucoup pour la propulsion des navires de commerce, est un moteur au moins aussi sûr qu'une machine à vapeur, et pour le prouver, il suffit de signaler que les installations récentes les plus puissantes ne comportent qu'une seule ligne d'arbres, c'est-à-dire un seul moteur. L'expérience prouve qu'il est inutile d'avoir un moteur de rechange agissant sur une autre ligne d'arbres.

Cela ne veut pas dire que la surveillance soit inutile. En dehors des soins que nous recommandons, d'autres organes encore doivent être surveillés : les pistons et soupapes, mais surtout le dispositif d'injection du combustible.

Si l'on a bien choisi et vérifié le combustible, si celui-ci est décanté et filtré avant son arrivée aux pompes alimentées en charge, on ne peut vraiment redouter le désamorçage.

Mais l'aiguille d'injection du combustible reste un des organes les plus délicats du Diesel à allure rapide employé dans les sous-marins. Dans le Diesel à allure plus lente des cargos, les organes de distribution et l'aiguille d'injection se tiennent parfaitement et les ruptures d'aiguilles sont devenues extrêmement rares. Il peut arriver, sans doute, que le siège de cette aiguille s'encrasse au bout d'un certain temps, mais il est facile de roder l'aiguille en marche en la tournant sur son siège.

**Dispositifs de changement de marche.** — On comprend qu'il soit possible de renverser le sens de marche d'un Diesel en purgeant les cylindres, en provoquant ensuite un lancement en sens inverse, suivi d'une nouvelle distribution du combustible, de l'aspiration et de l'échappement. On est arrivé à exécuter, en moins de trente secondes, les opérations nécessaires : 1<sup>o</sup> stoppage du moteur, 2<sup>o</sup> lancement à l'air comprimé en arrière, 3<sup>o</sup> mise en marche arrière au pétrole sur un groupe ou sur la totalité des cylindres.

Nous allons donner une idée des dispositifs mécaniques généralement employés, en prenant des exemples.

Le renversement de marche Sulzer est clairement indiqué par la fig. 20.

**Renversement de marche Augustin-Normand.** — L'arbre à cames de la distribution porte deux séries de cames juxtaposées. Les leviers inférieurs qui actionnent, par l'intermédiaire de biellettes, les leviers supérieurs portent chacun deux galets dans les plans respectifs des deux cames, de sorte que l'ensemble de ces galets est disposé en quinconce et qu'il y a deux séries de galets susceptibles d'être attaqués par deux séries de cames. Il suffit donc de rapprocher ou d'éloigner simultanément du moteur tous les axes d'oscillation des leviers inférieurs

pour mettre en prise les galets et les cames de la marche avant ou arrière. Ce déplacement se fait à la main au moyen d'un volant vertical de grand diamètre, avec une démultiplication convenable.

Un verrou immobilise le mécanisme dans les positions exactes qu'il doit occuper ; il faut donc soulever le verrou pour pouvoir tourner le volant, et le tout est disposé pour

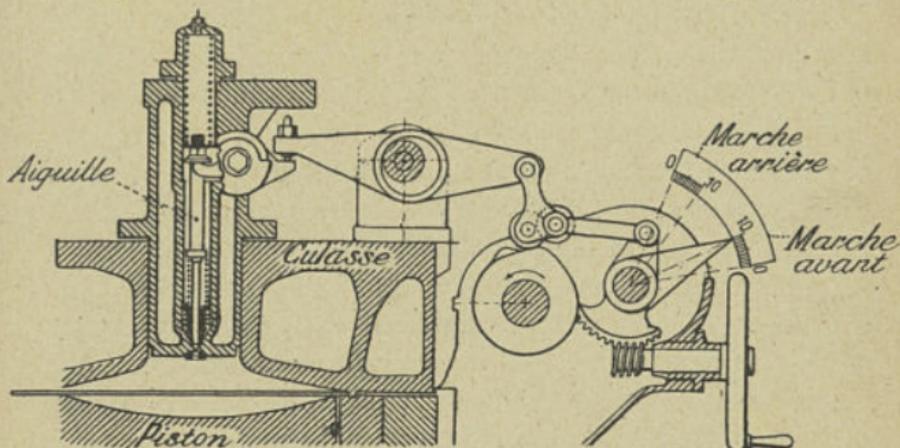


FIG. 20. — RENVERSMENT DE MARCHÉ SULZER.

On voit sur l'arbre à cames, au-dessus de la flèche, le profil des deux séries de cames qui agissent, par l'intermédiaire de galets, pour provoquer soit la marche avant, soit la marche arrière. Dans la position indiquée sur la figure, c'est le galet de gauche qui agit, pour entretenir la marche avant.

que ce soulèvement préalable ouvre une soupape générale qui, par commande pneumatique, purge tous les cylindres. Ainsi, d'une part le moteur se trouve prêt à partir sous une nouvelle impulsion d'air comprimé à pression relativement basse et, d'autre part, les soupapes d'aspiration et d'échappement ne sont pas dures à enfoncer, lorsqu'on effectue le changement de distribution, pendant lequel les galets de ces soupapes viennent rencontrer les bossages de certaines cames. Il est bien évident que pendant toute cette manœuvre les galets des soupapes à combustible et de lancement sont écartés des cames, la manœuvre ne

pouvant s'effectuer que si les leviers de mise en marche sont à la position « stop ».

*Renversement de marche Schneider.* — Il y a également deux cames pour la commande de chaque soupape : l'une pour la marche avant, l'autre pour la marche arrière ; mais les leviers de commande des soupapes ne peuvent recevoir l'action de ces cames que s'ils prennent appui sur d'autres cames déposées sur un arbre intermédiaire dit « de manœuvre ». On peut ainsi, en faisant tourner cet arbre intermédiaire, soustraire les leviers à l'action des cames de commande ; on peut, à l'aide d'un calage approprié des cames, de profil convenable, ne mettre hors d'action qu'un certain nombre de leviers. Par exemple, pour le départ, on admet l'air de lancement dans tous les cylindres (ou dans un nombre suffisant), puis on coupe successivement l'air pour injecter le combustible.

A l'arrêt, tous les galets sont dégagés des cames, de sorte qu'on peut déplacer longitudinalement l'arbre de distribution et remettre en marche en faisant tourner l'arbre de manœuvre pour l'amener progressivement dans la position où tous les cylindres sont alimentés. Cette opération est effectuée en tournant successivement deux petits volants à main, placés côte à côte. Un dispositif de sûreté verrouille l'arbre de distribution pour l'empêcher de se déplacer longitudinalement quand l'arbre de manœuvre n'est pas à la position d'arrêt.

*Facilités de manœuvre.* — Les dispositifs employés pour le renversement de marche par les différents constructeurs ressemblent à ceux que nous venons d'examiner ; dans tous les cas, il suffit de faire tourner un volant de manœuvre et l'on ne peut rien imaginer d'aussi simple.

En ce qui concerne la surveillance pendant la marche, on peut dire que le Diesel réduit le personnel nécessaire à

peu près à la moitié du personnel employé pour des machines à vapeur ; mais il serait illusoire de penser que l'on peut se passer de mécaniciens spécialisés.

*Machines auxiliaires.* — Peut-on se passer de la vapeur dans les services auxiliaires du bord (treuils, guindeaux, dynamos pour l'éclairage, etc.) ? On peut évidemment commander tout cela par des moteurs électriques alimentés par des groupes électrogènes avec moteurs Diesel ; mais, les treuils et les machines auxiliaires placés sur le pont, exposés aux embruns, font un dur service, et si l'on trouve des treuils à moteur électrique, bien fermés, qui ont donné toute satisfaction, on comprend cependant que beaucoup d'armateurs hésitent à remplacer les treuils à vapeur dont les qualités sont sanctionnées par de longues années d'expérience, et préfèrent garder une chaudière auxiliaire pour les services du pont.

*Prix d'exploitation.* — Même si l'on emploie des moteurs relativement lents, dont le poids est d'environ 100 kg par cheval, il reste encore une marge appréciable à l'avantage du moteur Diesel par rapport à l'installation à vapeur.

Il faut observer, cependant, que le prix d'achat d'un moteur Diesel pourrait difficilement s'abaisser jusqu'à celui d'un ensemble chaudière et machine à vapeur de même puissance, car le prix de ces derniers groupes s'est abaissé à une limite extrême, par exemple 0 fr. 70 le kg avant 1914. Les prix relatifs des pétroliers à vapeur et des moteurs étaient en 1922 de £ 20 et de £ 25 par tonne ; la différence est très appréciable : £ 30 000, par exemple, pour un bateau de 6 000 t. Cependant le prix d'achat n'est pas le seul facteur à considérer.

L'encombrement est très réduit, non seulement par la suppression des chaudières, mais aussi par la réduction

du volume des soutes alimentaires ; cela permet d'augmenter le fret.

Une consommation de 185 g de pétrole par cheval-heure, cela fait, à puissance égale, le tiers de la consommation d'un groupe à vapeur chauffé au combustible liquide. Un cargo de 10 000 t de port « en lourd » dépenserait 10 à 11 t par vingt-quatre heures, et 1 à 2 t de plus si l'on tient compte de la petite chaudière qui reste pour les services auxiliaires et pour l'alimentation du compresseur de secours ; il faut y ajouter l'huile de graissage, environ 7 % de la consommation du combustible.

Nous laissons à nos lecteurs le soin de faire la comparaison ; il suffit de connaître le prix du combustible par rapport à celui du charbon.

On peut aussi craindre de ne pouvoir se ravitailler en pétrole aussi facilement qu'on le voudrait ; ces craintes peuvent s'apaiser depuis que les compagnies pétrolifères ont fait un grand effort pour aménager, dans les principaux ports du monde, des dépôts suffisants.

Aussi, au lieu des 290 navires (234 000 t en tout) pourvus de moteurs à combustion interne en 1914, en a-t-on constaté, en 1922, 1 639 qui représentent 1 511 000 t, dont 149 navires de plus de 3 000 t.

Nous allons maintenant examiner une autre série d'applications des moteurs à combustion interne, moins importante jusqu'à présent, mais qui paraît cependant appelée à se développer beaucoup.

## CHAPITRE VII

### MOTEURS DIESEL SUR VOIES FERRÉES TRANSMISSION DE L'ÉNERGIE ENTRE LE MOTEUR ET LES ROUES

---

Comparaison entre l'emploi des hydrocarbures et l'emploi de la vapeur. — Les hydrocarbures sont employés sur voies ferrées dans deux catégories de véhicules : les locotracteurs et les voitures automotrices.

Les locotracteurs sont de petites locomotives qui servent aux manœuvres sur les voies ferrées des usines et des chantiers. L'avantage des hydrocarbures est alors indiscutable ; même si l'on consomme de l'essence, c'est-à-dire un combustible très cher, on enregistre encore une économie, parce que la locomotive à vapeur reste allumée toute la journée, alors que l'on ne consomme de l'essence que si l'on marche. Le locotracteur à hydrocarbures paraît donc avantageux dans tous les cas où l'on ne peut disposer à bon compte de l'énergie électrique.

Nous allons voir que, sous cette réserve, les avantages du moteur à hydrocarbures se retrouvent à différents degrés pour la traction des automotrices.

Les automotrices sont des voitures qui peuvent transporter elles-mêmes des voyageurs et des marchandises et, en outre, entraîner un certain nombre de véhicules.

Les expériences montrent que, pour arriver à une dépense réduite d'essence (nous examinons plus loin les moteurs à huile lourde) il ne faut pas dépasser une vitesse

de 40 ou 45 km à l'heure ; on a donc renoncé aux essais qui avaient été effectués à l'étranger afin de réaliser des trains légers de luxe atteignant la vitesse des rapides. Cela s'explique par la progression avec laquelle s'accroît, suivant la vitesse, la résistance par tonne : cette progression est beaucoup plus rapide pour un train léger que pour un train lourd.

La question d'économie n'a pas été jusqu'à présent la question primordiale. On a cherché surtout à améliorer l'exploitation, particulièrement sur les réseaux secondaires. C'est ainsi que l'on peut avantageusement remplacer deux trains à vapeur journaliers, dont la traction revient à 3 fr le km, par trois trains, dont l'un, à vapeur, fait un service mixte, voyageurs et marchandises, les deux autres étant entraînés par des automoteurs plus économiques, environ 1 fr le km, et plus rapides.

M. E. Brillé, dans une communication très intéressante au Congrès des combustibles liquides, en 1922 (1), rapporte divers chiffres de consommations moyennes sur les chemins de fer de l'Etat. Nous n'en retiendrons que les consommations kilométriques comprenant les allumages et les stationnements ; le combustible étant compté à 90 fr la tonne, par exemple ; rendu au dépôt, les prix moyens de la traction par kilomètre seraient les suivants :

1 <sup>o</sup> trains de grande ligne (machines Pacific) ..	1,56 le km
2 <sup>o</sup> trains omnibus (machines américaines à simple expansion) .....	1,50 —
3 <sup>o</sup> lignes secondaires accidentées (machines à trois essieux couplés) .....	1,64 —
4 <sup>o</sup> navettes sur lignes accidentées (machines de types anciens) .....	1,67 —

(1) *Chimie et Industrie*, n<sup>o</sup> spécial de 1923, p. 383. Communication complétée par des conférences à la *Société d'Encouragement* et à la *Société des Ingénieurs civils de France*, en 1925. (Bulletin de mars-avril).

Si l'on regarde au tonnage remorqué, les différences s'accusent davantage ; les chiffres respectifs des consommations aux 100 t par km étant de 0,44, 1,15, 1,64, 2,16.

Il n'est d'ailleurs pas nécessaire de faire état de ces derniers chiffres qui tiennent, en partie, à l'utilisation de machines anciennes sur des lignes accidentées. Il suffit de penser qu'un train automoteur, qui brûle 0 fr 80 d'essence par km, permet de faire l'économie d'un agent, pour voir tout de suite que ce dispositif est bien préférable à celui de l'exemple 3, par exemple, concernant les lignes secondaires.

Mais c'est avec les moteurs Diesel que l'on peut avoir la plus grande économie. Les automotrices avec moteurs Diesel de 100 à 200 ch consomment, pour 100 t-km, 0 kg 85 d'huile, soit 0 fr 30. Ceci pour des trains légers, et nous venons de voir que les trains lourds sont d'une traction plus économique. On peut donc affirmer que le moteur Diesel est très intéressant et que, moyennant quelques perfectionnements possibles, il prendra place dans la traction des chemins de fer, sur les lignes principales qui ne seront pas électrifiées.

Faut-il citer l'exemple de la Suède où il est acquis que, pour les petits trains à tonnage égal, l'exploitation par automotrices Diesel revient à la moitié ou même au tiers du prix de la traction à vapeur.

Il est presque inutile de faire remarquer qu'en matière d'exploitation de chemins de fer, tout n'est pas dans la dépense de combustible, d'ailleurs réduite par les moteurs à combustion qui ne consomment rien pendant les arrêts, mais qu'il y a d'autres avantages à considérer :

1° suppression des encrassements de grille, des dépôts de suie dans les tubes, qui obligent à changer de machine toutes les trois ou quatre heures.

2° suppression des fumées, des escarbilles et par conséquent des indemnités pour incendies.

3<sup>o</sup> réduction des frais d'entretien, résultant surtout de l'absence de chaudière et de la suppression des décrassages, ramonages, etc...

4<sup>o</sup> sur les locomotives, il y a un mécanicien et un chauffeur, alors qu'une automotrice peut être conduite par un seul agent près duquel on peut placer, au point de vue de la sécurité seulement, le conducteur du train ;

5<sup>o</sup> réduction du nombre d'unités nécessaires, les automotrices étant employées beaucoup plus longtemps chaque jour, parce que leur entretien est plus simple et qu'il n'est pas besoin de les mettre sous pression par un chauffage préalable ;

6<sup>o</sup> suppression des approvisionnements en cours de route, et surtout suppression des alimentations en eau, considération très importante pour les régions où l'eau est rare ou de mauvaise qualité, comme cela se présente sur les chemins de fer algériens.

C'est ainsi que l'on pourrait peut-être résoudre le problème du chemin de fer transsaharien. L'électrification, qui rendrait inutile la création de postes d'alimentation en eau, aurait l'inconvénient d'exiger de nombreux postes de transformation, et surtout d'exposer à la malveillance un équipement indispensable et coûteux.

Le moteur Diesel pouvant consommer des huiles végétales d'arachide, de palme, que l'on trouverait sur place, il serait ainsi possible de marcher sans arrêt, pendant plusieurs journées, à la manière d'une traversée maritime, le service de l'automotrice étant assuré par quarts.

L'évocation de ce mirage va nous permettre de nous intéresser davantage aux réalisations plus modestes qui suivent.

**Données numériques concernant la traction par automotrices.** — Deux catégories d'éléments numériques entrent en jeu et sont à considérer dans l'établissement

d'une voiture automotrice sur rails : la résistance au roulement et l'adhérence.

La résistance au roulement varie évidemment avec l'état de la voie. A faible vitesse, c'est-à-dire au-dessous de 40 km à l'heure, on peut l'estimer à 4 ou 5 kg par tonne sur une bonne voie ; cette résistance augmente jusqu'à 8 à 10 kg par tonne sur une voie de chantier.

L'importance de la vitesse sur la résistance au roulement pourrait être considérable, si l'on ne songeait pas que la résistance de l'air croît environ comme le carré de la vitesse ; cette résistance prend bien plus d'importance relative s'il s'agit d'une automotrice avec ou sans remorque que s'il s'agit d'un train plus lourd comportant un grand nombre de wagons ou de voitures (1).

Les essais des chemins de fer de l'Etat ont confirmé cette observation. Un train automoteur de 25 t, composé simplement de l'automotrice et d'une remorque, devait vaincre à la vitesse de 60 km à l'heure une résistance au roulement de 10 kg par tonne, alors qu'à la même vitesse, pour un train de 300 à 400 t, cette résistance ne ressort qu'à 3 ou 4 kg seulement.

A la résistance au roulement, on doit ajouter la résistance due aux déclivités et celle qui provient des courbes. La première est exactement proportionnelle au poids ; elle est de 1 kg par mm de pente, par mètre et par tonne.

Quant à l'adhérence, elle est fonction de circonstances météorologiques qui modifient l'état du rail ; elle varie ainsi, de 20 % du poids adhérent lorsque le rail est très sec, jusqu'à 11 % en cas de brouillard, 10 % lorsque le rail est gras (souterrain) ; elle s'abaisse même à 8 % si le rail est recouvert de feuilles mortes ; mais l'emploi de la sablière permet d'atteindre 25 % du poids adhérent. Pour

---

(1) On sait qu'on appelle wagon un véhicule qui transporte des marchandises, et voiture un véhicule pour les voyageurs.

utiliser au mieux le poids de la machine, on doit s'arranger de manière que l'effort tangentiel maximum aux roues concorde avec l'adhérence maximum, c'est-à-dire que cet effort soit de 20 à 25 % du poids adhérent (poids total de la machine, si celle-ci est à adhérence totale).

Dans des conditions de bonne adhérence, une machine peut ainsi remorquer :

20 à 25 fois son poids en palier.			
9 à 10	—	en rampe de ....	20 mm
3	—	—	40 —
1	—	—	100 —

Il ne faut pas perdre de vue ce tableau lorsque l'on examine les qualités d'une automotrice.

**Emploi de différents moteurs.** — On a employé, pour diminuer la dépense, des moteurs d'automobiles avec différents carburants, comme la naphthaline, ou encore comme le pétrole lampant, lorsqu'on utilisait un carburateur à réchauffeur, ou une disposition spéciale permettant de pulvériser le liquide dans une atmosphère raréfiée. Mais l'avenir semble appartenir aux combustibles lourds, pour lesquels on aura recours à des moteurs comme le Peugeot-Tartrai, déjà utilisé sur les camions, et surtout aux moteurs Diesel, déjà appliqués depuis longtemps.

**Transmissions.** — Dans l'application du moteur à hydrocarbures à la traction des trains, la question du choix du moteur n'est peut-être pas la plus importante : il est plus difficile, sans doute, d'aménager le mécanisme de transmission de la puissance motrice aux roues.

Il faut que ce mécanisme permette d'établir où de rompre la liaison ; de réaliser la marche dans les deux sens avec des rapports de vitesse différents, suivant que l'on utilise la puissance à faible vitesse angulaire, c'est-à-dire au démarrage ou

dans une forte rampe), ou à grande vitesse, dans les sections de résistance minimum à la traction.

Nous ne pouvons décrire tous les dispositifs qui ont été imaginés pour la commande des roues. Il est très simple de réaliser une commande par *chaînes* ou par arbres avec *joints à la cardan*. Une difficulté se présente lorsque l'on veut commander l'axe de l'essieu par l'axe moteur à l'aide d'*engrenages*.

Pour des machines de faible vitesse, on se résigne à supprimer la suspension élastique de l'essieu-moteur; ainsi les deux axes, du moteur et de l'essieu, restent toujours à une distance invariable et les engrenages fonctionnent convenablement; l'autre essieu, qui est suspendu, est relié au premier par chaîne ou à l'aide de bielles d'accouplement.

On peut aussi suspendre les deux essieux si la *boîte de mécanisme* (boîte contenant les engrenages démultiplicateurs, interposée entre le moteur et l'essieu) est supportée par l'essieu-moteur; le moteur et la boîte de mécanisme sont alors reliés par une transmission à la cardan.

Le dispositif que nous venons de décrire est celui que l'on emploie aussi pour suspendre les dynamos dans le cas d'une transmission électrique.

Certains constructeurs, non sans audace, ont fait, sans inconvénient pratique, paraît-il, engrener la roue dentée de l'essieu avec un pignon solidaire du châssis suspendu.

Les *transmissions hydrauliques*, qui permettent de faire varier facilement la vitesse et d'assurer le démarrage, sont d'un fonctionnement assez simple. Elles comportent en principe :

1° un *transmetteur* ou pompe de compression, en prise directe avec le moteur; une manette permet de faire varier le débit de cette pompe ou même d'inverser le sens de la circulation du liquide;

2° un *récepteur* ou moteur hydraulique, actionné par ce

liquide et qui commande lui-même les essieux par l'intermédiaire de chaînes ou de bielles ;

3° entre ces deux machines, les tuyaux de communication nécessaires.

Le liquide employé est l'huile.

Ce principe a été plus ou moins modifié par les constructeurs qui ont réalisé des transmissions hydrauliques.

Dans le dispositif *Lenz*, le transmetteur est formé de deux corps de pompes à palettes de débit différent : le petit débit pour la première vitesse, le grand, pour la seconde vitesse, les deux débits, mis en parallèle, assurant la vitesse maximum. Il existe un récepteur unique à palettes, dont l'arbre forme *faux-essieu*.

Dans la transmission *Hele-Shaw*, le transmetteur est formé d'une série de pistons en étoile, dont la course réglable peut varier de zéro à un maximum convenablement choisi, sous l'action d'un excentrique commandé par une manette. Le transmetteur et le récepteur sont des appareils rotatifs analogues aux moteurs d'aviation, mais dans lesquels le fluide qui circule est de l'huile. Le récepteur est plus simple, car son excentricité est fixe, tandis qu'elle varie, au contraire, dans le transmetteur. Ce dispositif est employé notamment au Canada et en France, sur des locotracteurs de la Compagnie des Chemins de fer du Nord.

Dans le système *Naëder*, les cylindres en étoile sont fixes, et les modifications de la course des pistons sont obtenues par un dispositif à coulisse permettant de modifier le rayon de deux manivelles à 180° ; les chemins de fer du Nord ont également des locotracteurs de ce genre.

M. Naëder a réalisé, sur une automobile, une transmission *hydro-mécanique* qui pourrait être adaptée à un moteur sur rails. Entre le transmetteur et le récepteur hydrauliques, mis en tandem, un dispositif permet le couplage direct lorsque les vitesses des deux arbres (trans-

metteur et récepteur) sont égales : la transformation d'énergie n'entre en jeu qu'au démarrage et dans les rampes exceptionnelles. On peut ainsi augmenter jusqu'à 75 % le rendement des appareils précédents.

Quand on ne regarde pas au rendement, on peut se servir d'air comprimé.

Cependant, sur les machines lourdes susceptibles d'aller vite, il vaut mieux employer un *faux-essieu*, c'est-à-dire un arbre supplémentaire qui traverse la boîte de mécanisme, dans laquelle il reçoit la commande des engrenages sans aucun inconvénient. Ce faux-essieu transmet ensuite son mouvement aux roues à l'aide de bielles.

Nous en savons assez maintenant pour examiner quelques-unes des réalisations les plus intéressantes.

**Locotracteurs.** — Si nous écartons les moteurs qui ne peuvent consommer des huiles lourdes, nous ne trouvons dans la catégorie des locotracteurs que des appareils allemands employés dans les mines et construits par la Maison Deutz-Oberusel.

Dans le modèle ancien, le moteur horizontal monocylindrique tourne à 330 tours ; les deux essieux suspendus sont connectés par chaîne, la commande de l'essieu moteur par le moteur s'opérant par l'intermédiaire d'engrenages. Il n'y a, dans les deux sens, marche avant et marche arrière, qu'une seule vitesse possible.

Les modèles plus récents pour voie étroite pèsent de 3 à 10 t et sont à deux vitesses, 4 et 8 km ; les machines sont à trois essieux couplés, et l'essieu avant est muni d'un dispositif (Klien-Linder) qui permet le déplacement des roues par rapport à l'essieu, pour faciliter le passage des courbes ou, suivant l'expression généralement adoptée, *l'inscription dans les courbes*.

Sur des bases analogues, le même constructeur a établi un locotracteur de 13 t pour voie normale. Le moteur

Diesel de 40 ch à 330 tours permet deux vitesses, 4 et 8 ou 5 et 10 km à l'heure. La commande des roues motrices se fait par l'intermédiaire d'un faux-essieu et de bielles.

L'emploi d'une transmission électrique revient à placer, sur le véhicule même, une petite usine génératrice pour l'alimentation des électro-moteurs. Les voitures automobiles que l'on avait fondées sur ce principe n'ont pas eu beaucoup de succès. Il existe cependant des locotracteurs qui donnent satisfaction.

L'aménagement est très simple. Le moteur à hydrocarbures actionne une génératrice de courant continu qui alimente les moteurs des essieux par l'intermédiaire d'un appareil contrôleur-combinateur dit *controller*.

Cette disposition est très commode pour la variation des vitesses et des couples-moteurs, suivant l'effort de traction à exercer.

Si la génératrice et les moteurs-récepteurs sont montés en *shunt* (1), les champs inducteurs restent toujours dans un rapport fixe : la transmission se comporte comme une transmission mécanique à rapport fixe, mais ce rapport est entre les mains du conducteur, qui peut le faire varier en introduisant des rhéostats qui agissent sur les excitations shunt.

On peut en outre, en ajoutant des excitations *série*, faire varier automatiquement les rapports des vitesses en fonction de la charge, la commande continuant à se faire par les excitations shunt, ou même, si l'on veut, par l'action des enroulements série.

On a ainsi une grande marge de réglage.

Dans la transmission électrique *Crochat-Collardeau*, les réceptrices sont du type série, la génératrice comprend des enroulements shunt et série.

---

(1) Voir, pour les définitions des termes électriques que nous employons, les ouvrages de cette Collection sur l'électricité.

Au départ, lorsque le moteur est au ralenti, l'enroulement shunt de la génératrice est seul en circuit. Ainsi la génératrice ne s'amorce pas, puisqu'elle est branchée sur une réceptrice série arrêtée, c'est-à-dire en court-circuit. Cela ne peut que favoriser le départ du moteur.

Pour démarrer, il suffit d'introduire dans le circuit l'enroulement série de la génératrice : celle-ci s'amorce et le véhicule se met en marche progressivement.

Pour accélérer ou pour ralentir, on agit sur le moteur.

En parcours dur, dans une rampe, on shunte le compoundage de la génératrice, ce qui diminue la vitesse du véhicule sans toucher à celle du moteur. Dans un parcours facile, au contraire, en shuntant les inducteurs des réceptrices, on peut augmenter la vitesse du locotracteur par rapport à celle du générateur.

Dans le dispositif *Westinghouse*, on peut coupler en parallèle ou en série les réceptrices suivant l'effort à exercer.

**Automotrices.** — Les transmissions électriques sont fréquemment employées sur les automotrices à moteur Diesel.

*Sulzer* place le groupe générateur de 200 ch sur le bogie avant, afin d'en faciliter la visite et le démontage, et de soustraire la carrosserie aux vibrations du moteur.

Celui-ci est un Diesel-Sulzer à deux temps et à six cylindres ; il tourne à 440 tours et commande directement une dynamo-shunt dont la tension est réglable, par l'excitation, de  $-300$  à  $+300$  v. Les réceptrices sont sur le bogie arrière ; dans les dispositifs anciens, elles attaquent un faux-essieu, lequel commande les roues par l'intermédiaire de bielles. Dans les derniers modèles, les réceptrices sont des moteurs de traction commandant directement les essieux ; en outre, un troisième moteur ac-

tionne l'un des essieux du bogie avant. La mise en marche du moteur s'effectue à l'aide de la génératrice, qu'on alimente à ce moment par accumulateurs.

Dans ces automotrices, on dispose un poste à chaque extrémité pour la conduite ; cela évite l'emploi des plaques tournantes aux gares terminus.

Un dispositif de sécurité permet de faire conduire le train par un seul homme, la défaillance ou la mort du conducteur provoquant l'arrêt ; ce dispositif est dit *dead-man's grip* ou *dead man* : sur la manette du contrôleur se trouve un bouton-poussoir où le conducteur doit poser sa main ; s'il l'abandonne, le bouton remonte, arrêtant le moteur et, quelques secondes après, actionnant le serrage des freins.

Une automotrice de 64 t, dont 26 pour le bogie avant, transporte 100 voyageurs à la vitesse de 70 à 75 km à l'heure en palier ; si l'on accroche une remorque de 30 t, la vitesse est réduite à 60 km.

Sur le parcours Winterthur-Frauenfeld (16 km), on consomme 6 l à l'aller, 14 au retour, 20 au total, soit 18 kg, c'est-à-dire 560 g par km. La consommation pour le transport de 100 t-km revient donc à 0,32 fr environ, si l'on compte le combustible à 360 fr la tonne.

*Polar*, de Vasseras (Suède), a réalisé des moteurs à 550 tours qui pèsent environ 40 kg par cheval. On y accouple une génératrice électrique à 8 pôles avec enroulement shunt, dont la tension, réglée par l'excitation, peut atteindre 550 volts. Le groupe est mis en marche par cette génératrice à l'aide d'accumulateurs.

Les électro-moteurs à enroulement série peuvent être couplés en série ou en parallèle, suivant que le parcours est dur ou facile.

Les transmissions électriques offrent l'avantage de permettre, à chaque instant — si les automotrices sont bien conduites, — la réalisation de la vitesse de marche la plus

favorable ; on peut même arrêter le moteur dans les pentes où son action est inutile.

A ces avantages s'ajoute la faculté d'installer, à chaque extrémité de la voiture, deux postes de manœuvre (un pour chaque direction) qui évitent le passage de l'automotrice sur une plaque tournante aux terminus.

Pour la conduite, il suffit d'un manette agissant sur un combinateur.

Cependant, pour l'entretien il faut non seulement des mécaniciens, mais aussi des électriciens. D'autre part, les pertes totales de rendement sont de l'ordre de 30 % ; ces pertes sont partiellement compensées, il est vrai, par les économies que l'on peut réaliser en faisant varier la vitesse d'après les efforts de traction. Enfin, les prix et les poids des automotrices sont supérieurs à ceux des appareils avec transmissions mécaniques.

On a donc essayé de concilier les avantages de ces deux systèmes avec les transmissions *électro-mécaniques* où le moteur et la dynamo se prêtent un mutuel appui.

Dans l'automotrice *Pieper* le groupe moteur-dynamo, relié à une batterie d'accumulateurs, commande les essieux-moteurs à l'aide de deux arbres à cardans, par l'intermédiaire de deux embrayages magnétiques.

La mise en marche se fait par la dynamo, comme dans les transmissions électriques que nous venons d'examiner.

Au démarrage ou dans les rampes dures, la dynamo, travaillant comme électro-moteur en empruntant de l'énergie aux accumulateurs, ajoute son action à celle du moteur. Au contraire, dans les parcours faciles, l'excédent d'énergie du moteur est utilisé par la dynamo, qui fonctionne alors comme génératrice pour le rechargement des accumulateurs.

Nous ne parlerons ni de la transmission électro-mécanique *Thomas*, dans laquelle le moteur et l'essieu sont, en marche normale, directement accouplés afin d'avoir le

rendement maximum, la transformation d'énergie (et seulement d'une partie) étant réservée à la période de démarrage ou pour franchir une rampe exceptionnelle ; ni de l'automotrice *Daimler*, où deux moteurs à essence actionnent chacun un essieu et peuvent être mis en marche par une dynamo, dispositif symétrique qui a permis des vitesses normales de 80 km à l'heure.

Le dispositif Pieper pourrait servir à récupérer dans les pentes une partie de l'énergie dépensée dans les autres sections du parcours. Cette récupération est un problème assez difficile, qu'on a résolu parfois au moyen de l'air comprimé.

*A priori*, le rendement d'une transmission comprenant un transformateur d'énergie à l'air comprimé ne semble pas très brillant. On objecte qu'une compression par étages avec refroidissement entre deux phases et, au contraire, un réchauffage de l'air pendant la détente, au moyen de l'échappement du moteur thermique, pourraient rendre acceptables les dispositifs Maybach, Lenz, Dunlop, etc., qui ont été imaginés dans ce sens.

La transmission pneumatique *Hautier* a été essayée en 1913 et a donné :

à 23 km à l'heure, en prise directe, sans transformation, un rendement de 90 % ; à 15 km, avec transformation partielle d'énergie, 80 % environ ; à 7 km, avec transformation plus importante, 67 % environ. Ce sont là des rendements inespérés, que l'on peut expliquer ainsi : la transformation d'énergie est toujours partielle ; l'air comprimé est immédiatement employé à haute température dans le moteur à air ; les différents mobiles de la transmission étaient très soigneusement montés sur billes dans des bains d'huile.

Bien que le procédé se prête à plusieurs variantes qui pourraient le simplifier (par exemple, la transmission directe attaquerait un essieu et le moteur à air, un autre,

le réchauffage de l'air étant conservé), on estime généralement que, sauf pour des cas spéciaux, l'air comprimé n'est pas le meilleur agent de transformation.

Le moteur du dispositif Hautier fonctionnait avec un carburateur à naphthaline fondue par l'eau de circulation maintenue à 100°; les deux autres dispositifs que nous allons examiner utilisent des moteurs Diesel.

**Locomotive Diesel-Sulzer de 1 000 ch.** — Le moteur à deux temps comprend 4 cylindres en V; il est disposé transversalement entre les deux longerons du véhicule; son arbre, qui comprend deux coudes, forme faux-essieu pour la commande directe par bielles des quatre roues motrices.

L'air comprimé n'est employé que pour le démarrage.

A cet effet, un groupe moto-compresseur de 250 ch envoie dans les cylindres de combustion du moteur principal l'air comprimé qui assure le fonctionnement de ce moteur, jusqu'à ce que le train ait acquis une vitesse et une inertie suffisantes pour que le fonctionnement normal Diesel puisse être amorcé.

En rampe, le démarrage était très difficile, car le moteur ne pouvait fonctionner en Diesel que lorsque la vitesse de 10 à 12 km était atteinte par la marche préalable à l'air comprimé. Une circonstance retardait d'ailleurs l'amorçage de la combustion, c'était le refroidissement des cylindres causé par la détente de l'air comprimé pendant toute la période de démarrage.

La maison Sulzer paraît avoir renoncé à ce dispositif, en faveur de la transmission électrique.

**Automotrice Leroux.** — L'air comprimé demeure intéressant pour les mines. C'est pourquoi nous terminerons ce chapitre par l'examen d'une automotrice à deux bogies employée aux mines de Carvin, et dont la transmission

présente une certaine analogie avec la précédente.

Le moteur, monté sur le bogie avant du véhicule, commande directement par bielle les quatre roues motrices.

Ce moteur est un Diesel à 2 cylindres à deux temps dont les manivelles sont à  $180^{\circ}$ , chaque cylindre comportant deux pistons opposés, chaque piston supérieur étant relié à l'inférieur de l'autre cylindre par bielle oblique, de sorte que, dans chaque cylindre, les pistons se déplacent en sens inverse, comme nous l'avons expliqué précédemment.

Sur l'arbre du moteur, comme on le fait souvent d'ailleurs, sont attelées deux pompes de balayage dont les manivelles sont à  $90^{\circ}$  l'une de l'autre. Ces pompes comportent, attelés en tandem, des pistons étagés pour la compression à 70 kg de l'air d'insufflation.

L'air comprimé que l'on utilise pour le démarrage, au lieu d'être envoyé dans les cylindres de combustion, comme dans la machine précédente, se rend dans les cylindres de balayage. Une distribution appropriée, sur laquelle nous n'insisterons pas, permet de faire fonctionner ces cylindres comme moteurs à air comprimé (et comme moteurs à double effet, ce qui supprime les points morts). Après avoir fourni ce travail, l'air se rend enfin dans les cylindres de combustion pour remplir l'office de balayage. Mais, tandis que le balayage, pendant la période de fonctionnement normal, est capable tout au plus de donner dans les cylindres une pression initiale de 200 g, le balayage pendant le démarrage, par l'intermédiaire de l'échappement du moteur à air, procure une pression initiale de 1 kg, et la surcompression qui en résulte compense la réfrigération provoquée par la détente ; la température dans les cylindres du Diesel est même plus élevée que pendant le fonctionnement normal, ce qui rend très sûr l'amorçage de la combustion. Au second tour de roue, le Diesel est lancé. On conserve pendant un certain temps,

comme appoint à l'action motrice du Diesel, l'action motrice de l'air comprimé.

Nous insistons un peu sur ce dispositif, parce qu'il complète ce que nous avons dit sur le démarrage des moteurs Diesel en général, et qu'il pourrait être utilisé dans certains cas.

La récupération de l'air de démarrage est facile ; il suffit, dans une déclivité ou aux abords d'un arrêt, de renverser la distribution des cylindres de balayage ; ces cylindres fonctionnent alors comme compresseurs et rechargent les réservoirs d'air comprimé. On pratique ainsi un freinage récupérateur.

Le moteur comprenait 2 cylindres de  $200 \times 250$  et développait 150 ch. L'air en réserve était à la pression de 150 kg ; il était détendu à 4 kg pour le démarrage.

Voici les caractéristiques de cette machine, qui a été détruite pendant l'occupation allemande.

Poids	} à vide .....	24 t 5
		avec 60 voyageurs .....
Deux remorques avec, chacune, 60 voyageurs .....		33 t
Poids total d'un train avec 180 voyageurs ..		62 t
Consommation : 482 g par km, soit 780 g pour 100 t-km, correspondant à une dépense de .....		0 fr 28

**Remarque sur les procédés électro-mécaniques et pneumatiques.** — Dans ces procédés, on réalise en marche normale une transmission aussi directe que possible de l'énergie du moteur aux roues.

Le procédé Hautier permet de transformer au démarrage ou en rampe une partie de l'énergie du moteur, afin d'augmenter l'effort à la jante des roues motrices ; cela, bien entendu, au détriment de la vitesse. Il permet l'arrêt ou la mise au ralenti du moteur dans les pentes, mais il nécessite des trains d'engrenages.

Cela ne peut constituer un motif suffisant pour ajourner l'emploi de ces dispositifs, car de grands progrès ont été réalisés dans l'exécution des démultiplications par engrenages, que l'on emploie dans les transmissions des locomotives électriques comme dans les réducteurs des turbines marines et dans bien d'autres machines.

Pour les grandes puissances, la transmission électrique est certainement en faveur et c'est, dans l'état actuel, cette transmission qui permet le plus facilement, et sans aléa, de réaliser une machine d'après un programme donné ; mais les transmissions par engrenages avec dispositifs spéciaux pour le démarrage sont encore susceptibles de donner des réalisations intéressantes pour les machines puissantes. On doit reconnaître qu'elles ne sont pas au point.

Le procédé Leroux, comme le procédé Pieper, exige pour les démarrages, et dans les rampes exceptionnelles, l'appoint de l'énergie d'un accumulateur dont la capacité dépend, par conséquent, des difficultés du parcours. Ainsi, il faut employer un moteur *surabondant* qui travaillera normalement au-dessous de sa puissance. Mais n'est-ce pas là ce qu'on fait toujours quand on veut garder une marge de sécurité ? Et dans le cas des deux procédés que nous visons, n'avons-nous pas, en compensation d'une assez faible augmentation de la consommation, une transmission d'un rendement supérieur ?

Il ne nous reste maintenant, pour terminer cette étude des locomotives pourvues de moteurs à combustion interne, qu'à parler de l'alliance de ce moteur avec la machine à vapeur réalisée dans le moteur Still dont nous avons fait connaître le principe à propos des moteurs fixes et marins.

**Locomotive Still.** — On sait que, dans le procédé Still, une partie des chaleurs de l'échappement du moteur à

combustion sert à produire de la vapeur qui vient agir sur l'autre face du piston moteur.

La chaudière de la locomotive est en communication avec les chambres à eau des cylindres ; elle comprend un *faisceau tubulaire* chauffé normalement par les gaz d'échappement, et, pour la mise en route, par des brûleurs qui utilisent le même combustible que le moteur à combustion. La mise en marche s'effectue par la vapeur.

Si l'on marche sous une pression de 10 kg, par exemple, l'eau de circulation est à la température uniforme de 180° ; les dilatations du cylindre se font donc d'une manière uniforme, avec le minimum de déformations.

D'autre part, dès la mise en marche, les parois sont réchauffées et la combustion peut s'effectuer, par exemple, sous 20 kg de compression au lieu de 32.

Le piston est refroidi par la vapeur saturée qui agit sur sa face arrière et qui se surchauffe elle-même à ce contact.

Il en résulte un cycle plus économique que le cycle Diesel, une grande facilité de démarrage en charge et un approvisionnement de vapeur utile pour les machines auxiliaires. La maison Kitson, de Leeds, a construit ainsi une locomotive de 1 200 ch.

Cette locomotive-tender comprend trois essieux couplés et deux bissels. Les essieux couplés sont commandés à l'aide d'un faux-essieu, qui reçoit par l'intermédiaire d'engrenages son mouvement de l'arbre-moteur ; celui-ci est actionné par 8 cylindres horizontaux fonctionnant à quatre temps, et dont chaque piston reçoit : sur sa face extérieure, la pression des gaz de combustion ; sur sa face intérieure, l'action de la vapeur. La tige de piston est munie de garnitures et de glissières comme dans une machine ordinaire.

De même, la chaudière est disposée au-dessus du moteur et comporte un foyer cylindrique, suivi d'un faisceau tubulaire pour la mise en pression. Les faisceaux tubu-

lares de chauffage par les gaz d'échappement sont placés latéralement, et deux gros tubes ramènent dans les collecteurs à l'arrière les gaz d'échappement des cylindres avant.

**Conclusion.** — On voit que les solutions ne manquent pas pour l'application à la traction sur voies ferrées des moteurs à hydrocarbures, et particulièrement des moteurs à combustion interne. Une industrie nouvelle tend à s'établir sur les lignes qui ne seront pas électrifiées.

Quant à faire un choix entre les divers procédés qui ont été essayés ou proposés pour la transmission, aux essieux-moteurs, de l'énergie développée sur l'arbre-moteur, il serait difficile de se prononcer d'une manière catégorique. Nous avons fait connaître les avantages et les inconvénients des différents dispositifs ; les qualités à rechercher ne sont pas les mêmes pour un locotracteur, pour une automotrice de ligne secondaire accidentée et pour une locomotive de ligne à grand trafic. Il faut tenir compte de beaucoup d'éléments que l'on ne peut chiffrer, comme, par exemple, de la commodité de l'exploitation ; c'est une question d'appréciation et une question d'espèce.

Nous allons maintenant examiner une série de moteurs un peu différents des moteurs Diesel ordinaires, les moteurs à injection mécanique, qui pourraient d'ailleurs s'appliquer aux mêmes usages.

---

## CHAPITRE VIII

### MOTEURS DIESEL DE FAIBLE PUISSANCE. MOTEURS LÉGERS. INJECTION SOLIDE. CYCLE MIXTE

---

Intérêt des moteurs Diesel de l'ordre d'une dizaine de chevaux. — A son origine, le moteur Diesel était destiné à des puissances modestes, mais il n'a pas tardé, pour les applications industrielles et maritimes, à atteindre les grandes puissances que nous avons citées dans les chapitres précédents (1).

Au contraire, les progrès pour les faibles puissances ont été beaucoup plus lents ; la limite inférieure des puissances pratiquement réalisées était de l'ordre de 50 ch.

Cela tenait aux difficultés techniques, non irrésolubles d'ailleurs, mais qui conduisaient à des solutions coûteuses. Par exemple, les organes accessoires pour l'injection du combustible revenaient à peu près au même prix pour un petit moteur que pour un moteur de puissance moyenne.

Les moteurs de faible puissance conservent cependant l'avantage des faibles consommations du moteur Diesel ordinaire, et dès lors que l'on put se procurer des moteurs de 10 ch fonctionnant avec le cycle Diesel, on les acheta pour les petits ateliers et pour les barques de pêche. A la

---

(1) Le plus puissant moteur du monde serait de 17 000 ch (gas-oil Power, 3 janv. 1924).

fin de 1923, il y en avait 120 en service dans notre pays, dont 40 environ sortaient de nos usines.

Cette industrie paraît très intéressante et, avant d'examiner la fabrication un peu spéciale des petits moteurs, nous allons indiquer, à titre d'exemple, les dispositions essentielles de deux moteurs assez répandus.

Ces deux moteurs ont conservé le mode d'injection du combustible par insufflation d'air que nous avons décrit, mais les réservoirs d'air comprimé ont pu être supprimés.

**Moteur Hindl.** — Nous décrirons sommairement le type de 7 ch. Ce moteur est du type vertical à quatre temps, que nous connaissons bien.

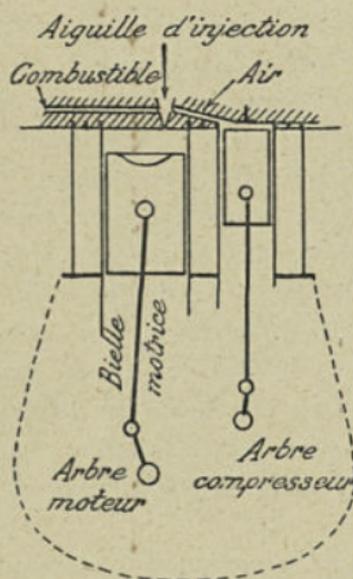


FIG. 21. — SCHÉMA D'UN MOTEUR HINDL.

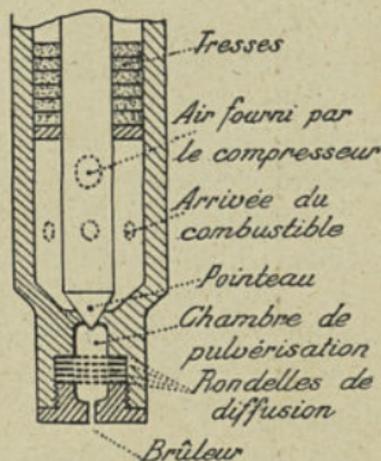


FIG. 22. — INJECTEUR DU MOTEUR HINDL.

La compression de l'air nécessaire à l'injection se fait, en un seul étage, par un petit piston (fig. 21) qui se déplace dans un cylindre parallèle au cylindre moteur ; de la sorte, il est facile de conduire directement cet air autour de

l'aiguille d'insufflation, à l'aide d'un petit canal oblique ménagé dans la culasse commune aux 2 cylindres, sans qu'il soit besoin d'un réservoir intermédiaire.

On pompe le combustible de façon à l'amener à la soupape d'admission juste au moment où celle-ci s'ouvre. Il n'est comprimé à chaque course que la quantité d'air nécessaire à une seule injection de combustible.

Le cylindre du compresseur et le canal sont refroidis par la circulation générale d'eau qui entoure le moteur.

La soupape d'admission du combustible dans le cylindre c'est l'aiguille elle-même (fig. 22). On voit sur le schéma l'endroit où débouche l'air comprimé ; le combustible arrive un peu en dessous par plusieurs ouvertures, et sa mise sous pression a lieu au moment même de l'injection ; une tresse, serrée dans un presse-étoupe, prévient les fuites de l'aiguille.

La pulvérisation s'accomplit, non avant le passage de la pointe de l'aiguille, mais dans une petite chambre comprise entre ce cône et l'orifice d'entrée du mélange pulvérisé dans le cylindre. Cette chambre sert au logement de trois rondelles percées de petits trous ; ceux de la rondelle centrale n'étant pas en regard des trous des deux autres, il en résulte une série de chocs et de tourbillons qui favorisent la pulvérisation.

Quant à la distribution, elle s'opère de la même manière que dans un moteur Diesel ordinaire à quatre temps.

Cependant, le diagramme réel (fig. 23) est plus pointu que les diagrammes habituels des autres moteurs (fig. 24)

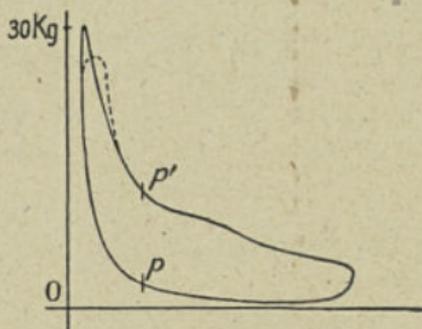


FIG. 23. — DIAGRAMME RÉEL D'UN MOTEUR HINDL.

et se rapproche des diagrammes des moteurs à explosion : la combustion se fait, tout d'abord, presque à volume constant.

Les deux pistons (moteur et compresseur) sont commandés à l'aide de bielles et de manivelles par des arbres parallèles ; mais celui du compresseur tourne évidemment deux fois moins vite. D'autre part, lorsque le maneton, point d'articulation de la bielle et de la manivelle motrice, est au point mort haut, le maneton de la manivelle du compresseur d'air est en arrière, dans le sens du mouvement, d'un angle de  $30^\circ$  environ ; ce décalage initial est réglable, comme d'ailleurs celui de la pompe à combustible.

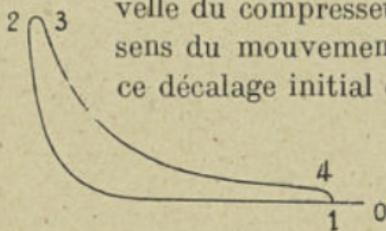


FIG. 24. — DIAGRAMME CORRECT ET COURANT D'UN MOTEUR DIESEL ORDINAIRE.

C'est ainsi qu'en  $p$ , le pointeau de l'aiguille se soulève et le piston compresseur approchant alors du point mort supérieur, l'air comprimé commence à s'écouler, chassant par l'aiguille le combustible qui n'avait pas été introduit (nous verrons pourquoi) dans l'injection précédente ; en  $h$ , où la compression se termine dans le cylindre moteur, le piston étant arrivé au point mort haut, la pompe à combustible s'abaisse, chassant le combustible frais dans la chambre de pulvérisation et dans le cylindre ; en  $p'$ , le pointeau de l'aiguille revient sur son siège et le cylindre compresseur cesse de communiquer avec le cylindre moteur (le piston compresseur n'arrive qu'un peu après au point mort haut).

On voit, sur le diagramme, qu'entre les points  $p$  et  $p'$  la courbe est aiguë ; il vaudrait mieux, sans doute, l'arrondir suivant le tracé en pointillé, qui procurerait la même puissance tout en abaissant les pressions maxima dans le cylindre et, par conséquent, les efforts sur les organes.

On peut se rapprocher de cela en réglant l'écart angulaire entre les manivelles de façon à modifier la surpression qui existe entre le cylindre du compresseur et le cylindre moteur au moment de l'ouverture du pointeau.

Nous n'insisterons pas sur le réglage des appareils qui commandent la distribution, ni sur ces appareils eux-mêmes ; mais l'on conçoit qu'il soit possible d'agir sur les éléments suivants :

Cylindre moteur	$\left\{ \begin{array}{l} \text{admission} \\ \text{d'air} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{point d'ouverture} \\ \text{point de fermeture} \end{array} \right.$	durée de l'ouverture.
		$\left\{ \begin{array}{l} \text{compression} \\ \text{d'air} \end{array} \right.$	

Pompe à combustible : instant du début du refoulement.

Cylindre compresseur	$\left\{ \begin{array}{l} \text{variation du taux de compression et de} \\ \text{la loi de surpression dans ce cylindre} \\ \text{relativement au cylindre moteur, de} \\ \text{façon à agir sur la rapidité de l'in-} \\ \text{jection.} \end{array} \right.$
----------------------	--

Injection . . . . .	$\left\{ \begin{array}{l} \text{ouverture du pointeau} \\ \text{fermeture du pointeau} \end{array} \right.$	durée de l'ouverture de l'aiguille.
---------------------	---	-------------------------------------

La consommation d'un moteur de 7 ch en combustible de densité 0,863, dont le pouvoir calorifique est de 10 000 calories environ, est de 220 g par cheval-heure à la vitesse de 450 tours.

La distribution est réglée de telle manière que la chambre de pulvérisation n'est pas vidée lorsque le pointeau se referme. Il en résulte que, vers la fin de la période suivante de compression, le piston moteur comprime dans cette chambre de l'air qui provoque une petite explosion.

Ce phénomène, qui semble favoriser le fonctionnement du moteur, a été appliqué plus hardiment dans le moteur que nous allons examiner maintenant.

**Moteur Hvid.** — Le moteur Hvid diffère du précédent, non seulement par le développement de cette phase d'ex-

plosion, mais encore par le mode de refroidissement. On emploie toujours l'eau, mais sans aucune circulation : l'élévation de température est limitée par l'évaporation de l'eau contenue dans la chemise. En outre, la détente est prolongée, afin de réduire un peu les chaleurs emportées par l'échappement. On arrive ainsi à réaliser le diagramme de la fig. 25, avec une pression maximum de 40 kg par  $\text{cm}^2$ .

Le seul point sur lequel nous insisterons, c'est le dispositif d'injection dont la fig. 26 est le schéma. On y voit particulièrement l'auget que l'on approvisionne en combustible destiné à provoquer l'explosion initiale. Cette explosion se produit lorsque, vers la fin de la période de compression, l'air chaud pénètre dans cet auget par l'orifice qui sert aussi

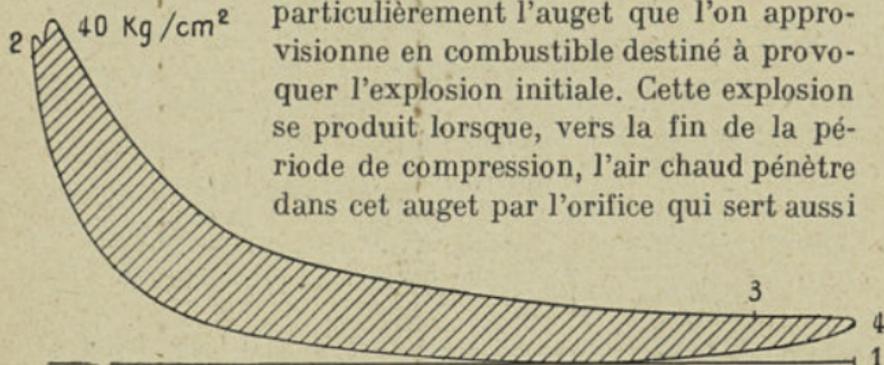


FIG. 25. — DIAGRAMME DU MOTEUR HVID.

à l'expansion des gaz produits à ce moment ; on ne voit qu'une petite portion de la capacité supérieure du cylindre.

Les temps ou les phases se développent de la manière suivante :

Nous supposons que la manivelle et, par conséquent, le piston-moteur partent du point mort haut. Le piston descend et, bien que la soupape d'aspiration d'air s'ouvre, la dépression est suffisante pour provoquer le soulèvement de la soupape d'air d'insufflation. Ce soulèvement ne dure que fort peu de temps, car la dépression ne tarde pas à être insuffisante, et la soupape est appliquée contre son siège par un ressort non figuré.

Mais que s'est-il passé pendant le soulèvement ? Sur

le siège même de cette soupape débouche un conduit qui prolonge l'espace annulaire restant autour du pointeau. Ce pointeau, qui est commandé par le régulateur du moteur, obture donc plus ou moins le conduit, par lequel une certaine quantité de combustible peut s'écouler dans l'auget, lorsque la soupape est ouverte ; un réservoir à combustible se trouve au-dessus du pointeau.

Ainsi, lorsque la manivelle et le piston arrivent au point mort bas, le cylindre est plein d'air et l'auget est partiellement rempli de combustible.

Le piston remonte ; c'est la course de compression que nous connaissons déjà.

A la fin de cette course et sous l'influence de la chaleur de l'air comprimé, une petite explosion se produit dans l'auget, provoquant une pointe dans le diagramme, laquelle indique un relèvement de pression suivi d'un affaissement qui ne dure pas car, à ce moment, l'injection du combustible provoque une combustion plus lente, suivie de détente pendant la course descendante.

L'échappement commence un peu avant la fin de cette course et se poursuit pendant toute la course ascendante suivante

Nous sommes ainsi revenus au point initial, à partir duquel un nouveau cycle se déroule de la même façon.

La valeur de la compression dans le cylindre détermine l'instant de la petite explosion initiale dans l'auget, et la

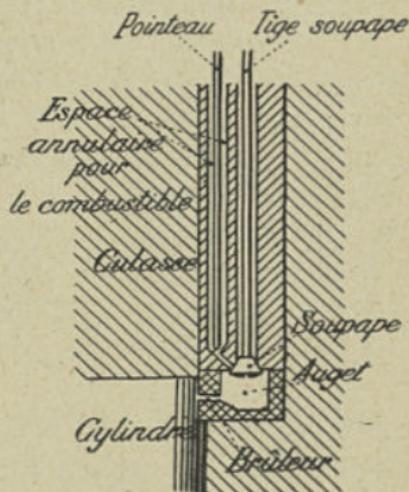


FIG. 26. — SCHÉMA DU DISPOSITIF D'INJECTION HVID.

disposition de l'orifice assure la projection convenable du combustible dans le cylindre.

On peut, comme dans le moteur précédent, régler l'admission et la compression de l'air dans le cylindre moteur. On peut aussi doser la quantité de combustible qui pénètre chaque fois dans l'auge, en réglant la position initiale du pointeau, position qui est d'ailleurs modifiée à chaque instant par le régulateur et par le ressort de la soupape

La combustion est complète et la consommation de combustible reste du même ordre que celle que nous avons indiquée pour le moteur précédent ; un peu plus élevée peut-être, mais plus constante en présence des variations de la charge : 220 g par cheval-heure pour une puissance de 7 ch ; 250 g lorsque la puissance s'abaisse à 5 ch et 228 g lorsque la puissance développée sur l'arbre peut atteindre 8 ch. Ces chiffres peuvent du reste varier suivant les combustibles employés.

**Notes pratiques sur la construction des petits moteurs.** — Nous ne pouvons examiner tous les petits moteurs Diesel qui ont été essayés et construits, mais nous formulerons cependant quelques observations susceptibles de guider les acheteurs dans leur choix.

Le cylindre doit être symétrique pour diminuer les risques de rupture qui résulteraient des dilatations par trop inégales. Le fond doit s'enlever facilement en vue de la visite du cylindre.

Les pistons doivent pouvoir s'enlever sans qu'il soit nécessaire de démonter le cylindre ; l'articulation du pied de bielle doit être assez éloignée de la face active et chaude du piston. La pression des segments sur le cylindre doit être faible, car ce sont les segments qui doivent s'user et non le cylindre, plus difficile à remplacer ; l'étanchéité peut être renforcée par l'emploi de cannelures sur les segments.

Les organes de distribution sont commandés par des cames ; il faut que l'arbre qui les porte soit court et bien soutenu, que chaque came passe dans l'huile avant son contact avec l'organe commandé, lequel est une tige assez robuste et assez bien guidée pour éviter les vibrations ou les coincements.

Il faut exiger, autant que possible, que les paliers se démontent sans enlèvement préalable de l'arbre, afin que le rattrapage des jeux provenant de l'usure soit facile.

La régulation doit permettre de passer d'une charge à une autre, avec variation correspondante des vitesses, et d'employer différents combustibles ; il faut que le moteur soit muni d'un dispositif qui en limite la vitesse en cas de suppression de la charge.

Il est inutile de rappeler que l'aiguille est une des pièces les plus fragiles, que son démontage complet doit être simple et que sa forme doit être assez ramassée pour éviter les vibrations.

Ce sont là des observations essentielles ; il faudra d'ailleurs s'en rapporter à un bon mécanicien pour l'examen attentif du montage et de l'ajustage des différents organes. Il faut proscrire évidemment les montages en porte-à-faux, particulièrement pour les engrenages. Les commandes par roue et vis sans fin ne sont admissibles que si la vis tourne à faible vitesse et ne peut se déplacer ni suivant son axe, ni dans le plan de la roue.

**Graissage.** — Le graissage des petits moteurs est un peu spécial. On ne peut, sans complication, employer dans le même moteur plusieurs huiles. L'huile unique doit donc être bien choisie d'après la viscosité qu'elle peut garder entre les températures extrêmes de son emploi dans l'organe à lubrifier. Il faut tenir compte de son point d'inflammabilité, afin d'éviter des explosions dans le carter. Il faut considérer ses propriétés chimiques à froid

et à chaud. On aura intérêt, à ce sujet, à prendre les conseils pratiques du constructeur.

Mais on ne pourra éviter l'emploi d'une huile d'été et d'une huile d'hiver que si le circuit de circulation de ce lubrifiant est pourvu d'un réfrigérant efficace, essentiel pour maintenir sa fluidité et son pouvoir lubrifiant indépendants de la température ambiante.

Le graissage forcé qui absorbe de l'énergie n'est pas utile pour tous les organes des petits moteurs.

Par exemple les axes seront graissés à l'aide d'un anneau ou d'un lécheur ; les cames, par gouttes ou bain d'huile pendant une partie de leur rotation ; il en sera de même pour les engrenages. Les parois des cylindres elles-mêmes pourront se contenter de gouttes, si le cycle est à quatre temps, c'est-à-dire s'il y a une course d'aspiration d'air frais.

En tout cas, il faut que des gorges, des trous ou des raclettes empêchent l'introduction d'un excès d'huile dans le cylindre ou, tout au moins, orienter les canaux de sortie de façon à favoriser l'expulsion du lubrifiant, aux faibles charges par exemple.

La pompe à engrenages droits, la plus simple, est recommandable avec, sur le refoulement, un dispositif à membrane déformable, qui peut commander l'ouverture du conduit d'alimentation du combustible ; cela donne une grande sécurité, le réservoir auxiliaire d'huile ainsi constitué prolongeant le graissage pendant quelques instants après l'arrêt du moteur.

Le circuit général de la circulation d'huile peut avantageusement comprendre :

Une pompe, alimentée en charge par une région A du carter et qui refoule l'huile dans un appareil où sa température est réglée, et d'où elle se rend aux lieux de graissage ; elle descend de ces lieux et des déversoirs dans une région B du carter par l'intermédiaire de filtres à chicanes

avec feutre, composés de plateaux que l'on peut retirer pour le nettoyage. Il est bien évident que l'on pourra aussi placer des filtres entre la pompe et le réfrigérant.

**Dispositions générales des petits moteurs.** — Les moteurs de faible puissance que nous avons décrits sont à quatre temps ; cela supprime la pompe de balayage, mais au prix d'une augmentation considérable du poids et de l'encombrement du moteur, à puissance égale.

Le cycle à deux temps paraît donc préférable, son rendement est équivalent, son fonctionnement peut être aussi sûr, et les inégalités de température dans le cylindre sont atténuées.

Quel que soit d'ailleurs le cycle le moteur devra former un bloc compact nécessitant le minimum de place et de frais d'installation. Il devra être dans un carter qui le protège des poussières et qui étouffe les bruits ; ce carter sera muni de lumières, afin de surveiller les fumées, les suintements, etc. qui permettent de s'apercevoir à temps des incidents et de les localiser. Une rigole rassemblera les suintements, mais les compartiments du carter doivent éviter les mélanges de liquides susceptibles de créer des risques d'incendie. Le démarrage doit être obtenu à la main, en cas de panne.

Vaut-il mieux employer un moteur à cylindres horizontaux ou à cylindres verticaux ? Le dispositif horizontal soulage un peu les coussinets, mais la disposition verticale favorise la répartition du combustible et diminue l'usure des cylindres, pistons, segments, et surtout l'usure inégale qui ovalise les cylindres. Sauf pour des raisons particulières d'utilisation, le moteur vertical paraît donc préférable.

Quant au nombre des cylindres, il semble bien qu'un moteur marin devrait en avoir au moins deux, pour des raisons de sécurité et qu'un groupe électrogène devrait

en avoir davantage pour obtenir, sans volant, une régularité suffisante.

Mais le problème de la réalisation du plus petit cylindre possible ne semble pas, jusqu'à présent, avoir tenté les constructeurs. Nous touchons là à des questions de poids sur lesquelles nous devons quelques explications.

**Allègement des petits moteurs Diesel.** — Si l'on fait, pour un grand nombre de moteurs, le calcul du poids par cheval, on voit que les petits moteurs pèsent de 64 à 200 kg par cheval, c'est-à-dire sont relativement plus lourds que les gros moteurs qui pèsent de 77 à 85 kg, les moteurs les plus lents pesant 100 kg.

Exception faite pour les moteurs de sous-marins, aucun progrès sur le poids n'a été effectué depuis l'an 1900 environ.

On sait, au contraire, que les moteurs à explosion ont depuis lors été considérablement allégés par la meilleure utilisation de la matière, par le choix de certains alliages et surtout par l'augmentation de la vitesse angulaire.

Il en résulte que, dans l'opinion courante, un moteur à explosion peut être un moteur léger, tandis qu'un moteur Diesel ne saurait être qu'un moteur lourd.

Il est certainement plus facile de construire un moteur lourd qui soit robuste ; mais rien ne s'oppose à ce que, par une série d'études et de perfectionnements, on réalise un moteur Diesel à haute compression beaucoup plus léger que ceux dont on dispose actuellement.

L'allègement ne peut être obtenu que par l'augmentation de la vitesse angulaire, qui diminuerait les couples-moteurs et, partant, les dimensions des pièces qui transmettent les efforts. La difficulté réelle, c'est de combattre les effets d'inertie du dispositif qui aurait à assurer l'injection dans une très courte durée. Il paraît difficile de se passer d'un compresseur pour avoir l'air d'insuffla-

tion indispensable. Cependant nous allons voir que dans un moteur proposé pour l'aéronautique on produit cet air dans une explosion préalable ; ce dispositif ne paraît malheureusement pas susceptible d'un réglage précis.

**Moteur Charles.** — Le dispositif d'explosion préalable d'une certaine quantité de combustible dans une petite capacité auxiliaire est destiné à provoquer la pulvérisation et l'introduction de la masse principale de combustible. Le mode d'injection ressemble un peu, si l'on veut, à l'injecteur Giffard, mais le poids du moteur Charles reste encore de l'ordre de 10 kg par cheval, ce qui est excessif pour l'aéronautique. Nous ne pensons pas qu'on puisse gagner beaucoup dans cette voie, d'autant plus que le réglage des phases n'est pas assez précis, comme nous venons de le faire remarquer.

**Moteur Garuffa-Gargiulo.** — Le moteur Garuffa, au contraire, a été réalisé du premier coup avec une puissance massique comparable à celle des autres moteurs d'aviation. Nous nous hâtons de dire que les qualités de ce moteur italien ont encore besoin de la consécration d'une longue pratique, mais il n'en reste pas moins la preuve indiscutable des possibilités d'allègement des moteurs à combustion interne.

Il s'agit, en effet, d'un véritable moteur Diesel à deux temps.

C'est un moteur fixe, en étoile, avec refroidissement par eau, dont la forme générale est semblable à celle des engins ordinaires du même genre. Cependant, les organes d'allumage qui donnent lieu à tant de pannes, les soupapes, qui provoquent tant d'incidents et d'accidents, sont supprimés et remplacés par un *distributeur* qui injecte, par l'intermédiaire d'un collecteur sous pression, le combustible dans chaque cylindre.

L'air de balayage est fourni par un compresseur Rateau commandé mécaniquement et qui est capable, en outre, d'assurer la suralimentation pour le vol aux hautes altitudes.

La consommation reste de l'ordre de 200 g par cheval-heure.

Quel que soit l'avenir de ce moteur, sa réalisation a ouvert au moteur Diesel et à l'aéronautique de nouvelles possibilités.

Le moteur Diesel pourrait devenir le moteur des avions commerciaux ; il permettrait de brûler un combustible beaucoup moins cher que l'essence et surtout moins dangereux. Si ces moteurs deviennent des engins pour l'aviation, il est bien évident qu'avec un allègement moins poussé, et par conséquent une plus grande robustesse, ils conviendront aux automobiles. Ainsi le moteur Diesel aurait conquis tous les domaines : moteur de centrale, d'usine, de navire, d'automobile et d'avion, et cela dans la gamme la plus étendue des puissances désirables. Ce n'est qu'une vue d'avenir, et nous nous sommes attachés dans ce qui précède à délimiter les zones des applications actuellement possibles.

**Injection solide.** — Nous avons vu que l'insufflation du combustible au moyen d'air comprimé avec ou sans réservoir spécial était recommandable par son efficacité, particulièrement pour les combustibles lourds qu'on brûle parfaitement sans incidents, pourvu qu'on prenne la précaution de démarrer avec une huile plus légère dite « d'allumage », pétrole lampant le plus souvent, et qu'on revienne à ce combustible avant d'arrêter le moteur, afin que les traces du combustible lourd ne puissent demeurer en certains points où ils provoqueraient des engorgements ou un véritable collage des organes mobiles, par exemple des pistons dans les cylindres.

Avec les mêmes précautions, on arrive à injecter mécaniquement, sans air comprimé d'insufflation, un combustible lourd, et la combustion est à peu près aussi parfaite dans certains modèles. On évite ainsi l'emploi, toujours délicat, des compressions élevées à plusieurs étages.

Sauf cette différence et le dispositif spécial d'injection mécanique dite « solide », les moteurs en question ont toute l'apparence d'un moteur Diesel ordinaire. Cependant, les compressions dans le cylindre restent d'un ordre moins élevé, afin de faciliter l'injection et la pulvérisation sans air comprimé.

Voici comment peuvent être établis la pompe à combustible et le pulvérisateur.

La pompe à combustible doit être capable de donner une très forte pression. On emploie une pompe à piston plongeur qu'on peut commander par une came ou par tout dispositif capable de permettre une variation de la course afin de régler, de cette manière, la puissance du moteur. La pompe aspire l'huile combustible du réservoir à l'aide d'une soupape dont on peut régler la levée ; l'huile est ensuite refoulée, par un tuyau, dans le pulvérisateur dont le premier organe est un joint robuste pour l'insertion de ce tuyau. On trouve ensuite généralement un clapet de retenue, un dispositif de pulvérisation, un pointeau et une buse d'injection.

Dans certains cas, on fait quand même appel à l'air comprimé pour parachever la pulvérisation, mais juste au moment où l'injection se produit et sans qu'il soit nécessaire de prévoir un compresseur à 50 ou 70 kg. On s'arrange, par exemple, pour que les jets de combustible dirigés horizontalement rencontrent des filets d'air chassés à ce moment d'une capacité auxiliaire où les a comprimés le piston dans sa course ascendante.

Nous allons d'ailleurs examiner quelques conditions de la pulvérisation mécanique.

**Pulvérisation mécanique.** — La pulvérisation par changements de direction et par chocs est tout à fait insuffisante ; c'est le mouvement giratoire dans la tête du pulvérisateur qui peut seul donner les très fines gouttelettes dont nous avons besoin, comme nous allons essayer de le faire comprendre.

Supposons que notre pulvérisateur comprenne, à l'extrémité d'un tube, une tête fraisée de plusieurs canaux tangents à l'évidement central. Ainsi le liquide est animé d'une vitesse qui est la composante d'une vitesse parallèle à l'axe du pulvérisateur et d'une vitesse que nous pouvons appeler tangentielle, normale à cet axe. Le combustible est donc lancé obliquement sous forme de jets liquides, c'est-à-dire dans un état peu favorable à la combustion complète que nous recherchons.

Mais si nous disposons devant ces jets une cuvette de forme convenable, les filets liquides vont s'écouler d'un mouvement giratoire le long de la paroi de la cuvette et s'étaler en un film extrêmement mince, dont l'épanouissement à l'extérieur sera également très peu épais.

Il faut évidemment pour cela que la méridienne de la surface de la cuvette, ou si l'on veut son profil, soit convenablement calculée, sans quoi le liquide sortirait de la cuvette en un jet cylindrique plein tournant sur lui-même, formant vrille au lieu de constituer une nappe. Il faut en outre que l'huile ait atteint un degré de fluidité convenable, au besoin par un réchauffage suffisant.

La détermination de la surface méridienne, par la condition que les filets liquides puissent s'écouler en tournant sur les parois de la cuvette sans « décoller », est possible mathématiquement ; mais cela nous conduirait à une équation aux dérivées partielles. Qu'il nous suffise de savoir que l'on peut trouver un profil convenable et que le phénomène que nous recherchons sera favorisé par la fluidité du combustible, à tel point que si l'on fait croître

progressivement la température du liquide et par conséquent sa fluidité, l'épaisseur de la veine liquide soumise au phénomène de cavitation diminue brusquement lorsque la fluidité atteint une valeur convenable.

Mais que va-t-il se passer lorsque le liquide, ayant ainsi circulé en tournant dans la cuvette, dépasse l'orifice de sortie ? Quelle forme va prendre la nappe liquide ?

Si nous considérons un petit élément liquide à sa sortie, nous pouvons voir qu'il est sollicité par trois composantes :

1° une vitesse suivant l'axe du pulvérisateur ;

2° une vitesse suivant le rayon, vitesse assez faible d'ailleurs ;

3° une vitesse suivant la tangente au cercle formant orifice.

La composante de ces trois vitesses est une ligne droite, faisant un angle constant avec l'axe du pulvérisateur et s'appuyant sur le contour circulaire de l'orifice de sortie. La surface formée par l'ensemble des filets est donc un hyperboloïde de révolution. Mais ce n'est pas ce qui nous intéresse le plus.

Le rayon des sections droites de la nappe hyperboloïde allant en croissant, il faut bien que la pellicule liquide diminue d'épaisseur ; mais elle ne peut s'étirer indéfiniment : deux éléments voisins tendent à se séparer en formant chacun un petit filet liquide, et cette tendance à la séparation sera d'autant plus marquée que la nappe hyperboloïde sera divergente, c'est-à-dire que la vitesse moyenne et la pression en amont d'où elle résulte seront plus grandes. Le seul phénomène qui retardera la rupture sera la viscosité, qui semble agir ici dans un sens défavorable ; mais il ne faut pas oublier que si jusqu'au moment de la rupture la nappe liquide a pu s'amincir sans se déchirer, c'est grâce à la viscosité. S'il y a donc avantage, au point de vue de la pulvérisation, à augmenter la pression

et par conséquent la divergence de l'hyperboloïde, il ne faut pas que la viscosité soit trop élevée, car la séparation de la nappe pourrait se faire en filets de plus gros diamètre : il faut que le liquide soit assez visqueux pour résister à la traction qui provoque l'amincissement de la nappe, mais il ne faut pas que la viscosité permette une trop grande résistance au cisaillement entre deux particules voisines sollicitées par des vitesses un peu divergentes. Il vaut mieux avoir la plus grande quantité possible de filets divergents ; une viscosité trop élevée permet la formation de plus gros filets, la vitesse de chacun d'eux est alors une moyenne entre les vitesses d'éléments qui tendent à diverger mais que la viscosité rassemble.

La question du débit intervient ici. Supposons que tout soit bien réglé et que l'on ait le débit voulu à une certaine température et sous une pression déterminée. Si, sans changer la température, on veut diminuer le débit, il faut diminuer la pression, ce qui peut conduire à une pression trop basse, car nous savons maintenant pourquoi une grande pression est nécessaire. Il y a donc avantage à conserver une pression convenable en diminuant la température.

On voit par ce qui précède combien est délicate la réalisation de la pulvérisation optimum pour un débit et pour un liquide déterminé ; et il semble que les méthodes par chicanes et chocs, bonnes lorsque l'on insuffle de l'air comprimé — ce qui change absolument la question, — ne peuvent que donner une pulvérisation grossière lorsqu'on veut se passer d'air, et qu'ainsi la dépense d'énergie est excessive pour un résultat très imparfait, éloigné de la combustion complète.

Mais ce n'est pas tout. Notre nappe liquide s'est séparée en un certain nombre de filets qui doivent se séparer eux-mêmes en fines gouttelettes. La tension superficielle, c'est-à-dire la capillarité, intervient certainement et nous sa-

vons que, pour une capillarité convenable, le filet continu se séparera en gouttes, suivant des sections qui sont équidistantes et égales à quatre fois et demie le diamètre du filet ; s'il y a des gouttes plus petites, cela provient de secousses qui agiront d'autant moins que le liquide sera plus capillaire. La capillarité ou tension superficielle serait donc défavorable, mais il faut penser qu'elle empêche la réunion en une seule goutte de deux gouttes déjà formées et qui viendraient à se rencontrer.

La pression, la viscosité, la capillarité interviennent donc en des sens divers pour modifier les conditions de fonctionnement d'un pulvérisateur donné. Si l'on veut réaliser un nouvel appareil ou améliorer les conditions de fonctionnement d'un appareil existant, il ne faut pas oublier l'influence de ces éléments divers qu'il est bien difficile de chiffrer. C'est pourquoi les pulvérisateurs mécaniques sont toujours inférieurs aux appareils qui utilisent l'insufflation à haute pression.

**Moteur Diesel à injection mécanique.** — Cependant, un assez grand nombre de constructeurs ont résolu d'une manière assez satisfaisante ce problème difficile pour des moteurs assez puissants. Il ne s'agit pas, bien entendu, de machines à huile lourde qui imposent le chauffage préalable d'une partie de la culasse, un dispositif d'injection d'eau, etc. ; mais il s'agit de véritables moteurs Diesel simplifiés par la suppression du compresseur, et dont le service est extrêmement simple ; la mise en marche a lieu par l'air à faible pression d'un réservoir, que le moteur charge lui-même avant son arrêt.

Les consommations de combustible sont généralement un peu plus élevées que celles des moteurs à insufflation d'air ; mais, pour des puissances de 200 ou 300 chevaux, la différence est presque insignifiante. On est même arrivé à construire des moteurs de 20 chevaux tournant à

290 tours et qui consomment environ 230 g de pétrole par cheval-heure ; nous répétons qu'il ne s'agit pas ici de moteurs semi-Diesel, d'ailleurs plus simples, mais dont les consommations sont généralement plus élevées ; nous le verrons dans les chapitres suivants.

Il est inutile, par conséquent, de décrire un moteur Diesel à injection solide : nous retrouverions tous les organes que nous connaissons déjà, sauf le compresseur à haute pression pour l'air d'insufflation.

Cependant, le cycle réalisé dans ces moteurs est un peu différent du cycle Diesel, c'est-à-dire de la combustion à pression constante.

Cette phase est précédée d'une phase au cours de laquelle la pression augmente dans le cylindre, et pendant laquelle la combustion s'effectue sous un volume sensiblement constant.

Comme certains moteurs à insufflation tendent aussi à utiliser ce cycle spécial et mixte, nous allons terminer ce chapitre par l'étude du diagramme correspondant, qui constitue le cycle de combustion le plus général qu'on puisse imaginer.

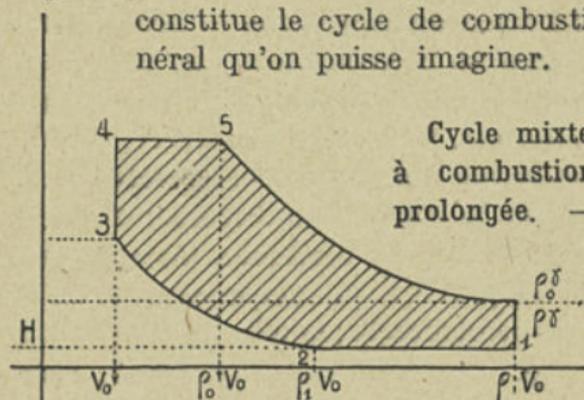


FIG. 27. — CYCLE MIXTE A EXPLOSION ET A COMBUSTION.

Cycle mixte à explosion et à combustion avec détente prolongée. — Pour éviter des redites,

nous prions nos lecteurs de se reporter aux explications que nous avons données au

sujet des diagrammes (p. 36) ; ils comprendront ainsi du premier coup le cycle théorique de la fig. 27.

Dans ce cycle, l'apport de chaleur qui se fait après la compression préalable 2-3 a lieu tout d'abord à volume constant, suivant 3-4, puis à pression constante suivant 4-5.

On peut faire, sur ce cycle, les calculs que nous avons indiqués pour les cycles à pression constante, chercher l'énergie fournie sous forme de chaleur, tant à volume constant qu'à pression constante, mesurer le travail à l'intérieur du contour 1, 2, 3, 4, 5, 6, et, en ayant soin de prendre dans les deux évaluations le kilogrammètre comme unité d'énergie, faire le rapport du second nombre au premier pour déterminer le rendement.

Nous ne referons pas ce calcul, mais nous rappellerons que le rendement du cycle à combustion sous volume constant est

$$r = 1 - \frac{1}{\rho_1^{0,3}};$$

que le rendement du cycle à combustion sous pression constante est

$$n = 1 - \frac{1}{\rho_1^{0,3}} \frac{\rho_0^{1,3} - 1}{1,3 (\rho_0 - 1)},$$

et que, la quantité par laquelle on a multiplié le dernier terme du premier rendement étant à *compression égale* supérieure à l'unité, le rendement d'un cycle à combustion est moindre que celui d'un cycle à explosion.

Nous avons souligné « à compression égale » ; cela est essentiel pour la comparaison. Or, nous savons que la compression dans le cycle à combustion peut être le double ou le triple de la compression possible dans le cycle à explosion ; il en résulte que ce dernier est moins avantageux — il s'en faut de beaucoup.

Dans le cycle mixte, on peut bénéficier des deux avantages : du rendement plus élevé du cycle à explosion et de la possibilité des hautes compressions dans le cycle à

combustion. On conçoit que par un choix convenable des compressions préalables, de la rapidité de l'explosion formant la première phase du cycle, de la durée de la combustion formant la seconde phase et du taux de la

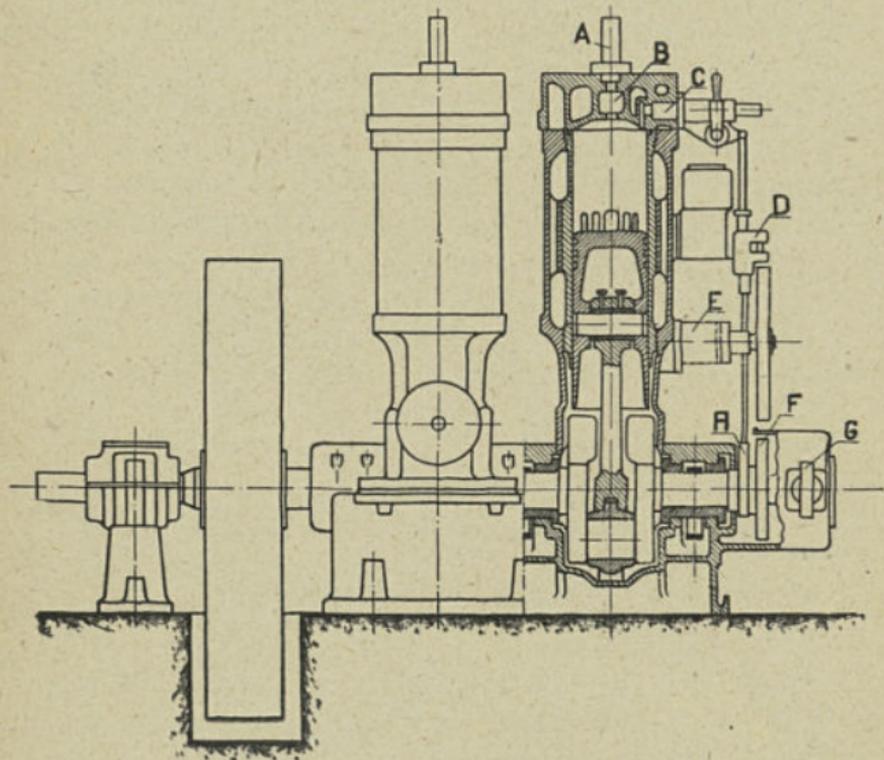


FIG. 28. — MOTEUR A INJECTION MÉCANIQUE OU SOLIDE, dit Super-Diesel.

Élévation et coupe longitudinale.

détente qui l'achève, on puisse trouver dans un cycle mixte, pour une compression donnée et pour une pression maximum fixée, le rendement optimum d'un moteur.

Le cycle mixte pratiquement réalisé dans les moteurs construits dans ce but (fig. 28 et 29) se traduit évidemment par un diagramme plus arrondi que le diagramme théorique de la fig. 27.

Il ne semble pas, jusqu'à présent, que l'on ait beaucoup gagné au point de vue des consommations, lesquelles, pour un combustible à 10 000 calories, restent voisines de 180 à 200 g par cheval-heure effectif. Cependant, il semble que l'on pourrait, par une étude plus approfondie, économiser encore quelque chose.

Nous terminerons là notre étude spéciale sur le moteur Diesel et sur ses applications, et nous allons maintenant examiner toute une série de moteurs plus simples, fondés sur le cycle mixte, mais dans lequel la phase explosive l'emporte davantage sur la phase de combustion proprement dite.

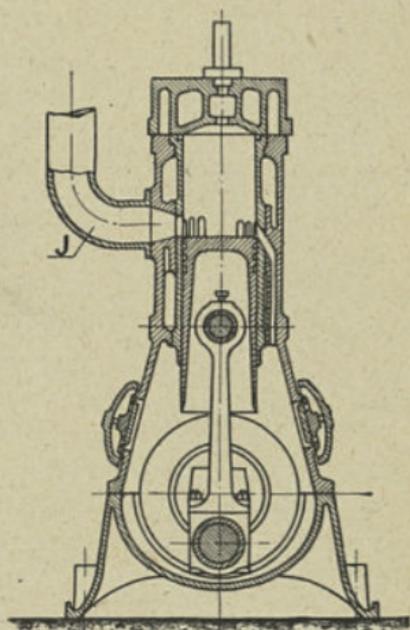


FIG. 29. — MOTEUR  
A INJECTION MÉCANIQUE.  
Coupe transversale.

## CHAPITRE IX

### MOTEURS SEMI-DIESEL APPLICATIONS A BORD DES BATEAUX DE PÊCHE

---

**Caractères généraux du semi-Diesel.** — Dans certaines applications, sur les bateaux de pêche par exemple, on regarde moins à la consommation qu'à la simplicité, à la robustesse, au faible prix de revient, à la facilité de conduite. Cela explique qu'il existe encore, dans le bassin d'Arcachon, de très nombreuses barques de pêche, dites « pinasses », pourvues de moteurs à explosion.

Mais le plus souvent on cherche à concilier la commodité du moteur à explosion avec la grande économie que l'on peut réaliser par l'emploi d'huiles lourdes bon marché qui offrent, en outre, moins de risques d'incendie.

Une solution consiste dans l'emploi de pétrole lampant sur le cycle à explosion à quatre temps, dans des moteurs à carburateur spécialement étudié pour le réchauffage énergétique de ce combustible, moins volatil que l'essence. Nous verrons pourquoi on y a renoncé, ou à peu près, en faveur du moteur semi-Diesel, d'ailleurs plus ancien que le Diesel lui-même, venu un peu plus tard lui fournir une appellation qui fait image et qui a résisté pour cela à certaines critiques.

Le cycle du semi-Diesel est assez différent, en effet, du cycle Diesel. Cependant, dans les deux cas, on injecte le liquide combustible dans l'air préalablement comprimé ;

l'allumage reste automatique. Dans le semi-Diesel, l'injection, solide, s'opère presque toujours par la poussée d'un piston, dans les conditions que nous avons précisées ; en outre, le degré de compression, moins élevé, permet d'avoir des organes un peu moins lourds.

Mais l'insuffisance de l'élévation de température dans cette compression modérée oblige à ménager, sur la tête du moteur, une surface incandescente pour l'allumage, qui sous cette influence, plus brutale que la seule action de l'air chaud, se fait à la manière d'une explosion, au moins dans la première phase de la combustion. C'est là une différence essentielle avec les moteurs Diesel. Les semi-Diesel pourraient donc s'appeler *moteurs à tête chaude*.

Dans presque tous les moteurs semi-Diesel, en effet, la surface incandescente qui assure l'allumage après chaque injection est une portion de la paroi même de la culasse. Cette portion n'est pas refroidie ; on doit la chauffer, pour la mise en marche, à l'aide d'une source extérieure, mais les combustions successives la maintiennent ensuite au rouge vif. Cette paroi, tantôt en forme de poche, tantôt simplement hémisphérique, reçoit souvent d'une manière directe le jet de pétrole plus ou moins pulvérisé, qui se trouve ainsi vaporisé puis enflammé.

La pompe à injection doit donner sa vive impulsion à un moment tel, que le combustible, projeté sous la forme de jets assez fins, ait le temps de rebondir, d'être vaporisé et d'être mélangé à l'air avant son inflammation ; ce temps est assez court, en vérité, mais il y a lieu d'en tenir compte. On s'arrange souvent de manière que l'inflammation comprenne deux stades, la première inflammation partielle ayant lieu dans une partie de la chambre de combustion plus chaude et séparée du reste de cette chambre et du cylindre par un étranglement. Il résulte de cette disposition un brassage des gaz enflammés et des

remous et tourbillons qui favorise le mélange homogène et intime du combustible et de l'air comburant.

La compression préalable de l'air pur atteint 10 à 15 kg par  $\text{cm}^2$ , et la pression en fin de combustion est voisine de 20 à 25 kg.

La caractéristique de ces moteurs étant la simplicité, on les construit presque tous suivant le cycle à deux temps, ce qui permet de n'avoir ni soupapes d'aspiration, ni soupapes d'échappement. La pompe de balayage elle-même est supprimée et c'est le dessous du piston qui comprime dans le carter la quantité d'air pur nécessaire.

La distribution est faite par le piston moteur qui découvre, avant d'arriver au bas de sa course, d'abord les lumières d'échappement, puis les lumières de balayage.

Nous allons retrouver toutes ces caractéristiques sur un premier exemple.

**Principe du moteur semi-Diesel.** — Considérons la coupe (fig. 30) d'un moteur semi-Diesel du type le plus commun, c'est-à-dire à deux temps. Cette coupe est faite suivant l'axe du cylindre et normalement à l'arbre-manivelle ou vilebrequin A.

Au-dessus d'un bâti, nous voyons un carter à section trapézoïdale, surmonté d'un cylindre dont les parois sont évidées pour la circulation d'eau de refroidissement, et terminé par une culasse où vient se fixer, au centre, la boule d'allumage, portant elle-même à son extrémité supérieure le dispositif d'injection du combustible.

Autour de la boule d'allumage, une enveloppe En peut concentrer la chaleur produite avant le démarrage par la lampe de chauffage L.

Sur le cylindre, on peut remarquer un orifice E destiné à l'échappement par l'intermédiaire du pot *p* des gaz brûlés, et un épanouissement G pour le passage de l'air.

Sur le carter, qui est étanche, une large soupape à cla-

pets multiples K permet l'arrivée de l'air extérieur en temps opportun, comme on le verra plus loin.

Telles sont les pièces essentielles constituant la partie fixe du moteur.

La partie mobile se compose d'un coude du vilebrequin, muni d'un maneton B (figuré au point mort bas) autour duquel est assemblée la tête de bielle B dont le pied s'articule sur l'axe du piston, et duquel on ne distingue que la section circulaire. Le piston lui-même est un fourreau muni de segments, au-dessous desquels se trouve un orifice H pour le passage de l'air ; la face supérieure de ce piston est munie d'une sorte de dent, le *défecteur*, qui dirige vers le haut l'air introduit dans le cylindre. Un volant calé sur l'arbre-moteur complète le dispositif.

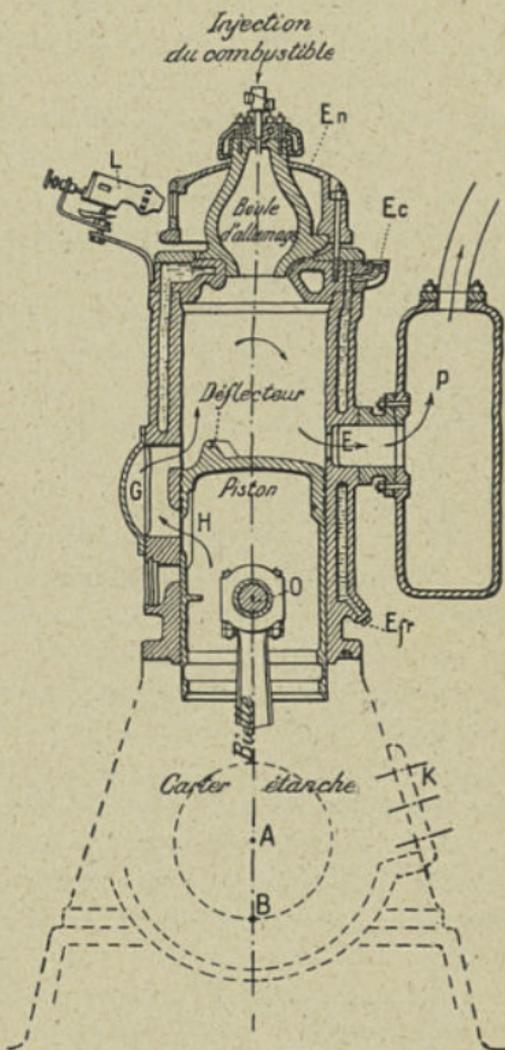


FIG. 30. — DISPOSITIF  
D'UN MOTEUR DIT SEMI-DIESEL.

Le moteur fonctionne suivant le cycle à deux temps.

Nous supposons que le tout est disposé comme sur la figure, c'est-à-dire que le maneton (et par conséquent le piston) est au point mort bas :

Sous l'influence de l'énergie emmagasinée dans le volant, le piston, sollicité par le maneton et la bielle, se relève, comprimant l'air au-dessus de lui et raréfiant, au contraire, la capacité du carter qui est au-dessous.

Par l'effet de cette dépression, les clapets automatiques *k* se soulèvent et l'air frais est introduit dans le carter.

Le piston, arrivant au point mort haut, a comprimé dans un espace réduit, en l'échauffant, l'air de la cylindrée. A ce moment, et même un peu avant, le combustible injecté dans la boule chaude s'est vaporisé ; il se mélange à cet air chaud et s'enflamme spontanément, en produisant une grande expansion de gaz qui chasse le piston vers le bas : la course motrice commence.

La combustion, suivie de détente, se poursuit jusqu'au moment où le piston, redescendant, débouche l'orifice E par lequel les gaz brûlés commencent à s'échapper. Mais le piston, en descendant, a comprimé en même temps l'air isolé dans le carter dont les clapets automatiques ont été rappelés sur leurs sièges par les ressorts, dès que la dépression, qui a permis l'admission, cesse d'exister. Par l'orifice H du piston, le passage G et l'orifice supérieur du cylindre, qui sont découverts très peu de temps après l'échappement (et alors que cet échappement se poursuit), l'air comprimé dans le carter (air de balayage) se précipite dans le cylindre ; le déflecteur le dirige vers le haut, de sorte qu'il n'y a pas mélange entre cet air pur et les gaz brûlés, puisque l'air de balayage chasse devant lui ces gaz ; si bien qu'à la fin de sa course descendante le piston, revenu au point initial, n'a plus au-dessus de lui que de l'air pur. Sous l'influence du volant le cycle va recommencer. Ajoutons que dès que le piston remonte, il obture

les divers orifices d'admission et d'échappement, ce qui permet la compression dans la course ascendante que nous avons déjà décrite.

Nous avons exagéré en affirmant que, revenu au point mort bas, le piston n'avait plus, au-dessus de lui, que de l'air pur. En réalité, le balayage n'a pu être complet, il reste un peu de gaz brûlés dans le cylindre. Cela n'a pas d'inconvénient pour le rendement, mais la puissance s'en trouve un peu diminuée ; car, puisqu'il y a moins d'oxygène dans le cylindre pour brûler le combustible, il faut introduire un peu moins de combustible que si la cylindrée était exclusivement composée d'air pur.

Au début, la boule est chauffée avec une lampe de soudeur. Il faut, pour que l'allumage se produise, que la boule soit suffisamment chaude ; mais il vaut mieux qu'elle ne le soit pas trop, car alors l'allumage serait trop violent pour la résistance de cette paroi, affaiblie par sa haute température ; il en résulterait, en tout cas, un choc un peu trop violent.

Pour éviter la surchauffe qui peut se produire pendant le fonctionnement, on doit donc user d'un agent de refroidissement. On emploie souvent une pulvérisation d'eau qui accompagne celle de l'huile lourde. Mais il arrive (pour les moteurs marins par exemple) que l'eau douce soit une matière rare ; on se sert alors d'une injection d'air. Ce n'est pas là une complication comparable à celle que constituent les compresseurs d'air des moteurs Diesel, parce que cet air de refroidissement n'a pas besoin d'être comprimé à une pression aussi élevée — cela, de beaucoup — il faut simplement ménager un petit cylindre spécial qui provoque le déplacement d'air nécessaire.

Quant au réglage de la puissance, on dispose de plusieurs moyens ; l'un des plus employés est la modification de la course de la pompe à combustible. Cette pompe est

commandée, par exemple, à l'aide d'une came conique que le régulateur déplace le long de son arbre.

**Remarques sur la combustion dans le moteur semi-Diesel.** — Nous savons que la combustion exige un mélange intime du combustible et du carburant et une température obtenue, dans le semi-Diesel, par une compression préalable de l'air seul. Cette compression est favorable au rendement ; elle a de plus pour effet d'entretenir incandescente une surface pour l'allumage.

Dans les moteurs à explosion, au contraire, le mélange combustible et carburant est comprimé et l'allumage est obtenu à un moment précis, le plus souvent par l'étincelle électrique. Ce mode de travail donne de bons résultats pour tous les combustibles volatils, appelés alors carburants (essence, benzol, alcool ou mélanges convenables de ces substances) ; il est assez difficile d'utiliser le pétrole lampant et presque impossible d'employer le gas-oil, d'où l'intérêt du semi-Diesel.

Nous devons faire observer, cependant, qu'à la faveur de divers artifices on peut utiliser dans les moteurs à explosion des combustibles relativement lourds.

L'un des meilleurs procédés consiste à vaporiser le liquide dans une atmosphère raréfiée par le mouvement même du piston ; on complète ensuite la cylindrée par une admission d'air. Si le moteur construit d'après ces principes est un peu encombrant, il permet cependant d'obtenir une vaporisation à froid et par conséquent un démarrage immédiat.

Mais, le plus généralement, quand, dans les moteurs à explosion, on veut employer du pétrole ou tout autre combustible lourd, on réchauffe ce combustible pour obtenir l'explosion ; mais on applique assez mal ce réchauffage dont on ignore très souvent le véritable effet.

On pense qu'un combustible s'enflammera d'autant

plus facilement que son *point d'éclair* est plus bas. Or, le point d'éclair, mesuré à l'aide d'un appareil Luchaire, par exemple, est la température d'inflammation sous une pression très voisine de la pression atmosphérique.

Dans le cylindre d'un moteur, l'inflammation s'opère sous pression et le phénomène paraît tout différent.

Le chimiste anglais Moore essaya de se rapprocher du phénomène industriel qu'il voulait étudier, en faisant tomber des gouttes de combustible dans une certaine masse d'air ou d'oxygène. Pour des températures déterminées de ces masses, il nota des explosions spontanées.

Il est curieux de constater que ces températures sont très différentes des points d'éclairs, lesquels croissent avec les densités (quand il s'agit d'huiles de pétrole de même origine). Voici les résultats publiés par Moore ; ce sont les températures d'explosion spontanée de quatre combustibles introduits sous forme de gouttes dans l'oxygène :

essence de pétrole .....	270 à 280°
pétrole lampant .....	251 à 253°
gas-oil .....	254°
huile de goudron .....	450 à 480°

Ainsi le pétrole et le gas-oil s'enflammeraient beaucoup plus facilement dans un cylindre que l'essence de pétrole ; cette constatation d'allure paradoxale est confirmée par les auto-allumages ou les détonations qui se produisent dans les moteurs à pétrole lampant, dès qu'on veut pousser la compression aussi loin que pour l'essence.

Dans les moteurs à pétrole lampant se produit, en outre, un *cracking* des vapeurs de pétrole, phénomène de dissociation bien connu qui donne, d'une part des essences, ce qui est avantageux, mais d'autre part, du coke, qui est bien gênant ; les dépôts de coke nuisent au fonctionnement mécanique et agissent, en outre, comme *catalyseurs* pour avancer encore le point d'auto-allumage du mélange.

Puisque le phénomène du « cracking » existe, le mieux est de se servir de cette dissociation, qui donne naissance à des carbures légers, mais en la localisant en dehors du cylindre ; c'est ainsi que certains réchauffeurs ont pu donner satisfaction. Mais l'emploi du pétrole dans un moteur à explosion reste toujours assez délicat, et le semi-Diesel est bien préférable.

On ne craint plus l'auto-allumage, puisque l'allumage ne peut commencer qu'au moment où l'on injecte le combustible pulvérisé, mais non vaporisé. Cependant, une certaine vaporisation s'opère dans l'appendice formé par la boule creuse maintenue au rouge ; et si cette boule est trop chaude, l'inflammation s'opère un peu tôt et trop brutalement, d'où la nécessité d'un refroidissement obtenu par une injection de vapeur d'eau ou d'air.

On peut cependant arriver, en fonctionnement normal, à équilibrer la température de la boule ; il faut s'arranger pour que la chaleur émise par cette boule soit égale à la chaleur emmagasinée. La chaleur émise dépend de la température elle-même et de la surface ; la chaleur emmagasinée dépend de la capacité calorifique de la boule et de la masse de combustible brûlé. Le choix des formes convenables pour la culasse, la boule, ainsi que la disposition du mécanisme d'injection et le réglage de la quantité de combustible injecté, permettent de faire fonctionner certains moteurs semi-Diesel sans injection d'eau, sauf aux allures très poussées.

Le moteur semi-Diesel est donc un engin commode et simple, qui permet de brûler des combustibles lourds. Son cycle se rapproche du cycle à explosion, c'est-à-dire d'une combustion sous volume sensiblement constant. Le rendement thermique, à compression égale, serait supérieur à celui du Diesel ; en réalité, comme on pousse beaucoup moins la compression préalable, le rendement reste un peu inférieur. Il ne semble pas avantageux

d'augmenter la compression, car on retomberait dans les complications que l'on veut précisément éviter pour certaines applications. Pour les puissances moyennes, les différences de consommation sont très acceptables, en regard de la simplification du service.

**Construction des moteurs semi-Diesel.** — La construction des moteurs semi-Diesel est évidemment plus simple que celle des Diesel ; mais elle ne souffre aucune médiocrité.

La tête de cylindre ou chambre de combustion en acier coulé doit être bien étudiée et très robuste. Le cylindre est en fonte avec enveloppe de circulation d'eau « venue de fonderie » en même temps ; le fond de cylindre, au contraire, est une pièce distincte.

Le piston est en fonte présentant des qualités spéciales.

L'axe du piston sur lequel s'articule la bielle doit être placé de façon à éviter toute déformation sous l'influence de la chaleur ; il doit être construit en très bon acier, cimenté, trempé et rectifié.

Les segments du piston, qui assurent l'étanchéité, doivent être nombreux ; l'un d'eux, placé à la partie inférieure, est destiné à retenir l'huile de graissage.

La bielle doit être en excellent acier forgé, et ses épaisseurs doivent être largement proportionnées aux fatigues assez grandes de cet organe.

L'arbre-manivelle doit être en acier Martin forgé ; il faut prendre garde à ce que ses portées sur les paliers du bâti soient assez larges, afin de diminuer le jeu qui se produit avec l'usure ; on ne peut empêcher ce jeu, mais on peut ainsi en retarder la production. L'arbre-manivelle doit être parfaitement équilibré, à l'aide de contrepoids convenables, dans le prolongement des manivelles.

Tous les coussinets sont généralement munis de métal blanc ; mais lorsque les efforts sont très importants, dans

les moteurs puissants, il vaut mieux adopter un alliage de cuivre, assez doux pour que l'usure se fasse sur le coussinet et non sur l'arbre, mais assez résistant pour en diminuer le taux.

La bougie comprend généralement plusieurs parties qui s'emboîtent les unes dans les autres et qui doivent être construites de façon que l'assemblage résiste parfaitement aux fortes pressions et aux températures élevées.

Le meilleur régulateur est celui qui utilise la force centrifuge. La masselotte mobile de cet organe doit agir en modifiant la course de la pompe d'alimentation à piston, par exemple en faisant varier son point mort bas. Ainsi, à chaque tour, la quantité de combustible est proportionnelle à l'effort demandé ; l'explosion se produit à chaque cycle, ce qui n'existe pas dans le réglage par « tout ou rien », que nous ne pourrions recommander. Il faut s'arranger pour que la masselotte de réglage n'ait aucun effort à supporter lorsqu'elle remplit son office ; c'est facile si le réglage s'opère au moment où la pompe à combustible est à l'aspiration.

La valve à air qui est placée, nous le savons, sur le carter (appelé quelquefois chambre de la manivelle) étant automatique, doit avoir une très large section de passage.

Le graissage est généralement assuré par une pompe qui alimente un organe distributeur d'où partent les tubes qui envoient l'huile aux différentes surfaces en contact. Il ne faut pas oublier de placer des filtres et un réfrigérant sur le circuit.

La circulation s'opère sous l'impulsion d'une pompe à piston plongeur qui aspire par l'intermédiaire d'une crépine filtrante.

Dès que la puissance du moteur atteint l'ordre d'une quinzaine de chevaux, il faut un *démarrateur à air comprimé*. Une pression de 15 kg est suffisante dans les bouteilles, dont la capacité doit permettre huit à dix démar-

rages successifs. Il existe alors sur le cylindre une valve dont l'ouverture assure le démarrage immédiat.

Quand il n'existe pas de démarreur automatique, il faut, en balançant le volant, augmenter peu à peu l'amplitude du mouvement du piston, de sorte qu'il est facile d'arriver, en gagnant un peu à chaque oscillation, à dépasser le point de compression nécessaire à l'allumage, ce que l'on ne pourrait faire tout de suite si l'on voulait imiter le lancement à la manivelle des moteurs d'automobiles.

**Garanties à exiger.** — Lorsqu'on rédige un cahier des charges en vue de l'achat d'un moteur, il faut toujours penser aux conditions pratiques de l'utilisation de la machine.

Par exemple, le *coefficient d'irrégularité* sera déterminé suivant la destination du moteur. S'il doit faire partie d'un groupe électrogène, on sera plus difficile que s'il doit actionner un compresseur d'air ou une hélice marine. On fera bien de faire préciser, non seulement le rendement du moteur seul, mais encore celui de l'ensemble dont il fait partie. On aura généralement avantage à s'adresser à un seul fournisseur qui prendra la responsabilité du groupe.

Ce qu'il faut préciser, en tout cas, ce sont les qualités du combustible qui servira ; c'est ce combustible-là qu'on doit se procurer pour les essais. Les huiles de graissage devront également faire l'objet de spécifications précises.

Si le moteur doit occuper un poste fixe, il est indispensable d'étudier les conditions de refroidissement, suivant la qualité et la quantité des eaux dont on dispose.

Nous pouvons comprendre maintenant l'installation d'un moteur semi-Diesel fixe. Ce que nous avons dit au sujet des moteurs Diesel est encore applicable, mais avec des sujétions bien diminuées.

L'installation des moteurs marins demande, au contraire, quelques dispositifs particuliers. Nous aurons surtout en vue les bateaux de pêche.

**Qualités spéciales aux moteurs pour barques et bateaux de pêche.** — Il est inutile de dire que les moteurs sont maintenant indispensables aux pêches maritimes.

Ce sont les pays scandinaves : le Danemark, la Suède, l'Allemagne du Nord, qui nous ont montré les meilleurs moyens de mettre le poisson à la disposition de tous. Des milliers de bateaux à propulseurs mécaniques ont été construits, tant pour la pêche côtière que pour la pêche hauturière ; le moteur sert aussi pour actionner les cabestans de levage du chalut. Les Anglais, les Hollandais, les Belges et les Américains nous ont également précédés dans cet équipement mécanique.

C'est peut-être parce que nous avons voulu aller trop vite que nous sommes en retard. Dès les premiers essais (à Boulogne-sur-Mer), on a cherché tout de suite à se passer de mécaniciens, et les moteurs, livrés aux pêcheurs, assez peu soigneux généralement, ont eu des pannes qui obligeaient les bateaux à moteur à des chômages qui en écartaient les pêcheurs les plus courageux.

Dans le bassin d'Arcachon seulement, on assistait à un magnifique essor des barques à moteur pour la pêche aux sardines. Fait singulier, c'est le moteur à essence, très coûteux au point de vue de la consommation, qui se multiplia à bord des « pinasses » d'Arcachon, cela malgré les efforts des constructeurs scandinaves qui essayaient de conquérir la place.

Un moteur de pêche doit être facile à installer, facile à conduire, d'un prix d'achat modéré, toutes qualités que possèdent les moteurs à essence mis au point par des constructeurs locaux, après apprentissage fait dans la réparation des premiers moteurs du type automobile et particu-

lièrement du cycle à deux temps, que les pêcheurs ont employé tout d'abord.

Un moteur d'automobile ne pouvait, en effet, devenir un bon moteur de pêche. Ce dernier doit être plus simple, plus robuste, peu encombrant et surtout d'une installation facile à bord. Les organes doivent être bien abrités pendant la traversée, tout en demeurant facilement accessibles pour la visite et le nettoyage. Le fonctionnement doit être particulièrement sûr. Le prix d'achat doit être abordable, en raison des ressources modestes des pêcheurs.

Il faut aussi regarder au prix d'exploitation. A ce point de vue, l'essence est inférieure au pétrole, lequel est inférieur aux huiles lourdes dont s'accommodent semi-Diesel et Diesel ; mais ce dernier est un peu compliqué pour les bateaux de pêche.

Si l'on pense à la vogue du moteur à essence à deux temps sur les barques de pêche, on estimera sans doute que c'est bien le semi-Diesel à deux temps qui remplit le mieux les conditions désirables actuellement. A puissance égale, la vitesse en est plus régulière que celle du quatre temps (nous supposons qu'il y a le même nombre de cylindres), le poids et l'encombrement sont réduits ; la course utile étant généralement égale à l'alésage, la course totale est ainsi égale à l'alésage augmenté de la hauteur des orifices d'échappement.

#### Historique des progrès des moteurs à bateaux de pêche.

— Le court historique que nous allons faire des progrès réalisés sur les barques et bateaux de pêche de la Baltique et de la mer du Nord ne sera pas inutile, car nous allons, au fur et à mesure, faire connaître quelques points intéressants, particulièrement les divers moyens employés pour la commande de l'hélice propulsive.

Un des premiers moteurs, l'*Alpha*, de 10 ch, pesait 1 650 kg, consommait 485 g de pétrole par cheval-heure,

tournait à 340 tours ; la course du piston était de 330 mm et l'alésage du cylindre de 223 mm. Cet organe était supporté par quatre colonnes en fer forgé.

On trouvait un réglage convenable de l'injection de pétrole, une pompe de circulation pour l'eau de refroidissement, une soupape de sûreté pour éviter les éclatements en cas de gelée, des manivelles équilibrées, le tout très pratique ; seule la consommation de pétrole était excessive.

Le lancement s'effectuait avec deux manivelles qui encadraient une roue à rochets, reliée par chaîne à une autre roue à rochets placée sur l'arbre-moteur, de sorte que le débrayage de ce mécanisme de mise en train était automatique dès que le moteur tournait sous l'effet de sa propre impulsion.

L'arbre-moteur entraînait, soit une hélice ordinaire par l'intermédiaire d'un embrayage, soit une *hélice à ailes réversibles*, c'est-à-dire une hélice dont les pales ne font pas corps avec le moyeu, mais peuvent, au contraire, prendre sur ce moyeu des inclinaisons réglables à l'aide de tringles commandées par un levier ; de sorte qu'on peut, en faisant varier l'incidence des surfaces qui attaquent l'eau, et même en renversant cette incidence, obtenir toute une gamme de vitesses, en avant et en arrière, et particulièrement le stationnement du bateau.

Bien qu'une hélice à ailes réversibles soit toujours un peu moins solide qu'une hélice à ailes fixes, on préfère souvent employer, pour les puissances modérées, ce dispositif plus commode que l'embrayage, et d'ailleurs moins bruyant.

Ensuite, les moteurs *Grei* à deux temps offrirent aux pêcheurs toute une série de puissances : des moteurs monocylindriques de 4 à 65 ch, des moteurs à 2 cylindres jusqu'à 130 ch, et même à 4 cylindres jusqu'à 360 ch. Les alésages varient de 110 à 430 mm, les rapports  $\frac{\text{course}}{\text{alésage}}$

de 1,2 à 1,16 ; les vitesses de rotation, de 550 t-m (moteur de 4 ch) à 210 t-m (moteur de 360 ch).

Dans ces derniers moteurs, la consommation est diminuée ; la bougie est en cône, de sorte que la pointe est rouge, tandis que la partie inférieure est seulement au rouge sombre ; la pointe sert d'accumulateur de chaleur, tandis que l'injection du combustible se fait dans la région moins chaude, ce qui évite une décomposition pyrogénée du pétrole, nuisible pour la consommation.

Ces moteurs n'ont pas de soupapes : le piston assure lui-même l'ouverture et l'obturation des canalisations d'admission d'air et d'échappement des gaz brûlés, comme dans le moteur que nous avons pris comme exemple. Avant d'être introduit dans le carter, l'air circule dans un tube autour du conduit d'évacuation des gaz, où il prend une température favorable à la combustion parfaite.

Nous trouvons dans ces moteurs la plupart des perfectionnements désirables, particulièrement d'excellentes dispositions de nature à faciliter l'inspection et l'entretien : coussinets en deux pièces ; couvercles amovibles de la chambre d'introduction (un sur chaque bord), qu'il suffit d'enlever, ainsi que le chapeau du cylindre, pour pouvoir retirer les « vørstangen » — châssis de toile métallique — et démonter le piston.

La course du piston de la pompe à combustible est réglable suivant le travail demandé. Le graisseur central est en liaison avec la chambre d'introduction, de sorte que l'huile est à une pression égale à la pression qui règne dans cette chambre.

L'embrayage et le désembrayage de l'arbre porte-hélice se font par l'intermédiaire d'un accouplement à friction peu encombrant, muni de cônes armés de « rillers ».

La mise en marche des gros moteurs se fait à l'air comprimé ; le chauffage préalable s'opère en quelques minutes, un peu plus pour les plus gros moteurs.

Mais, pour modérer l'échauffement au cours d'une marche prolongée, la circulation d'eau ne suffit pas : il faut injecter de l'eau dans le cylindre même ; pour les puissances au-dessus de 180 ch, il n'est même plus possible de se passer d'injection d'eau.

L'injection d'eau réduit de 15 % environ la consommation spécifique de combustible, mais seulement pour une puissance supérieure à la puissance normale sans injection d'eau (dans les moteurs qui pourraient fonctionner sans ce dispositif). Il en résulte que, même si cette injection n'est pas nécessaire, un pêcheur n'hésitera pas à augmenter la puissance (pour revenir plus vite au port, par exemple) aux dépens de la conservation du moteur, en soumettant continuellement les organes de celui-ci aux efforts maxima. Cet inconvénient s'aggrave de la nécessité d'emporter une provision d'eau douce assez importante.

Les moteurs *Alpha* ont été modifiés par les frères *Houmøller*. Dans la bougie de ces moteurs à quatre temps, on continue d'injecter du pétrole ; mais, en outre, on lance *directement* dans le cylindre de l'huile solaire, ce qui, au prix d'une assez petite complication, réduit la dépense d'exploitation.

En outre, ces moteurs démarrent à la benzine, par allumage électrique, ce qui permet d'appareiller quand on veut.

Les moteurs *Dan*, également à quatre temps, sont robustes mais bruyants. Signalons : l'adjonction d'une came auxiliaire qui lève à mi-course la soupape d'échappement pendant le lancement du moteur, afin de diminuer la compression à ce moment ;

les pompes oscillantes à double effet commandées par un excentrique et qui permettent de régler le débit d'huile ;

le refroidissement des soupapes et même du collecteur d'échappement : on injecte sous forme de jet annulaire de

l'eau froide dans le silencieux ; ce dispositif s'est montré satisfaisant ;

l'existence de deux volants qui équilibrent la charge sur le bateau et sont moins encombrants qu'un seul volant ; cela permet de placer plus bas le moteur et de diminuer d'autant la pente de l'arbre porte-hélice.

Quelques moteurs de ce type existent encore en France.

Le moteur *Avance* à deux temps est un bon moteur de faible puissance. Voici quelques précisions sur un moteur de 12 ch que nous avons eu l'occasion d'étudier.

Le cylindre de 195 mm d'alésage est robuste, ainsi que les autres organes. Le vilebrequin, de 60 mm de diamètre, repose sur des paliers longs de 120 mm, de sorte qu'en comptant sur une pression unitaire de 35 kg par cm<sup>2</sup> sur le piston, la pression moyenne approximative sur les paliers est de 118 kg par cm<sup>2</sup>. Le volant assure un coefficient d'irrégularité de 1/50.

L'alésage de la pompe d'injection est de 10 mm, sa course peut varier jusqu'à 5 mm ; son piston, en bronze sans garnitures, est rodé dans le cylindre ; il est commandé par un excentrique de 35 mm de course, calé à 130° en arrière de la manivelle ; la partie de cette course utilisée pour l'injection est de 5 mm au maximum ; elle commence à 6° et se termine à 50°, après le passage du piston au point mort bas.

L'épure de la distribution peut s'établir sur les chiffres suivants :

		Avance linéaire.
		—
Ouverture...	{ échappement.....	60 mm
	{ admission.....	28 —
Hauteur des lumières	{ échappement.....	50 —
	{ admission.....	28 —
Course totale	.....	220 —

L'injection d'eau est employée, car elle augmente la puissance ; l'eau passe par un robinet pointeau avec vi-

seur : il sort du gicleur un mélange d'eau et de combustible.

Les courbes des moments-moteurs et des puissances que nous avons relevées au frein de Prony en cherchant, pour chaque vitesse, le fonctionnement avec le maximum d'injection de combustible, nous ont montré que le couple décroît assez vite, en raison inverse de la vitesse, parce que la vaporisation et la combustion du mélange sont relativement lentes.

Nous ne citerons que les moteurs *Nor*, *Norröna*, *Rap*, *Viking*, *Hoffmans*, *Kaupen*, *Tuxham*, *Aktiv*, *Neptun*, *Thor*, *Hein*, *Gideon*, tous moteurs norvégiens, danois ou suédois, et le moteur *Wolverine*, américain, cela pour montrer le grand nombre de types existants dans les pays scandinaves. Nous ne donnerons d'explications que sur le *Bolinder*.

Les moteurs de ce type à deux temps ont 2 cylindres de 10 à 160 ch, 4 cylindres de 60 à 500 ch. La vitesse angulaire des premiers décroît avec la puissance, de 600 à 225 t-m ; celle des seconds décroît de même, de 450 à 225 t-m.

La caractéristique essentielle de ces moteurs, c'est qu'ils permettent le renversement direct de la marche, supprimant ainsi les boîtes à friction, les embrayages à trains d'engrenages, les hélices à ailes réversibles. Il suffit de réduire progressivement, mais assez vite, la vitesse à zéro et, à ce moment, d'introduire à contre-temps, au moyen d'une pompe spéciale, le pétrole lourd dans les cylindres. Cette manœuvre demande une ou deux minutes et une certaine adresse.

Nous avons eu l'occasion d'examiner en détail un de ces moteurs sur un bateau-pilote. C'était un engin de 1 650 kg, composé de 2 cylindres et qui occupait 2 m en longueur, 0,63 m en largeur et 1,015 m en hauteur. A la vitesse de 450 t-m, il développait 30 ch environ. Tous les

organes bien accessibles paraissaient fort robustes. La consommation variait de 225 à 300 g par cheval-heure effectif, suivant que l'on employait le pétrole lourd ou l'huile de houille. Son seul inconvénient était le bruit, vraiment gênant dans la chambre des machines exigüe.

#### **Moteurs semi-Diesel marins construits en France. —**

Dans ces dernières années, quelques constructeurs français se sont intéressés à cette question de la construction des moteurs semi-Diesel pour la navigation, soit qu'ils aient cherché à réaliser eux-mêmes des moteurs entièrement nouveaux, soit qu'ils aient acquis la licence d'une bonne marque étrangère.

La plupart de ces moteurs sont du type à deux temps analogues à ceux dont nous avons fait la description. Nous ne signalerons donc maintenant que les caractéristiques spéciales à leur emploi sur bateaux.

Les cylindres sont verticaux ; la compression préalable de l'air de balayage se fait dans le carter ; la puissance par cylindre varie de 7 à 60 ch environ et, suivant la puissance, la vitesse angulaire est de 600 à 500 t-m.

Afin d'assurer la robustesse nécessaire, on s'est résigné à construire des moteurs relativement lourds (50 à 80 kg par cheval), sans aucun organe délicat, c'est-à-dire sans soupapes, sans carburateur et sans autre bougie que l'appendice non refroidi de la chambre de combustion.

Les seuls organes accessoires sont généralement : le pulvérisateur à combustible, la pompe à combustible, le régulateur, la pompe de circulation.

Il en résulte qu'il suffit d'un seul homme pour conduire un engin de moyenne puissance.

Les consommations de pétrole lourd se tiennent entre 250 et 300 g.

Ces moteurs ont une souplesse suffisante, c'est-à-dire une aptitude convenable à se plier aux changements

d'allure. Cela résulte des dispositifs d'injection et de pulvérisation, et de la manière dont le régulateur peut agir.

On retrouve dans tous ces moteurs à peu près le même dispositif.

La pompe est commandée par une came montée sur un arbre intermédiaire ; cette came tourne par conséquent dans un plan normal à cet arbre. Cela ne suffirait pas pour obtenir les changements de course de la pompe à combustible, changements qui sont indispensables au réglage du débit. La came peut donc coulisser sur l'arbre, et, comme elle est conique, les points d'attaque de la tige de la pompe varient suivant les positions de cette came sur l'arbre, dans lequel on peut la faire coulisser automatiquement, sous l'action du manchon du régulateur centrifuge à ressort. En comprimant plus ou moins le ressort qui, dans le régulateur, retient les masses mobiles, on peut obtenir la sensibilité et le réglage que l'on désire.

Ce système paraît plus simple que le dispositif à commande par excentrique à course variable ; il est en tout cas très supérieur aux dispositifs à dé clic qui règlent par tout ou rien, c'est-à-dire qui empêchent le fonctionnement de la pompe à injection de combustible, dès que la vitesse du moteur s'accroît au-dessus d'une certaine valeur. Evidemment cette dernière manière est trop brutale pour maintenir la vitesse à un chiffre sensiblement constant, tandis qu'avec un régulateur à force centrifuge on peut très facilement n'avoir qu'une variation de 6 à 8 % entre la vitesse à pleine charge et la marche à vide.

Sur les moteurs marins, il faut, en outre, que l'on puisse faire varier la vitesse à la main, indépendamment de la commande automatique du régulateur ; on arrive ainsi à réduire la vitesse aux quatre dixièmes de sa valeur normale, sans s'exposer à voir stopper le moteur.

L'injection d'eau n'est employée que si l'on veut momentanément marcher en surcharge. Il sera bon de faire

préciser par le constructeur les conditions d'une marche en surcharge, afin de se tenir toujours dans des limites raisonnables. Le dispositif d'injection d'eau est simple : généralement un petit pulvérisateur est placé dans le conduit d'arrivée au cylindre de l'air de balayage ; il est alimenté par l'eau de circulation venant de l'enveloppe des cylindres ; un pointeau règle la quantité d'eau injectée ; celle-ci est, au maximum, égale à la masse du combustible brûlé en même temps.

Le meilleur combustible est l'huile solaire ou le *gas-oil*, c'est-à-dire les produits de la distillation du pétrole qui viennent, après les huiles photogènes dans les pétroles américains, après le kérosène dans les pétroles russes. Voici, pour préciser, de bonnes caractéristiques :

Densité à 15°	{ produits américains .....	0,8 à 0,83
	{ produits russes .....	0,86 à 0,88
Point d'inflammabilité	{ Luchoire .....	80°
	{ vase ouvert....	100°
Viscosité Engler à 20° .....		1,5 à 2
Pouvoir calorifique	{ inférieur .....	10 000 à 10 200 cal.
	{ supérieur .....	10 650 à 10 900 cal.

Ces chiffres ne sont qu'une première indication ; les densités, par exemple, varient beaucoup suivant la provenance des huiles, cela à qualité motrice égale.

Le mazout peut être employé, à la condition d'être réchauffé. Il faut en outre, dans ce cas, partir et marcher au *gas-oil* un quart d'heure après le départ et avant l'arrêt, afin de ne pas laisser dans les canalisations du mazout froid qui empêcherait une nouvelle mise en route. Ces conditions sont analogues à celles que nous avons indiquées pour l'usage de l'huile de goudron de houille dans les moteurs Diesel ; mais, dans le cas des semi-Diesel, il faut reconnaître que l'on ne peut employer que des huiles de goudron de très bonne qualité.

*Mise en marche.* — Nous venons de voir une première précaution à prendre dans le cas des combustibles lourds.

Dans tous les cas, s'il s'agit d'un moteur de 15 à 20 ch, il est à peu près impossible de démarrer à la main après chauffage préalable des boules d'allumage au rouge sombre. Le balancement du volant autour du point mort bas est une manœuvre qui ne réussit que pour les faibles puissances. On se sert donc d'air comprimé ; il suffit, pour un moteur à 2 cylindres, d'agir sur l'un d'eux, muni d'une soupape de lancement commandée à la main. On amène le piston un peu après le point mort haut ; on injecte le combustible, en agissant à la main sur la pompe, puis on soulève la soupape de lancement ; l'air à 10 kg donne alors une impulsion généralement suffisante. Il arrive que le moteur parte dans le mauvais sens. La souplesse du moteur est suffisante pour que l'on puisse ralentir la vitesse et, en donnant une impulsion à la course au bon moment, le faire repartir dans le sens convenable. Si cette manœuvre ne réussit pas, on arrête le moteur et on le lance de nouveau.

Une fois en marche, les moteurs rechargent d'eux-mêmes leurs réservoirs de mise en marche. Par exemple, si la soupape de lancement est appliquée sur son siège par un ressort (ce qui constitue une soupape de sûreté) de façon à réaliser une pression de 10 kg par  $\text{cm}^2$ , comme la pression d'explosion est supérieure à ce chiffre, une partie des gaz s'échappe par la soupape et vont au réservoir. Quand la pression dans celui-ci atteint 10 kg, la soupape reste sur son siège ; on la cale à ce moment à l'aide d'une vis.

Dans certains moteurs, cependant, on fait usage d'un petit compresseur placé en bout d'arbre.

**Installation à bord. Changement de marche.** — Un moteur semi-Diesel se place facilement sur un bateau de

pêche ; on l'installe vers l'arrière (fig. 31 et 32), de façon à diminuer la longueur de la ligne d'arbre et à augmen-

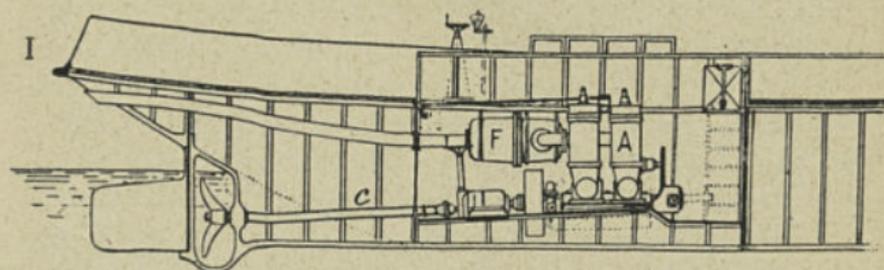
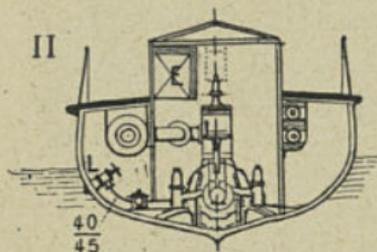


FIG. 31. — INSTALLATION D'UN MOTEUR SEMI-DIESEL SUR UN BATEAU (I, Coupe longitudinale, II, transversale).

A, cylindre. — E, réservoir d'huile. — F, pot d'échappement. — c, arbre d'hélice. — L, prise d'eau.



ter la stabilité. Sur le côté, on disposera le réservoir à combustible, le réservoir d'air de lancement et, s'il y a lieu, le réservoir d'eau d'injection.

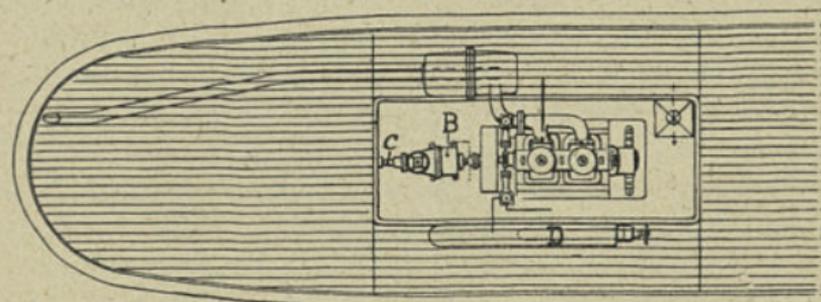


FIG. 32. — INSTALLATION D'UN MOTEUR SEMI-DIESEL SUR UN BATEAU (plan).

D, réservoir d'air de lancement. — B, embrayage. — c, arbre d'hélice.

La pompe de circulation d'eau de refroidissement prend l'eau à la mer par l'intermédiaire d'une crépine et l'envoie dans les divers organes à refroidir, sans oublier le tube

d'échappement, particulièrement si celui-ci se retourne horizontalement, jusqu'à la poupe, afin d'éviter des fumées gênantes. On disposera une pompe de cale et une large cuvette pour la récolte des égouttures, surtout s'il s'agit d'un navire en bois. Le moteur sera dans un compartiment étanche ou bien protégé ; des extincteurs d'incendie seront disposés dans cette chambre, qui comprendra tout ce qui est nécessaire à la marche du moteur, y compris le dispositif d'embrayage.

Dans les moteurs de puissance moyenne, on pourra employer un changement de marche par *pignons satellites* ; ce dispositif est un peu lourd, mais très sûr.

Dans les barques de pêche, il est plus commode d'avoir une hélice réversible. L'hélice à deux ailes qui peut s'effacer dans le plan médian ne gêne pas la manœuvre du filet.

Dans les moteurs puissants, par exemple dans les moteurs à 4 cylindres, on emploie plus souvent un *dispositif direct*. Ces moteurs sont pourvus d'un système de distribution d'air aux cylindres, afin d'assurer le départ dans une position quelconque. La manœuvre comprend alors : arrêt, lancement à l'air dans le nouveau sens de rotation, mise en marche au pétrole.

Mais quel que soit le dispositif, — hélice réversible, changement de marche par engrenages ou changement de marche direct, — un seul homme y suffit : il agit sur le volant du régulateur pour modérer l'allure et sur le volant du changement de marche pour inverser le sens de rotation. Dans les bateaux de pêche, ces volants peuvent être montés sur le pont et manœuvrés par le pilote.

Nous allons examiner maintenant un moteur semi-Diesel pour automobiles qui pourrait, sans modification profonde, être adapté à un bateau de pêche ou à une vedette marine.

**Moteur semi-Diesel pour automobiles.** — Le moteur que nous allons examiner est un moteur à deux cylindres verticaux fonctionnant sur le cycle à deux temps et présentant, par conséquent, l'apparence et les dispositions générales que nous connaissons déjà. Il est remarquable par certaines dispositions concernant le réglage de l'injection, la pulvérisation et la vaporisation du combustible et le départ à froid. Ce moteur a été imaginé et mis au point par M. Tartrais avec le concours de la Maison Peugeot.

*Réglage de l'injection.* — Nous avons déjà vu plusieurs dispositifs qui permettaient de faire varier la course et par conséquent le débit de la pompe ; mais il ne s'agissait, jusqu'à présent, que de moteurs ayant une assez faible vitesse angulaire. Le problème est beaucoup plus difficile dès qu'on veut augmenter les vitesses, comme cela est indispensable pour un moteur d'automobile.

On retrouve, dans ce moteur, une pompe d'injection poussée de bas en haut à l'aide d'une came placée sur un arbre intermédiaire mû par le moteur.

Ce piston refoule le combustible dans la soupape automatique du pulvérisateur, d'où il se rend dans le cylindre.

Le piston est rappelé vers le bas par un ressort énergique, jusqu'à un butoir formé par un écrou mobile. Il suffit donc de faire varier la position de cet écrou-butoir pour régler exactement la course et le débit de la pompe, soit à la main, soit à l'aide d'un régulateur.

Mais le fonctionnement correct de la pompe ne peut être assuré s'il reste des bulles de gaz dans les canalisations d'injection.

Il faut donc que les joints soient parfaitement étanches, ce qui ne suffit pas, car toute vaporisation intérieure donnerait aussi des bulles ; il en serait ainsi tout particu-

lièrement si cette vaporisation se trouvait favorisée par un vide ou une raréfaction dans la canalisation.

Pour donner un exemple des difficultés, nous dirons que la soupape d'aspiration de la pompe à combustible (comme toutes les soupapes d'aspiration en général) s'ouvrait en dedans. Au moment où cette soupape retombait sur son siège, l'inventeur a remarqué qu'un phénomène de *cavitation* provoquait la production d'un vide et d'une bulle de vapeur dont la condensation était loin d'être immédiate ; de sorte que la colonne liquide, interrompue par un élément gazeux, avait une certaine élasticité qui retardait le moment où le combustible était introduit dans le pulvérisateur ; le réglage manquait de précision. En commandant cette soupape à l'aide d'une came spéciale, on peut l'ouvrir en dehors et empêcher le phénomène gênant.

D'autre part, le réglage était gêné par la dilatation des conduits et même par la compressibilité du liquide, sous les pressions assez fortes que l'on doit employer dans toute injection mécanique dite *solide*. On a dû éliminer ces inconvénients en interposant, à l'entrée du pulvérisateur, un clapet de retenue qui conserve une pression immuable dans la tuyauterie.

Malgré cela, lorsque la pression baisse dans le cylindre, le combustible contenu dans la tuyauterie allant de la pompe au pulvérisateur se détend et coule goutte à goutte dans le cylindre, ce qui cause, non seulement une perte de combustible, mais encore une injection imparfaite, en mouillant la soupape du pulvérisateur.

Afin d'éliminer ces derniers inconvénients, on ajoute une petite rainure sur la soupape de refoulement de la pompe ; cette rainure permet au liquide comprimé lors du coup de piston de revenir lentement à l'arrière dans la pompe, ce qui vaut mieux qu'un écoulement dans le cylindre. On voit que même l'étanchéité absolue n'est pas toujours désirable.

*Pulvérisation et vaporisation du combustible.* — Mais il ne suffit pas d'introduire, à chaque pulsation, une masse déterminée de combustible ; il est indispensable que le liquide soit parfaitement vaporisé pour qu'il puisse brûler rapidement. Dans le moteur Diesel, nous savons que l'on satisfait à cette condition à l'aide de l'air d'insufflation sous haute pression. Nous avons vu que dans les moteurs Diesel à injection mécanique ou solide le problème de la pulvérisation est difficile — et il ne s'agit pourtant que de moteurs à vitesse angulaire modérée. Dans un moteur d'automobile, on doit s'arranger pour que la combustion soit achevée avant que le piston moteur ait trop bougé, afin de se rapprocher de la combustion à volume constant, plus avantageuse pour le rendement thermique.

Le mieux est donc de pulvériser, vaporiser et brasser le mélange dans la culasse même du cylindre, mais seulement après la compression préalable de l'air, afin de bénéficier d'un taux de compression élevé, que l'on ne saurait obtenir avec un mélange susceptible d'auto-allumage ou de détonation (1).

La pulvérisation se fait dans une chambre qui est ménagée dans la culasse, selon le dispositif le plus souvent employé ; mais cette chambre communique avec la capacité du cylindre par un passage parfaitement cylindrique, dans lequel peut s'engager un prolongement de même forme du piston, prolongement appelé *défecteur*. C'est donc un peu avant d'atteindre le point mort haut que le piston, ou plutôt son prolongement, s'engage dans le passage ménagé entre le cylindre et la chambre de la culasse. Dans cette chambre, à ce moment, le combustible injecté par la pompe jaillit de la soupape du vaporisateur sous forme d'une nappe horizontale, aussi mince que pos-

---

(1) Il n'y a ni auto-allumage, ni détonation, parce que le mélange d'air et de combustible se fait d'abord exclusivement dans la culasse et non en présence d'un excès d'air.

sible, et dont les filets sont animés d'une grande vitesse. Le plan de cette nappe est sensiblement perpendiculaire à la direction de l'anneau d'air comprimé que le déflecteur refoule dans la culasse : l'air refoulé entre la face du piston et le fond du cylindre ne pouvant en effet passer que dans l'espace annulaire laissé libre par le déflecteur, prend en effet à peu près la forme d'un anneau, lequel remonte la nappe hyperboloïde presque horizontale qui jaillit du vaporisateur. Les filets de cette nappe, saisis par le violent courant d'air chaud, sont projetés contre la paroi supérieure de la chambre de combustion, et l'on a même percé des trous dans le déflecteur, afin que la petite quantité de combustible qui pourrait tomber de la tête du pulvérisateur n'échappe pas à la vaporisation.

On sait que la culasse, non refroidie, est à la température du rouge sombre ; à son contact, les particules très fines de liquide se vaporisent donc presque instantanément, et c'est sous la forme de vapeurs qu'elles entrent dans le tourbillon qui règne dans la culasse ; ainsi, au moment où le piston atteint son point mort haut, le mélange d'air comprimé avec la vapeur combustible est parfaitement homogène, d'où l'inflammation spontanée, rapide et complète qui provoque la descente du piston.

*Départ à froid.* — Au démarrage, la culasse étant froide, les phénomènes que nous venons d'analyser ne peuvent se produire. On emploie donc un allumage électrique à l'*incandescence* : une batterie (piles ou accumulateurs) de quatre volts suffit à porter à l'incandescence un fil de platine soutenu par une bougie isolante. Autour de ce fil, se propage l'inflammation dès que le circuit d'allumage est fermé, ce qu'il est facile d'assurer en temps opportun. La combustion que l'on réalise de cette manière est certes moins complète et moins rapide qu'en régime normal, mais la culasse atteint au bout de peu de temps

la température nécessaire à l'allumage automatique : on coupe alors le courant électrique devenu inutile.

La bougie n'en continue pas moins à subir les hautes pressions et les hautes températures qui règnent dans la culasse, mais on est arrivé à trouver une stéatite de qualité supérieure dite *isolantite*, qui résiste parfaitement.

Le rendement du moteur est très satisfaisant, et cela confirme les vues théoriques que nous possédons sur l'heureuse influence des fortes compressions, des grandes vitesses, de la bonne pulvérisation et du refroidissement modéré du cylindre.

Le taux de compression est 9, ce qui assure, en fin de compression, une pression effective de 21 atm et un rendement thermique théorique de 0,6 qui doit rester à peu près indépendant de la charge, puisque la masse vaporisée est toujours proportionnelle au travail à développer. Pratiquement, on consomme 180 g de pétrole par cheval-heure en pleine charge et 220 g en quart de charge.

Ce moteur peut s'accommoder d'huile de goudron de houille, de mazout, ou même d'huiles végétales (d'arachide, d'olives, de ricin) et animales (huile de poisson).

Il a l'inconvénient de chauffer un peu trop.

## CHAPITRE X

### QUESTIONS GÉNÉRALES

---

#### *COMBUSTIBLES ET COMBUSTION LUBRIFIANTS ET RÉFRIGÉRANTS COMPARAISONS. PROGRÈS POSSIBLES*

**Intérêt de ce chapitre.** — Dans les chapitres précédents, nous avons examiné successivement les principaux types de moteurs à combustion interne en usage. Nous savons comment sont constitués ces moteurs et quelles sont les fonctions de leurs divers organes. Nous avons des idées sur les applications des moteurs Diesel et semi-Diesel. Il nous reste à exposer quelques notions utiles, pratiques et théoriques, sur les combustibles et la combustion, sur les lubrifiants et la réfrigération. Ces notions achèveront de fixer nos idées et nous permettront de comparer entre elles les diverses solutions adoptées jusqu'à présent, pour en tirer des enseignements sur les progrès possibles.

#### *COMBUSTIBLES*

**Combustibles employés.** — Les moteurs Diesel s'accommodent de la plupart des combustibles liquides, des pétroles lampants aux huiles lourdes, c'est-à-dire : produits provenant du traitement des pétroles bruts (huiles lampantes, huiles solaires, huiles dites « distillées », huiles

à gaz (gas-oil), huiles lourdes combustibles (fuel-oil) ; huiles de schistes ; huiles de goudron de houille et de lignite ; huiles végétales (huile de palme et d'arachides).

Lorsqu'on veut employer certains combustibles difficilement inflammables, comme l'huile de goudron, ou visqueux, comme certains résidus de pétrole, la mise en marche se fait avec une huile plus légère qui, à cause de son rôle, est appelée huile d'allumage ou de démarrage. Nous savons déjà qu'il convient en outre de revenir à cette huile un peu avant l'arrêt, afin d'éviter l'obstruction des canalisations, qui empêcherait un nouveau démarrage.

Nous avons déjà fait connaître les consommations. Rappelons que, d'une manière générale, les indications relatives aux consommations se rapportent à un combustible à 10 000 calories. On peut avoir une première idée des consommations de divers combustibles en multipliant le chiffre de la consommation d'un combustible à 10 000 calories par le rapport des pouvoirs calorifiques.

**Spécifications officielles.** — Nous allons tout de suite apporter quelques précisions en rappelant quelques-unes des conditions de recette édictées par les autorités maritimes de diverses nations.

En France, la *Marine nationale* distingue entre les résidus de naphte et les huiles à gaz.

La densité des résidus doit être comprise entre 0,89 et 0,96 ; cette clause est heureusement complétée par l'obligation de faire connaître la provenance (on sait que la densité n'est qu'une première indication de la qualité). Les résidus homogènes, non acides, ne doivent rien laisser sur une toile (n° 70 du commerce), ne pas contenir plus de 1 % d'eau, ni plus de 0,75 % de soufre, et rester liquides jusqu'à - 5° C. La fluidité mesurée à l'ixomètre Barbey devra donner au moins 7 divisions pour un écoulement à + 15° C. pendant dix minutes. Le point d'inflammabilité

doit être au moins 79<sup>o</sup>/<sub>4</sub> (C. H. 28 octobre 1918). Aux essais, cette température est maintenue pendant deux heures, afin de s'assurer que l'action prolongée de la chaleur ne donne lieu à aucun dégagement de matières inflammables.

Le gas-oil ordinaire et le gas-oil épuré devront provenir du même fractionnement de la distillation. Les mêmes clauses relatives aux impuretés, à la teneur en soufre, à l'acidité doivent être observées. La densité doit être entre 0,86 et 0,895. Le point d'inflammabilité est abaissé à 60° C. La fluidité à 35° C., mesurée à l'aide du même ixomètre Barbey, ne devra pas être inférieure à 300 divisions. A la température de 350°, les gas-oil doivent distiller dans la proportion de 90 % ; la distillation, jusqu'au résidu sec, ou coke, ne doit pas laisser plus de 5 décigrammes par décilitre. La combustion de 50 cm<sup>3</sup> dans une capsule de platine ne doit pas laisser de dépôt appréciable.

Le pouvoir calorifique des résidus de naphte, comme celui des gas-oil, doit être de 10 500 calories (mesure à l'obus Malher).

Aucune acidité minérale n'est tolérée, mais seulement une légère acidité organique.

Les spécifications des autres pays sont légèrement différentes.

*L'amirauté britannique* exige pour les huiles de pétrole une densité comprise entre 0,82 et 0,94, un point d'inflammabilité Luchaire inférieur à 65°, avec la condition supplémentaire de n'avoir aucune vapeur inflammable au-dessous de 95° C. Les teneurs maxima en impuretés sont : 3 % d'asphalte, 0,75 % de soufre, 0,5 % d'eau, 3 % de coke. L'huile doit être exempte de goudron, d'hydrocarbures solides et d'acide.

Aux *Etats-Unis*, le point d'inflammabilité des fuel-oil

et gas-oil ne doit pas être inférieur à 150° F. (avec les appareils Abel ou Pensky-Martens, coupe close) ou à 175° F. (79°45 C.) avec l'appareil Tagliabuc, coupe ouverte. On limite la viscosité à 40° Engler (18° Barbey) pour une température de 70° F. (21°11 C.). Pour les résidus qui ont une viscosité supérieure à 8° Engler (82° Barbey) à 150° F., le point d'inflammabilité en coupe close ne doit pas être inférieur à la température à laquelle le résidu atteint cette viscosité.

En Roumanie, on retrouve cette même limitation de la viscosité, mais on est encore plus sévère (il s'agit de l'huile lourde à gaz ou *motorine*) : au plus 2°5 Engler à + 20° C. La densité doit être de 0,86 à 0,895, le point d'inflammabilité doit être supérieur à + 60° C. (appareil Martens-Pensky). La recherche de l'acidité minérale doit se faire au méthylorange.

Pour les gas-oil, la *Marine allemande* complète l'indication de densité (entre 0,83 et 0,9) par l'obligation de pouvoir réaliser la distillation entre 200° et 400° C. On exige une teneur en hydrogène supérieure à 12 % ; on tolère 0,3 % d'acides minéraux. Le point de congélation doit être au-dessous de - 12° pour les sous-marins. L'inflammabilité doit être supérieure à 65°. Les tolérances sont portées à 2 % de créosote, 1 % de soufre, 1 % de coke, 0,6 % d'éléments incombustibles.

Les différences que l'on peut noter sont dues pour une part aux différentes qualités des huiles que les diverses nations peuvent se procurer plus ou moins facilement. Remarquons l'importance que l'on attache, avec raison, à la viscosité, au point d'inflammabilité et à l'absence d'impuretés.

On trouverait des différences du même ordre dans les diverses spécifications concernant l'huile lourde de goudron. Nous nous bornerons à donner la spécification des constructeurs français.

- Pouvoir calorifique minimum : 9 000 calories.  
 Densité à 20° C. : au plus 1,04.  
 Point d'inflammabilité (creuset ouvert) : 87° C.  
 Fluidité à 10° C.  
 Eau : moins de 1 %.  
 Soufre : moins de 0,5 %.  
 Cendres : moins de 0,02 %.  
 Coke : moins de 1,4 %.  
 Matières-insolubles dans la benzine (essai sur de l'huile sèche) : 0,04 %.  
 Distillation : 85 % au moins doivent passer avant 300° C.  
 Congélation : pas de cristaux à 15° C.  
 Viscosité Engler à 20° C. : 2° au plus.

La spécification allemande précise les conditions de distillation que nous rappellerons.

La distillation doit commencer à 120° C. ; les fractionnements doivent donner les volumes cumulés suivants :

à 125° C.....	6 cm <sup>3</sup>
140° C.....	17 —
150° C.....	23 —
160° C.....	34 —
180° C.....	48 —
200° C.....	57 —
220° C.....	65 —
240° C.....	72 —
280° C.....	82 —
320° C.....	88 —
360° C.....	95 —
Pertes et résidus .....	5 —

La distillation fractionnée est l'un des meilleurs moyens de vérification assez rapide de la qualité d'une huile.

Nous ne décrirons pas les procédés d'essais et d'analyse en usage dans les laboratoires ; mais nous tenons à formuler quelques observations pratiques, qui permettent de reconnaître assez vite les qualités d'une huile.

**Observations générales sur l'aspect et la densité.** — La couleur, l'odeur, la limpidité permettent aux personnes assez averties d'avoir une première idée sur la valeur

d'une huile. Il est assez facile de faire des comparaisons utiles si l'on dispose d'une petite collection de produits convenables : huile lourde de houille, huile de goudron de houille, huile lourde de schiste, huile lourde de pétrole, résidus de pétrole, etc.

Une bonne huile est claire, limpide et d'odeur douce.

Une huile noire est chargée d'asphalte et d'hydrocarbures oxydés ; une huile trouble contient de l'eau ou des matières insolubles ; une odeur forte provient de produits de décomposition, à réaction acide le plus souvent.

La densité permet de vérifier l'homogénéité d'une fourniture importante. Cette indication, conjuguée avec celle de l'inflammabilité, permet déjà de se faire une idée de la valeur du produit.

Une huile de 0,87 à 0,88, inflammable seulement au-dessus de 100°, aura certainement un meilleur pouvoir calorifique qu'une huile plus dense à point d'inflammabilité plus bas. On aura tout intérêt à acheter les huiles au volume, car c'est la teneur en calories disponibles qui seule intéresse l'acheteur ; il faut penser qu'une huile lourde de houille dont le pouvoir calorifique est voisin de 9 000 aura, à volume égal, plus de calories disponibles qu'une huile de pétrole à 10 500 ou 11 000 calories.

Il est donc très intéressant de déterminer la densité avec assez d'exactitude. Que l'on se serve de pesées ou de densimètres, il faudra corriger d'après la température observée en même temps. Pour obtenir la densité à + 15° C., on ajoutera ou l'on retranchera autant de fois 0,000 65 qu'il y aura de degrés en plus ou en moins de + 15° C.

**Distillation fractionnée.** — Dans les laboratoires spécialisés, cette opération se fait à l'aide de ballons de verre ; mais on peut, sans danger et avec une approxima-

tion suffisante, employer un matériel en cuivre rouge qui comprendra :

- un ballon,
- un col tubulé,
- un réfrigérant,

avec les accessoires suivants :

- un trépied avec brûleur à gaz,
- les éprouvettes, densimètres et thermomètres en quantité suffisante.

On peut construire un ballon sphérique de 100 mm de diamètre environ et de 2 à 3 mm d'épaisseur, obtenu par emboutissage ; on pourra, dans certain cas, avoir un récipient cylindrique avec fond amovible permettant l'examen facile des résidus solides ou visqueux.

Le col tubulé sera légèrement évasé en haut, afin de recevoir le bouchon de liège qui portera le thermomètre : ce tube peut avoir 200 mm de longueur ; il portera en son milieu une tubulure de 250 mm de longueur environ, brasée sur le col ; le diamètre intérieur du col étant de 20 à 25 mm, celui de la tubulure sera de 7,5 à 10 mm.

L'assemblage du ballon ou cornue avec le col pourra se faire à l'aide de deux collerettes faisant corps avec chaque pièce et qu'on assemblera solidement en interposant un mince anneau de carton d'amiante imbibé d'huile de lin.

A la suite de la tubulure du col, on placera le tube réfrigérant de 70 mm de diamètre et de 300 mm de longueur, légèrement incliné vers l'éprouvette. Il n'est pas nécessaire de l'entourer d'une circulation d'eau ; les points de condensation des vapeurs sont assez élevés, en effet, pour qu'on puisse obtenir, sans eau, une réfrigération convenable, pourvu qu'on distille l'huile à une vitesse modérée.

La source de chauffage la plus commode est un bec de Bunsen ; mais on peut, à la rigueur, utiliser une lampe à souder, en la réglant et en la plaçant à une distance convenable du fond du ballon.

On choisira un jeu de densimètres et d'éprouvettes graduées de dimensions appropriées au volume du ballon, mais en ayant soin d'avoir des éprouvettes dont le diamètre soit supérieur de 5 à 6 mm au diamètre extérieur des flotteurs, et dont la hauteur sera suffisante (par exemple 170 mm de hauteur et 22 mm de diamètre pour un essai de 400 cm<sup>3</sup>).

Dans le ballon, préalablement taré, on verse 400 cm d'huile dont on aura pris la température et la densité. On fixe le thermomètre dans l'axe du col, de façon que le réservoir soit en regard de la tubulure. On peut se servir d'un bouchon de liège, car le haut du col n'est pas assez chaud pour altérer le liège et produire des fuites. On pourra, de même, utiliser le liège pour joindre la tubulure au tube réfrigérant. Le ballon étant sur son trépied, on soutiendra le réfrigérant par un empilage de briques, afin que le col du ballon soit vertical.

Ayant allumé la lampe, il s'agit de régler la rapidité de l'opération. Bien que le ballon de cuivre soit opaque, on peut cependant savoir, à peu près, ce qui s'y passe, en l'essuyant avec un chiffon imbibé d'huile lourde. On suit l'élévation progressive de la température en observant l'évaporation de cette légère couche d'huile extérieure ; on voit la zone séchée cheminer vers le col et la tubulure, comme à l'intérieur progressent les vapeurs vers le thermomètre et la tubulure de dégagement. Au moment où elles y atteignent, ces vapeurs s'écoulent vers le réfrigérant dans lequel leur condensation produit des gouttelettes que vient recueillir l'éprouvette placée à la sortie.

Le thermomètre, qui était resté stationnaire, s'échauffe alors très vite et la colonne mercurielle s'élève jusqu'au point qui indique la température exacte des vapeurs qui passent à ce moment dans le réfrigérant. Il faut alors régler l'intensité de la lampe, car il peut arriver que l'on

assiste à un débordement du liquide, si le chauffage a été trop brutal. On doit alors recommencer l'essai avec plus de précautions.

On détermine généralement les volumes recueillis entre les températures suivantes : 0, 150°, 200°, 250°, 300°, 350° dans une série d'éprouvettes graduées. Avec une vitesse de distillation de 10 cm<sup>3</sup> par minute, vitesse qui paraît convenable, il est impossible de refroidir rapidement les huiles condensées ; il en résulte que, si l'on peut ramener par un calcul les volumes à ce qu'ils seraient pour une température de + 15° C, les températures des diverses fractions vont en croissant : les volumes, ramenés à 15°, successivement recueillis dans les éprouvettes de capacité donnée, vont donc en diminuant.

On évite cette complication en opérant, non plus sur 400 cm<sup>3</sup> d'huile, mais sur 350 g, c'est-à-dire sur le même volume approximativement, pour obtenir 10 ou 20 fractions de même poids.

Au lieu de prendre des éprouvettes graduées, il suffit alors de recevoir les produits distillés dans des éprouvettes convenablement proportionnées aux densimètres, préalablement tarées et placées sur le plateau d'une balance, dont l'autre plateau aura reçu, en plus de la tare, un poids de 35 g ou de 17,5 g, suivant que l'on veut faire le fractionnement en dixièmes ou en vingtièmes. On devra évidemment prendre garde au mouvement de la balance et substituer rapidement une éprouvette à l'autre, au moment où le fléau sera horizontal ; l'opération se complique du fait de la rectification de la tare qui se trouve sur l'autre plateau ; mais de cette manière, avec des éprouvettes quelconques, on aura un fractionnement exact en poids.

Les fractionnements étant obtenus, on détermine les densités qu'on ramène à + 15° par une correction très simple déjà indiquée.

On consignera ensuite les résultats sur un tableau qui peut être réglé comme suit :

Le... (date), fractionnement au  $\frac{1}{n}$  (en volume) d'une huile lourde de... (densité à + 15° C) provenant de...

NUMÉROS du FRACTIONNEMENT	TEMPÉRATURES LUES DANS LA DISTILLATION de chaque fractionnement		DENSITÉ de la FRACTION à + 15° C.
	Au début	A la fin	
1 .....	155	175	0,840
2 .....	175	180	0,842
3 .....	180	184	0,846
.....	...	...	.....
.....	...	...	.....
$n-1$ .....	340	375	0,920
$n$ .....	résidu		0,950

Le tableau qui précède va permettre de tracer des courbes qui caractériseront les propriétés de l'huile essayée et qui faciliteront ensuite le contrôle des livraisons ; si les premières huiles essayées ont donné de bons résultats dans les moteurs, on cherchera à retrouver des huiles de même origine, que l'on pourra reconnaître d'un coup d'œil, dès que l'on aura tracé les courbes en question, d'après les résultats d'une nouvelle distillation fractionnée.

En dehors de cette facilité pour les comparaisons, les courbes peuvent donner des renseignements sur les mélanges constituant l'huile lourde et même sur la nature chimique des composés.

**Courbes de température.** — Si l'on porte les résultats consignés au tableau des essais sur un quadrillage où l'on

aura noté, en abscisses, les températures moyennes de distillation, et en ordonnées les volumes ou les poids distillés, on obtiendra des courbes telles que A, B, C (fig. 33).

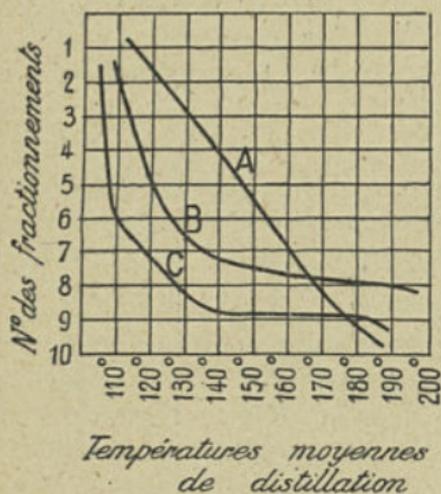


FIG. 33. — COURBES DE TEMPÉRATURE.

en face de chaque numéro de fraction distillée, un point correspondant, non plus aux températures, mais aux densités moyennes, on obtient des courbes qui donnent des renseignements un peu plus précis, A, B (fig. 34).

A indique un mélange d'hydrocarbures dont les densités croissent régulièrement.

B montre l'existence de deux hydrocarbures principaux : l'un, de faible densité, peut provenir du pétrole ; l'autre, plus lourd, pourrait provenir de la houille.

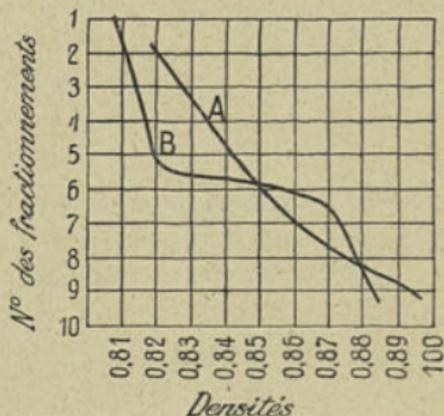


FIG. 34. — COURBES DE DENSITÉS.

**Courbes spécifiques.** — On pourra enfin avoir des indications sur la nature chimique des composants de l'huile lourde, sans analyse élémentaire, en portant en abscisses les densités de dix en dix ou de cinq en cinq millièmes, et en ordonnées les températures moyennes de distillation des fractions. Nous aurons ainsi un point pour chaque fraction. La courbe qui reliera les  $n$  points d'une même distillation caractérisera l'huile distillée (fig. 35).

C'est ainsi que la courbe de droite est fournie par la distillation d'une huile lourde de houille; la courbe de gauche provient d'une huile de pétrole paraffineux (la meilleure pour les Diesel); la courbe intermédiaire, en traits interrompus, représente une huile plus riche en carbures aromatiques, c'est-à-dire en carbone, moins favorable aux moteurs Diesel.

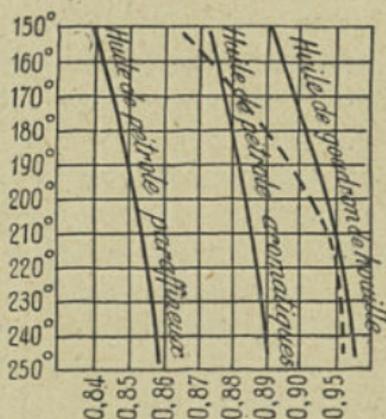


FIG. 35 — COURBES SPÉCIFIQUES.

Si l'on peut se procurer les graphiques caractérisant des huiles de nature bien déterminée, on peut ainsi, par comparaison, savoir immédiatement à quelle huile ou à quel mélange on a affaire et régler ainsi le moteur d'après la courbe spécifique ou caractéristique.

Les dernières courbes que nous venons de tracer permettent, sans passer par la bombe calorimétrique, d'avoir une indication sur le pouvoir calorifique, qui est d'autant plus élevé que la densité des huiles distillant entre deux températures sera faible, c'est-à-dire que l'huile contiendra plus d'hydrogène et moins de carbone.

*Nota.* — Les huiles lourdes peuvent bénéficier d'une exonération des droits de douane si la quantité de liquide distillé au-dessous de 275° est inférieure à 10 % (l'essai est effectué avec thermomètre maintenu dans le liquide pendant toute l'opération). On peut se servir, à défaut de l'appareil de Bordas, de l'appareil précédemment décrit, en faisant simplement plonger le thermomètre presque jusqu'au fond.

**Teneur en asphalte, coke et cendres.** — L'essai de douane n'a qu'un intérêt économique ; il ne peut donner aucun renseignement sur la qualité de l'huile combustible.

Au contraire, il importe de connaître la teneur en asphalte et en coke, dont les dépôts peuvent nuire gravement au fonctionnement du moteur. Ces matières présentent un double inconvénient : elles obstruent les canalisations ou elles contribuent à l'usure des surfaces de frottement des cylindres.

L'obstruction due à la présence des deux impuretés, brai et coke, pourra se produire même après filtration parfaite sur des mailles de beaucoup inférieures à la section des canalisations d'injection. En effet, le brai, solide à basse température, chemine en suspension dans les huiles et, sous l'influence de la chaleur croissante, prend une consistance pâteuse et agglomère les petites particules qui s'accumulent dans les coudes ; ces amas peuvent se détacher brusquement et obstruer les appareils d'injection ou de pulvérisation ; l'arrêt du moteur peut être immédiat.

En tout cas, le coke et même le brai peuvent rester imbrûlés, surtout dans la dernière phase de l'injection du combustible, et former ainsi, avec les huiles lubrifiantes, une véritable pâte à polir dont il vaut évidemment mieux se passer.

Rien n'est plus facile que de déterminer le coke résiduel. On chauffe le ballon avec précaution, mais assez pour atteindre 400 ou 500°, afin de chasser du brai, résidu de notre distillation fractionnée, la totalité des matières volatiles. Une pesée permettra de déterminer le poids du coke restant. C'est alors qu'il est utile d'avoir un ballon de cuivre en deux pièces, afin de pouvoir atteindre le coke et procéder au nettoyage. Un coke homogène indique que l'huile a déjà subi un traitement par distillation.

Quant à la teneur en brai, elle dépend de la manière dont l'opération a été conduite, et si elle peut fournir quelques renseignements sur la provenance de l'huile, cette indication n'est pas d'une très grande importance technique. Pour obtenir la teneur en brai, il suffit d'arrêter la distillation après le passage des dernières gouttes de produits condensés accompagnées de gaz jaunâtres et odorants. Si, pour examiner le brai, on veut renverser le ballon au-dessus d'une capsule, il convient d'attendre que le brai soit assez refroidi pour ne pas s'enflammer spontanément.

Il est très utile, au contraire, de déterminer la teneur en cendres par calcination complète du coke. Si l'huile a été distillée, elle ne contient que des cendres provenant de l'attaque des parois métalliques par les acides organiques ; sinon, elle peut contenir des matières minérales, le plus souvent du sable, très nuisibles aux moteurs.

**Teneur en eau et en paraffine. Acidité.** — La présence de l'eau ne diminue pas seulement le pouvoir calorifique, elle peut occasionner de brusques variations dans le régime du moteur ; d'autre part, les émulsions d'huile dans l'eau, à des températures supérieures à 100° et sous pression, forment des masses plastiques extrêmement dangereuses pour les canalisations.

On peut déterminer la teneur en eau par décantation,

en aidant le phénomène par une faible élévation de température et par une addition d'huile légère, qui diminuent la fluidité. On peut aussi utiliser les appareils centrifugeurs, mais il suffit, en prenant quelques précautions au cours de la distillation fractionnée, de recueillir et d'examiner les produits qui passent entre 100 et 110°. On chauffera d'autant plus lentement que la quantité d'eau prévue sera plus grande, et l'on entourera d'un drap imbibé d'eau le tube servant de réfrigérant pour absorber les chaleurs de condensation de l'eau, beaucoup plus élevées que celles des hydrocarbures.

Pour déterminer la teneur en paraffine, on soumettra à des refroidissements assez énergiques les fractions qui distillent au-dessus de 250° C.

L'acidité se déterminera en ajoutant de l'alcool neutre, une solution déci-normale de potasse et en se servant, comme indicateur, d'une solution de phénol-phtaléine. Cette détermination est importante, car les acides naphthéniques ou oléfines attaquent très facilement le plomb et même le cuivre des réservoirs.

**Point d'inflammabilité.** — Il n'est pas indispensable d'utiliser des appareils spéciaux pour déterminer avec une précision suffisante la température à laquelle l'huile dégagera des vapeurs susceptibles de s'enflammer au contact d'une flamme. Il suffit de chauffer l'huile lentement, en observant la température et en guettant le moment où ces vapeurs peuvent s'enflammer. On a ainsi le point d'inflammabilité *en vase ouvert*. Si l'on recouvre la capsule d'un couvercle perforé d'un trou, on peut déterminer la température à laquelle les vapeurs se mélangeant à l'air compris entre le liquide et le couvercle forment un mélange explosif. On a ainsi le point d'éclair *en vase clos*, supérieur de 2 à 3° au premier.

Il est avantageux de placer le creuset dans un autre

vase plus grand, dont les bords protègent contre les courants d'air, et de poser les deux vases sur un large carton d'amiante, afin de modérer le chauffage ; celui-ci est obtenu, par exemple, à l'aide d'une lampe Pigeon. Le thermomètre que l'on placera au sein du liquide, en le suspendant à une potence, devra être très sensible, c'est-à-dire constitué par un petit réservoir sphérique avec colonne capillaire. Pour faire l'essai d'inflammation des vapeurs, on se servira de petits bouts de ficelle que l'on allumera préalablement à l'aide de la lampe.

La présence de très petites quantités d'une huile plus légère peut donner lieu à un phénomène, appelé *inflammabilité accidentelle*, qui fausserait le résultat. Il suffit, pour s'en apercevoir, après une première détermination, de laisser refroidir l'huile et de recommencer ; si la deuxième lecture est bien supérieure à la première, c'est que les vapeurs qui avaient provoqué la première inflammation étaient en petite quantité et d'une nature différente de celle du produit. On peut donc penser qu'il s'agissait de substances inflammables introduites accidentellement, par exemple au moment du transvasement, par l'intermédiaire de canalisations ayant servi pour l'essence.

Il faut noter que le *point de combustion*, température à laquelle le combustible brûle sans le secours d'aucune mèche, est supérieur de 10 à 20° au point d'inflammabilité.

**Viscosité. Fluidité.** — On sait que de la fluidité dépend la plus ou moins grande facilité avec laquelle on pourra pulvériser les huiles (voir p. ). On mesure la viscosité à l'aide de différents appareils. On peut observer le temps d'écoulement d'un certain volume de liquide à une certaine température, ou le volume écoulé pendant un temps donné sous l'influence de forces également déterminées.

Un *viscosimètre* se compose donc essentiellement d'un vase muni d'une tubulure calibrée et dans lequel on placera un volume de liquide déterminé, à une température constante. On observera les conditions de l'écoulement de l'huile à essayer et de l'huile prise pour type ou même de l'eau, en ayant bien soin de procéder aux essais dans les mêmes circonstances, afin que les résultats soient comparables.

Il est avantageux de placer le vase formant viscosimètre au centre d'un autre vase, constituant double enveloppe avec trop-plein, pouvant être chauffé directement. Un agitateur favorise la réalisation d'une température uniforme.

Quand on veut comparer les viscosités de deux ou de plusieurs huiles, il suffit d'observer les durées d'ascension de bulles d'air de même volume dans des tubes calibrés, s'il s'agit d'huiles colorées, ou les durées de chute de billes de même dimension, s'il s'agit d'huiles claires ; mais il est difficile d'opérer ainsi aux températures intéressantes pour l'alimentation des moteurs.

**Dosage du soufre.** — Le dosage du soufre se fait facilement dans les laboratoires à l'aide de l'obus calorimétrique de Mahler, dans lequel on brûle une petite quantité d'huile à essayer, en présence d'un peu de vapeur d'eau, dans de l'oxygène à 25 atm. Le soufre est transformé en acide sulfurique qui se dissout dans l'eau de condensation et que l'on transforme en sulfate de baryte pour le dosage ; celui-ci doit être très précis, à cause de la petite masse (0,5 g) de matière soumise à l'essai.

On peut doser le soufre sur de plus grandes quantités d'huile, en brûlant cette huile dans une lampe du type Primus, dont la flamme s'obtient par injection de pétrole sous pression dans un gazéificateur (pour la combustion, il faut ajouter à l'huile lourde à essayer de l'essence

lourde bien raffinée et exempte de soufre). Si l'on envoie les gaz de la combustion dans une solution alcaline, on pourra doser l'acide sulfurique et en déduire la teneur en soufre.

Dans l'industrie, il est d'ailleurs possible de doser de la même manière le soufre dans les gaz d'échappement. Connaissant, en effet, le poids de l'huile brûlée pendant un certain temps, le volume total des gaz d'échappement, le volume des gaz aspirés dans les flacons laveurs et aspirateurs, on pourra déduire, du poids de sulfate de baryte précipité dans les solutions de lavage, la teneur en soufre du combustible.

Dans les laboratoires le dosage du sulfate de baryte est une opération un peu délicate ; à l'usine, on pourra opérer plus simplement, en déterminant la teneur en acide sulfurique par comparaison avec des solutions de titres connus, dans lesquelles on ajoutera du chlorure de baryum à froid et en opérant dans des conditions rigoureusement identiques.

En confrontant les troubles produits dans les différents tubes par les précipités formés, on pourra ranger ces tubes par ordre de richesse des solutions primitives en acide sulfurique, et par conséquent ranger à sa place la solution dont on cherche la teneur. On aura soin d'utiliser, pour la confection des solutions de teneurs connues, la même solution de carbonate employée au lavage des produits de la combustion et destinée à l'absorption de l'acide sulfureux.

### LUBRIFIANTS

**Huiles lubrifiantes.** — On peut utiliser la plupart des procédés que nous venons d'examiner pour l'essai des huiles lubrifiantes, par exemple pour déterminer la viscosité ou la fluidité ; cette dernière était considérée jusqu'à

présent comme la caractéristique essentielle de la valeur lubrifiante.

Il convient de faire l'essai aux diverses températures d'emploi, afin de s'assurer que l'huile y garde des propriétés suffisantes, c'est-à-dire continue à adhérer avec énergie et résiste aux effets de la pression et de la vitesse qui tendent à la rejeter en dehors des surfaces frottantes. Il est évident que l'huile ne doit pas se décomposer et produire des matières épaisses, résineuses ou même simplement solides, capables d'encrasser ou de rayer les surfaces. D'autre part, les huiles lubrifiantes ne doivent pas pouvoir s'enflammer ; il faut cependant éviter la projection d'huile par les manivelles sur la chemise du cylindre, car l'huile, entraînée par le piston dans les chambres de compression, détermine toujours des encrassements. Les fumées à l'échappement peuvent déceler ce défaut.

Nous avons déjà décrit le graissage forcé appliqué généralement à tous les moteurs, sauf aux engins de faible puissance. Nous n'y reviendrons pas ; nous voulons simplement examiner ici les conditions générales auxquelles doivent satisfaire les huiles et les caractéristiques à exiger.

Au moment de la combustion, la température de 1 000° est facilement atteinte ; la paroi du cylindre est moins chaude, grâce au refroidissement : 400° près de la chambre de combustion, 150° seulement à la partie inférieure. Il est indispensable, par conséquent, de choisir une huile qui supporte les températures élevées en gardant des propriétés lubrifiantes.

Dans la pompe à air, la température est voisine de 300° ; d'autre part, l'humidité déposée par l'air peut dissoudre les graisses animales ou végétales en donnant des acides. L'huile pour le graissage de la pompe à air doit donc avoir les mêmes qualités que celle du piston et, en outre, être exempte de graisse organique.

Les organes de commande, arbres, tourillons, roues hélicoïdales, pièces de distribution, etc., ont besoin d'une huile moins exceptionnelle.

Voici les caractéristiques établies par l'usage :

*Huiles pour cylindres et pompe à air.*

Viscosité Engler	}	à 20° .....	70 à 220
		à 50° .....	16 à 32
Température ..	}	de vaporisation ..	100 à 160
		d'inflammation ..	225 à 290
		de combustion ...	280 à 340

*Huiles pour organes de commande.*

Viscosité Engler	}	à 20° .....	30 à 70
		à 50° .....	6 à 15
Température ..	}	de vaporisation ..	60 à 120
		d'inflammation ..	190 à 220
		de combustion ...	220 à 245

Dans les marchés d'huile de graissage, il convient de spécifier les points suivants :

L'huile sera minérale, pure et limpide, sans eau, ni écume, ni huile animale ou végétale, ni résine, ni aucune matière en suspension ; elle ne laissera aucun dépôt sur un filtre de papier Joseph.

L'huile ne devra pas provenir de malaxage d'échantillons de caractéristiques différentes.

Elle ne devra renfermer aucune trace d'acide organique.

L'indice de goudron devra être inférieur à 0,1 %.

L'huile ne devra pas avoir tendance à la saponification ; agitée avec de l'eau, elle doit, après repos de quatre-vingts secondes, se retrouver dans la proportion de 80 %.

L'huile ne devra se congeler qu'à une température inférieure à 0°.

Il est bien entendu que, malgré ces spécifications, toutes les huiles devront être filtrées avant usage.

Rappelons que la consommation d'huile de graissage, variable avec la puissance et la vitesse du moteur, est généralement comprise entre 5 et 8 g par cheval-heure.

Nous connaissons maintenant assez bien les combustibles et les carburants de nos moteurs ; nous allons pouvoir examiner la combustion ; exclusivement non pas du point de vue thermodynamique où nous nous étions placés jusqu'à présent, mais en portant notre attention sur le côté chimique de la question.

### COMBUSTION

**Variations de volume des vapeurs combustibles dans le cylindre.** — Malgré les travaux de Duhem, H. Le Chatelier, E. Jouget, W. Nernst et Ostwald, ceux-ci tout dernièrement signalés par M. Brutzkus (1), on ignore généralement les conditions nécessaires pour que les réactions chimiques compliquées de la combustion soient achevées dans le court délai qui leur est imparti. On s'est peu soucié des différences que pouvaient présenter à cet égard les divers combustibles, ce qui n'empêche pas les moteurs de marcher mais pourrait nuire à certains progrès.

On sait que les trois facteurs qui interviennent dans une combustion (comme d'ailleurs dans toute réaction chimique) sont la *température*, la *pression* et la *concentration* (cette dernière s'exprimant par le nombre de molécules-grammes contenues dans un volume d'un litre).

Au principe mécanique d'action et de réaction correspond, en chimie, le principe de *Le Chatelier* : « Tout changement de l'un des facteurs de l'équilibre a pour résultat

---

(1) M. BRUTZKUS, *Contribution à la théorie des moteurs à combustion interne*. Gauthier-Villars, 1923, pp. 16, 29, 33. — T. M., n° 4 de 1914.

une transformation du système dans un sens tel, que ce même facteur subit un changement opposé. » Ce qui veut dire que si nous élevons la température, nous tendons vers une réaction endothermique, si nous l'abaïssons, nous favorisons une réaction exothermique. Selon que nous augmenterons ou diminuerons la pression, la réaction tendra à diminuer ou à augmenter le nombre des molécules ; enfin, si nous agissons sur la concentration d'un des gaz, toute augmentation tendra à une réaction dans le sens de la disparition de ce gaz, toute diminution donnera une impulsion à une réaction pouvant provoquer le dégagement de ce gaz. Si nous changeons les trois facteurs de manière que la réaction reçoive des impulsions dans la même direction que celle qui est recherchée, cette réaction s'opérera avec la plus grande vitesse.

Dans les moteurs, la combustion s'accompagnant de grandes variations de volume, de température et de concentration, le principe de Le Chatelier est donc particulièrement intéressant.

On en déduit immédiatement que, pour les combustibles dont la combustion est liée à une diminution du nombre des molécules, la combustion la plus avantageuse sera, sous pression croissante, facilement obtenue dans la course de compression. Au contraire, pour les combustibles dont le nombre des molécules augmente en brûlant, la combustion sera facilitée par une dépression croissante réalisable dans la course d'expansion. Les combustibles dont la combustion n'est pas liée à une variation du nombre des molécules brûleront indifféremment de l'une ou de l'autre façon.

Dans la première catégorie se rangent tous les combustibles gazeux industriels (gaz d'éclairage, de gazogène, de coke, d'antracite, de lignite, de haut fourneau), qu'il est avantageux de brûler dans la course de compression.

Dans la seconde catégorie, on trouve des gaz tels que

l'éthane, le propane, le butane et tous les combustibles liquides, qu'il est par conséquent avantageux de brûler, sous une pression continuellement décroissante, dans la course d'expansion.

Le méthane et l'éthylène brûlent sans variation du nombre des molécules ; la variation de pression dans un sens ou dans l'autre étant inopérante pour l'accélération de leur combustion, il en résulte que ces gaz brûlent très lentement dans les moteurs.

La température est également un facteur qui a la plus grande influence.

Dans les moteurs à explosion, la combustion qui s'opère dans la course de compression cause une augmentation de température ; cette augmentation est accélérée par la compression ; elle est diminuée seulement par l'effet de l'allumage, qui propage la chaleur du gaz enflammé dans le gaz non encore allumé, et par le refroidissement des parois.

Dans les moteurs où l'on recherche la combustion à pression constante, l'élévation de température provoquée pendant la course d'expansion est modérée par l'évaporation du combustible, l'arrivée de l'air d'injection, l'expansion et le refroidissement des parois.

Si l'on applique le principe de Le Chatelier, élévation de température, réaction absorbant de la chaleur, c'est-à-dire endothermique — abaissement de température, réaction exothermique, on voit que les influences réfrigérantes sont avantageuses (1).

Cela n'est pas un paradoxe, et, pour s'en rendre compte, il suffit de penser que si l'on brûle de l'oxyde de carbone,

---

(1) Cette conclusion pourrait être tirée aussi de la formule de Van't Hoff :

$$\frac{d \ln K}{dT} = - \frac{Q}{RT},$$

qui ne permet d'ailleurs le calcul que pour un volume constant, mais montre qu'un abaissement de température favorise la combustion.

par exemple, dans un excès d'air, les premières molécules de CO se consumeront vite ; mais à mesure que la température s'élèvera, la combustion se ralentira, pour cesser tout à fait au-dessus de  $1\ 300^{\circ}$ . Pour entretenir la combustion, il faut refroidir l'air.

Dans les moteurs Diesel où la combustion s'opère pendant la course d'expansion, on devra donc chercher à obtenir le plus rapidement possible la température élevée indispensable à la combustion des huiles lourdes ; mais lorsque cette combustion est obtenue, il faut réaliser un refroidissement assez considérable des gaz et autant que possible sans pertes de chaleur, de sorte que le meilleur procédé de refroidissement est une rapide expansion des gaz. Il en résulte qu'une forte compression et surtout une grande vitesse du piston sont très utiles pour la combustion.

L'air d'injection, introduit à température assez basse aussitôt dilaté, est un réfrigérant très actif qu'il paraît difficile de remplacer ; c'est là une des difficultés de l'injection mécanique qu'on ne pourra vaincre qu'en augmentant la vitesse, ce qui peut créer des difficultés de pulvérisation.

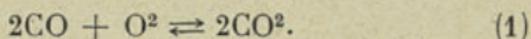
Quant à la combustion dans la course de compression (cycle à explosion), il ne faut pas qu'elle commence à une température très élevée, et on doit employer des mélanges pauvres, afin que la combustion ne soit pas trop rapide.

La limite de l'augmentation des températures de combustion paraît due à l'impossibilité d'arriver à une combustion rapide, lorsqu'on élève trop la température. Le refroidissement des parois causerait une perte de plus en plus considérable. Ce sont ces considérations, bien plus que la dissociation de l'anhydride carbonique et de la vapeur d'eau, qui empêchent de dépasser les températures que l'on obtient actuellement. Si l'on ne devait craindre

que la dissociation, on pourrait aller beaucoup plus loin : à 2 000° en effet, sous une pression de 35 atm, la dissociation de la vapeur d'eau atteint à peine 0,2 % ; celle de l'anhydride carbonique, à peine cinq fois plus.

Mais nous manquons de documents et d'études sur les vitesses des réactions chimiques. Si l'on admet que la réaction est la résultante de deux vitesses dans les deux sens opposés, on peut, par des variations continues de pression, de température et de concentration, favoriser la réaction dans un certain sens et entraver celle qui tend à se produire dans le sens opposé.

Ainsi de la combustion de l'oxyde de carbone dans l'oxygène :



Si, agissant du dehors d'une manière continue, nous augmentons la pression et la concentration des gaz en présence tout en diminuant la température, nous favorisons la réaction de combustion et nous entravons la réaction contraire de dissociation de  $\text{CO}^2$ .

Cette réaction sera, au contraire, favorisée si nous faisons varier les facteurs en sens contraires à ceux que nous venons d'indiquer, et elle prévaudra à des températures plus basses qui, autrement, sont défavorables à la réaction dans ce sens.

Il semble donc que si nous parvenons à brûler dans une durée de deux centièmes de seconde de l'huile lourde dans un moteur, c'est que, dans cette réaction exothermique où le nombre des molécules augmente, nous provoquons une dépression par la marche du piston ; nous abaissons la température pour les diverses raisons que nous avons déjà fait connaître et, simultanément, nous augmentons la concentration de l'oxygène par l'introduction d'air nouveau, faisant ainsi varier les trois facteurs de l'équi-

(1) Nous admettons que ces réactions sont réversibles.

libre chimique dans des sens opposés à ceux dans lesquels varie la réaction de combustion.

C'est exactement l'inverse qui se produit lorsqu'on brûle du gaz dans un moteur à explosion pendant la course de compression — du moins pour les gaz que nous avons cités ; car pour le méthane et l'éthylène qui, brûlant sans variations du nombre des molécules, sont très paresseux malgré une grande avance à l'allumage, la combustion se prolonge fort avant dans la course d'expansion. L'éthane, le propane et le butane, comme les combustibles liquides, brûleraient mieux dans la course d'expansion parce que le nombre de leurs molécules augmente pendant la combustion.

Ces variations extérieures, de sens opposé aux sens que provoque la réaction, peuvent être plus grandes ou plus petites que celles que produit cette réaction ; les variations résultantes seront alors dans le même sens que celles-là ou que celles-ci.

Par exemple, dans la combustion dans les moteurs Diesel, malgré l'augmentation continue du volume, la pression peut rester constante ; malgré la tendance continue au refroidissement, la température s'élève — du moins dans une première phase, — et malgré l'introduction continue de l'air, la concentration d'oxygène va en diminuant.

La combustion pourrait s'accélérer si les variations résultantes étaient de même sens que les variations extérieures, cela jusqu'à une certaine limite de température.

Il en résulte que dans les moteurs, à cause des grandes variations de pression produites par le déplacement du piston, les changements de volume dus à la combustion prennent une grande importance.

Il est assez facile de calculer :

le volume après la combustion :

le volume du combustible à l'état de vapeur et celui de l'oxygène avant la combustion.

On en déduit le changement de volume causé par la combustion, rapporté à une molécule de combustible ou, si l'on veut, à l'unité de volume de l'oxygène (le volume du combustible étant pratiquement négligeable à l'état liquide). D'où l'on peut tirer le changement de volume pour une calorie. Si le combustible est un mélange, la variation de volume dans la combustion est la somme algébrique des variations de chacun de ses composants multipliée par son coefficient dans l'unité de combustible.

D'autre part, de la loi des masses on tire que, si la variation  $n - n'$  du nombre des molécules des différents corps qui entrent en réaction est nulle, la variation de la pression totale n'a aucune influence sur la marche de la réaction ; au contraire, cette variation de la pression totale a d'autant plus d'influence sur la réaction, que  $\Sigma n - \Sigma n'$  sera plus grand en valeur absolue. La combustion sera d'autant plus vive que la variation du nombre des molécules (c'est-à-dire du volume) à cause de cette combustion sera plus grande.

En rangeant donc les combustibles d'après la valeur de la dilatation ou de la contraction provoquée, par la combustion à température constante, on aura l'ordre de leur aptitude à servir dans les moteurs.

On verrait ainsi que ce sont les substances organiques à molécules compliquées qui conviennent le mieux, c'est-à-dire les corps gras et les homologues supérieurs de la série du méthane, telles que les substances principales des huiles minérales.

Ces considérations, et surtout les recherches expérimentales qu'elles peuvent guider, dicteraient la convenance et le mode d'emploi des combustibles.

La pratique a consacré deux principaux types de moteurs : les moteurs à explosion, dans lesquels on brûle

les combustibles gazeux industriels dont le nombre des molécules diminue pendant la combustion, et les moteurs Diesel qui brûlent des combustibles liquides donnant tous une augmentation du nombre des molécules. En général, un moteur à explosion est un moteur qui brûle les corps dans la course de compression sous une pression croissante ; un moteur dit à pression constante est un moteur qui brûle les corps dans la course de dilatation sous une pression continuellement décroissante.

C'est pour cette raison que le moteur Diesel, qui brûle les combustibles dans la course d'expansion, est désavantageux pour la combustion des corps gazeux industriels, lesquels brûlent tous avec une diminution du nombre des molécules ; au contraire il convient bien pour la combustion des huiles les plus lourdes.

Ajoutons que le pouvoir calorifique déterminé à volume constant, à l'aide duquel on apprécie les combustibles, ne suffit pas ; il faut tenir compte de la variation du nombre des molécules : l'augmentation du nombre des molécules est un gain, la diminution de ce nombre est une perte de travail. Ainsi, le coefficient d'utilisation d'une huile de naphte est supérieur de 4,42 % à celui du gaz des hauts fourneaux.

Les considérations qui précèdent permettent donc de déterminer la manière dont chaque combustible doit être brûlé et, par comparaison avec d'autres combustibles, d'évaluer son rendement. Ces considérations, que nous ne pouvions abréger davantage, jettent un peu de lumière sur nos connaissances et pourront inciter quelques esprits à de nouvelles recherches dans cet ordre d'idées, recherches qu'il convient de poursuivre à l'aide d'expériences méthodiques.

Il est bien évident cependant, comme nous l'avons déjà fait remarquer, que les températures d'inflammation doivent être toujours considérées avec la plus grande atten-

tion. Nous allons, sur quelques exemples, juger de leur influence.

**Combustions de l'huile de goudron et de l'huile de paraffine.** — Il est indiscutable que l'huile de paraffine brûle très bien dans un moteur Diesel, alors que l'huile de goudron ne s'allume qu'à une température plus élevée et brûle irrégulièrement après l'allumage.

Si l'allumage était précédé de la gazéification intégrale du combustible, cette différence s'expliquerait difficilement. En effet, alors que l'huile de paraffine ne donne que 5 % environ d'hydrogène, l'huile de goudron en dégage 30 % ; les gaz riches en hydrogène s'allumant plus facilement, l'huile de goudron devrait brûler mieux que l'huile de paraffine dans les Diesel.

Cependant, si l'on fait tomber goutte à goutte divers combustibles dans un creuset contenant de l'oxygène à diverses températures (mesurables à l'aide d'un élément thermo-électrique), on détermine *le point d'allumage spontané* de chaque combustible. Voici les chiffres publiés par Moore :

Huile de paraffine .....	240°
— légère .....	326
— de goudron .....	445
— de goudron (fours verticaux) .....	468
— d'antracène .....	472
— de naphthaline .....	500
— de benzol pur .....	570

Il est remarquable de noter que les essais pratiques des huiles dans le moteur Diesel ont donné une classification exactement dans le même ordre que celle qui vient d'être indiquée. Cela prouve l'importance des points d'allumage spontané.

D'autre part, on a déterminé aussi les points des gaz produits par les mêmes combustibles dans une bombe.

Ces températures pour les quatre premiers sont à peu près identiques (entre 615 et 600).

On ne peut donc plus penser que l'inflammation n'est possible qu'après gazéification ; la paraffine, très inflammable, doit s'enflammer bien avant le gaz d'huile de paraffine, beaucoup moins inflammable.

La combustion de l'huile de paraffine semble donc se faire, sinon à l'état liquide, du moins à l'état de vapeur, ce qui explique sa régularité.

Quant à la combustion du goudron, plus difficile, on peut imaginer le processus suivant : une évaporation partielle produit une inflammation ; la chaleur dégagée dissocie les molécules voisines, et ainsi de suite, de proche en proche ; mais un certain nombre de particules peuvent être gazéifiées et s'enflammer dans cet état, ce qui explique les secousses traduites par les oscillations du diagramme, aussi bien pendant la combustion que pendant la détente.

On est arrivé cependant à produire la combustion complète des huiles de goudron par divers moyens que nous rappellerons : augmentation du taux de compression préalable de l'air, chauffage de cet air ou étranglement, de la quantité d'air aspiré (ce qui élève la température mais diminue la masse et par conséquent le travail), emploi de l'huile d'allumage, chauffage de l'air d'insufflation et de l'huile, amélioration de l'injection en évitant l'excès d'air d'insufflation froid.

Si l'on se reporte maintenant au tableau qui précède, des points d'allumage spontané, on peut, d'une manière générale, constater que cette classification est du même ordre que celle que l'on pourrait dresser en examinant les augmentations relatives de volume pendant la combustion. C'est ainsi que la paraffine augmente de plus de 0,35, tandis que la naphthaline et le benzol augmentent fort peu de volume ; 0,077 et 0,059 respectivement. Ainsi, les

points d'allumage spontané conduisent à une classification d'aptitude des combustibles du même ordre que la classification établie d'après l'augmentation du volume dans la combustion à température constante.

L'oléine augmentant de 0,346 pendant la combustion, on pouvait prévoir que les oléagineux seraient d'un bon emploi dans les moteurs Diesel. Les essais pratiques paraissent, en effet, le confirmer.

**Emploi des huiles végétales.** — Les caractéristiques des huiles végétales essayées dans les moteurs Diesel sont malheureusement assez instables ; il est difficile de formuler à leur propos des conclusions très nettes. C'est ainsi que le point d'inflammabilité que l'on note 220 à 300° est, en réalité, beaucoup plus variable. Les consommations sont de l'ordre de 250 g par cheval-heure. Il est inutile de réchauffer les huiles d'arachide et de coton, mais on doit porter l'huile de palme à la température de 55° environ et fondre le beurre de karité avec 10 % de pétrole. C'est avec cette dernière huile et avec l'huile de ricin que l'on enregistre les plus grandes consommations spécifiques.

Il paraît nécessaire d'employer un Diesel à insufflation et dont la compression préalable est de 32 à 35 kg ; il est indispensable que le combustible soit complètement enflammé avant d'atteindre le piston ou les parois du cylindre, car les huiles végétales donnent par décomposition des acides organiques, indépendamment d'un encrassement toujours fâcheux. Quant à la puissance fournie par ces huiles, l'huile de ricin exceptée, elle paraît supérieure à celle que donne le mazout. Cette constatation, qui peut surprendre si l'on ne regarde qu'aux pouvoirs calorifiques, s'explique par la moins grande quantité d'oxygène nécessaire à la combustion des oléagineux, dont on peut intro-

duire ainsi, à chaque injection, une plus grande masse dans le cylindre.

Ces diverses constatations font espérer que l'on pourra, particulièrement aux colonies, utiliser ces huiles dans des moteurs, pour les divers besoins de l'industrie et de la locomotion.

### RÉFRIGÉRATION

**Nécessité de la réfrigération.** — Nous venons de voir qu'un abaissement de température était favorable à la combustion des combustibles liquides, dont le nombre de molécules augmente lorsqu'ils brûlent. Il existe, d'autre part, une nécessité plus impérieuse

de refroidir, non plus seulement les gaz, mais les parois du cylindre et même du piston ; cela suffirait à justifier la perte de 20 % de chaleur emportée par les réfrigérants, c'est-à-dire par l'eau de circulation qu'on emploie

généralement et par l'huile, utilisée parfois pour le refroidissement des pistons.

En effet, si nous traçons, au lieu du diagramme des pressions, le diagramme des températures (fig. 36), nous voyons que la température monte à 500° environ sous l'effet de la compression ; la combustion la porte à 1 300 ou 1 400°, l'échappement s'opère vers 300°, et l'aspiration

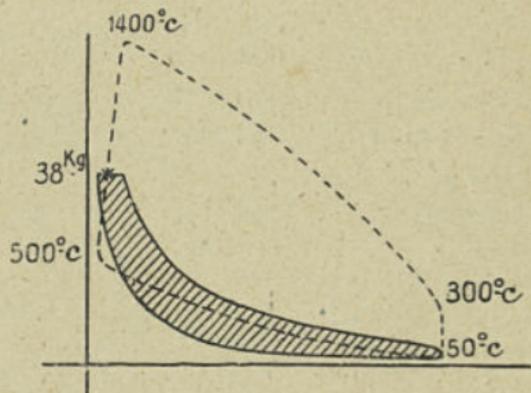


FIG. 36. — DIAGRAMME DES TEMPÉRATURES (en traits ponctués) aux différents points d'un diagramme des pressions (hachuré).

rétablit à 50° en moyenne cette température à l'intérieur du cylindre. Les parois tendent donc à prendre une température élevée.

Or, l'acier fond vers 1 350°, le bronze vers 950°, le cuivre vers 1 100°, le fer, lui-même, fondrait à 1 420° ; l'alliage dit « antifriccion », dont on garnit parfois le piston, fond à une température beaucoup plus basse. Il est inutile d'insister. D'ailleurs la fusion du métal n'est pas le seul inconvénient à redouter : bien avant la fusion, les dilatations sont fort gênantes, qu'on en juge : une augmentation de température de 100° donne, par mètre, des dilatations linéaires de 1,16 mm pour l'acier, 1,8 mm pour le bronze, 1,18 mm pour le fer. Nous avons vu, d'autre part, qu'au delà de 320° toutes les huiles qu'on pourrait employer se décomposent et se vaporisent.

**Circuits réfrigérants.** — On emploie généralement deux circuits de réfrigération : le premier, pour les cylindres, culasses et soupapes d'échappement, se fait toujours à l'eau ; le second, pour les fonds de piston, se fait parfois à l'huile.

Dans les moteurs de faible puissance, on se contente souvent d'un jet d'huile sous le fond du piston ; les autres comprennent une chambre de circulation d'eau ou d'huile.

La transmission de chaleur à travers la face active du piston se fait avec une vitesse inversement proportionnelle à son épaisseur, qu'on pourrait ainsi être tenté de réduire, si le métal n'était soumis aux chocs directs des gaz chauds et quelquefois aux jets enflammés du combustible. On peut penser qu'il vaut mieux donner une certaine capacité calorifique à la tête du piston, dont la température dépend ainsi de la température moyenne dans le cylindre.

Il est indispensable de continuer à refroidir après l'arrêt, jusqu'à ce que la température des cylindres et des

pistons se soit abaissée vers 50°, sans quoi ces organes prendront la température des gaz d'échappement. Si l'on voulait remettre en route à ce moment — ce qui peut être nécessaire sur un navire, — l'eau de circulation à 15 ou 20°, arrivant brusquement sur des pièces à 150° environ, provoquera une contraction brusque suivie immédiatement d'une nouvelle dilatation provoquée par les premières injections. Ces à-coups donnent des fêlures. Il faut donc disposer, particulièrement sur les navires, d'une turbine ou pompe indépendante pour la circulation de l'eau de refroidissement, que l'on mettra en marche à l'arrêt, dès que les pompes de circulation ordinaire seront arrêtées.

**Débit nécessaire.** — Le débit se règle d'après les thermomètres (qui indiquent les températures d'entrée et de sortie des liquides réfrigérants), à l'aide de soupapes régulatrices interposées dans chaque circuit.

On peut se rendre compte, en gros, du débit nécessaire en moyenne.

Soit un moteur consommant 0,240 kg de pétrole par cheval-heure ; le pouvoir calorifique de ce pétrole est de 11 000 calories. Nous savons que la circulation réfrigérante emporte 20 % environ des calories produites. Nous devons donc évacuer par cheval et par heure :

$$0,24 \times 11\,000 \times 0,2 = 528 \text{ calories.}$$

Si l'eau entre à 20° et si nous voulons qu'elle sorte à 42° (ce qui est prudent, à bord des navires, car à partir de 55° l'eau de mer qu'on y emploie forme rapidement des dépôts, il nous faut :

$$\frac{528}{42 - 20} = 24 \text{ litres par cheval-heure.}$$

On distribue généralement ce débit pour les 2/3 dans les enveloppes des cylindres et pour 1/3 dans les pistons, c'est-à-dire 8 l par ch.h.

Si l'on emploie de l'huile pour la réfrigération des pistons, en admettant que le nombre des calories à emporter soit  $\frac{528}{3}$ , en prenant 30° et 70° comme températures d'entrée et de sortie de l'huile et en estimant la chaleur spécifique de l'huile égale à 0,3 de la chaleur spécifique de l'eau, le débit d'huile nécessaire dans les pistons sera :

$$\frac{528}{3(70 - 30) \times 0,3} = 14 \text{ l. 66 par ch-h,}$$

c'est-à-dire presque le double de celui de l'eau.

**Comparaison entre l'eau et l'huile.** — L'eau donne une réfrigération plus active, plus constante et moins coûteuse ; les organes sont deux fois moins volumineux, ils exigent moins de puissance.

L'huile doit être contenue dans des appareils très importants, où sa température peut s'abaisser assez vite.

L'huile finit par laisser sur les parois une couche de coke calorifique ; il faut donc renouveler l'huile et nettoyer.

Si l'on a employé l'huile, c'est, d'une part, à cause des dépôts que forme l'eau de mer au-dessus de 50-55° et, d'autre part, pour éviter les déversements d'eau par fuites dans le carter, lesquelles provoquent en très peu de temps la formation d'une sorte de sauce mayonnaise : on doit arrêter et remplacer l'huile de graissage.

Dans les moteurs fixes, si l'on emploie une eau convenablement épurée (voir p. 75) et si l'on s'arrange pour éviter les fuites d'eau dans le carter, il n'est pas nécessaire d'utiliser l'huile comme agent de refroidissement des pistons. D'ailleurs, dans la marine même, on tend à l'emploi exclusif d'eau.

**Circulation d'eau dans le piston. Dispositif pour éviter les fuites.** IRIS, LILLIAD, Université Lille 1 trombones à cou-

lisse (voir p. 23) qui permettent l'arrivée et le départ de l'eau. C'est évidemment à cet endroit que les fuites peuvent se produire et rendre impropre au graissage l'huile du carter.

Un trombone comprend essentiellement (fig. 37) :

deux tubes fixes concentriques ;

un tube qui coulisse autour du plus petit des tubes précédents, lui-même fixé invariablement au piston.

Il faut que ce tube mobile ne soit pas gêné. On le fait donc passer dans un presse-étoupe formé de rondelles en antifriction, dont les diamètres sont de deux dimensions que l'on fait alterner, de sorte que le tube n'est pas bridé. Mais cette garniture suffit, d'autant plus qu'on aménage des

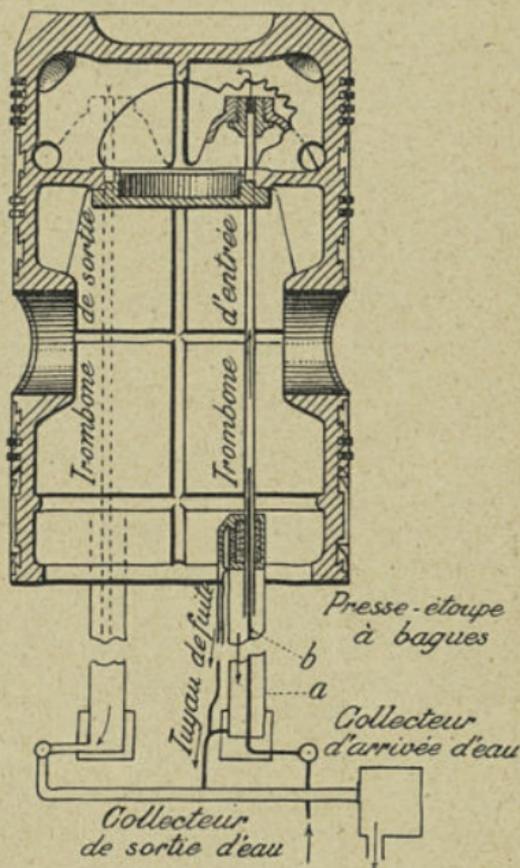


FIG. 37. — CIRCULATION D'EAU PAR TROMBONE pour le refroidissement du piston.

chambres de fuite qui recueillent les infiltrations ; ainsi, aucune goutte d'eau ne peut tomber dans le carter. C'est là une méthode générale : quand on ne peut absolument éviter les fuites, il suffit de les canaliser pour les empêcher d'aller dans le carter.

## COMPARAISONS

Nous avons terminé notre étude des moteurs à huile lourde. Nous avons examiné deux types principaux.

Le Diesel, dans lequel l'air, comprimé à la pression de 32 à 35 kg en moyenne, est porté à la température de 500 à 550° environ ; l'injection du combustible s'opère graduellement, à l'aide d'une aiguille qui permet de réaliser une combustion donnant une pression à peu près constante pendant une faible fraction de la course motrice.

L'injection et la pulvérisation du combustible se font sous pression, le plus généralement à l'aide d'air très fortement comprimé dans un compresseur spécial.

Dans certains cas, on remplace l'air d'insufflation par une pulvérisation mécanique dite « solide ». Les moteurs de ce genre, appelés moteurs à injection mécanique, *super-Diesel*, ou moteurs à haute compression (bien que la compression préalable de l'air dans le cylindre ne soit que de 25 à 28 kg), tendent à se répandre, mais ne procurent pas généralement une combustion aussi complète.

Le semi-Diesel, dans lequel la compression préalable de l'air (10 à 12 kg) ne suffit pas à l'allumage, sans le secours d'une paroi non refroidie de la chambre de combustion, que l'on doit ainsi chauffer avant démarrage.

La combustion rapide s'opère ainsi sous volume presque constant et produit une élévation notable de pression.

Nous avons vu qu'un type de ces moteurs pouvait atteindre des vitesses assez grandes, démarrer à froid, utiliser les combustibles les plus divers avec des consommations modérées ; mais ces qualités sont exceptionnelles.

Quant aux machines mixtes à vapeur et à combustion, elles partent d'un excellent principe et sont certainement appelées à un grand avenir.

## CONCLUSION

Bien qu'il n'y ait que deux catégories principales de moteurs à combustion interne, il existe beaucoup de machines industrielles entre lesquelles il faut choisir.

On pourrait penser que le grand nombre de types différents est l'indice d'un problème encore mal résolu par un grand nombre de solutions imparfaites, aucune n'ayant pu l'emporter sur les autres par des qualités indiscutables.

Ce n'est pas sous cet angle qu'il faut examiner la question. Il est fort heureux qu'on puisse avoir le choix entre un certain nombre de types. Dans un moteur, le rendement thermique n'est pas tout ; ni même le rendement économique, c'est-à-dire le prix de revient réel de l'énergie. Il est des commodités d'encombrement, de facilité de conduite, d'utilisation d'un combustible qui se trouve à pied d'œuvre, de vitesses angulaires à réaliser, de légèreté, de silence ; des précautions à prendre contre l'incendie, etc., qu'il est difficile de chiffrer, et qui peuvent, cependant, emporter notre choix dans un cas particulier. Nous n'avons pu tout mettre dans ce livre parce que nous ne savons pas tout et que nous n'avons pas la place de développer tout ce que nous savons ; mais nous espérons que les notions acquises par nos lecteurs sont maintenant assez claires pour qu'ils puissent comprendre le fonctionnement de n'importe quel moteur dont ils se proposeraient l'étude plus approfondie. En tout cas, ils sont avertis de certains inconvénients dont ils peuvent se garder, ou s'accommoder si cela est nécessaire. .

La facilité du ravitaillement en combustibles est un des facteurs les plus importants dans le choix d'un moteur. D'autre part, si l'on possède déjà un moteur, on peut améliorer ses services en apportant des soins attentifs à l'achat,

à l'emmagasinage et à l'emploi des combustibles et des lubrifiants, au réglage du refroidissement, etc...

Pour la France, les combustibles liquides ne sont pas encore d'un emploi aussi économique qu'on peut le souhaiter. C'est de l'étranger que nous viennent les huiles de pétrole, du moins pour la plus grande part. La production des huiles de houille et de lignite va se développer sans doute, ainsi, peut-être, que celle des huiles végétales de nos colonies.

Mais nous avons vu que ce n'était pas sans difficultés que l'on arrivait à brûler ces combustibles, et particulièrement les derniers. Il y a là, non seulement des progrès possibles dans les moteurs, mais aussi dans la fabrication des huiles qui pourraient rester bon marché tout en étant meilleures.

Quels sont les autres progrès que nous pouvons espérer réaliser dans un avenir prochain ?

Sans doute, il est encore trop tôt pour parler des turbines à combustion, qui auraient l'avantage de supprimer les mouvements alternatifs, si gênants à cause des effets d'inertie — du moins pour le moteur, — car pour ce qui concerne la compression, toujours nécessaire, il faut penser que les compresseurs alternatifs seront encore bien longtemps plus économiques que les rotatifs. Certains essais, sur lesquels nous n'avons pu nous étendre, de turbines à combustion conjuguées avec des compresseurs alternatifs, donnent quelques espoirs et pourraient conduire à la construction d'un type pratique de machines puissantes.

Cependant, il semble que c'est dans la conjugaison des qualités de haut rendement du moteur à combustion avec une machine à vapeur qui en utilise les chaleurs perdues, tout en facilitant le refroidissement indispensable, que l'on obtiendra le plus vite des progrès sensibles. Nous avons d'ailleurs décrit une machine de ce genre.

Nous avons vu toutes les difficultés que l'on rencontre en cherchant à augmenter la puissance d'un cylindre. Cela tient à l'accroissement considérable des fatigues et de la chaleur, dès qu'on augmente beaucoup les alésages. La nécessité de se garder d'explosions toujours possibles dans le cylindre, conduit à renforcer encore des parois qui seraient déjà assez épaisses si l'on ne devait compter que sur les pressions normales ; l'épaisseur des parois nuit à la transmission de la chaleur et empêche le refroidissement suffisant. M. Dumanois, dans un mémoire couronné en 1913 par l'Académie des Sciences, voulait tourner la difficulté en formant chaque unité motrice de deux cylindres accolés, de dimensions différentes : un grand cylindre moteur où s'effectue la combustion suivie de détente, et un petit cylindre d'allumage. On réglerait les espaces morts de telle façon que, dans le petit cylindre, on atteindrait la pression et la température d'auto-allumage, tandis qu'il n'y aurait aucun danger que ce phénomène se produisit dans le cylindre principal. Mais, vers la fin de la course de compression des deux cylindres, après que le pulvérisateur aurait, un peu en avance, provoqué l'allumage dans le petit cylindre, une communication serait établie entre ce cylindre et le grand, avec un petit retard par rapport à la combustion dans le cylindre auxiliaire, mais avec une avance suffisante pour le cylindre principal. Ce dernier, ne possédant pas de pulvérisateur, pourvu d'autre part d'un espace mort suffisant, ne subirait aucune surpression et aurait, par conséquent, des parois aussi minces que possible, d'où légèreté relative et facilité de refroidissement.

Dans le moteur Still, c'est la vapeur agissant sur la face extérieure du piston qui facilite le refroidissement, tout en fournissant un appoint non négligeable.

Dans d'autres cas, nous l'avons vu, la chambre de combustion est divisée en deux parties inégales communi-

quant par des orifices étroits : l'allumage se produit dans la chambre auxiliaire et se communique ensuite à la capacité principale ou cylindre, où la combustion s'achève devant le piston ; ce dispositif produit des effets analogues, dans le super-Diesel où il est appliqué, à ceux que M. Dumanois recherchait pour le moteur Diesel proprement dit.

Le super-Diesel consomme moins que le semi-Diesel ; cela est dû à une plus forte compression jointe à une meilleure pulvérisation. Grâce à la suppression du compresseur, le super-Diesel a un meilleur rendement organique que le Diesel ; mais, jusqu'à présent, la pulvérisation et la combustion étant moins parfaites, le rendement global reste à peu près le même. On n'a pas dépassé jusqu'à présent une puissance de 200 ch.

Les moteurs à combustion interne, Diesel, semi-Diesel ou super-Diesel, mais surtout le premier et le dernier, se prêtent difficilement à une allure rapide. Nous avons vu cependant fonctionner un Diesel à 500 tours par minute avec une combustion parfaite ; le constructeur espère atteindre la vitesse de 700 tours. Mais cela ne suffit pas pour l'automobile et la navigation aérienne, qui attendent encore la possibilité d'utiliser un combustible bon marché et, surtout en ce qui regarde l'aviation, offrant moins de risques d'incendie. Nous avons signalé cependant quelques essais de moteur Diesel pour l'aéronautique et quelques performances d'un semi-Diesel qui part à froid et qui paraît intéressant, au moins pour les camions. La solution paraît donc prochaine.

Le perfectionnement de l'injection mécanique y aiderait ; nous avons montré dans quel sens on peut faire avancer cette importante question. La pulvérisation obtenue à l'aide de l'air d'insufflation est meilleure. Le pulvérisateur est alors un appareil très simple ; mais si l'aiguille ne s'applique pas sur son siège d'une façon bien

hermétique, le pétrole peut pénétrer dans le cylindre pendant la période de compression et former un mélange explosif. Ces accidents sont rares.

Il est essentiel que l'aiguille soit solide. On emploie pour sa construction de l'acier à 3 à 8 % de nickel, trempé à 900° et recuit à 400°. Son guidage doit être parfait et le presse-étoupe doit serrer assez pour éviter les fuites d'air comprimé sans contrarier le mouvement. La maison Augustin-Normand est parvenue à supprimer le presse-étoupe ; l'aiguille étant moins longtemps levée que baissée, on peut se contenter pendant l'ouverture, qui diminue le risque de fuite, d'une étanchéité relative, obtenue en calant sur cette aiguille un manchon qui coulisse à frottement doux dans un guide pourvu de cannelures circulaires ; quand l'aiguille est en position de fermeture, toute fuite est empêchée, l'épaule du manchon reposant alors sur un siège convenablement rodé.

Ainsi, on peut attendre, à côté de perfectionnements plus profonds, une série de progrès de détails concernant l'insufflation, la répartition de l'air insufflé, la pulvérisation solide ou non. La métallurgie pourra venir en aide aux constructeurs, ainsi que des recherches expérimentales analogues à celles que nous avons indiquées, sur l'inflammation et les phénomènes de combustion dans les moteurs (1).

Si les grandes puissances ont plus de prestige, les faibles puissances ont un grand intérêt pour les industriels, et il est bien désirable que les engins de 4 à 20 ch se multiplient avec la même sûreté et la même économie que les moteurs plus considérables.

---

(1) Voir aussi la note que nous avons publiée sur les *antidétonnants et les antioxygènes* dans la *Revue Scientifique* du 22 mai 1926.

## BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

---

- BOCHET : *Les Moteurs*.
- BRUHAT (C.) : *Cours de thermodynamique* (Masson).
- COURAU (R.) : *Technique des pétroles*.
- DE GUILLAUME : *Cours de construction des éléments et des organes de machines* (Eyrolles).
- DAMOUR (E.) et CARNOT (J.) : *La combustion* (Dunod).
- DUMANOIS (P.) : *Moteurs à combustion interne* (Baillière).
- EWING (J.-A.) : *Thermodynamique* (Gauthier-Villars).
- HUGO GULDNER : *Les moteurs* (Dunod).
- LANG (M.) et DOL (A.) : *Les moteurs à explosion à huiles lourdes, dits Semi-Diesel* (Béranger).
- LETOMBE (L.) et LACON (L.) : *Les moteurs* (Baillière).
- LE GALLOU (Y.) et BOUNHOURE (F.) : *Théorie succincte, description et conduite du moteur Diesel* (Dunod).
- MARCOTTE (Ed.) : *Les moteurs à explosion* (Armand Colin).
- STODOLA : *Turbines à vapeur et à gaz* (Dunod).
- SYNDICAT DES APPLICATIONS INDUSTRIELLES DES COMBUSTIBLES LIQUIDES : *Les combustibles liquides et leurs applications* (Gauthier-Villars).
- VALLOT (G.) : *Les moteurs Diesel et les moteurs Semi-Diesel* (Dunod).
- WITZ (A.) : *Thermodynamique à l'usage des ingénieurs* (Gauthier-Villars).
- *Les machines thermiques* (Gauthier-Villars).
- *Traité sur les moteurs à gaz et à pétrole* (Bernard).
- *Les moteurs* (Doin).
-

## TABLE DES MATIÈRES

---

Préface .....	1
---------------	---

### CHAPITRE PREMIER

Caractères généraux. Description d'un moteur Diesel à quatre temps .....	3
---	---

### CHAPITRE II

Description d'un moteur Diesel à deux temps .....	27
---	----

### CHAPITRE III

Comparaison des cycles .....	35
------------------------------	----

### CHAPITRE IV

La pratique du moteur Diesel. Les essais .....	43
--	----

### CHAPITRE V

Moteurs Diesel du type fixe. Disposition générale d'une installation .....	66
---	----

## CHAPITRE VI

<b>Moteurs marins du cycle Diesel. Changement de marche .....</b>	<b>88</b>
---	-----------

## CHAPITRE VII

<b>Moteurs Diesel sur voie ferrée. Transmission de l'énergie entre le moteur et les roues .....</b>	<b>103</b>
---	------------

## CHAPITRE VIII

<b>Moteurs Diesel à faible puissance. Moteurs légers. Injection solide. Cycle mixte .....</b>	<b>124</b>
---	------------

## CHAPITRE IX

<b>Moteurs semi-Diesel. Applications à bord des bateaux de pêche .....</b>	<b>146</b>
--	------------

## CHAPITRE X

<b>Questions générales .....</b>	<b>176</b>
Combustibles, 176. — Lubrifiants, 192. — Combustion, 196. — Réfrigération, 207. — Comparaisons, 212.	
<b>Conclusion .....</b>	<b>213</b>
<b>Bibliographie sommaire .....</b>	<b>218</b>

COLLECTION  
**ARMAND COLIN**  
 Directeur : Paul MONTEL, Professeur à la Sorbonne

Chaque volume in-16, broché ou relié.

**“ *Vulgariser sans abaisser* ”**

- N° 1. **Rayonnement** (Principes scientifiques de l'Éclairage), par A. BLANC, Professeur à la Faculté des Sciences de Caen (35 figures).
- N° 2. **La Construction du Vaisseau de guerre**, par E. JAMMY, Ingénieur en chef aux Forges et Chantiers de la Méditerranée (183 figures, 4 planches hors texte).  
 (Ouvrage couronné par la Ligue maritime et coloniale française.)
- N° 3. **Cinématique et Mécanismes**, par R. BRICARD, Professeur à l'École Centrale et au Conservatoire des Arts et Métiers (79 figures).
- N° 4. **L'École classique française** : Les doctrines et les hommes (1660-1715) (2<sup>e</sup> édition), par A. BAILLY, Professeur au Lycée Pasteur.
- N° 5. **Éléments d'Agriculture coloniale : Plantes à huile**, par Yves HENRY, Inspecteur général de l'Agriculture aux Colonies (35 figures).
- N° 6. **Télégraphie et Téléphonie sans fil** (6<sup>e</sup> édition), par C. GUTTON, Professeur à la Faculté des Sciences de Nancy (107 figures).
- N° 7. **Théorie cinétique des Gaz** (2<sup>e</sup> édition), par E. BLOCH, Professeur à la Sorbonne (7 figures).
- N° 8. **Traité pratique de Géométrie descriptive**, par J. GEFROY, Ingénieur des Arts et Manufactures (248 figures).
- N° 9-10. **Statique et Dynamique** (Tomes I et II), par H. BÉGHIN, Professeur à la Faculté des Sciences de Lille (226 figures).
- N° 11. **Éléments d'Électricité** (3<sup>e</sup> édition), par Ch. FABRY, Membre de l'Institut, Professeur à la Sorbonne (70 figures).
- N° 12. **La Fonte** (Élaboration et Travail), par le Colonel J. ROUELLE (29 figures).
- N° 13. **L'Hérédité**, par Et. RABAUD, Professeur à la Faculté des Sciences de Paris (34 figures).
- N° 14. **Principes de l'Analyse chimique**, par V. AUGER, Professeur de Chimie analytique à la Sorbonne (11 fig.).

IRIS - LILL'AD - Université Lille 1

- N° 15. **Les Pyrénées** (2<sup>e</sup> édition), par M. SORRE, Maître de Conférences à la Faculté des Lettres de Bordeaux (3 cartes).
- N° 16. **Chimie et Fabrication des Explosifs**, par P. VEROLA, Ingénieur en chef des Poudres (9 figures).
- N° 17. **La Révolution française**, par A. MATHIEZ, Chargé du cours d'histoire de la Révolution française à l'Université de Paris. Tome I : *La Chute de la Royauté* (3<sup>e</sup> édition).
- N° 18. **Les grands Marchés des Matières premières** (4<sup>e</sup> édition), par F. MAURETTE, Chef de la Division Scientifique du Bureau international du Travail (S. D. N.) à Genève (8 cartes et 3 graphiques).
- N° 19. **L'Industrie du Fer en France**, par J. LEVAINVILLE, Docteur de l'Université de Bordeaux (4 cartes).  
(Ouvrage couronné par la Société de Géographie de Paris.)
- N° 20. **L'Acier** (Élaboration et Travail), par le Colonel J. ROUELLE (45 figures).
- N° 21. **Le Droit ouvrier** (Tableau de la Législation française actuelle) (2<sup>e</sup> édition), par G. SCALLE, Professeur à la Faculté de Droit de Dijon.
- N° 22. **Les Maladies dites Vénériennes**, par le D<sup>r</sup> P. RA-VAUT, Membre de l'Académie de Médecine, Médecin de l'Hôpital Saint-Louis (22 figures).  
(Ouvrage couronné par l'Académie des Sciences, Prix Béliou.)
- N° 23. **La Houille blanche** (2<sup>e</sup> édition), par H. CAVAILLÈS, Professeur au Lycée de Bordeaux (8 cartes et 4 figures).
- N° 24. **Propriétés générales des Sols en Agriculture**, par G. ANDRÉ, Membre de l'Institut, Professeur à l'Institut Agronomique.
- N° 25. **Vue générale de l'Histoire d'Afrique**, par G. HARDY, Directeur de l'École Coloniale.
- N° 26. **Les Instruments d'Optique** (2<sup>e</sup> édition), par H. PARISELLE, Professeur à la Faculté des Sciences de Lille (82 figures).
- N° 27. **Le Naturalisme français**, par P. MARTINO, Doyen de la Faculté des Lettres d'Alger.
- N° 28. **Théorie du Navire** (Tome I), par M. LE BESNERAIS, Ingénieur en chef du Génie Maritime (61 figures).
- N° 29 - 30. **Éléments de Paléontologie** (Tomes I et II), par L. JOLEAUD, Professeur à la Faculté des Sciences de Paris (93 figures).
- N° 31. **Le Ballon, l'Avion, la Route aérienne**, par M. LARROUY, Ingénieur de l'École Supérieure d'Aéronautique (25 figures).

- N° 32. **La Société Féodale** (2<sup>e</sup> édition), par J. CALMETTE, Professeur à l'Université de Toulouse.
- N° 33. **Les Bois coloniaux**, par H. LECOMTE, Membre de l'Institut, Professeur au Muséum d'Histoire Naturelle (28 figures).
- N° 34. **Probabilités, Erreurs** (3<sup>e</sup> édition), par Émile BOREL, Membre de l'Institut, Professeur à la Sorbonne, et R. DELTHEIL, Professeur à la Faculté des Sciences de Toulouse (10 figures).
- N° 35. **Physique du Globe** (2<sup>e</sup> édition), par Ch. MAURAIN, Doyen de la Faculté des Sciences à l'Université de Paris (21 figures).
- N° 36. **L'Atmosphère et la prévision du Temps**, par J. ROUCH, Professeur à l'École Navale (36 figures).
- N° 37. **Les Méthodes actuelles de la Chimie** (2<sup>e</sup> édition), par P. JOLIBOIS, Professeur à l'École Supérieure des Mines (45 figures).
- N° 38. **Les Coopératives de consommation en France**, par Bernard LAVERGNE, Professeur à la Faculté de Droit de Nancy.
- N° 39. **La Grande Guerre** (1914-1918), par le général THEVENET, ancien Gouverneur de Belfort (15 cartes).
- N° 40. **Mines et Torpilles**, par Henri STROH, Ingénieur en chef de la Marine (40 figures).
- N°s 41, 42, 43. **Chimie minérale** (3 volumes), par H. COPAUX, Professeur à l'École de Physique et de Chimie Industrielles de la Ville de Paris, et H. PERPÉROT, Sous-Chef de travaux pratiques à l'École de Physique et de Chimie.
- N° 44. **Éléments de Géométrie analytique**, par A. TRESSE, Docteur ès sciences, Inspecteur général de l'Instruction publique (91 figures).
- N° 45. **Le Félibrige**, par Émile RIPERT, Professeur à la Faculté des Lettres de l'Université d'Aix-Marseille.
- N° 46. **Le Blocus et la Guerre sous-marine**, par A. LAURENS, Capitaine de Vaisseau, Chef de la Section historique de l'État-Major de la Marine.
- N°s 47 - 48. **Alternateurs et Moteurs synchrones** (Tomes I et II), par E. ROTH, Ingénieur en chef de la Société Alsacienne de Constructions électriques de Belfort (167 figures).  
(Ouvrage couronné par l'Académie des Sciences, Prix Hébert.)
- N° 49. **Éléments d'Agriculture coloniale : Plantes à fibres**, par Yves HENRY, Inspecteur général de l'Agriculture aux Colonies (75 figures).

- N° 50. **Astronomie générale**, par Luc PICART, Directeur de l'Observatoire de Bordeaux (42 figures).
- N° 51. **L'Après-guerre et la Politique commerciale**, par Cl. GIGNOUX, Rédacteur en Chef de la *Journée Industrielle*, ancien chargé de Cours à la Faculté de Droit de Nancy.
- N° 52. **La Révolution française**, par A. MATHIEZ, Chargé de cours d'histoire de la Révolution française à l'Université de Paris. Tome II : *La Gironde et la Montagne* (2<sup>e</sup> édition).
- N° 53. **L'Angleterre au XIX<sup>e</sup> siècle, son évolution politique**, par Léon CAHEN, Professeur au Lycée Condorcet.
- N° 54. **Balistique extérieure**, par J. OTTENHEIMER, Ingénieur principal d'Artillerie navale (48 figures).
- N° 55. **Piles et Accumulateurs électriques** (2<sup>e</sup> édition), par L. JUMAU, Ingénieur (76 figures).
- N° 56. **Les Alpes françaises** (2<sup>e</sup> édition), par R. BLANCHARD, Professeur à l'Université de Grenoble (15 cartes).
- N° 57. **Les Courants alternatifs** (2<sup>e</sup> édition), par Pierre SÈVE, Professeur à la Faculté des Sciences de Marseille (127 fig.).
- N° 58. **Rome et les Lettres latines**, par A. DUPOUY, Professeur au Lycée Michelet.
- N° 59. **Théorie du Navire** (Tome II), par M. LE BESNERAIS, Ingénieur en chef du Génie Maritime (33 figures).
- N° 60. **Calculs numériques et graphiques** (2<sup>e</sup> édition), par Émile GAU, Directeur de l'Enseignement en Tunisie (33 figures et graphiques).
- N° 61. **Les Industries de la Soie en France**, par P. CLERGET, Directeur de l'École de Commerce de Lyon (10 graphiques, 15 tableaux statistiques).
- N° 62. **Les Industries de fixation de l'Azote**, par Marcel GUICHARD, Professeur à la Sorbonne (21 figures).
- N° 63. **Le Saint-Siège, l'Église catholique et la Politique mondiale** (2<sup>e</sup> édit.), par Maurice PERNOT, Agrégé de l'Université, ancien Membre de l'École française de Rome.
- N° 64. **La France économique et sociale au XVIII<sup>e</sup> siècle**, par Henri SÉE, Professeur honoraire à l'Université de Rennes.
- N° 65. **Les Submersibles**, par G. RABEAU, Ingénieur du Génie Maritime, et A. LAURENS, Chef de la Section historique de l'État-Major de la Marine (44 figures).
- N° 66. **Les Doctrines économiques en France depuis 1870**, par Gaëtan PIROU, Professeur à la Faculté de Droit de Paris.
- N° 67. **Introduction à la Géologie** (2<sup>e</sup> édit.), par J. LEUBA,

- N° 68. **La Renaissance des Lettres en France, de Louis XII à Henri IV**, par J. PLATTARD, Professeur à la Faculté des Lettres de Poitiers.
- N° 69. **Parnasse et Symbolisme** (2<sup>e</sup> édition), par P. MARTINO, Doyen de la Faculté des Lettres d'Alger.
- N° 70. **Les Moteurs à explosion**, par E. MARCOTTE, Ingénieur (I. C. F.), Professeur à l'École spéciale des Travaux publics (61 figures).  
(Ouvrage couronné par l'Académie des Sciences, Prix Trémond.)
- N° 71. **Le Magnétisme**, par P. WEISS, Correspondant de l'Institut, Professeur à la Faculté des Sciences de Strasbourg, et G. FOEX, Maître de Conférences à la Faculté des Sciences de Strasbourg (69 figures).
- N°s 72-73. **Éléments de Calcul différentiel et de Calcul intégral** (Tomes I et II), par Th. LECONTE, Directeur de l'Enseignement de la Seine, et R. DELTHEIL, Professeur à la Faculté des Sciences de Toulouse.
- N° 74. **Peuples et Nations des Balkans**, par Jacques ANCEL, Professeur au Collège Chaptal et à l'École des Hautes Études Commerciales (3 cartes).  
(Médaille d'or de la Société de Géographie.)
- N° 75. **Transport de l'Électricité**, par René COUFFON, Ingénieur des Arts et Manufactures (45 figures).
- N° 76. **Les Alpes, Géographie générale**, par Emm. DE MARTONNE, Professeur à la Sorbonne (24 cartes ou graphiques).
- N° 77. **Les Moteurs à combustion**, par E. MARCOTTE, Ingénieur (I. C. F.), Professeur à l'École Spéciale des Travaux publics (37 figures).  
(Couronné par l'Académie des Sciences, Prix Trémond.)
- N° 78. **La Transformation de l'énergie électrique : I. Transformateurs**, par R. CARTON, Ingénieur E.M.I., et P. DUMARTIN, Ingénieur A. et M.I.E.G. (39 figures).
- N° 79. **Les Origines du Capitalisme moderne**, par Henri SÉE, Professeur honoraire à l'Université de Rennes.  
(Recommandé par le Comité France-Amérique.)
- N° 80. **Balistique intérieure**, par J. OTTENHEIMER, Ingénieur principal d'Artillerie navale (37 figures).
- N° 81. **La Pensée française au XVIII<sup>e</sup> siècle** (2<sup>e</sup> édition), par Daniel MORNET, Professeur à la Sorbonne.
- N° 82. **Mesures Électriques**, par Jean GRANIER, Ingénieur, Chargé de Cours à la Faculté des Sciences de Montpellier

- N° 83. **La Littérature italienne**, par Th. LAIGNEL, Professeur agrégée d'italien au Lycée de jeunes filles de Lyon.
- N° 84. **L'Organisation scientifique du Travail**, par Georges BRICARD, Ingénieur en chef du Génie Maritime (34 fig.).
- N° 85-86. **Les Courants de la Pensée philosophique française** (Tomes I et II), par A. CRESSON, Professeur de Philosophie au Lycée Condorcet.
- N° 87. **Principes de l'Électrochimie** par J. PONSINET, Ingénieur des Manufactures de l'État (35 figures).
- N° 88. **Syndicats et Coopératives agricoles**, par Michel AUGÉ-LARIBÉ, Secrétaire général de la Confédération nationale des Associations agricoles.
- N° 89-90. **La Tuberculose**, par le D<sup>r</sup> Édouard RIST, Médecin de l'Hôpital Laënnec et du Dispensaire Léon Bourgeois. Un volume double (25 figures et 6 graphiques).
- N° 91. **Les Expériences monétaires contemporaines** (2<sup>e</sup> édit.), par George-Edgar BONNET, Directeur général adjoint de la C<sup>ie</sup> du Canal de Suez.  
(Recommandé par le Comité France-Amérique.)
- N° 92. **Histoire de la Langue Allemande**, par E. TONNELAT, Professeur à la Faculté des Lettres de l'Université de Strasbourg (1 carte hors texte).
- N° 93. **La Révolution française**, par A. MATHIEZ, Chargé du cours d'histoire de la Révolution française à l'Université de Paris. Tome III : *La Terreur* (2<sup>e</sup> édition).
- N° 94. **La Cinématographie**, par Lucien BULL, Sous-Directeur de l'Institut Marey (36 figures).
- N° 95. **La Littérature française contemporaine : Poésie, Roman, Idées** (3<sup>e</sup> édition), par André BILLY.
- N° 96. **La Vie de la Cellule végétale**. Tome I, par R. COMBES, Maître de Conférences à la Sorbonne (16 figures).
- N° 97. **Psychologie expérimentale**, par Henri PIÉRON, Professeur au Collège de France et à l'Institut de Psychologie, Directeur du Laboratoire de Psychologie physiologique de la Sorbonne (11 figures ou graphiques).
- N° 98. **La Civilisation athénienne**, par P. CLOCHÉ, Professeur à la Faculté des Lettres de Besançon (15 fig., 1 carte).
- N° 99. **Appareils et Méthodes de Mesures mécaniques**, par le Lieutenant-Colonel J. RAIBAUD, Chef des Travaux pratiques de Mécanique à l'École Polytechnique (87 fig.).
- N° 100. **L'École romantique française : les doctrines et les hommes**, par Jean GIRAUD, Agrégé des Lettres, Directeur

- N° 101. **Éléments de Thermodynamique**, par Ch. FABRY, Membre de l'Institut, Professeur à la Sorbonne (39 figures).
- N° 102. **Introduction à la Psychologie collective**, par le D<sup>r</sup> Charles BLONDEL, Correspondant de l'Institut, Professeur à la Faculté des Lettres de Strasbourg.
- N° 103. **Nomographie**, par M. FRÉCHET, Directeur de l'Institut de Mathématiques à la Faculté des Sciences de Strasbourg, et M. ROULLET, Ingénieur, Professeur à l'École nationale technique de Strasbourg (79 figures).
- N° 104. **L'Ancien Régime et la Révolution russes**, par Boris NOLDE, ancien Professeur à la Faculté de Droit de Pétersbourg.  
(*Couronné par l'Académie des Sciences Morales et Politiques, Prix Perret*).
- N° 105. **La Monarchie d'Ancien Régime en France, de Henri IV à Louis XIV**, par Georges PAGÈS, Professeur d'Histoire moderne à la Faculté des Lettres de Paris.
- N° 106. **Le Théâtre français contemporain**, par Edmond SÉE.
- N° 107. **Hygiène de l'Européen aux Colonies**, par le D<sup>r</sup> Charles JOYEUX, Professeur agrégé à la Faculté de Médecine de Paris.
- N° 108. **Grammaire descriptive de l'Anglais parlé**, par Joseph DELCOURT, Docteur ès lettres, Professeur au Lycée Pasteur.
- N° 109. **La Vie de la Cellule végétale. (Tome II)**, par R. COMBES, Maître de Conférences à la Sorbonne (13 figures).
- N° 110. **La Formation de l'État français et l'Unité française, des Origines au milieu du XVI<sup>e</sup> siècle**, par G. DUPONT-FERRIER, Professeur à l'École Nationale des Chartes.
- N° 111. **Nos Grands Problèmes Coloniaux**, par Georges HARDY, Directeur de l'École Coloniale.
- N° 112. **Le Calcul vectoriel**, par Raoul BRICARD, Professeur au Conservatoire National des Arts et Métiers et à l'École Centrale des Arts et Manufactures.
- N° 113. **Ondes et Electrons**, par Pierre BRICOUT, Docteur ès sciences, Répétiteur à l'École Polytechnique.
- N° 114. **La Littérature en Russie**, par Jules LEGRAS, Professeur à l'Université de Dijon.
- N° 116. **La Formation de l'Unité Italienne**, par Georges BOURGIN, Ancien membre de l'École française de Rome, Archéologue.

- N° 117. **La Justice pénale d'aujourd'hui**, par H. DONNEDIEU DE VABRES, Professeur à la Faculté de Droit de Paris. (Ouvrage recommandé par le Comité du Livre français *France-Amérique*.)
- N° 118. **Les grands courants de la Pensée antique**, par A. RIVAUD, Professeur à la Sorbonne, Correspondant de l'Institut.
- N° 119. **Les Systèmes philosophiques**, par A. CRESSON, Professeur de Philosophie au Lycée Condorcet.
- N° 120. **Les Rayons X**, par Jean THIBAUD, Docteur ès sciences, Ingénieur E. S. E., Directeur-adjoint au Laboratoire de Physique des Rayons X (Ecole des Hautes-Etudes).
- N° 128. **La Belgique Contemporaine (1780-1930)**, par Franz VAN KALKEN, Professeur à l'Université de Bruxelles.

*Pour paraître prochainement :*

- Essences naturelles et Parfums**, par R. DELANGE.
- Principes de Psychologie appliquée**, par Henri WALLON.
- Les Anciennes Civilisations de l'Inde**, par G. COURTILLIER.
- L'Islam**, par Henri MASSÉ.
- Les Quanta**, par G. DÉJARDIN.
- Couleurs et Pigments des êtres vivants**, par le D<sup>r</sup> J. VERNE.
- Pétroles naturels et artificiels**, par J.-J. CHARTROU.
- La Téléphonie**, par Robert DREYFUS.
- La Musique contemporaine en France**, par R. DUMESNIL.
- La Thérapeutique moderne**, par le D<sup>r</sup> G. FLORENCE.

LIBRAIRIE ARMAND COLIN, 103, Boul. St-Michel, PARIS

*Nouvelle Édition, entièrement refondue et considérablement augmentée, en 2 vol. :*

CHARLES SEIGNOBOS

Professeur à la Faculté des Lettres de l'Université de Paris

## HISTOIRE POLITIQUE DE L'EUROPE CONTEMPORAINE

Évolution des Partis et des formes politiques (1814-1914)

Tome I. Un volume in-8° raisin (16×25), xvi-536 pages, broché.

Tome II. Un volume in-8° raisin (16×25), xvi-536 pages, broché.

Chaque volume est vendu également relié demi-chagrin, tête dorée.