

Le moteur Diesel et son application à la navigation sur le lac Léman

Autor(en): **Hoffet, P.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **32 (1906)**

Heft 12

PDF erstellt am: **19.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-25577>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Bulletin technique de la Suisse romande

ORGANE EN LANGUE FRANÇAISE DE LA SOCIÉTÉ SUISSE DES INGÉNIEURS ET DES ARCHITECTES. — Paraissant deux fois par mois.

Rédacteur en chef: M. P. HOFFET, professeur à l'Ecole d'Ingénieurs de l'Université de Lausanne.

Secrétaire de la Rédaction: M. F. GILLIARD, ingénieur.

SOMMAIRE: *Le moteur Diesel et son application à la navigation sur le lac Léman*, par M. P. Hoffet, professeur à l'Université de Lausanne (Planches 4 et 5). — **Divers**: Concours pour un hôtel de la Caisse d'Epargne de Neuchâtel, à la Chaux-de-Fonds. Rapport du jury. — Fêtes d'inauguration du tunnel du Simplon.

Le moteur Diesel et son application à la navigation sur le lac Léman.

Par M. P. HOFFET, professeur à l'Université de Lausanne.

L'emploi de moteurs à pétrole ou à benzine pour la propulsion de bateaux s'est généralisé depuis quelques années sur les lacs suisses. La petite navigation de plaisance emploie maintenant presque exclusivement ces moteurs, et la navigation marchande en fait usage sur une grande échelle, notamment sur les lacs de Zurich et des Quatre-Cantons.

Les bateaux du lac Léman n'ont pas suivi le même progrès en ce qui concerne leur propulsion, probablement parce qu'ici les barques à voiles sont très supérieures à celles qui sont en usage sur les autres lacs suisses et peut-

être aussi parce que la navigation y est plus difficile, vu l'absence de ports sûrs pouvant offrir un abri en cas de panne d'un moteur. C'est pour ce dernier motif, entre autres, que la *Compagnie générale de Navigation sur le lac Léman* a préféré en rester au remorquage de ses chalands, malgré les inconvénients de ce système, plutôt que de les munir de moteurs à benzine.

Cependant, lorsque le moteur *Diesel* eut fait son apparition sur le marché et que ses avantages incontestables furent démontrés, elle n'hésita pas à commander, en août 1904, un chaland avec moteur Diesel à MM. Sulzer frères, à Winterthour, pour en étudier l'emploi.

Parmi tous les moteurs thermiques qui ont été exécutés jusqu'à ce jour, le moteur Diesel tient de beaucoup le record en fait de rendement économique. On sait que le rendement économique d'un moteur thermique est le rapport de la chaleur transformée en travail mécanique à la chaleur

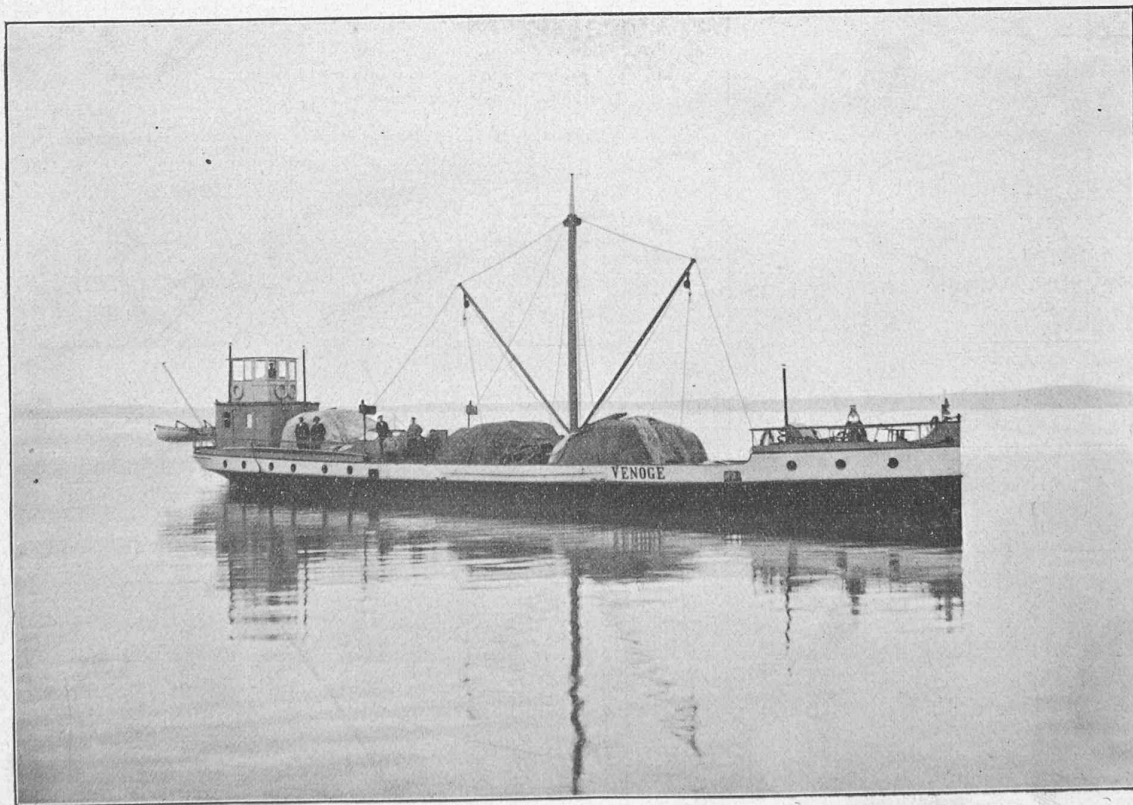


Fig. 1. — La « Venoge », chaland de la Compagnie générale de Navigation sur le lac Léman.

emmagasinée dans le combustible, c'est-à-dire au nombre de calories que produirait ce combustible par une combustion parfaite. En d'autres termes, le rendement économique est le rapport du nombre de calories utilisées effectivement dans un kilo de combustible au pouvoir calorifique de ce combustible.

Le tableau suivant donne en grammes les consommations de combustible obtenues aujourd'hui dans les conditions les plus favorables, le nombre de calories employées pour produire 1 chev. effectif en partant du combustible naturel (pour l'alcool il faudrait ajouter la chaleur employée pour la distillation) et le rendement économique. Les chiffres soulignés sont tirés des sources indiquées dans la dernière colonne et qui ont servi à établir le tableau.

Ainsi que nous l'avons dit, ces chiffres ont été obtenus dans les conditions les plus favorables, c'est-à-dire en pleine charge et pendant des essais faits avec un soin spécial; on ne pourrait guère les atteindre en exploitation ordinaire et lorsque les moteurs ne marchent pas continuellement en pleine charge.

Le *masut* (résidu de pétrole) que l'on brûle dans le moteur Diesel, a un pouvoir calorifique de 10 000 cal. et, suivant les indications de MM. Sulzer frères, on en brûle, dans les grands moteurs, 185 gr. par cheval-heure en charge normale. La consommation de calories s'élève donc à 1850 calories par cheval-heure et le rendement économique à **34,5** %. Ces chiffres correspondent à une **exploitation normale** et non à des essais faits dans des conditions spéciales. Ajoutons à cela que dans le moteur Diesel la quantité de combustible employé décroît à peu près proportion-

nellement avec la puissance demandée au moteur, du moins jusqu'à environ 50 % de la charge normale, et qu'en outre ce moteur peut employer un combustible dont le prix est bien inférieur à celui de tous les autres; nous avons ainsi résumé les avantages économiques du moteur Diesel.

Nous reviendrons plus tard sur les autres avantages de ce moteur, après en avoir exposé rapidement les particularités.

Le moteur Diesel rentre dans la catégorie des moteurs à *quatre temps* comme la plupart des moteurs à gaz, benzine, pétrole, etc., que l'on construit actuellement; c'est un moteur à simple effet, dont le piston fait quatre courses et la manivelle deux tours pendant que le fluide moteur accomplit un cycle. Comme dans tous les moteurs que nous venons de citer, le combustible, source d'énergie, est brûlé dans le cylindre de travail lui-même. Toutefois il existe une grande différence entre ceux-ci et le nouveau moteur: dans les premiers, un mélange tonnant, comprimé préalablement à une pression moyenne, est enflammé artificiellement et fait *explosion*, c'est-à-dire brûle presque instantanément au début du 3^{me} temps; dans le moteur Diesel, au contraire, on comprime de l'*air pur* à haute pression et l'on introduit le combustible progressivement dans le cylindre pendant le premier dixième du 3^{me} temps. Ce combustible s'enflamme au fur et à mesure de son admission en entrant en contact avec l'air fortement surchauffé pendant la compression préalable.

Le principe de la combustion progressive dans les moteurs à pétrole, gaz et benzine n'est pas nouveau en lui-même. Il avait été réalisé, quoique beaucoup moins avanta-

MOTEUR	Pouvoir calorifique du combustible	Consommation en gr.	Calories empl. par chev.-heure effectif	Rendement économique maximum %	Source des renseignements
2 Machine à vapeur surchauffée de 3000 chev.	7 500	Houille 540	<u>4040</u>	<u>15,7</u>	1 Z. 1902 p. 187 et Etude de M. Diesel Z. 1903 p. 1367
Moteur à pétrole (expl.)	10 500	Pétrole <u>330</u>	3460	18,3	Z. 1903 p. 1367
Moteur à benzine (expl.)	11 000	Benzine <u>297</u>	3270	19,4	Z. 1903 p. 1367
Moteur à benzine (Banki) (expl.)	14 000	Benzine <u>221</u>	2440	26,1	Z. 1903 p. 1367
Moteur à gaz pauvre (expl.)	8 000	Anthracite <u>290</u>	2320	27,4	3 Güldner p. 406
Moteur à alcool (expl.)	5 800	Alcool <u>365</u>	2120	30,0	Essais du prof. Meyer, Z. 1903 p. 519. Pouvoir calorifique d'après Güldner p. 463

¹ Z signifie: Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure.

² La machine à vapeur en question a consommé pendant les essais du 29 novembre 1900, qui ont duré environ 6 h. 1/2, 4,05 kg. de vapeur par chev. indiqué, la température de la vapeur a été de 314,36, la pression de 12,3 kg. avant le cylindre de haute pression.

³ Güldner, Entwerfen und Berechnen der Verbrennungsmotoren.

geusement, dans les moteurs de *Brayton*, *Gardie*, *Capitaine*, *Hargreaves* et autres. Mais aucun de ces moteurs n'avait pu soutenir la concurrence des moteurs à explosion réalisant le cycle de Beau de Rochas. Tous les anciens moteurs à combustion progressive marchaient à *deux temps*. L'air nécessaire à la combustion était comprimé dans une pompe spéciale, à une pression variant entre $4\frac{1}{2}$ (*Brayton*) et 7 (*Gardie*) atmosphères. L'admission du mélange tonnant durait environ le $\frac{1}{3}$ de la première course du piston, la détente des gaz brûlés était donc relativement courte. Les diagrammes ressemblaient beaucoup à ceux d'une machine à vapeur (fig. 2).

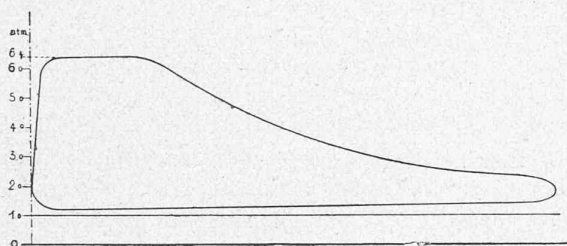


Fig. 2. — Diagramme du moteur de Gardie¹.

Dans le moteur de *Brayton* primitif (brevet de 1872), l'air comprimé entre dans le cylindre de travail après avoir traversé un filtre imbibé d'un hydrocarbure lourd. Le liquide pulvérisé par le passage de l'air est projeté sur une toile métallique, derrière laquelle la combustion se maintient sans interruption et sans explosion. Pour mettre le moteur en train, on se sert d'une allumette. La combustion se fait sous une pression d'environ $3\frac{1}{2}$ atm. et le rendement économique atteint à peine 8 %.

Le moteur de *Gardie* (brevet de 1863, exécution aux environs de 1890) brûle du gaz mixte produit dans le générateur qui porte le nom de *Gardie*. L'air comprimé est chauffé dans un régénérateur utilisant la chaleur du gaz d'échappement. Une partie de cet air passe directement au cylindre de travail, l'autre traverse le gazogène avec un courant de vapeur et forme ainsi, en passant à travers le combustible incandescent, le gaz qui, avec l'air dirigé directement au cylindre, donne le mélange tonnant. L'inflammation se produit au contact d'un allumeur en métal, maintenu au rouge par la combustion même du gaz.

De 1887 à 1890 *Hargreaves*² a imaginé d'employer comme combustible des huiles lourdes. L'air comprimé à 5 atm. entre dans le cylindre de travail après s'être saturé de vapeur d'eau et surchauffé en traversant un régénérateur utilisant les gaz d'échappement. Pendant la période d'admission, une petite pompe injecte l'huile brute dans le cylindre; celle-ci s'enflamme en rencontrant l'air surchauffé et brûle au fur et à mesure de son introduction. Il n'existe aucun organe pour produire l'inflammation.

¹ Voir Aimé Witz, *Traité théorique et pratique des moteurs à gaz et à pétrole*, 1903.

² Voir Hugo Güldner, *Entwerfen und Berechnen der Verbrennungsmotoren*.

A cette même époque *Capitaine*¹ s'efforçait de son côté de réaliser la combustion progressive dans des conditions économiques. Il s'était proposé de comprimer de l'air pur à une pression très élevée et d'y ajouter du pétrole pulvérisé, en le brûlant graduellement. L'inflammation était obtenue par une flamme dans la machine d'essais construite de 1889-1891 à la fabrique de moteurs *Swidersky*, à Leipzig. Cette même fabrique a construit des moteurs à explosion dans lesquels le liquide injecté à travers une soupape de pulvérisation était gazéifié sur les parois chaudes du vaporisateur, dont la température suffisait à enflammer le mélange tonnant. Elle a aussi essayé de supprimer pendant la marche le chauffage extérieur du vaporisateur en utilisant la chaleur de compression pour maintenir incandescentes ses parois une fois chauffées par une lampe à alcool².

Notons encore que, dans son moteur à compression progressive, *Capitaine* avait poussé la compression de l'air pur jusqu'à 16 atm., pression correspondant à peu près à la pression maximum obtenue dans les moteurs à explosion de cette époque³.

Pour différentes raisons, les essais de *Capitaine* furent interrompus. Son moteur d'essais était destiné à utiliser des résidus d'huiles minérales lourdes. D'après M. Güldner (p.101), il paraît que l'on était arrivé à une consommation de 0,4 kg. par cheval-heure, ce qui correspondrait à un rendement économique de 16 %, soit supérieur à celui des meilleures machines à vapeur.

En 1888 *Capitaine* avait aussi fait construire dans les ateliers de A. Monski, à Eilenburg⁴, un moteur à pétrole à explosion avec injection d'eau réglable; cette injection d'eau devait amener le mélange exactement à sa température d'inflammation, après une compression subséquente très forte. En réglant la quantité d'eau injectée, il voulait empêcher une inflammation prématurée. Tous les essais faits dans ce but jusqu'en 1894 ont été infructueux, car *Capitaine* ne cherchait à utiliser la compression que jusqu'à la température d'inflammation.

Tout au contraire, l'ingénieur *Donat Banki*, dont le moteur a été exposé en 1900 à Paris (Vincennes), s'est efforcé de pousser la compression très loin sans risque d'inflammation prématurée en injectant suffisamment d'eau dans le mélange tonnant pendant la période d'aspiration; il allume le mélange tonnant au moyen d'un tube incandescent. Avec une compression d'environ 16,4 atm. il atteint une pression de 38 atm. à l'explosion.

Les avantages obtenus par la haute compression sont en partie annulés par l'injection d'eau et, comme le montre le tableau comparatif, le rendement économique du moteur *Banki*, quoique très élevé, n'atteint de loin pas celui du moteur Diesel.

Tous les moteurs à combustion progressive dont nous avons parlé sont tombés dans l'oubli à côté des moteurs à

¹ Voir Güldner, *Entwerfen und Berechnen der Verbrennungsmotoren*.

² A. Musil, *Die Motoren für Gewerbe und Industrie*.

³ *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure*, 1895, p. 1051.

⁴ Musil, *Wärmemotoren*, 1899, p. 62.

explosion et l'on n'aurait peut-être plus songé à appliquer la combustion progressive sans l'intervention d'une brochure sensationnelle publiée en 1893 par M. R. Diesel, ingénieur, à Munich. Cette brochure portait le titre: « *Theorie und Konstruktion eines rationellen Wärmemotors zum Ersatz der Dampfmaschine und der heute bekannten Wärmemotoren.* » (Théorie et construction d'un moteur thermique rationnel devant remplacer la machine à vapeur et les autres moteurs thermiques connus actuellement).

Diesel résume ses recherches dans les conclusions suivantes:

1. La plus haute température du cycle ne doit pas être obtenue par la combustion, mais indépendamment de celle-ci par une compression mécanique d'air pur.

2. Introduction graduelle de combustible pulvérisé dans cet air comprimé et surchauffé de ce fait pendant une partie du retour du piston, la quantité de combustible étant telle que la combustion se fasse à température constante.

3. Choix judicieux de la quantité d'air suivant la température de combustion, afin que la réfrigération artificielle des parois du cylindre ne soit pas nécessaire pour la bonne marche du moteur.

L'application de ces thèses a été démontrée par Diesel sur la base d'un moteur de 100 chevaux devant marcher avec de la *poussière de charbon* et pour lequel il avait calculé les dimensions principales. Ce moteur devait réaliser le *cycle de Carnot* en parcourant les évolutions suivantes:

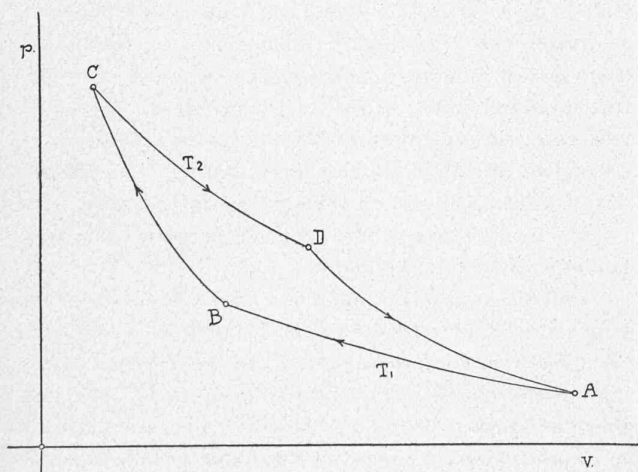


Fig. 3. — Cycle de Carnot.

AB: Compression *isothermique* de l'air pur avec injection d'eau jusqu'à une pression de 2,88 atm.

BC: Compression *adiabatique* de cet air jusqu'à 250 atmosphères, de façon à obtenir une température finale de 800° centigrades, qui est la température d'inflammation de la poudre de charbon.

CD: Introduction de la poussière de charbon dans l'air comprimé, mais seulement en quantité telle que pendant sa combustion progressive la température reste *constante*.

DA: Détente *adiabatique* jusqu'à la pression initiale.

Diesel lui-même reconnaît dans sa brochure que ce cycle n'est pas réalisable pratiquement. Il craint spécialement la

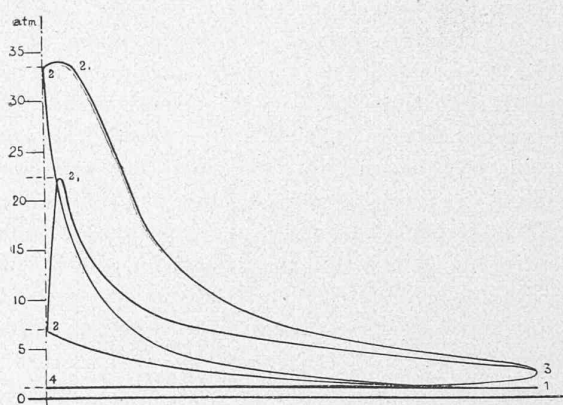


Fig. 4. — Diagramme Diesel et diagramme d'un moteur à explosion.

pression de 250 atm. et, pour arriver plus facilement à un résultat pratique, il traite encore un autre cycle, dans lequel il élimine la compression isothermique et passe de *A* à *C* directement par une compression adiabatique, lui assurant déjà la température de 800° à une pression de 90 atm., mais avec un rendement inférieur.

Finalement, la machine qui a été construite par les Ateliers de construction d'Augsbourg et qui a servi aux premiers essais de 1893 à 1897 ne comprimait qu'à 35 atm., fonctionnait au pétrole et sans manteau d'eau. Aux moteurs d'essais suivants on ajouta ce dernier et on arriva finalement à réaliser un nouveau cycle, connu sous le nom de *cycle de Diesel*, mais qui diffère sensiblement de celui que l'inventeur préconisait pour son moteur rationnel. Le moteur Diesel actuel est donc caractérisé essentiellement par la haute compression de l'air pur jusqu'à la température à laquelle commence la combustion progressive, et par l'absence d'un inflammateur quelconque. La première communication publique sur le moteur Diesel réalisé a été faite en 1897 par M. Diesel lui-même, à la 38^e Assemblée générale de la Société des ingénieurs allemands¹.

Déjà en 1897 la consommation du pétrole n'est que de 240 grammes par cheval-heure d'après les essais faits par M. le prof. Schröter, de Munich², alors que les autres moteurs à pétrole en consomment le double.

Dès lors la supériorité du moteur Diesel est reconnue universellement, et plusieurs maisons de construction de premier rang se mettent à l'œuvre pour le perfectionner encore. On a même cru pouvoir revenir à l'idée primitive d'employer de la poussière de charbon comme combustible, mais, après des essais faits en 1899, on y a renoncé définitivement, et actuellement le moteur Diesel est essentiellement un moteur à huiles lourdes.

Pour faciliter la comparaison des cycles d'un moteur à explosion, marchant dans des conditions normales, et d'un moteur Diesel tel qu'on le construit actuellement, nous avons superposé, après les avoir réduits aux mêmes échelles, un diagramme pris sur un moteur Diesel de MM. Sulzer frères

¹ Voir Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1897, p. 785.

² Voir Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1897, p. 889.

et un diagramme d'un moteur à gaz pauvre de MM. Crossley frères (fig. 4). Ce qui nous frappe à première vue, c'est la rapidité avec laquelle monte la pression de 7 à 22 1/2 atm. dans le moteur à explosion et le choc considérable qui se produit dans l'intérieur du cylindre, tandis que la pression bien supérieure est atteinte doucement dans le moteur Diesel, qui réalise de ce fait une marche tranquille à n'importe quelle vitesse. Inutile de dire que ce nouvel avantage est des plus précieux, tant au point de vue de la régularité de marche que de la sécurité.

En outre, nous pouvons être assuré avec le moteur Diesel que l'inflammation du combustible se fera sans faute.

Voici maintenant le fonctionnement des deux moteurs considérés :

		Moteur à explosion.	Moteur à combustion progressive.
4-1	1 ^{er} temps	Aspiration du mélange.	Aspiration d'air pur.
1-2	2 ^{me} temps	Compression du mélange à 7 atm., température finale inférieure à la température d'inflammation.	Compression de l'air pur à 33 1/2 atm., température finale supérieure à la température d'inflammation.
2-2 ₁	3 ^{me} temps	Inflammation du mélange par un inflammateur, explosion.	Injection du combustible liquide, inflammation au contact de l'air chaud, combustion.
2 ₁ -3		Détente.	
3-4	4 ^{me} temps	Echappement.	Echappement.

Dans le moteur à explosion, la compression du mélange est limitée par l'inflammabilité du combustible qui, elle-même, dépend des proportions du mélange et de la pression à laquelle le mélange est soumis. D'après les essais qui sont connus jusqu'à présent, il est difficile de dire à quelle température et sous quelle pression un mélange déterminé s'enflammera spontanément et sans l'intervention d'une flamme ou étincelle.

Suivant M. Güldner¹, un mélange de gaz pauvre et d'air dans le rapport des volumes de 1 : 1,5 s'enflammerait à environ 750° C.; si l'on ne tient donc pas compte de ce que l'inflammabilité doit augmenter avec la pression, on devrait pouvoir comprimer le mélange de gaz et d'air bien plus qu'on ne le fait dans la pratique, ainsi que le montre la figure 5, dans laquelle nous représentons une courbe de compression adiabatique donnant les températures en degrés centigrades atteintes par cette compression. Nous avons admis une pression initiale de 0,9 atm., correspondant à la pression à la fin de la période d'aspiration, et une température initiale de 75° C.; la courbe a été calculée avec l'exposant $z = \frac{C_p}{C_v} = 1,35$ et en supposant $pv^z = \text{const.}$ (p = pression; v = volume spécifique du mélange).

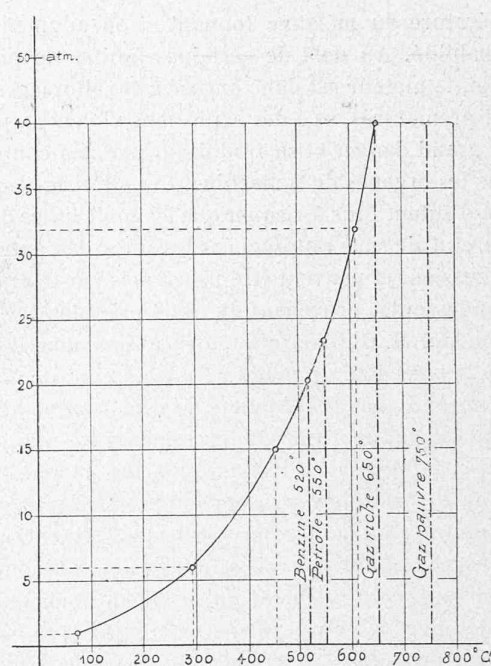


Fig. 5. — Courbe des températures de la compression adiabatique.

On sait depuis longtemps qu'en augmentant la compression préalable d'un moteur à explosion on en augmente le rendement thermique, qui s'exprime par :

$$\eta_t = 1 - \left(\frac{p_a}{p_c} \right)^{\frac{z-1}{z}},$$

p_a étant la pression à la fin de l'admission et p_c la pression à la fin de la compression. Le rendement η_t augmente d'abord rapidement avec le degré de compression, puis toujours moins, à mesure que la compression est poussée plus loin. Comme le rendement mécanique η_m diminue naturellement à mesure que les pressions exercées sur les organes en mouvement deviennent plus grandes et que cette diminution du rendement mécanique finit par être plus importante que l'augmentation du rendement thermique, il s'ensuit que le rendement économique, qui est le produit des deux autres, soit $\eta_e = \eta_m \times \eta_t$, atteint un maximum qui, d'après M. Güldner, est limité par des degrés de compression de 16 à 20 atm. pour les moteurs à explosion. Le rendement économique est en outre diminué par les déperditions de chaleur à travers les parois du cylindre et ces pertes augmentent avec le degré de compression. Il serait donc inutile de vouloir atteindre des compressions plus fortes.

On a du reste été fort prudent dans le choix de la compression préalable et ce n'est que progressivement que l'on a admis des pressions allant en moyenne jusqu'à

- 6 atm. pour gaz de ville,
- 12 » » gaz pauvre,
- 4 » » benzine,
- 6 » » pétrole.

En effet, si l'on comprime adiabatiquement, c'est-à-dire sans soustraire de la chaleur, on élève considérablement

¹ Hütte, des Ingenieurs Taschenbuch 1905. I, p. 1076.

la température du mélange tonnant et on augmente son inflammabilité. Au delà de certaines limites de pression préalable, le moteur est donc exposé à des allumages spontanés et prématurés, et à des explosions violentes, présentant un grand danger et se traduisant par des coups secs sur tous les organes de la machine. Ces allumages spontanés sont d'autant plus à risquer que les molécules de combustible et d'air sont rapprochées les unes des autres par la compression, et peuvent être provoqués par des particules incandescentes provenant du cycle précédent.

Cependant M. Güldner cite entre autres dans son ouvrage, à la page 406, un moteur à gaz de ville de 450 chevaux, construit par les Ateliers de construction d'Augsbourg, marchant avec une compression de 9,5 atm. et une pression maximum de 31 atm., puis des moteurs à gaz pauvre de 30 à 100 chevaux avec compression préalable de 14 à 16 atm., ayant donné un rendement exceptionnellement favorable. Pour pouvoir atteindre des pressions aussi fortes, il faut naturellement se servir de mélanges très pauvres et, avec le pétrole, il ne serait pas possible d'atteindre ces pressions sans l'injection d'eau de Banki, qui, comme nous l'avons déjà dit, atténue l'amélioration du rendement obtenu par la haute compression.

Dans les moteurs à explosion, l'inflammation du mélange comprimé est obtenue par une étincelle électrique ou par un corps incandescent.

Ainsi que nous l'avons déjà vu, dans le moteur Diesel on ne comprime que de l'air pur et le combustible n'est introduit dans le cylindre qu'au départ du piston pour la course utile, en brûlant au fur et à mesure de son admission. Le degré supérieur de compression n'est donc pas limité par l'inflammabilité du combustible, mais uniquement par des considérations pratiques telles que la température moyenne maximum que peuvent supporter le cylindre et le graissage; les dimensions des différents organes, qui augmentent naturellement avec la compression, demandent un volant plus lourd et diminuent finalement le rendement mécanique. Ceci étant donné, on peut admettre, dans les conditions actuelles, une pression maximum de 35 atm. dans le moteur Diesel. Mais, avec cette pression, on obtient une température bien suffisante pour allumer le combustible liquide pulvérisé. En effet, si nous partons d'une pression de 0,9 atm. et d'une température initiale de 75° C., la compression à 32 atm. pour $\alpha = 1,35$ amène l'air à une température de 610° C. (voir fig. 5) et le combustible que l'on emploie dans le moteur Diesel s'enflamme déjà entre 530 et 580° C.

Le rendement thermique du moteur Diesel dépend non seulement du degré de compression et de l'exposant α , mais encore de la durée de l'admission du combustible, soit de la combustion. Il s'exprime ainsi :

$$\eta_t = 1 - \frac{\left(\frac{v^1}{v_c}\right)^{\alpha} - 1}{\alpha \left(\frac{v}{v_c}\right)^{\alpha-1} \cdot \left(\frac{v^1}{v_c} - 1\right)}$$

v = volume total du cylindre, y compris la chambre de compression.

v_c = volume de la chambre de compression.

v^1 = volume occupé par les gaz au commencement de la détente.

M. Güldner¹ compare le rendement d'un moteur Diesel, calculé ainsi pour un degré d'admission de 10% et une pression maximum de 33 atm., au rendement thermique d'un moteur à explosion, travaillant également à une pression maximum de 33 atm., et pour cela avec une compression préalable de 13-15 atm. Pour le moteur à combustion progressive l'on aurait $\eta_t = 0,564$ et pour le moteur à explosion $\eta_t = 0,55$. Dans ces conditions de pression, le rendement thermique serait presque équivalent pour les deux cycles et deviendrait même inférieur pour le moteur à combustion progressive avec un degré d'admission plus grand. Pour que la supériorité du rendement thermique du moteur Diesel se fasse vraiment sentir, il faudrait de beaucoup dépasser avec la pression maximum du moteur à combustion progressive celle que l'on peut atteindre, sans danger d'explosion prématurée, avec le moteur à explosion. La pression maximum du moteur Diesel semble être limitée actuellement à 33 atm. Nous avons cité un moteur à gaz de ville atteignant une pression maximum de 31 atm. et un moteur à gaz pauvre avec compression préalable de 14 à 16 atm.

Pour les moteurs à gaz, le cycle de Diesel, compris entre les limites de pressions actuelles, ne semble donc pas avoir d'avantages au point de vue du rendement thermique. Lorsqu'il s'agit de combustibles liquides dont la température d'inflammation est plus basse, la question se pose autrement. Des compressions préalables de 15 atm. ne peuvent être atteintes avec ceux-ci qu'en refroidissant énergiquement le mélange par injection d'eau (Banki) ou par la surface extérieure du cylindre; mais l'on perd par ce moyen une grande partie de ce que l'on gagne par la forte compression. Pour les combustibles liquides le cycle de Diesel est donc préférable, car il permet de travailler, sans réfrigération exagérée, à une pression maximum que l'on ne pourrait guère atteindre autrement avec le cycle de Beau de Rochas.

Lorsqu'il ne s'agit pas seulement du rendement *thermique* maximum que l'on peut atteindre avec les deux cycles, rendement basé sur des diagrammes théoriques plus ou moins conformes aux diagrammes réels, mais du rendement *économique*, l'avantage du cycle de Diesel se montre surtout dans l'emploi d'huiles lourdes brûlant difficilement à des températures relativement basses. La haute température réalisée pendant la compression, la pulvérisation parfaite du combustible pendant son injection et son mélange intime avec l'air, assurent une combustion parfaite, grâce au grand excès d'air admis dans le moteur Diesel. Aussi les gaz d'échappement sont-ils incolores et inodores lorsque le réglage est bien fait. Une proportion trop forte de combustible se dénoncerait par l'odeur et la couleur de ces gaz. Le combustible employé

¹ Verbrennungsmotoren (p. 162).

généralement pour les moteurs Diesel est le *masut* de Galicie.

Le *masut* s'évapore difficilement et ne prend donc feu au contact d'une flamme qu'à une température relativement élevée. Entre 80° et 180° C. il dégage des vapeurs inflammables à sa surface et le liquide lui-même n'entre en combustion que quand la chaleur produite par la combustion des vapeurs a suffisamment élevé sa température. Le *masut* est donc un combustible peu dangereux et pas exposé, comme le pétrole lampant et la benzine, à des explosions inattendues. Le principal avantage du *masut* est son prix extrêmement bas. Il se paie aujourd'hui en Suisse 8-9 fr. les 100 kilos; son pouvoir calorifique est de 10 000 calories et l'on en dépense environ 220 grammes par cheval-heure pour les moteurs de faible puissance et, suivant des renseignements que nous devons à MM. Sulzer frères, tout au plus 185 grammes pour les grandes unités.

La dépense maximum de combustible s'élève donc à 2 centimes par cheval-heure pour les petits moteurs et elle peut s'abaisser jusqu'à 1,5 centime pour les grands moteurs, en supposant que l'on marche toujours à puissance normale.

La benzine coûtant environ 25 fr. les 100 kilos, un moteur qui en emploie 300 grammes par cheval-heure dépensera donc 7,5 centimes par cheval-heure, tandis que, pour une machine à vapeur, on peut estimer le coût par cheval-heure à Lausanne à environ 3 à 4 centimes au minimum, dans de bonnes conditions. Ajoutons encore les frais de main-d'œuvre et graissage, qui sont bien plus élevés pour la machine à vapeur.

Avec le moteur Diesel, comme avec la machine à vapeur, on règle la vitesse en proportionnant la consommation de combustible au développement d'énergie; le rendement économique ne diminue donc avec le travail produit que puisque le travail de frottement et les pertes de chaleur ne décroissent pas aussi rapidement que le travail utile. Pour faire diminuer la puissance du moteur Diesel on abrège la période de combustion, mais en conservant la pression. La combustion est donc toujours normale et complète, c'est-à-dire économique. Dans les moteurs à explosion qui ne se règlent pas d'après le système « tout ou rien », mais par une variation des proportions du mélange tonnant, la combustion se fait dans des conditions différentes, suivant la quantité de combustible admis et la pression qu'elle permet d'atteindre. L'explosion est d'autant plus violente que le mélange aura été riche, et la combustion

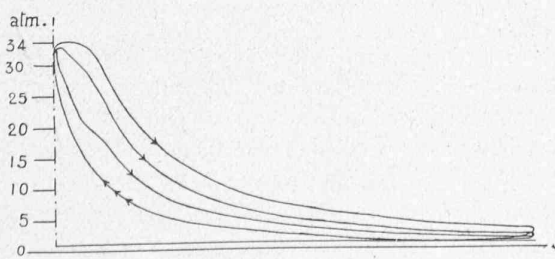


Fig. 6. — Diagrammes montrant la variation de la puissance dans un moteur Diesel.

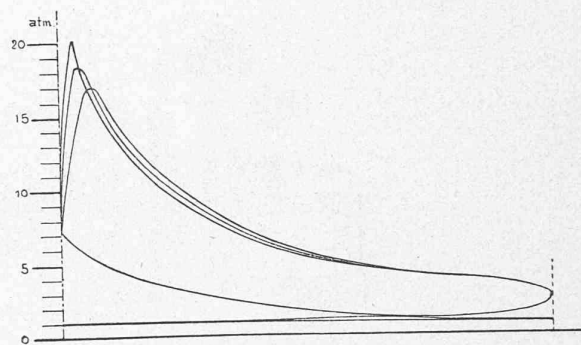


Fig. 7. — Diagrammes montrant la variation de la puissance dans un moteur à explosion.

ne peut être réalisée dans les conditions les plus avantageuses que pour une proportion déterminée du mélange. Dans l'ensemble, l'économie du moteur souffrira donc de cette manière de régler la puissance.

Les figures 6 et 7 montrent plusieurs diagrammes superposés pour un moteur Diesel et un moteur à explosion, marchant à puissance variable.

La régularité de la marche est mieux assurée dans le moteur Diesel que dans les moteurs à explosion, car la production de travail a lieu à chaque cycle et l'inflammation du combustible ne peut jamais manquer, comme cela arrive non seulement d'une manière voulue avec les moteurs qui travaillent suivant le système « tout ou rien », c'est-à-dire en laissant manquer de temps en temps une ou plusieurs explosions suivant les besoins, mais aussi accidentellement ensuite d'un mauvais réglage de l'inflammation, d'un mélange trop pauvre ou d'une température trop basse.

Le moteur Diesel est toujours prêt pour le démarrage, étant donnée l'absence d'un appareil d'inflammation. Il est non seulement le plus économique des moteurs thermiques, le plus régulier de marche, le moins exposé à des accidents, mais aussi le moins encombrant, étant donnée la haute pression à laquelle il travaille.

Sans aucun doute, c'est au moteur Diesel qu'appartient l'avenir, parmi les moteurs à combustibles liquides. Il constitue le plus grand progrès qui ait été fait depuis longtemps dans le domaine des moteurs à combustion progressive ou instantanée.

DESCRIPTION DU MOTEUR

Les figures 8 et 9 et les planches 4 et 5, que nous devons à la complaisance de MM. Sulzer frères, nous donnent

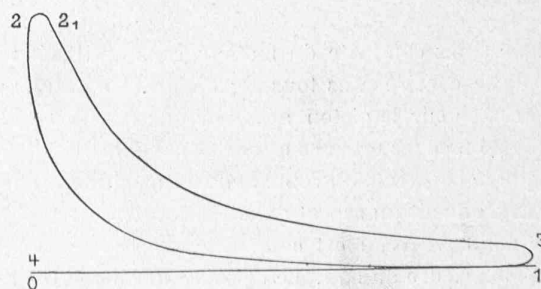


Fig. 8. — Diagramme d'essai d'un moteur Diesel.

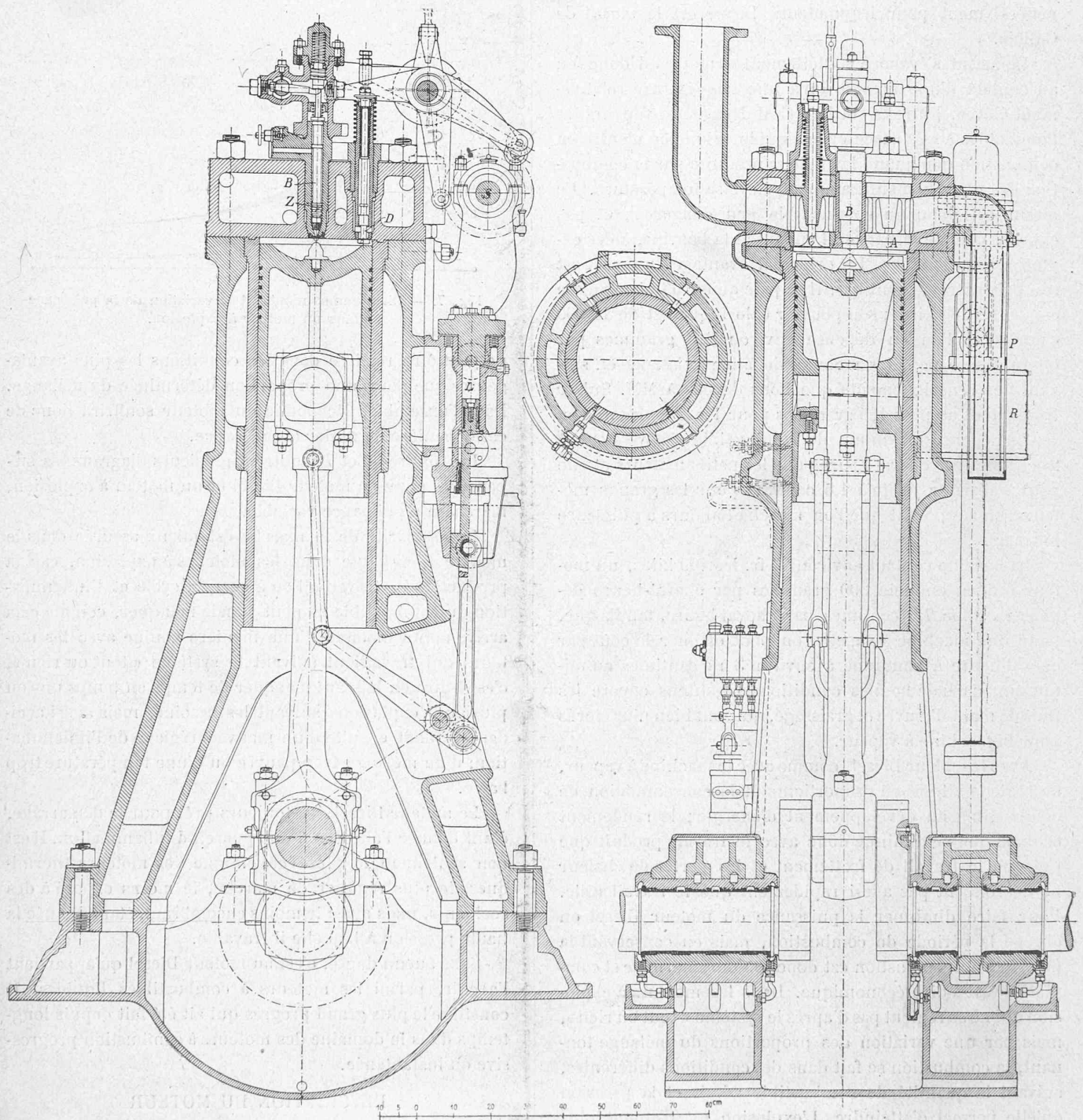
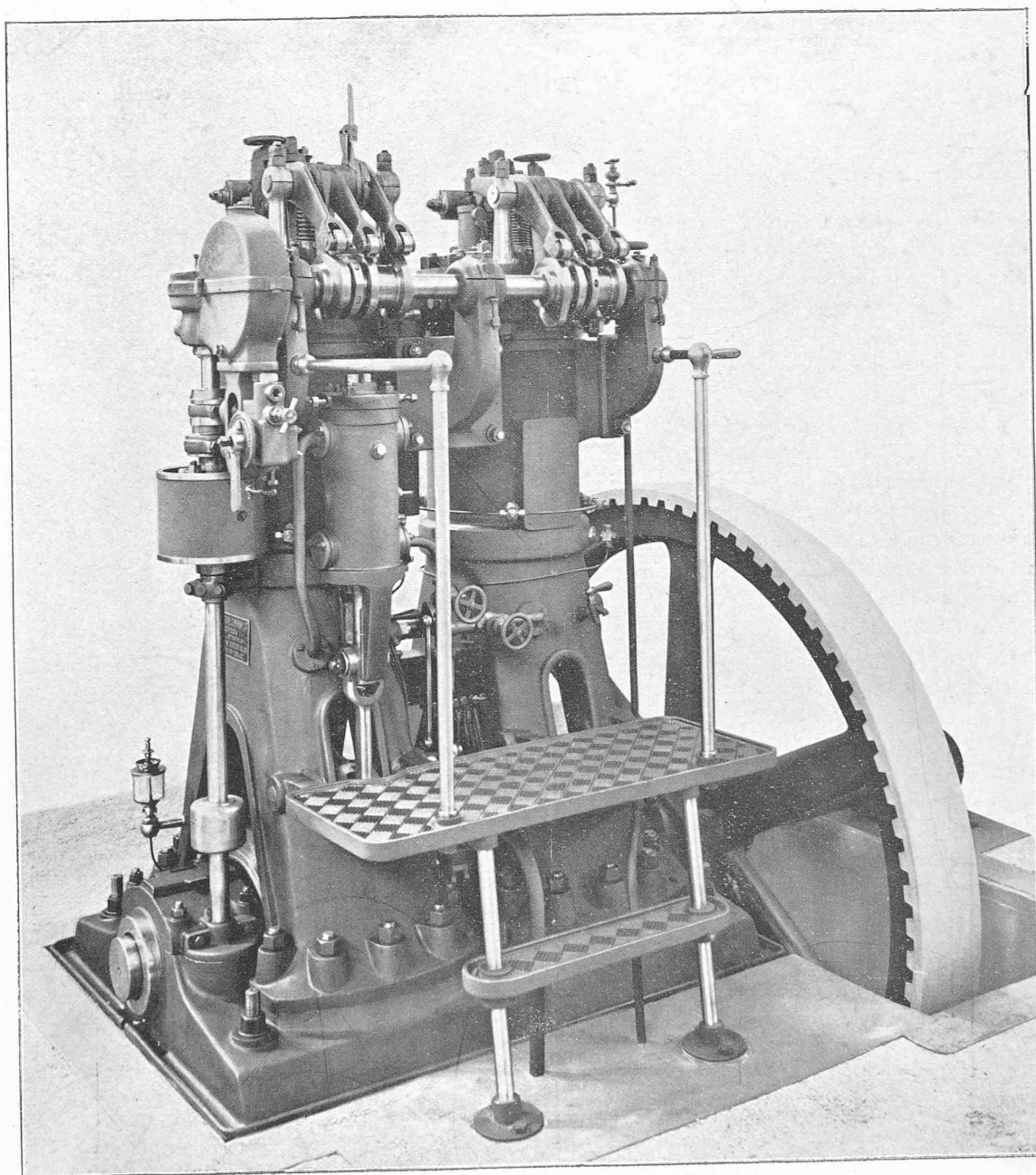


Fig. 9. — Moteur Diesel. — Coupes.
Construit par MM. Sulzer frères, à Winterthour.

une idée assez complète du moteur, sans qu'il soit nécessaire de le décrire dans tous ses détails. La grande pression exercée sur le piston nécessite une résistance considérable de tous les organes qui en dépendent, c'est ce qui explique la construction robuste de la machine, sans que pour cela elle ait un aspect massif et lourd.

Le manteau d'eau est compris entre le cylindre et la partie supérieure du bâti. Le cylindre lui-même est fondu à part en fonte spéciale et ajusté dans le bâti; il est retenu

par la boîte de distribution, qui contient la soupape d'aspiration d'air *A*, la soupape de combustible *B*, la soupape d'échappement *C* et une soupape *D* pour le démarrage; cette dernière est fermée pendant la marche normale du moteur. La commande des soupapes *A*, *B*, *C* se fait depuis l'arbre de distribution *S* par des cames soulevant des leviers coudés; des ressorts antagonistes ramènent les soupapes sur leurs sièges. L'arbre *S* est commandé par deux paires de roues hélicoïdales et par l'arbre vertical qui porte



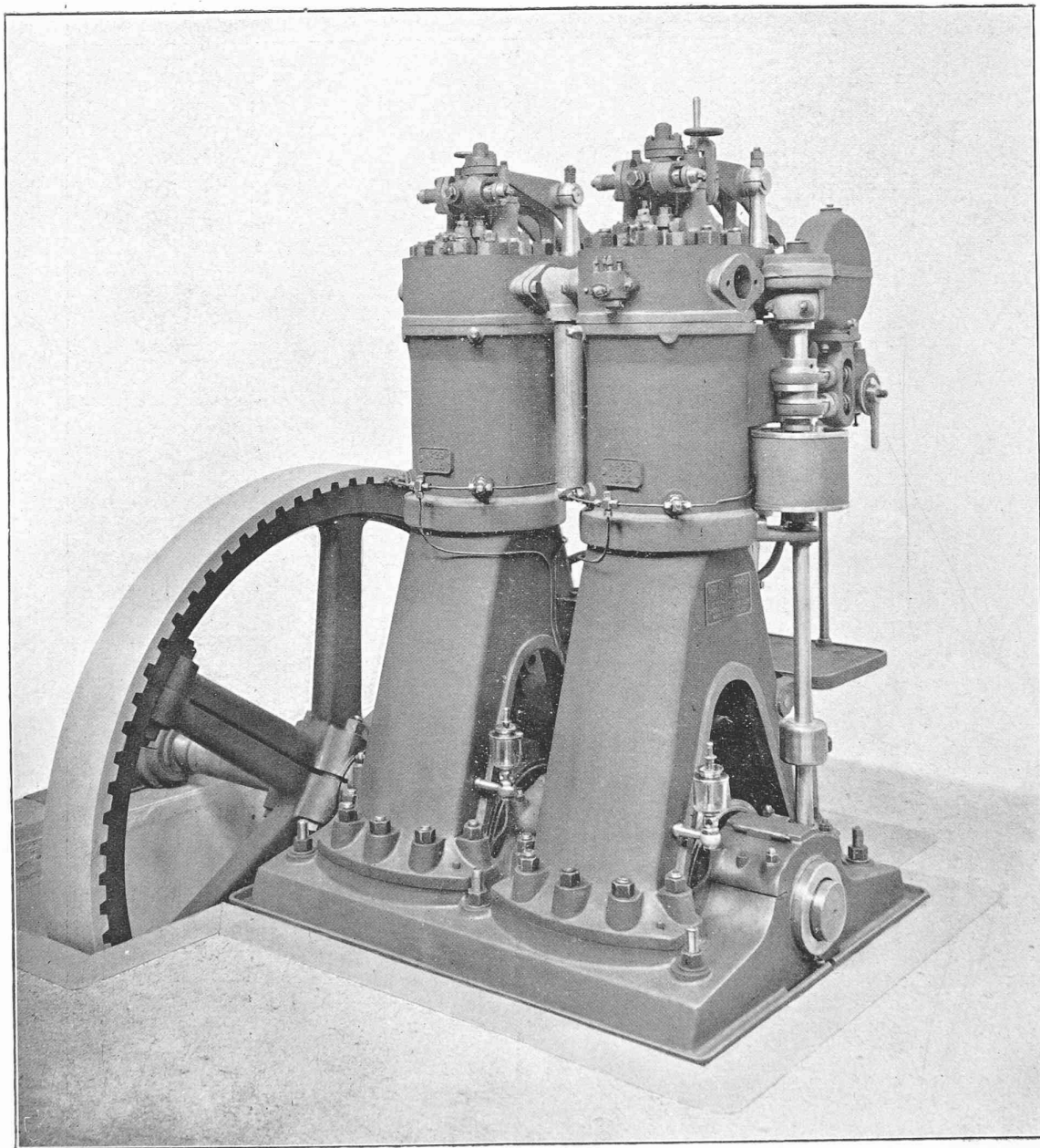
MOTEUR DIESEL

CONSTRUIT PAR MM. SULZER FRÈRES, A WINTERTHOUR

(vu de devant).

Seite / page

leer / vide /
blank



MOTEUR DIESEL

CONSTRUIT PAR MM. SULZER FRÈRES, A WINTERTHOUR

(vu de derrière).

Seite / page

leer / vide /
blank

le régulateur *R*. Celui-ci agit sur la soupape d'aspiration de la pompe du combustible *P* et en modifie la course suivant la puissance que doit développer le moteur; il règle ainsi la quantité de combustible admis. De la pompe *P* le combustible est amené au pulvérisateur *Z*, dans lequel il se mélange avec de l'air hautement comprimé; après avoir traversé un certain nombre de petits trous et des canaux étroits ménagés dans le pointeau de la soupape *B*, il arrive parfaitement pulvérisé dans le cylindre de travail. C'est le pulvérisateur qui constitue la partie la plus délicate du moteur. Si les canaux arrivaient à se boucher, la ligne d'admission du diagramme s'abaisserait et l'inflammation serait retardée. C'est pour cela que l'air qui sert à pulvériser le combustible doit arriver avec une pression bien supérieure à celle de la combustion. Cet air est comprimé à 50-60 atm. dans une pompe à deux étages; anciennement il était pris comme dans la figure 7 au cylindre de travail pendant la période de compression, au moment où celle-ci avait atteint environ 10 atm., puis il était comprimé complètement dans la pompe *L*, qui pouvait de ce fait avoir des dimensions assez restreintes. La pompe à air *L* est commandée par un levier prenant son mouvement sur la bielle motrice; elle est refroidie comme le cylindre de travail par une circulation d'eau. L'air servant à l'injection est d'abord expédié dans un réservoir en acier.

Pour faire démarrer le moteur, on se sert également d'air comprimé, qui est emmagasiné par le moteur lui-même dans des réservoirs spéciaux, d'où il est amené dans le cylindre par la soupape *D*. Ces réservoirs sont remplis pour la première fois dans les ateliers par le moteur lui-même au moment des essais, puis on les expédie chargés avec le moteur, qui est prêt à marcher, dès que son montage est terminé, sans aucun préparatif spécial.

Le graissage des paliers principaux se fait à l'aide de bagues, les autres parties frottantes principales sont graissées automatiquement par une pompe à huile.

La quantité d'eau nécessaire au refroidissement du cylindre de travail et de la pompe à air est très minime et ne comporte en moyenne que 12 à 15 litres par cheval-heure effectif.

Suivant la puissance des moteurs, leur nombre de tours varie de 150 à 300 par minute; mais, comme la consommation de combustible varie tout au plus de 25% des plus petits aux plus grands moteurs, on n'est pas obligé de construire de grandes unités centrales, par économie, ainsi que cela se fait de plus en plus pour les machines à vapeur, car ici les petites machines de 10 à 20 chevaux consomment par cheval-heure environ deux ou trois fois plus de combustible que les grandes machines de 2000-3000 chevaux.

LE MOTEUR DIESEL DE LA « VENOGÉ »

L'emploi de moteurs à combustion progressive ou instantanée pour la propulsion de bateaux nécessite des dispositions spéciales pour le renversement du sens de la marche, car jusqu'à présent le problème de leur réversibi-

lité n'a été résolu que par un moteur Diesel à deux temps à changement de marche, que MM. Sulzer frères viennent d'envoyer à l'Exposition de Milan, et que nous nous proposons de faire connaître à nos lecteurs dès que cela nous sera possible, ce moteur devant être établi sur un bateau de la Compagnie générale de navigation après l'Exposition.

La grande difficulté que l'on rencontre dans le passage d'un sens de rotation à l'autre est l'arrêt inévitable par lequel il faut passer. Or, si facilement que se fasse la mise en marche, le temps nécessaire à cette opération est encore trop long et ne permet pas de répondre aux exigences de la manœuvre d'un bateau, avec un moteur qui n'est pas réversible instantanément comme le moteur Sulzer que nous avons vu fonctionner à Milan.

Pour tourner la difficulté, on a été obligé jusqu'à présent d'employer des mécanismes permettant l'inversion du sens de rotation de l'hélice sans arrêter le moteur.

On a employé, à cet effet, soit l'hélice réversible, dont les pattes articulées peuvent être obliquées de façon à former un pas de vis droit ou gauche, soit des combinaisons d'engrenages et embrayages à friction, au moyen desquelles on obtient le renversement de marche de l'arbre de l'hélice. Ces mécanismes n'ayant pas paru présenter une sécurité suffisante, on a préféré employer, pour la « Venogé », un changement de marche électrique plus coûteux, mais plus sûr, d'après le système « Del Proposto ».

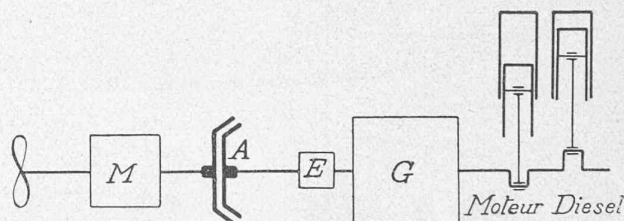


Fig. 10. — Schéma du changement de marche électrique de la « Venogé ».

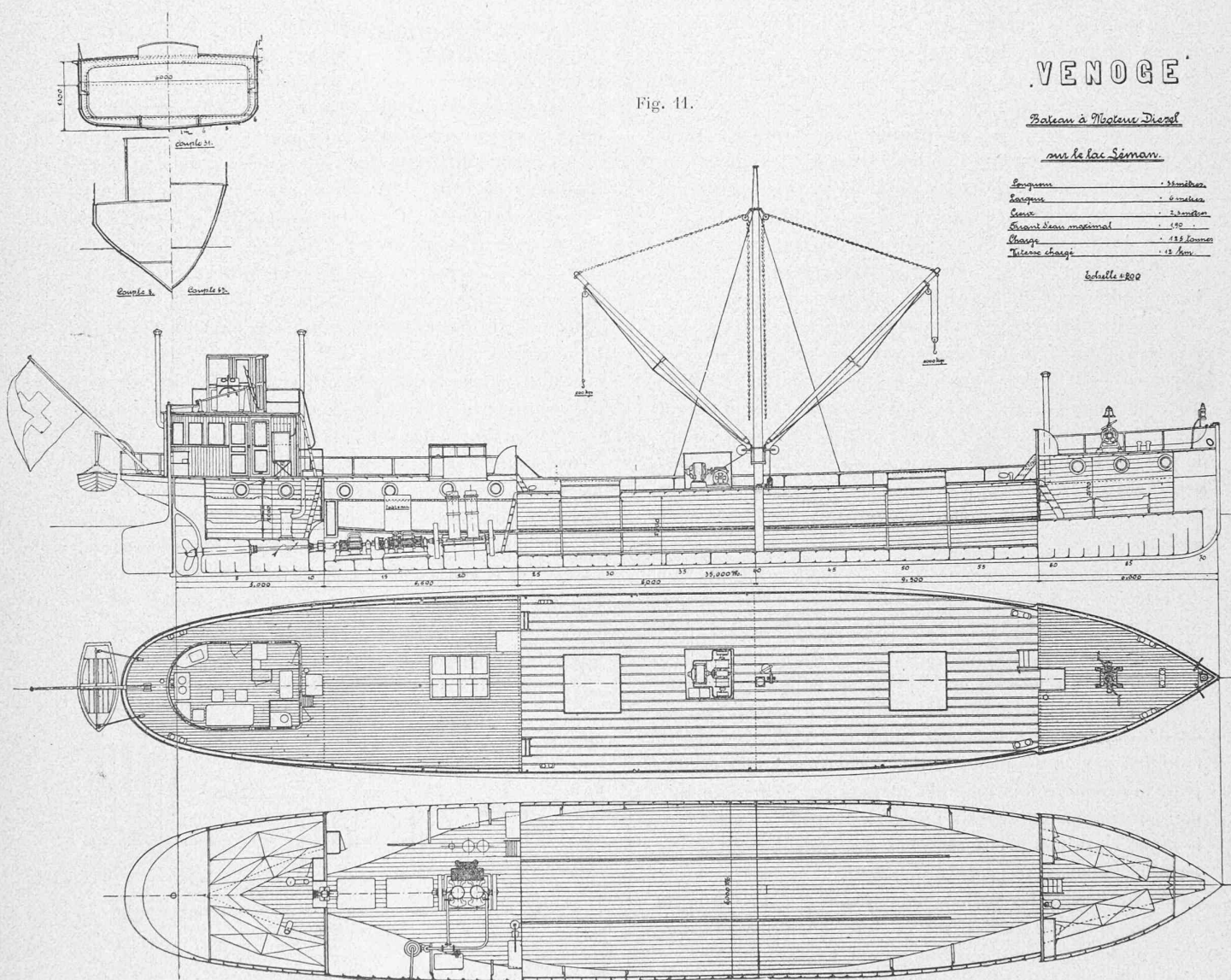
Ce changement de marche fonctionne de la manière suivante :

Le moteur Diesel actionne directement une génératrice *G* avec son excitatrice *E* placée sur le même arbre.

L'arbre de l'hélice porte un moteur électrique *M* et peut être accouplé à l'arbre du moteur Diesel par un accouplement magnétique. Dans ce cas, la génératrice *G* et le moteur *M* tournent à vide et l'excitatrice fournit le courant nécessaire à maintenir l'accouplement; l'hélice tourne en *avant*.

Pour faire des manœuvres, on débraye les cônes; la génératrice produit alors du courant qui alimente le moteur *M* à volonté en *avant* ou en *arrière*.

Pour faire marcher le bateau en avant en marche normale, il suffit d'attendre que les groupes générateur et moteur aient la même vitesse, puis de pousser à fond le levier de mise en marche pour que les cônes s'embrayent, tandis que les génératrices et le moteur se trouvent dés-excités. Le moteur Diesel commande donc directement l'hélice.



Toutes les opérations se font au moyen d'un appareil de mise en marche électrique commandé par un levier et placé à portée du timonier.

Quand le bateau est arrêté, la génératrice alimente le treuil électrique des deux grues de chargement.

La « Venoge » a une longueur de 35 m. entre perpendiculaires, une largeur de 6 m. au maître-bau et 2^m,30 de creux ; son chargement maximum est de 125 tonnes (fig. 41).

Le moteur Diesel du type de 40 chev. nom. a donné aux essais 48 chev. effectifs. L'installation électrique destinée uniquement aux manœuvres a été construite pour fournir normalement 20 chev., puissance qui peut être portée momentanément à 40 chev. ; on peut ainsi faire les manœuvres dans de bonnes conditions.

La vitesse du bateau est de 14 km. par heure à lège et de 12 km. en pleine charge. La consommation de masut s'élève à 10 kg. par heure.

Outre les cales à marchandises et la chambre des machines, le bateau contient les locaux nécessaires au per-

sonnel, soit cuisine avec petit bureau et W.-C. sur le pont, chambres d'équipage à l'avant et à l'arrière, sous le pont.

Les constructeurs, MM. Sulzer frères, à Winterthur, ont confié l'exécution de la partie électrique à la Compagnie de l'industrie électrique et mécanique, à Genève, tandis que la Compagnie générale de navigation se chargeait elle-même de la construction de la coque et des parties en bois.

Mise en œuvre au commencement d'octobre 1905, la « Venoge » a déjà effectué de nombreuses courses et donne toute satisfaction.

Nous terminons en remerciant tout spécialement M. H. Cornaz, ingénieur et directeur de la Compagnie générale de navigation sur le lac Léman, pour les précieux renseignements qu'il a bien voulu nous donner, et MM. Sulzer frères pour les clichés et photographies du moteur Diesel.