

NOTES DIVERSES

LE MOTEUR DIESEL

(DIESELS RATIONELLER WAERMEMOTOR)

PAR

EM. MASSON
ingénieur à Verviers.

[16214]

En 1893, l'ingénieur Rudolf Diesel, de Munich, annonçait l'invention d'un moteur à air chaud et combustible liquide (gazeux ou pulvérisé) utilisant un cycle de Carnot de rendement bien supérieur aux rendements connus, et devant restituer en travail utile 25 à 30 % de la puissance calorifique du combustible. Diesel étayait ses assertions de diverses considérations théoriques. Au point de vue du mineur, ce moteur présente la particularité remarquable d'être dépourvu de l'appareil d'inflammation des moteurs à pétrole.

Sa brochure fit à cette époque beaucoup de bruit et suscita de nombreuses discussions dans le monde savant, discussions qui renaissent actuellement à la suite des résultats pratiques obtenus.

On trouvera dans "*Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure*", 17 juillet 1897, les diagrammes caractérisant les six étapes de

perfectionnement du moteur d'essai, auxquelles furent consacrées les années 1893 à 97.

En 1897, un moteur de 20 chevaux, essayé par le professeur Schröter de l'École polytechnique de Munich (1), rendit en travail utile 26 % de la puissance calorifique du pétrole employé en consommant 250 grammes de pétrole par cheval heure effectif. Le moteur entraît dès lors dans la période d'application pratique. A l'Exposition " Kraft und Arbeits maschinen " de Munich 1898, le moteur Diesel était exposé par les firmes suivantes :

I. Maschinen fabrik A. G. Augsburg,	35 chevaux effectifs.
II. Fried. Krupp, Essen	35 " "
III. Maschinenbau A. G. Nürnberg	20 " "
VI. Gas motoren fabrik Deutz	20 " "

En France, ce moteur est construit par la Société Française des moteurs Diesel, à Bar-le-Duc.

Pour assigner à ce moteur sa place relative, parmi les moyens similaires de production de force motrice, voyons ce que rendent ces derniers.

Rappelons qu'un cheval heure = 270,000 kilogrammètres = 637 calories.

Une machine à vapeur consommant 1 kilogr. de charbon par cheval utile, charbon à 8,000 calories de puissance calorifique par kilogr., rend donc $\frac{637}{8,000}$ ou environ 8 % de cette puissance 8 p. c.

D'après le professeur Schröter, la machine de 700 chevaux à triple expansion, de la filtrerie Göggingen, fonctionnant à 10 atmosphères effectives, rend en travail utile 12.1 p. c.

La machine Schmidt de 76 chevaux, à haute surchauffe, à 350°, à 12 atmosphères effectives, rend, d'après le même professeur 13.19 p. c.

Ce faible rendement de la machine à vapeur provient en majeure partie du peu de différence des températures d'entrée et de sortie de la vapeur, comparati-

(1) Cet essai est reproduit R. U. M., 3^e série, t. XLI, mars 1898, p. 315 à 321, nous en donnons (p. 155) les résultats principaux.

vement à la température (absolue) d'entrée, rapport qui mesure le rendement du cycle de Carnot. Le rendement théorique de la vapeur dans la machine n'est que 0.300 à 0.328. (Le rendement de la chaudière peut être estimé à 0.80, celui du travail indiqué réel au travail indiqué théorique à 0,59 et le rendement organique à 0.85.)

Dans le *moteur à gaz*, l'explosion détermine une haute température, 1600 à 2000°, et l'on peut s'attendre à un rendement élevé du cycle de Carnot, mais l'obligation de refroidir les parois du cylindre afin d'éviter la décomposition du lubrifiant du piston, enlève la moitié de la chaleur disponible; et en s'échappant chauds encore, les gaz emportent environ le quart de cette chaleur. Un moteur consommant par cheval-heure utile 600 litres de gaz à 6000 calories par mètre cube, rend donc 17.7 p. c.

A 500 litres de gaz il rendrait 21.2 p. c.
rendement bien supérieur, mais on observera que le moteur à gaz consomme proportionnellement beaucoup plus à *mi-charge* qu'à charge complète (1).

Un moteur à *gaz de gazogène* consommant 0.7 kilogr. d'anhracite par cheval utile rendrait 12.6 p. c.

Un moteur à *gaz de hauts fourneaux* consommant 3 mètres cubes de gaz à 1000 calories 21 p. c.

Un *moteur à pétrole*, à 450 grammes de pétrole à 10,000 calories rendrait 14 p. c.

Ce dernier moteur présente le défaut du moteur à gaz à *mi-charge*; la consommation de pétrole s'élève alors de 600 à 1,000 grammes par cheval.

Le *moteur à air chaud*, de Benier, qui, suivant l'inventeur, consommerait 1.5 kilogr. de charbon rendrait. . . 5.3 p. c.

(1) Essai d'un moteur Charon (Witz, *moteurs à gaz*, p. 166).

A vide consommation	7 ^m 3,350.
10 chevaux utiles	9 ^m 3,540 ou 903 l. par cheval heure.
15 "	9 ^m 3,700 ou 611 " "
18 "	10 ^m 3,960 ou 522 " "
25 "	12 ^m 3,230 ou 406 " "
28 "	13 ^m 3,420 ou 458 " "

Avec un rendement de 26 % en travail utile, le moteur Diesel s'est donc placé, du premier coup, au premier rang des moteurs thermiques, et ne consomme guère plus à mi-charge.

*
* *

Avant d'énumérer les principes envisagés par son inventeur, rappelons brièvement le cycle du moteur à gaz ou à pétrole à quatre temps, genre Otto, cycle qui s'effectue une fois par deux tours. (V. fig. 1, p. 147.)

Premier tour :

a) *Aspiration* de l'air et du gaz en proportion convenable (1/6 à 1/10 de gaz) pour une bonne combustion.

b) *Compression* du mélange, au retour du piston, à la pression de 3 à 4 atmosphères. Cette compression est adiabatique (théoriquement).

Deuxième tour :

c) *Inflammation locale* du mélange et propagation de proche en proche, déterminant une subite élévation de pression à 15 à 20 atmosphères, pendant un court instant, puis *détente* théoriquement adiabatique à mesure que le piston progresse. Le refroidissement extérieur par circulation d'eau dans l'enveloppe du cylindre enlève moitié de la chaleur dégagée.

d) *Expulsion* des gaz brûlés sous pression peu différente de celle de l'atmosphère. Les gaz s'échappent à 400° au moins (1).

La réduction de rendement du moteur à gaz provient donc en majeure partie du refroidissement extérieur auquel oblige la haute température engendrée par l'inflammation subite du mélange. En vue de s'y soustraire, Diesel s'inspire des principes suivants :

I. La température de combustion ne doit pas être développée pendant cette combustion, mais avant qu'elle ne commence, et indé-

(1) Witz, t. I, p. 175.

pendamment de cette combustion. Il l'obtient par simple compression préalable de l'air comburant, avant introduction au cylindre. Le dispositif habituel d'inflammation locale deviendra superflu.

II. Au lieu de comprimer l'air suivant une isothermale jusqu'à 2 ou 4 atmosphères puis, suivant une adiabatique jusqu'à 30 ou 40 atmosphères, il abandonne l'isotherme, et comprime directement

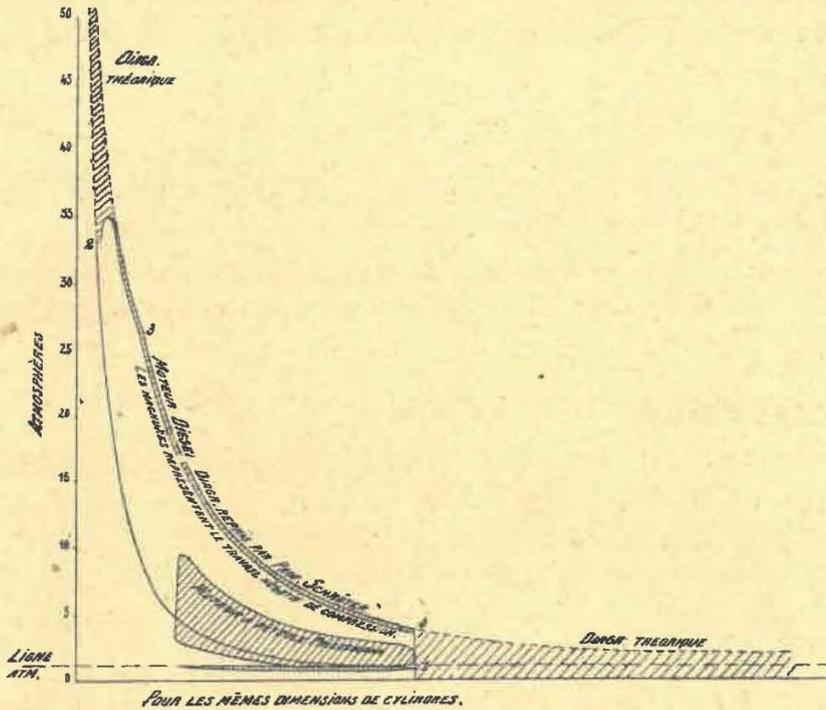


FIG. 1.

suivant l'adiabatique. Cette dérogation au cycle de Carnot, permet d'atteindre des températures exigeant autrement des pressions de 100 à 200 atmosphères.

L'application de la formule de compression adiabatique de l'air

$$t_2 = t_1 P^{0.29}$$

donne en effet :

30 atmosphères,	513° centigrades
40 "	581° "
50 "	638° "
70 "	731° "

III. *Introduction graduelle du combustible*, dans l'air comprimé porté à la température de combustion, de manière que cette combustion s'effectue pour ainsi dire à l'état naissant; le dégagement continu de chaleur compensant l'abaissement de température qui proviendrait de la détente, la combustion s'effectuerait sensiblement suivant une isothermale; la surélévation de température pendant la combustion serait minime ou nulle et le refroidissement extérieur pourrait être très réduit ou nul. Naturellement, le combustible doit être introduit à l'état gazeux, liquide ou pulvérulent.

IV. Le dernier principe, combustion avec un notable excès d'air, se trouve en désaccord avec les idées généralement reçues consistant à réduire au strict nécessaire cet excès d'air. Diesel préfère sacrifier un peu de chaleur emportée par le gaz pour assurer la combustion complète. — Notons du reste que Diesel désigne son moteur sous le nom de *Wärmemotor*, plutôt moteur à air chaud que moteur à pétrole.

Le diagramme théorique (fig. 2, p. 149) est construit d'après ces principes : l'air pur introduit au cylindre est comprimé suivant la courbe 1,2 avant introduction du combustible, à une température suffisante pour provoquer l'inflammation; le combustible est ensuite injecté, graduellement au cylindre et par suite du déplacement du piston et de l'expansion du mélange gazeux, la combustion s'effectue autant que possible suivant l'isothermale 2, 3, sans élévation notable de pression. L'introduction de combustible cessant, la détente se poursuit suivant la courbe 3, 4. A peine est-il besoin d'ajouter qu'en pratique, la pointe 2 du diagramme est supprimée et remplacée par un arrondi et que les courbes 2-3 différeront plus ou moins de l'isothermale. On reconnaît aussi qu'il est avantageux de supprimer la pointe 4, qui ne produit guère de travail et exigerait un cylindre très volumineux. Ces suppressions réduisent les dimensions des cylindres (1). Les lignes pointillées limitent les diagrammes obtenus au moteur d'essai.

Le même diagramme figure en même temps le procédé de

(1) La fig. 1, p. 147, montre les rapports de travail obtenus par de mêmes dimensions de cylindres pour un moteur à pétrole Priestman, un moteur Diesel et une machine à triple expansion.

réglage du moteur : on déplacera la courbe de combustion vers 3' ou 3'', en faisant varier de durée l'introduction du combustible.

On peut aussi modifier la hauteur du diagramme en commençant l'introduction du combustible en divers points de la ligne de compression.

Si la température moyenne du cylindre était maintenue à 800° et si les gaz pouvaient s'échapper à 20° (Diesel avait un instant pensé à une injection d'eau au cylindre) le rendement théorique du cycle pouvait devenir $\frac{800 - 20}{800 + 273} = 73\%$ au lieu de 30 environ pour la machine à vapeur et 60 pour le moteur à gaz.

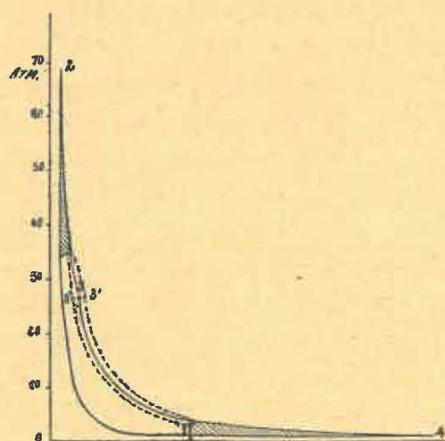


FIG. 2.

Les expériences de 1897 (où l'effet utile fut de 26 %) furent vivement critiquées et les contradicteurs trouvèrent qu'elles étaient loin d'appliquer les théories émises par Diesel, bien que les prévisions de bon rendement y fussent confirmées. — La fig. 5, p. 158, représente le diagramme réel obtenu : on y voit l'indication du point de détente 3. Le brevet Diesel fit en 1898 l'objet d'une demande en nullité, demande qui fut rejetée.

Nous nous bornerons à citer une remarque de M. Lüders : L'application rigoureuse des principes de Diesel à la construction d'un moteur de 100 chevaux aurait conduit à une machine produisant 800 chevaux de travail positif, dont il faut déduire 700 chevaux de travail négatif de compression de l'air, jusqu'à 250 atmosphères.

On trouvera des éléments d'appréciation pour et contre dans

les diverses publications dont nous donnons ci-dessous la liste (1).

En somme, le *moteur Diesel* comporte aussi quatre périodes effectuées sur deux tours; c'est donc un moteur à quatre temps, à simple effet.

Premier tour :

- 1° Aspiration d'air pur (et non d'un mélange);
- 2° Compression de cet air (et non d'un mélange) à 30 ou 40 atmosphères (et non à 2 ou 4 atmosphères);

Deuxième tour :

- 3° Introduction du combustible dans l'air fortement échauffé par la compression, combustion graduelle du mélange et détente des gaz.
- 4° Expulsion des produits de la combustion.

Un petit cylindre spécial est affecté à produire le supplément de compression de l'air et le foule à un réservoir.

Voici les dimensions des cylindres pour un moteur de 60 chevaux tournant à 200 tours par minute, muni de deux cylindres moteurs :

diamètre et course de 2 cylindres moteurs	0 ^m .30 × 0 ^m .46;
" " du cylindre compresseur d'air	0 ^m .10 × 0 ^m .23
(le $\frac{1}{18}$ d'un cylindre moteur);	
travail indiqué des cylindres moteurs :	95 chevaux
" " du compresseur, à retrancher :	6,3 chevaux

La figure 3 (p. 151) représente le schéma d'un *moteur Diesel monocylindrique*, avec sa distribution et la mise en train :

(1) Bibliographie concernant le moteur Diesel : *Théorie und konstruktion eines rationellen Wärmemotor, von Rudolf Diesel*, Berlin, Julius Springer. Publié aussi dans ZEITSCHRIFT DES VEREINES DEUTSCHER INGENIEURE, 1893, p. 291. — *Diesels rationeller Wärmemotor*, R. Diesel, Z. D. V. D. ING., 1897, p. 785, 817 et 845. (Résumé R. U. M., 3^e série, t. XLI). — *Essai du moteur Diesel de 20 chevaux*, par le prof. Schröter, Z. D. V. D. ING., 24 juillet 1897, traduit R. U. M., 3^e série, t. XLI. — *Critique du professeur Meyer*, Z. D. V. D. ING., 1897, p. 1108, traduit R. U. M., 3^e série, t. XLII, p. 130. — *Critique du prof. Köhler*, Z. D. V. D. ING., 1893, p. 1107. — *Critique de M. Lüders* (Aix-la-Chapelle), GLASERS ANNALEN, 1893, t. II, p. 68. — *Critique de M. Lüders*, Z. D. V. D. ING., 1898, p. 783. — *Mitteilungen über den Dieselschen Wärmemotor*, R. Diesel, Z. D. V. D. ING., 1899, p. 36 et 128.

B est l'arbre de distribution portant une série de cames commandant les soupapes d'entrée d'air, d'injection de combustible liquide, et d'échappement. Le même arbre sert aussi à la mise en train de la machine, en permettant l'introduction d'air comprimé venant du réservoir L. Il suffit pour cela de déplacer

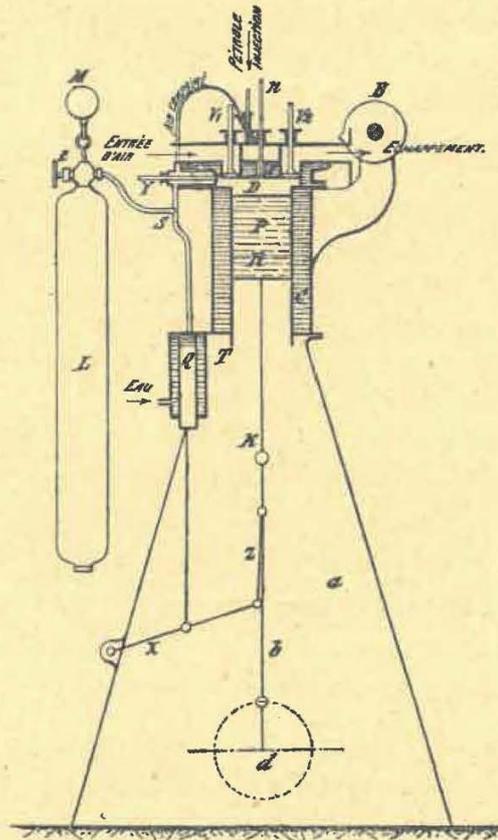


FIG. 3.

un petit levier spécial. Quand la machine a acquis la vitesse normale, le levier est remis en place, et la distribution actionne les soupapes d'admission d'air et de liquide.

Le cylindre est pourvu d'une enveloppe d'eau, le piston plongeur est muni de nombreux cercles graissés, la pompe de compression d'air Q est manœuvrée par un levier de réduction de course X et maintient dans le réservoir L une pression supérieure au maximum de compression du cylindre. Le tuyau S établit la

même surpression à l'intérieur de la soupape d'injection D. Dans cette dernière s'accumule le combustible liquide foulé par une petite pompe non figurée. A l'ouverture de l'aiguille *n* de l'injecteur, le pétrole s'échappe dans la chambre de compression du cylindre moteur, la période de combustion commence. La surface du diagramme dépend de la durée d'injection du combustible, de la surpression due au réservoir L, et de l'instant où commence l'injection.

En résumé, le piston agit en quatre temps comme dans un moteur à gaz ordinaire, le supplément de compression est donné par la pompe de compression et le combustible, au lieu de pénétrer en même temps que l'air, est injecté graduellement et pendant la période de combustion seulement.

Ce dernier point établit un rapprochement entre le moteur Diesel et la machine à vapeur.

En présentant son moteur à la Commission d'essai et de recherche d'appareils fumivores, Diesel a complété sa théorie par des *explications d'un caractère plus pratique* qui peuvent se résumer ainsi :

Le mode suivant lequel s'effectue la combustion, dans un moteur à gaz, dépend des proportions relatives d'air et de combustibles, de la température des produits en contact, de leur pression, de leur combustibilité, etc., etc., et des influences extérieures telles que température des parois, état et degré d'intimité du mélange d'air et des particules combustibles, forme sous laquelle le combustible est utilisé, vitesse de propagation de l'inflammation, etc.

Quelques règles générales, bien reconnues dans l'industrie, applicables ici aussi, servent à établir les sept points suivants :

a) Dans le chauffage des chaudières et des appareils à gazogènes, on observe combien le degré de perfection de la combustion dépend de l'intimité du mélange du combustible et du comburant, et de leur température ; conclusion :

1° *Division aussi grande et mélange aussi intime que possible de l'air et du combustible ;*

2° *Porter l'air destiné à la combustion à une haute température.*

Dans le moteur Diesel, la dispersion et la répartition uniforme du combustible dans l'air, résultent de son introduction sous surpression élevée, au fond du cylindre et dans la direction du mouvement ; la pulvérisation et le brassage persistant du mélange

occupant la chambre à combustion sont en tout point favorables à une bonne combustion.

La *compression préalable* porte l'air comburant à une haute température, atteignant 800°, bien supérieure à la température d'inflammation des combustibles employés. Le mélange se trouve aussitôt à un état de combustion parfaitement en train : il n'a pas à subir de " stage préparatoire " pour développer une température d'inflammation.

Ajoutons que la *durée de la combustion* dépend uniquement de la durée d'introduction et peut être réglée automatiquement par la *distribution* (comme l'*admission* d'une *machine à vapeur*).

b) Les *combustibles liquides* dérivés du pétrole sont des mélanges plus ou moins *complexes* d'hydrocarbures distillant et s'enflammant à des *températures différentes*. Si, comme dans les moteurs à pétrole ordinaires, on les fait séjourner dans un appareil *vaporisateur*, il s'opère une séparation des particules très volatiles, aisément inflammables, et des gouttelettes lourdes, brûlant difficilement. Ce mélange *hétérogène* étant introduit au cylindre, refroidi par enveloppe d'eau, les particules légères se comburent immédiatement et la partie des huiles lourdes s'abattant aux parois rafraîchies, ne pourra plus brûler. Cet effet s'accroîtra encore par l'introduction d'*air froid* au cylindre. La chambre à combustion, et les gaz de décharge seront *souillés* par ces produits de combustion incomplète. Les gaz d'échappement seront malpropres, fuligineux et d'odeur désagréable, conclusion :

- 3° *Pas de vaporisation préalable* du combustible liquide ;
- 4° *Pas de mélange préalable* du combustible et de l'air froid ;
- 5° *Pas de contact du combustible avec les parois* plus ou moins froides du cylindre.

Dans le moteur Diesel, chaque gouttelette de combustible forme *un tout*, échappant à la distillation préalable. La *pénétration subite du liquide* dans l'air surabondant, fortement échauffé, prévient la séparation en produits volatils et lourds, la combustion est immédiate et complète. Ceci explique pourquoi, dans ce moteur, les huiles brutes et les mélanges brûlent aussi bien et mieux même que les produits distillés.

La *haute température* de l'atmosphère comburante de la chambre de combustion détermine la combustion immédiate des particules liquides avant qu'elles aient pu atteindre les parois.

c) Dans les moteurs ordinaires, l'inflammation du mélange

explosif est *localisé* au fond du cylindre en *un point* seulement, par flamme, tube incandescent ou étincelle électrique. L'*inflammation* se *propage* de proche en proche avec une vitesse de 0^m.25 à 1^m.25 (Witz, t. I, p. 164) relativement faible et dépendant :

- 1° de la proportion du mélange ;
- 2° de l'*état de division* du combustible, car les particules les plus grosses et les plus lourdes ne prennent relativement qu'une faible part à la combustion ;
- 3° de la *puissance calorifique* du combustible ;
- 4° de la *pression* sous laquelle se produit l'inflammation ;
- 5° et tout particulièrement de la *température* du mélange au moment de son inflammation.

Si on parvient à régler le moteur à gaz d'éclairage par une compression et un mélange favorable presque constant, il n'en est plus de même avec les moteurs à gaz pauvres, à faible vitesse d'inflammation. Une modification de régime occasionne aisément des irrégularités et des troubles. En conséquence,

6° *Indépendance aussi complète que possible de la période de combustion et de la vitesse de propagation de l'inflammation.*

Ce but est atteint dans le moteur Diesel en injectant chaque parcelle de combustible dans une atmosphère très chaude complètement préparée pour sa combustion, où elle rencontre toutes les conditions nécessaires pour brûler. Elle n'aura pas à attendre l'inflammation préalable des molécules voisines, et les circonstances locales de propagation de l'inflammation seront sans effet.

d) Dans les moteurs ordinaires, il est reconnu que la combustion est favorisée par la *compression préalable* du milieu gazeux, compression qui correspond à un rapprochement des molécules, facilite la pénétration des particules isolées dans l'air ambiant. Une haute pression marque un acheminement vers la combinaison chimique et exerce sur la combustion une influence très favorable dont on trouve un exemple dans l'obus de Mahler servant à déterminer la puissance calorifique des corps. — Les essais du premier moteur Diesel ont fait vérifier l'exactitude de cette dernière condition.

7° *Etablir une pression aussi élevée que possible avant l'inflammation.* C'est un des caractères principaux du moteur Diesel et l'échauffement préalable de l'air provoqué par la compression, dispense des appareils d'inflammation des moteurs à gaz et pétrole, appareils exposés à détérioration et ratés.

Afin d'apprécier la portée pratique de ces considérations, résumons les résultats d'essai du moteur Diesel de 20 chevaux essayé en 1897 par le professeur Schröter de Munich (1).

MOTEUR DE 20 CHEVAUX 1897

Pétrole de densité 0.7955 à 10.206 carolies

	A pleine charge.		A mi-charge.	
	I	II	III	IV
Travail effectif au frein de Brauer	19.87	17.82	9.58	9.84
	- 19 -		- 9.5 -	
Rendement organique . .	74.8	75.5	57.8	59.6
Consommation de pétrole par cheval effectif . . .	247 gr.	238	278	276 grammes
	242		277 gr.	
La plupart des moteurs à pétrole consomment . .	450		600 - 1000	
Températ° des gaz d'échappement	404°	378°	260° - 260°	
Pression au réservoir, k ^{c2} .	41	42.7	39.6	39.5
Quantité d'eau de refroidissement env.	1 ^{m3} .500 = 75 litres par cheval			
Excès d'air	26 %		116 %	

Le *Bilan thermique* du moteur s'établit comme suit :

Chaleur disponible	100	100	100	
Enlevée par l'eau de refroidissement.	39	40.3	38.9	37.9
	- 40 -		- 38 -	au moteur à gaz
Enlevée par les gaz d'échappement .	21	18.5	20.3	20.5
	- 29.5 -		- 20.4 -	contre 25
Perte, erreurs . . .	7 %	6.5 %	?	3
Travail indiqué . . .	33.7 %	34.7 %	38.9 %	37.9 %
— effectif	25.2	26.2	22.5	22.6
				contre 17 à 20 p.c.

La fig. 4, p. 157, représente divers diagrammes obtenus avec ce moteur d'essai.

* * *

(1) R. U. M., 3 série, t. XLl.

Cet exposé général terminé, reprenons point par point *les caractéristiques du moteur Diesel*, telles que nous les extrayons des divers travaux et certificats d'essai, car nous n'avons pas eu l'occasion de voir fonctionner ce moteur. Nous examinerons successivement le rendement théorique, la consommation à pleine et à mi-charge, le réglage de vitesse, la mise en train, le graissage, la quantité d'eau de refroidissement, la continuité de fonctionnement, la facilité de conduite, les combustibles que ce moteur peut utiliser et les produits de combustion.

A. *Comparaison au rendement de la vapeur.* — Nous pouvons estimer le rendement calorifique e_1 de la chaudière, à 0.8 pour une installation importante et bien soignée; pour les moteurs à explosion et Diesel, l'absence de chaudière donne l'unité pour ce rendement.

e_2 désignant le rendement théorique du moteur considéré.

e_3 le rapport du travail indiqué réel au travail indiqué théorique.

e_4 le rendement organique du moteur.

Le produit $e_1 \times e_2 \times e_3 \times e_4$ de ces différents rendements nous donne le *rapport du travail utile retiré au pouvoir calorifique du combustible dépensé*.

Ce produit est :

Moteur Diesel, 1×0.50 à 0.70×0.70 à 0.80×0.71 à $0.75 =$

Soit, pour le moteur d'essai : $1 \times 0.50 \times 0.72 \times 0.74 = 0.266$.

Mot. à vapeur 700 ch. : 0.8×0.30 à $0.33 \times 0.59 \times 0.85 = 0.12$ à 0.13 .

Le *rendement pratiquement* obtenu par un moteur de 20 chevaux est donc double de celui d'une machine à vapeur de 700 chevaux⁽¹⁾. Ce résultat, certainement très encourageant, ne dispense pas, bien entendu, de tenir compte de la valeur relative des combustibles employés, charbon d'une part, pétrole lampant ou pétroles bruts de l'autre.

Nous en dirons un mot plus loin.

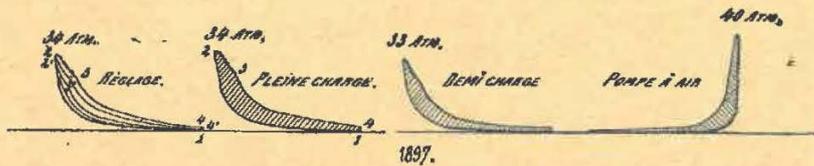
B. Un autre point nous frappera : la *consommation à mi-charge* n'est guère augmentée : 277 grammes contre 242. Le moteur Diesel présente encore de ce côté une analogie avec le moteur à vapeur,

(1) On est même arrivé, paraît-il, à une consommation de 210 grammes, soit un rendement de 31 %.

tandis que la consommation par cheval-heure du moteur à gaz ou à pétrole augmente beaucoup à mi-charge. C'est un point très important.

Un certificat d'essai de Ludwig Nobel, du 15 février 1899, relatant les consommations de naphte brut par cheval-heure effectif donne les chiffres suivants :

5 chevaux	10	15	20	25	30 chevaux
650 grammes	400	330	280	270	260. par cheval



(Diagrammes : fig. 4.)

C. *Combustibles appropriés.* — Ce moteur fonctionne avec *tous combustibles liquides et résidus*, tandis que les moteurs à pétrole ne consomment que du pétrole lampant ou de la benzine.

On a essayé avec succès ;

1° Les *benzines* de densité inférieure à 0.79 (puissance calorifique 10,400 calories) ;

2° Les *pétroles lampants* de densité 0.79 à 0.815, à 10,200 calories environ, qu'ils soient bien ou mal distillés, de provenance quelconque ;

3° Les huiles solaires (*solaröl*) provenant de la distillation des lignites ;

4° Les huiles lourdes extraites des naphthes ou pétroles, de densité supérieure au pétrole lampant, moyenne 0.85. Ces huiles sont connues en Amérique sous diverses désignations : *fuel oil*, *Lima fuel oil*, *gas oil*, *eagle oil*, etc., et ont servi au chauffage de chaudières de l'Exposition de Chicago. La *Lima fuel oil* (Ohio) dégage une très mauvaise odeur qui limite beaucoup ses emplois et a fait tomber son prix à 1.8 centime le litre ; au moteur Diesel elle fonctionne convenablement et les produits de combustion sont inodores ;

5° Les *huiles brutes* américaines et californiennes, les huiles brutes allemandes d'Elheim (0.87-0.88), les naphthes bruts des sources de Nobel frères (densité 0.871, 10175 calories) produits visqueux et colorés.

Le rapport du professeur J. E. Denton, de *Stevens Institute of Technologie*, Hoboken N. J., mentionne des consommations d'huile brute de Californie (0.846 à 10750 calories) de 284 et 318 grammes par cheval heure utile, à pleine et mi-charge, pour un moteur de 20 chevaux fonctionnant 30 heures sans interruption; pas de dépôt au cylindre; gaz de décharge propres, ne salissant pas le papier blanc. Seule différence avec le pétrole lampant, parfois une petite explosion à la mise en train.

Les consommations de naphte brut de Bakou (0.877) vieux d'une année, d'un moteur de 30 chevaux, sont données au rapport Nobel rappelé plus haut. Ce rapport recommande l'insertion d'un filtre sur l'arrivée de naphte brut. A ce taux la consommation de pétrole

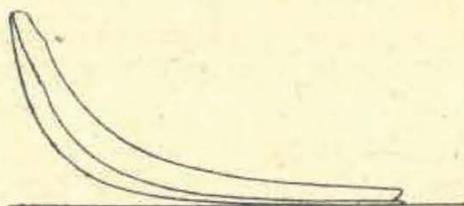


FIG. 5.

par cheval heure serait de 0.7 Kopek. (1.8 centime) à Saint-Pétersbourg.

6° Les *résidus de distillation* des naphtes, dits *masuts*, très épais, de poids spécifique 0.905, très largement utilisés en Russie au chauffage des chaudières de bateaux, locomotives, usines et même de foyers métallurgiques, dont le prix, très bas, a plutôt tendance à se relever par suite de l'extension de leur consommation.

7° L'*alcool du commerce* à une teneur en eau de 5 à 15 % est utilisable également. (Les alcools dénaturés ont un pouvoir calorifique d'environ 5,800 calories par kilogr. soit un peu plus de moitié des pétroles).

8° L'inventeur prévoit l'utilisation, par son moteur, de charbon pulvérisé, de gaz d'éclairage ou de gazogène; il rapporte que l'un de ses moteurs d'essai, de 12 chevaux, a longtemps fonctionné au gaz.

L'utilisation, dans des conditions économiques, de combustibles aussi variés, et la propreté des gaz de décharge peuvent être considérés comme preuves de combustion rationnelle.

L'attention des constructeurs du moteur Diesel s'est naturel-

lement portée tout d'abord sur l'utilisation de combustibles dispensant d'installations spéciales et surtout de combustibles refusés pour le moteur à pétrole ordinaire.

D. *Régularisation de la vitesse.* — Par analogie avec la machine à vapeur à détente variable, la régularisation de la vitesse est basée sur la durée variable de l'admission de combustible : la pompe à pétrole peut débiter le liquide dans deux directions, soit vers l'injection au moteur munie de soupape de retenue, soit vers une soupape de retour au réservoir. Tant que cette dernière soupape est libre de se soulever, la pompe marche à blanc. Quand l'admission doit commencer, une tige descendante vient caler la soupape de retour ; la soupape de retenue est alors soulevée contre la pression d'air régnant dans l'injecteur. Cette tige descendante est séparée en deux pièces entre lesquelles s'intercale un coin ressemblant au coin Hertay ; placé par le régulateur, ce coin fait varier la longueur totale de la tige et prolonge ou réduit l'admission. Un régulateur quelconque de commerce suffit, paraît-il. Ces moteurs sont assez réguliers pour conduire des dynamos. On les munit alors de deux cylindres moteurs et de deux volants.

E. La *mise en train*, qui constitue une des sujétions désagréables des moteurs à gaz, se trouve ici simplifiée par la présence d'un réservoir d'air comprimé à 30 à 40 atmosphères, toujours prêt à fonctionner. Une came de distribution spéciale admet 15 à 20 % d'air comprimé au cylindre ; le piston reçoit une impulsion suffisante pour quelques révolutions. Dès la seconde, le combustible peut généralement être admis.

Mais si le moteur doit démarrer sous charge, 3, 4, 5 révolutions deviennent nécessaires, et la pression du réservoir s'abaisserait à un taux insuffisant pour l'injection du combustible. Dans ce cas, le moteur est muni d'un second réservoir d'air comprimé entrant en jeu au gré du machiniste, après quelques révolutions. Ce second réservoir peut aussi servir en cas de mise en train ratée.

Dans l'un des types, la distribution se place automatiquement en position normale après un certain nombre de tours de mise en train.

F. *Propreté des gaz de décharge.* — Les certificats affirment que les gaz de décharge sont presque inodores et ne souillent pas des feuilles de papier blanc ; ce fait est important, non seulement

au point de vue du bon rendement résultant d'une bonne combustion complète, mais aussi au point de vue de l'installation de force motrice dans les villes. Ce moteur serait aussi peu bruyant.

G. *Continuité de fonctionnement.* — Un moteur de 60 chevaux a fonctionné sans interruption pendant *douze* jours consécutifs à Anheuser Busch Brauerei, Saint-Louis, U. S. Ce moteur actionnait un dynamo de 120 volts.

Voici le détail de l'essai :

La consommation par cheval-heure indiqué n'a pas sensiblement varié. 0,168, 0,1696 et 0,159 grammes (à mi-charge) d'huile désignée sous le nom de "Dieselmotor brennöl". On lisait la consommation tous les cinq minutes et on relevait des diagrammes tous les quarts d'heure.

La machine avait auparavant fonctionné pendant cinq jours consécutifs.

Le rendement de la dynamo (ancienne Edison 1882) étant estimé à 82% par le constructeur, et la perte par la courroie à 10%, le travail disponible sur la poulie, pour la première expérience aurait été de $\frac{46.6}{0.82 \times 0.90} = 63,3$ chevaux et le rendement organique du moteur $\frac{63.3}{88.5} = 71.5$ % ; la consommation d'huile par cheval-heure utile aurait donc été de 235 grammes.

H. *Facilité de conduite.* — Les attestations certifient que la conduite du moteur Diesel est aisée, qu'un machiniste ne possédant aucune connaissance technique s'est mis rapidement au courant de la direction du moteur.

N'ayant pas eu l'occasion de voir ces moteurs, nous devons nous abstenir de toute appréciation à cet égard, en observant que, sauf la pompe de compression, ce moteur ne paraît pas plus compliqué que le moteur à gaz et au pétrole.

Il semblerait même que, l'explosion étant moins brusque, dans ces moteurs, que dans les moteurs ordinaires, leurs organes doivent moins souffrir des chocs et exiger moins d'attention du conducteur.

I. *Graissage.* — La consommation de graisse des moteurs à gaz et à pétrole est relativement importante. Les renseignements à leur égard sont rares, et doivent naturellement varier dans une large mesure. Dans Witz, t. I, p. 213, nous trouvons une consommation de 160 grammes d'huile par heure pour un moteur Simplex déve-

loppant 7 à 9 1/2 chevaux, soit environ 20 grammes par cheval heure.

Dans un travail sur moteurs de son système, Koerting estime la consommation de lubrifiant à 0.4 à 0.25 centimes pour 10 à 50 chevaux, ce qui correspondrait à 8 à 5 grammes par cheval heure utile.

Witz cite (t. I, p. 419) dans une comparaison de machine à vapeur et moteur Simplex à gaz Dowson de 75 chevaux (comparaison concluant à l'avantage économique du dernier avec des charbons à 30 francs environ) une consommation constatée en essai de 3 gr. 74 d'huile à 65 francs et de 4 gr. 5 graisse à 1 fr. 50 par cheval heure effectif.

Quant au moteur Diesel, nous ne possédons que l'attestation de MM. Rugendas et C^{ie} d'Augsbourg disant que la consommation de lubrifiant par cheval heure utile de leur moteur de 50 chevaux ne dépasse pas 6 à 8 grammes.

Le moteur Diesel présente la particularité que les cercles de piston seuls sont graissés, au moment où ils viennent se présenter, au bas de course, devant des lumières pratiquées dans le cylindre, par lesquelles un graisseur Mollerup introduit le lubrifiant sous pression.

J. La consommation d'eau de refroidissement est extrêmement variable, suivant les moteurs et suivant l'élévation de température accordée à cette eau. Le moteur d'expérience de 20 chevaux de M. Schröter a consommé 70 litres, et celui de même force de M. Denton 36.6 litres par cheval heure effectif, tandis que l'on trouvera dans l'ouvrage de M. Witz des consommations de 20 à 80 litres et plus pour moteur à gaz. Puisque la quantité de chaleur emportée par l'eau, dans le moteur Diesel, est moindre (40 p. c. contre 50 p. c.) on doit s'attendre à une consommation d'eau relativement moins élevée.

K. *Coût du cheval-heure utile.* — Il serait téméraire d'émettre des appréciations générales au sujet du coût du cheval-heure utile, fourni par le moteur Diesel, car les éléments d'appréciation varient dans une très large mesure.

Dans l'établissement du prix de revient, il faut tenir compte, à côté des consommations directes et de la main d'œuvre, des frais d'amortissement de l'installation, ce qui présuppose la notion de la durée probable du moteur.

Afin de permettre aux lecteurs tentés de faire cette comparaison dans tel ou tel cas particulier, nous donnerons les éléments suivants :

Prix du moteur fixe de 15 à 90 chevaux, d'après le tarif 1899, de Maschinenfabrik Augsburg :

Monocylindrique, chevaux	15	25	35	45
Marks	9,500	13,500	18,500	21,500
Deux cylindres, chevaux	30	50	70	90
Marks	19,000	24,000	32,500	38,000

Les moteurs à grande régularité possèdent deux cylindres et deux volants.

Comme le moteur est vertical du type pilon, il occupe relativement peu de place (v. p. 150 des dimensions de cylindre). Le réservoir d'huile peut être placé à distance. La décharge est, paraît-il, inodore, incolore et presque silencieuse.

Les *frais annuels* à diviser par le nombre d'heures de fonctionnement et la puissance moyenne comportent :

1° *Intérêt et amortissement*, à déterminer ;

2° *Personnel*, d'après des tableaux comparatifs de Koerting, constructeur de moteurs à gaz et de gazogènes, il serait analogue à celui du moteur à gaz. 250 marks pour 25 chevaux, 500 pour 50 chevaux, 1000 marks pour 100 chevaux ;

3° *Graissage*. Nous en avons cité un chiffre ci-dessus, 6 à 8 grammes par cheval-heure utile, pour 50 chevaux ;

4° *Entretien*. Koerting le compare aussi à celui du moteur à gaz (2 p. c. par an) ;

5° *Consommation de combustible* par cheval-heure effectif.

Les constructeurs garantissent un maximum de 250 grammes de pétrole par cheval-heure effectif, et si la machine fonctionne fréquemment à mi-charge, on observera que la consommation du moteur Diesel n'augmente guère.

250 gr. de pétrole à 16 centimes représentent 4 centimes par cheval.		
„ à 22.5 (Allemagne, droit 9,5)	5.6	„
„ masut à 4 centimes	1.00	„
„ huile brute à 7 c. (St-Pétersbourg)	1.75	„

On voit par ces quelques chiffres pris au hasard et dépendant de cours soumis à fluctuations importantes, combien les frais directs varient suivant les conditions locales.

On trouvera dans ZEITSCHRIFT DES VEREINES DEUTSCHER INGENIEURE, du 25 février 1899, n° 8, un article de M. John Körting, de Hanovre, où se trouvent dressés des tableaux comparatifs de prix de la force motrice, pour machines à vapeur, moteurs à gaz, moteurs à gaz de gazogène de 10 à 400 chevaux, et moteurs Diesel de 25 à 100 chevaux, pour les cas de 3,000 heures d'exploitation annuelle et 1,500 heures. Si l'on prenait les résultats de ces tableaux, on verrait que, pour une consommation de force motrice de 3,000 heures annuelles, et pour un travail effectif de

Travail effectif 10 chev. 25 chev. 50 chev. 100 chev. 200 chev. 400 chev.

le coût du cheval heure utile serait de :

Vapeur 20 ^c	14.7	10.2 ou 8.8	7.5 ou 6.5	5.4	4.3
Gaz d'éclairage . . . 9	7.1	6.5	6	5.6	5.2
Gaz de générateur . 14.4	7.9	5.9	4.5	4	3.4
Moteur Diesel. . . .	8.2	7.8	7.2		centimes

et pour 1500 heures à

Vapeur 25.6	17.4	12.8	9.6 — 8.6	7.1	5.7
Gaz d'éclairage . . . 11.5	8.9	7.9	7.2	6.5	6
Gaz de générateur . 17.8	10.4	8	6	5.2	4.4
Moteur Diesel. . . .	11.25	10.5	9.5		centimes

avec des consommations par cheval heure utile de :

Charbon à 25 fr. . . . 2.85 kg.	2.5	2 — 1.5	1.3 — 1	0.9	0.7 k.
Gaz à 10 cent. 500 l.	450	400	400	400	400 litres
Anthracite à fr. 32.50	0.75 kg.	0.67	0.55	0.55	0.55 k.
Solaröl à 16 cent. . .	0.25 k.	0.25 kg.	0.25 k.		

des prix de premier établissement de fr. :

Machine, chaudière, cheminée, tuyau- terie (bâtiments, sans le terrain) . . .	11,000	20,000	33,000	53,000	87,000	142,000
Gaz d'éclairage	6,700	11,000	20,000	31,000	51,000	83,000
Gazogène	11,600	18,000	30,000	44,000	70,000	113,000
Diesel		20,000	34,000	60,000	(d'après prospectus)	

et un intérêt de 4 1/2 %, un amortissement de 7 % sur la partie mécanique et 2 1/2 % sur les constructions, amortissement uniforme pour les divers systèmes, leur supposant donc durée égale et même entretien, ce qui paraît assez risqué.

Un coup d'œil jeté sur ces chiffres, notamment ceux relatifs à la machine à vapeur, prix et coût du charbon, montrera de suite combien leurs conclusions sont loin d'être applicables, d'une manière générale, à bien des pays (1).

En ce qui concerne les chiffres portés pour le moteur Diesel, on observera la forte part de l'amortissement dans l'estimation du coût du cheval-heure. On fera en outre, pour ce moteur, et dans une certaine mesure pour la machine à vapeur, l'observation que la consommation par cheval n'augmente guère à mi-charge, tandis que les moteurs à gaz et pétrole sont loin de présenter cet avantage.

En résumé, indépendamment de l'intérêt théorique qu'il excite, le moteur Diesel présente à un haut degré les qualités du moteur à pétrole, facilité, propreté, absence de transports de charbon et de cendres, de chaudière, des dangers qu'elle entraîne, absence de fumée, il est dépourvu d'appareil d'inflammation.

De plus, les gaz de décharge sont, paraît-il, incolores et inodores. Le moteur convient donc à l'intérieur des villes et, peut-être, de certaines mines.

Comme *avantage économique* sur le moteur à pétrole, sa consommation est environ moitié moindre, n'augmente pas sensiblement à mi-charge, et il utilise les huiles brutes, huiles lourdes et résidus de distillation.

A ce point de vue un grand avenir peut lui être réservé à proximité des lieux producteurs ou distillateurs de combustibles liquides. Le poids de combustible à transporter n'étant que le quart de celui du charbon, il offre une facilité pour les industries du transport.

Les petits moteurs ne consomment guère plus que les gros, de sorte qu'il fournit une solution de la décentralisation de la force motrice dispensant de courroies, câbles ou transmissions électriques, et permettant d'écarter les ateliers les uns des autres.

E. MASSON.

(1) Le BULLETIN DE LA SOCIÉTÉ INDUSTRIELLE D'AMIENS, mars 1899, contient une lecture critique de M. E. Schmidt relative aux tableaux du prix de force motrice de 4 à 1000 chevaux combinés par M. Eberlé d'où M. Koerting a extrait ses renseignements.

TENEUR MOYENNE DES MINÉRAIS EXTRAITS OU CONSOMMÉS

EN BELGIQUE

I. — Minerais extraits en Belgique.

Oligiste oolithique	Fer	37 à 45	pour cent.
Limonite en amas ou filons couchés .	id.	35 à 38	id.
Minerai des prairies, phosphoreux, de la Campine.	id.	37 à 40	id.
Limonite oolithique (minette) . . .	id.	30 à 40	id.
Minerais de manganèse (ferro- manganèse	{ id. 20 Manganèse	15 à 22	id.
Blendes (crues)	Zinc	37	id.
id. (grillées)	id.	45 1/2	id.
Calamines (calcinées)	id.	35	id.
Galènes	Plomb	68 à 80	id.

II. — Minerais consommés en Belgique.

Minerais de fer	{	Hauts fourn. de la pr. de Liège .	Fer	43	id.
		id. id. Luxembourg	id.	33	id.
		id. id. Hainaut .	id.	38	id.
Minerais de plomb		Plomb	69	id.	
Minerais de zinc (calamines calcinées et blendes grillées)		Zinc	43	id.	