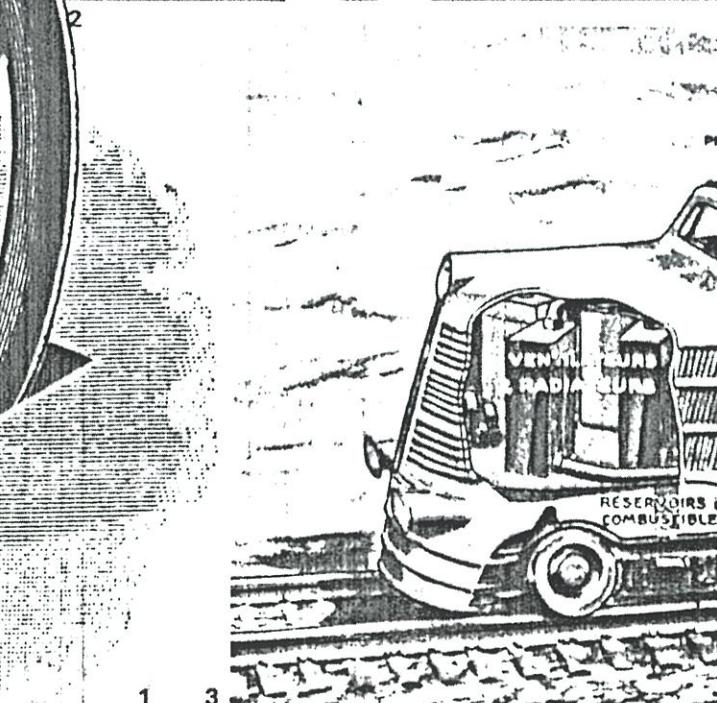


1. 2. Après avoir constaté que le cycle de fonctionnement à combustion à température constante n'est pas réalisable, Rudolf Diesel envisage la construction d'un moteur à cycle à quatre temps. Il réalise son premier moteur viable en 1897.

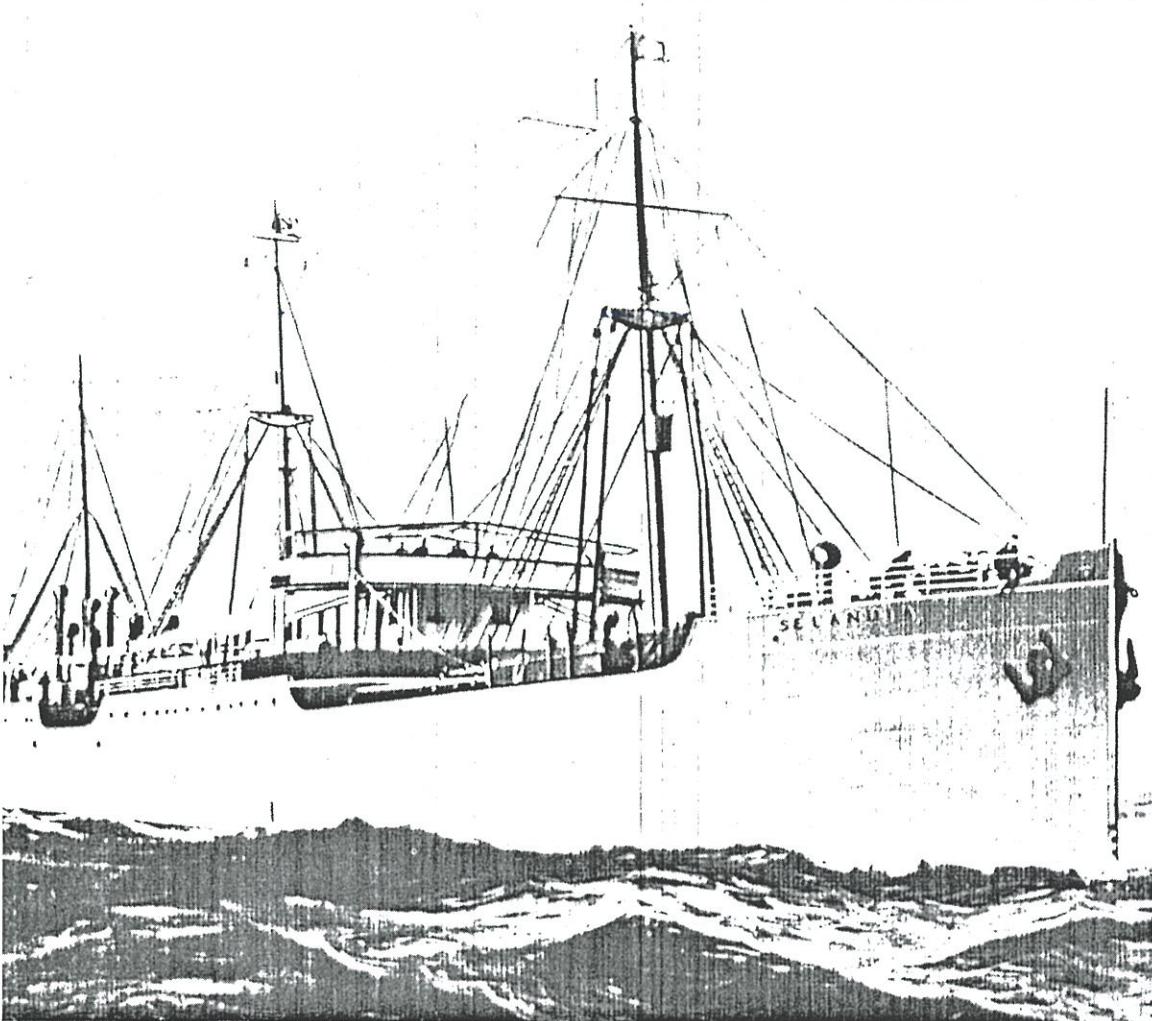
3. Locomotive Diesel électrique de 3 000 ch., type Transsaharien. La première locomotive Diesel est construite en 1912. Elle est équipée d'un moteur à deux temps développant 1 000 ch.

4. Le « Selandia », premier paquebot utilisant un moteur Diesel, a été construit en 1912.



1 3

# LE MOTEUR

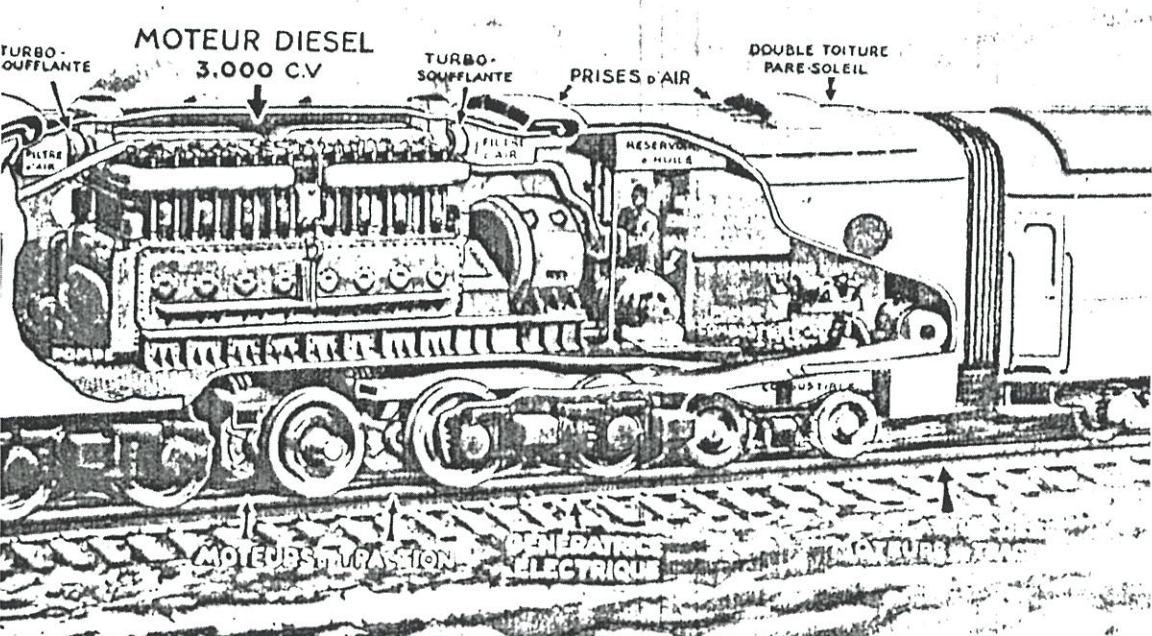


La création du moteur Diesel à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle est un événement important dans l'histoire des techniques. Non seulement par l'extraordinaire rôle qu'il joue aujourd'hui en étant le moteur thermique le plus utilisé, mais aussi par la démarche scientifico-technique qui a précédé sa création. En effet, c'est le premier exemple d'une réalisation technique née d'une analyse scientifique théorique.

**L**a seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle est l'époque où la thermodynamique fait de grands progrès et commence à être regardée comme l'outil indispensable du perfectionnement des machines thermiques. Carnot, le père de la thermodynamique, en avait énoncé dès 1824 les deux principes de base, établissant en même temps le cycle théorique idéal de fonctionnement d'une machine thermique qui donne le rendement maximum. Ce cycle porte le nom de son créateur.

C'est à cette même période que le moteur à combustion interne est né. Après des tâtonnements pendant plus d'un demi-siècle, le premier moteur à combustion interne utilisable a vu le jour en 1860, en France, où il fut réalisé par Etienne Lenoir. Deux ans plus tard, l'ingénieur français Beau de Rochas exposera ses vues sur la manière d'augmenter le rendement des moteurs à combustion interne (le moteur de Lenoir n'avait qu'un rendement de 4,7 %), qui est celle de travailler avec une charge de combustible précomprimée, et envisage même la solution pratique qui est le cycle à quatre temps. Le premier moteur à quatre temps fut réalisé en Allemagne, en 1876, par Nikolaus Otto.

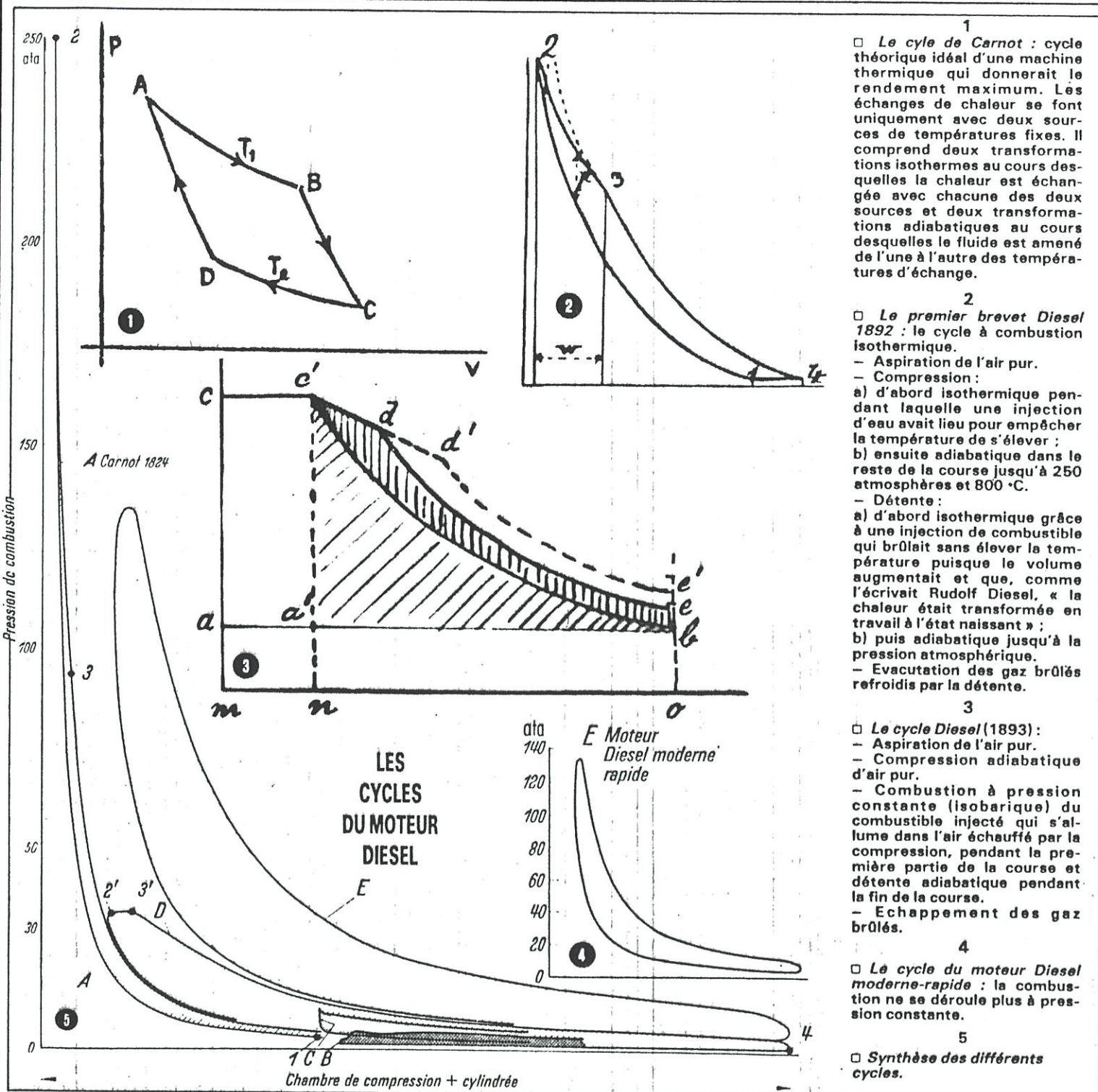
L'apparition du moteur Diesel est aussi importante que celle du moteur à compression préalable. Elle se situe dans la lignée de l'évolution de tous les moteurs à combustion interne, qui est celle de l'augmentation du rendement par l'accroissement de la compression.



# Diesel

1<sup>re</sup>  
partie

## LE MOTEUR DIESEL



1 **Le cycle de Carnot** : cycle théorique idéal d'une machine thermique qui donnerait le rendement maximum. Les échanges de chaleur se font uniquement avec deux sources de températures fixes. Il comprend deux transformations isothermiques au cours desquelles la chaleur est échangée avec chacune des deux sources et deux transformations adiabatiques au cours desquelles le fluide est amené de l'une à l'autre des températures d'échange.

2 **Le premier brevet Diesel 1892** : le cycle à combustion isothermique.

- Aspiration de l'air pur.
- Compression :
- a) d'abord isothermique pendant laquelle une injection d'eau avait lieu pour empêcher la température de s'élèver ;
- b) ensuite adiabatique dans le reste de la course jusqu'à 250 atmosphères et 800 °C.
- Détente :
- a) d'abord isothermique grâce à une injection de combustible qui brûlait sans éléver la température puisque le volume augmentait et que, comme l'écrivait Rudolf Diesel, « la chaleur était transformée en travail à l'état naissant » ;
- b) puis adiabatique jusqu'à la pression atmosphérique.
- Evacuation des gaz brûlés par la détente.

3

**Le cycle Diesel (1893)** :

- Aspiration de l'air pur.
- Compression adiabatique d'air pur.
- Combustion à pression constante (isobare) du combustible injecté qui s'allume dans l'air échauffé par la compression, pendant la première partie de la course et détente adiabatique pendant la fin de la course.
- Echappement des gaz brûlés.

4

**Le cycle du moteur Diesel moderne-rapide** : la combustion ne se déroule plus à pression constante.

5

**Synthèse des différents cycles.**

préalable. Le moteur Diesel pousse la compression à un niveau plus élevé, capable à elle seule de produire l'allumage. La voie par laquelle Rudolf Diesel a réalisé son moteur est un très marquant exemple de la matérialisation d'un fonctionnement d'après un cycle thermodynamique préalablement établi et corrigé à la suite d'essais pratiques.

Rudolf Diesel, le créateur du moteur qui portera son nom, est né à Paris à côté du Conservatoire des arts et métiers, ce sanctuaire de la

technique qui l'a fasciné dans son enfance, comme il l'avouera plus tard dans ses Mémoires. Il fait ses études d'ingénieur à la Technische Hochschule de Munich, en Allemagne, où il est l'élève de Charles Linde, qui réalisa en 1875 les premières machines frigorifiques en reconnaissant leur cycle de fonctionnement comme l'inverse du cycle d'une machine à vapeur. Dès le début de sa carrière d'ingénieur, Rudolf Diesel sera préoccupé par la réalisation d'un moteur de rendement maximum dont il voit le

cycle de fonctionnement calqué sur le cycle Carnot. Au cours de l'année 1892, il prend un brevet en Allemagne pour la construction d'un tel moteur qui fonctionnait en quatre temps suivant un cycle à combustion isothermique. Afin de trouver un soutien matériel auprès des industriels, il publie aussi une brochure intitulée « Théorie et Projet d'un moteur thermique rationnel destiné à remplacer la machine à vapeur et les moteurs thermiques connus aujourd'hui ». Il y propose un moteur qui fonctionnerait avec

un rendement thermique de 70 % pour une précompression de 250 atmosphères. L'appui le plus important est celui de la maison Maschinenfabrik Augsburg – futur MAN – où Rudolf va construire tous les moteurs d'essais jusqu'à la réalisation du premier moteur viable en 1897. Les maisons Krupp et Sulzer vont apporter également une contribution matérielle.

Après les premiers essais soldés par des échecs, Rudolf Diesel se rend compte que le cycle de fonctionnement à combustion à tempé-

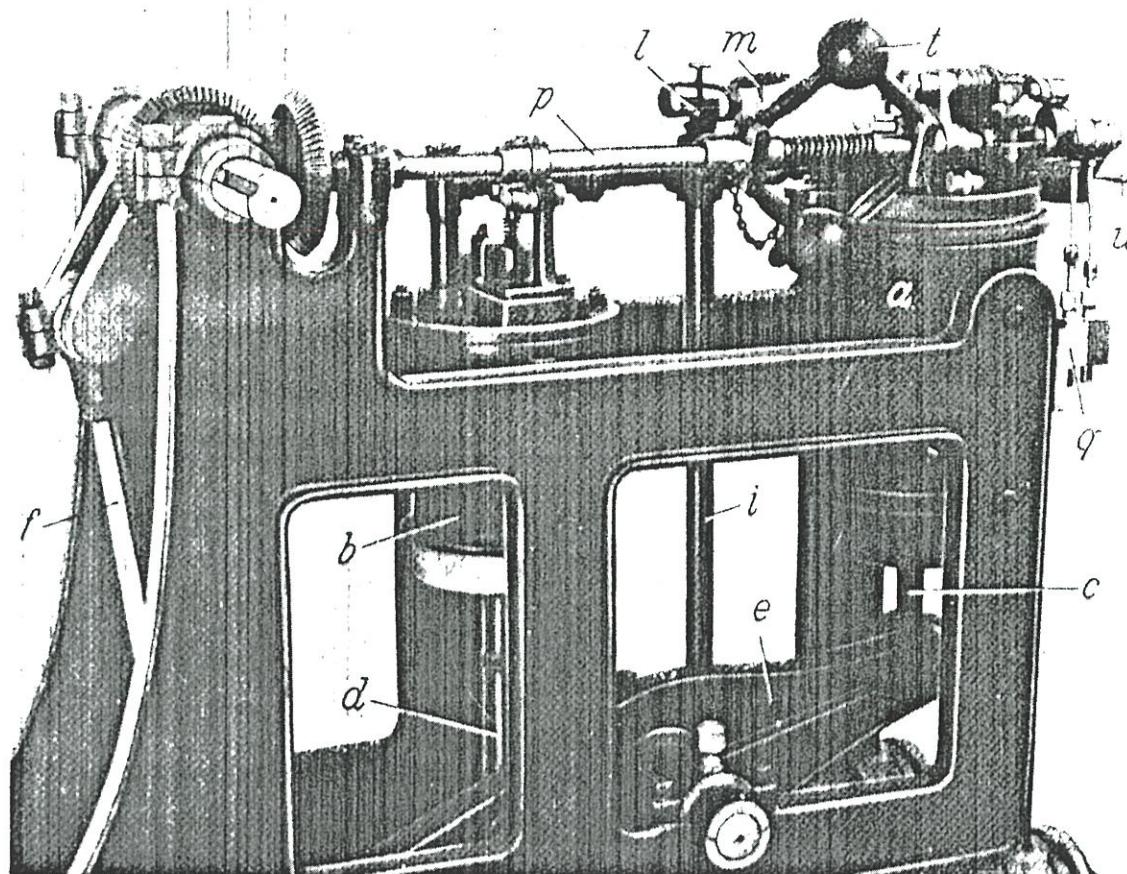
## LE MOTEUR DIESEL

ture constante n'est pas matérialisable, et, à la fin de l'année 1893, il envisage la construction d'un moteur qui devrait fonctionner selon le cycle suivant qui portera désormais son nom. Ce cycle et les principes de fonctionnement que Rudolf Diesel établit et sur la base desquels vont être construits ses moteurs ont été préconisés ou employés par divers inventeurs et constructeurs avant lui.

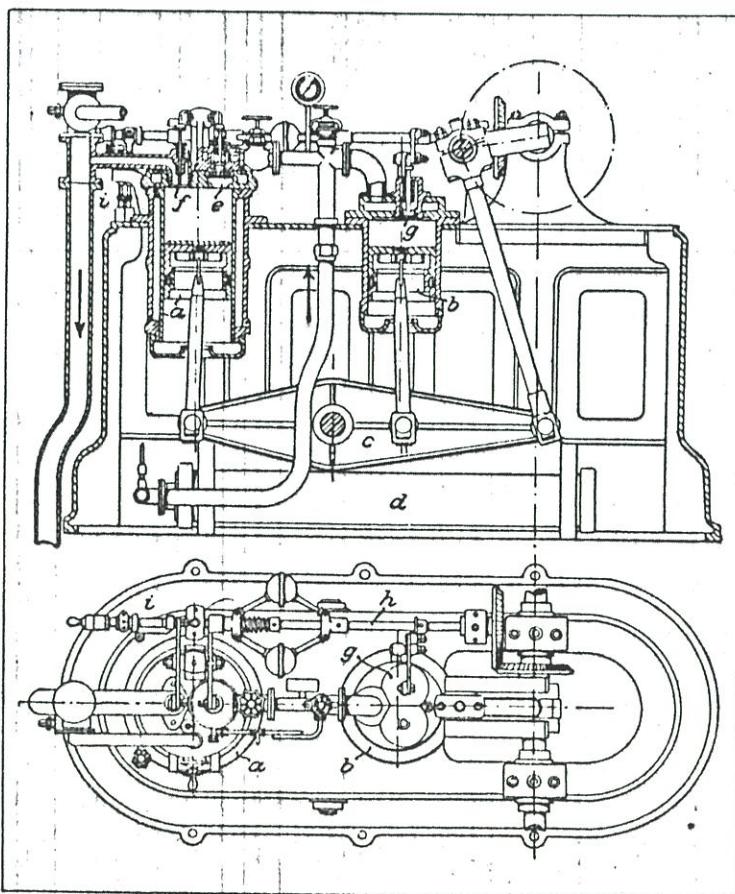
## L'ancêtre des semi-diesels

Ainsi le cycle qu'il utilise est celui à quatre temps conçu par Beau de Rochas et réalisé par Nikolaus Otto. La combustion à pression constante par l'introduction échelonnée du combustible était utilisée déjà depuis 1872 quand Brayton réalisa un moteur à deux temps qui porte son nom. Le cycle de fonctionnement à combustion à pression constante était d'ailleurs connu à l'époque sous le nom de cycle Brayton. La compression préalable de l'air pur et non du mélange carburant suivie de l'injection d'un combustible fut utilisée par d'autres constructeurs avant Diesel : Hargreaves, Brayton, Capitaine, et surtout Akroyd-Stuart. Celui-ci occupe une place particulière dans l'histoire des moteurs à combustion interne.

Le moteur d'Akroyd-Stuart est l'ancêtre des moteurs qu'on appelle aujourd'hui les semi-diesels et, par certaines de ses caractéristiques, un précurseur du moteur Diesel. Il comprenait une préchambre de combustion dans laquelle était injecté pneumatiquement le combustible. Dans les premiers moteurs Akroyd-Stuart, l'injection se faisait dans la préchambre pendant la course d'admission. Le combustible s'enflammait ici au contact des parois chaudes de la préchambre puis la combustion s'achevait dans le cylindre. Ces moteurs ont évolué rapidement, l'injection étant pratiquée pendant la fin de la course de compression, comme Akroyd-Stuart l'avait prévu dans son brevet de 1890. On est ainsi arrivé aux moteurs semi-diesels dans lesquels le taux de compression n'étant pas suffisamment élevé pour enflammer le combustible, celle-ci se produisait aussi à l'aide de la chaleur supplémentaire de la préchambre (boule chaude). Ces moteurs à deux temps, dérivés de ceux d'Akroyd-Stuart, furent mis au point par l'ingénieur Ründolf en 1902 et connurent un succès prolongé.

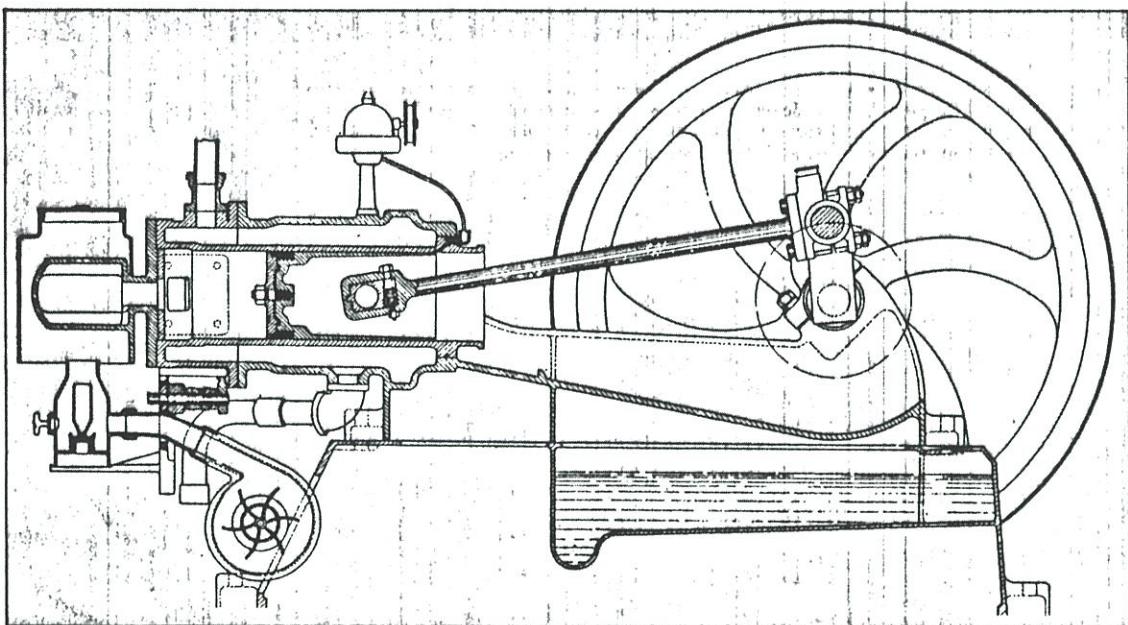
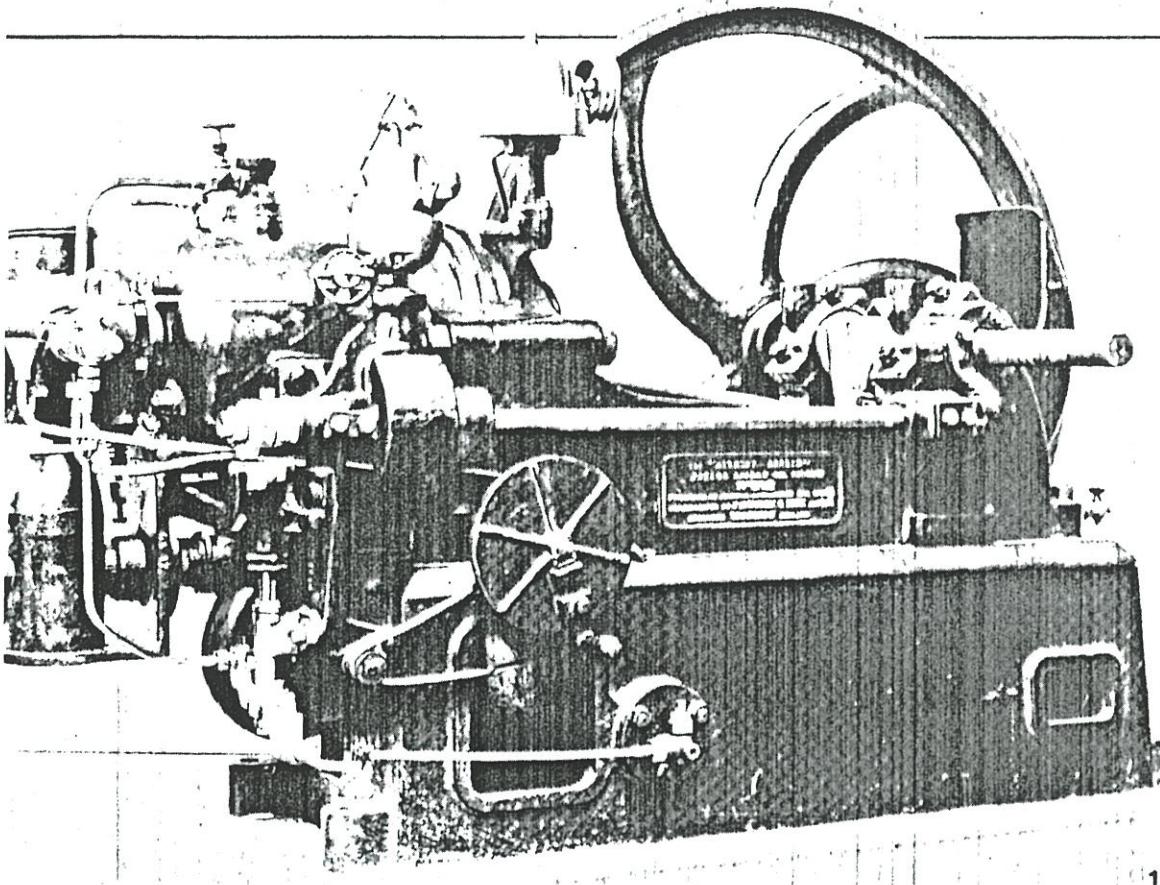


▲ Moteur Brayton. Le cycle de fonctionnement à combustion à pression constante de Diesel était déjà utilisé depuis 1872 par Brayton, qui réalisa un moteur à deux temps qui porte son nom.



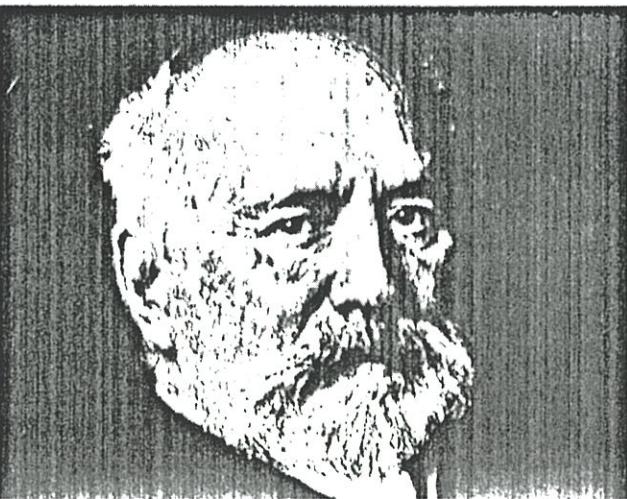
Herbert Akroyd-Stuart réalisa l'ancêtre des moteurs semi-diesels. Dans ses premiers moteurs, l'injection se faisait dans la préchambre pendant la course d'admission. Le combustible s'enflammait au contact des parois chaudes de la préchambre, puis la combustion s'achevait dans le cylindre.

## LE MOTEUR DIESEL



1 et 2. Moteur Hornsby-Akroyd. Le moteur Akroyd a évolué rapidement, l'injection étant pratiquée pendant la fin de la course de compression, comme Akroyd-Stuart l'avait prévu dans son brevet de 1890.

3. Heinrich von Buz dirige la maison Maschinenfabrik Augsburg, qui a déployé les plus grands efforts pour la construction et la mise au point du moteur de Rudolf Diesel.



L'allumage du combustible par la seule chaleur de la compression préalable, qui de nos jours est la seule caractéristique spécifique du moteur de Rudolf Diesel, était déjà préconisé par plusieurs inventeurs avant lui, en commençant par Isaac de Rivaz (1806) et Beau de Rochas (1862).

Tout cela fait que, dès le début, Rudolf Diesel s'est vu contester la priorité de ses découvertes. Il va être d'autant plus facilement attaqué que son premier brevet préconisait la construction d'un moteur fonctionnant d'après le cycle Carnot, cycle à combustion isothermique qui n'est pas matérialisable, fait qu'il n'a jamais voulu admettre. J. Lüders, professeur à l'école technique supérieure d'Achen, publie en 1913 l'ouvrage « Der Dieselmythus », dans lequel, d'une manière très passionnée, il conteste à Rudolf Diesel l'originalité de ses créations.

La dispute concernant la priorité de Rudolf Diesel dans la création des moteurs qui portent son nom va s'accentuer surtout autour de la Première Guerre mondiale avec l'essor des moteurs semi-diesel, trouvant leur origine dans les moteurs Akroyd-Stuart, des cycles de fonctionnement « mixte » ou Sabathé et des moteurs Diesel rapides. De nos jours le moteur Diesel ne reste défini que par la seule caractéristique de l'allumage, dû uniquement à la chaleur de la compression préalable. Toutes les autres caractéristiques du moteur, même la combustion à pression constante, sont devenues non spécifiques.

Le « Oil Engine Nomenclature Committee », créé en Angleterre en 1920 pour trouver une nomenclature adéquate aux différents types de moteurs à pétrole existants et trancher dans le débat qui opposait les partisans d'Akroyd-Stuart et ceux de Rudolf Diesel, rappelle : « Le point de départ dans le développement du moteur à pétrole moderne (voir Diesel) se trouve aussi bien dans les principes d'Akroyd-Stuart que dans ceux de Diesel et le fait de désigner le moteur par le nom de l'inventeur est trompeur et en même temps dépréciateur pour le travail de ceux dont l'effort a assuré le succès actuel. »

Quoi qu'il en soit, malgré le fait de n'avoir pas utilisé dans la conception de son moteur des principes nouveaux et malgré le fait de s'être trompé dans certaines considérations théoriques, le grand mérite de Rudolf Diesel est d'avoir su redécouvrir et combiner les différentes acquisitions techniques an-

## LE MOTEUR DIESEL

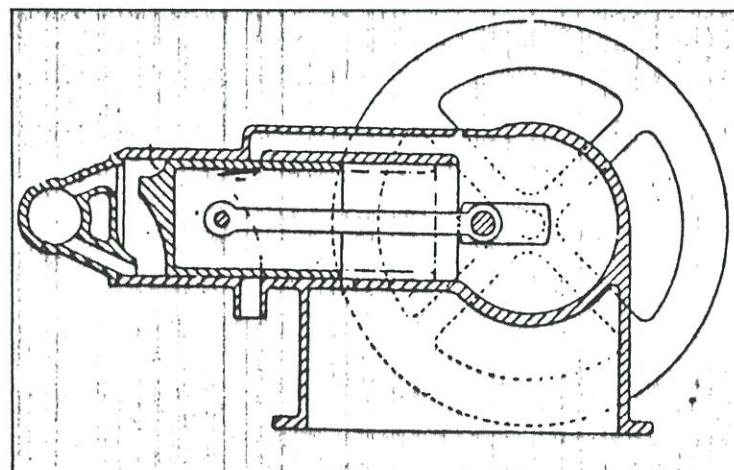
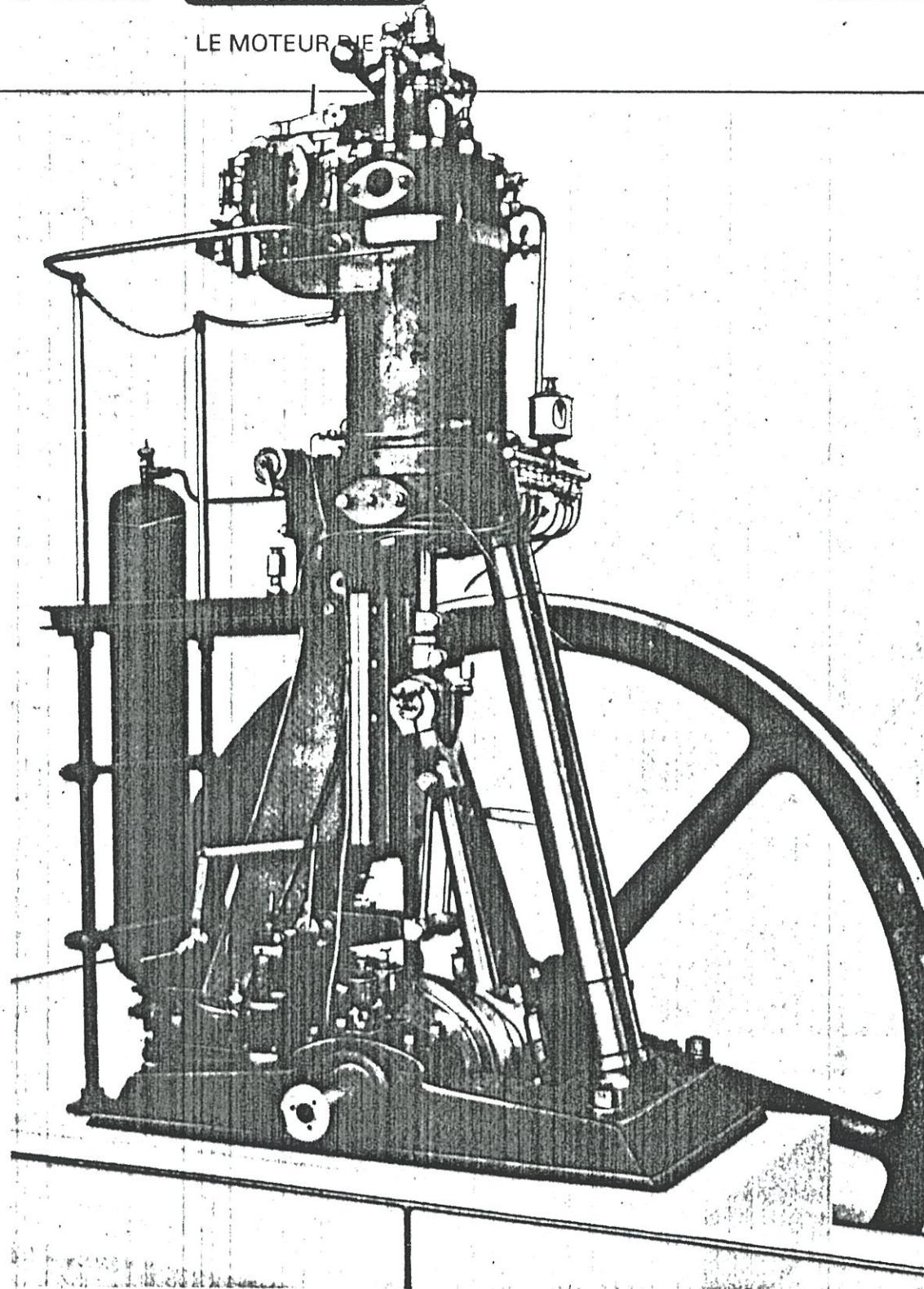
térieures. Et de suivre avec acharnement leur réalisation pratique jusqu'à la construction d'un moteur, caractérisé par le plus grand rendement thermique jamais atteint. Dans cette perspective, le nom de Diesel que porte ce moteur est pleinement justifié.

Le premier moteur Diesel fut réalisé à la suite d'une période de quatre années d'essais et de tâtonnements. Elle s'échelonne entre 1893, date de la construction du premier moteur d'essais et 1897 quand le premier Diesel utilisable fut enfin construit. C'est la maison Maschinenfabrik Augsburg, dirigée par Heinrich von Buz, qui a déployé les plus grands efforts pour la construction et la mise au point de ce moteur. Les prototypes de moteurs et les essais sont réalisés presque exclusivement chez elle. Pourtant il ne faut pas oublier les apports techniques et financiers des autres maisons qui acquériront les brevets Diesel jusqu'en 1897 : Krupp à Essen en Allemagne, Sulzer Frères à Winterthur en Suisse, Carles Frères à Gand en Belgique, et Dyckhoff à Bar-le-Duc en France. Ce dernier a construit un moteur Diesel d'essais dès 1894 et a effectué aussi les premiers essais réussis du moteur Diesel de 1897, plusieurs semaines avant ceux effectués à Augsburg.

Les tests du premier moteur Diesel donnent les résultats suivants : puissance de 17,8 ch à 154 tr/mn avec une consommation de 238 g/ch/h, soit un rendement économique de 26,2 % (rendement thermique 34,7 %). Pour arriver à ces résultats, le cheminement fut difficile et long. Plusieurs fois, le moteur fut reconstruit et modifié.

Le premier moteur d'essais Diesel (1893) construit pour fonctionner d'après le cycle à combustion isothermique possédait un cylindre vertical non refroidi avec la chambre de combustion dans le piston avec injection mécanique de l'essence. Fin 1893, un nouveau prototype était conçu, avec lequel des essais furent faits au début de l'année suivante. Transformé, ce deuxième moteur servit encore en 1895 ; enfin, un troisième moteur devait être conçu en 1897 : le premier avec lequel furent obtenus des résultats décisifs.

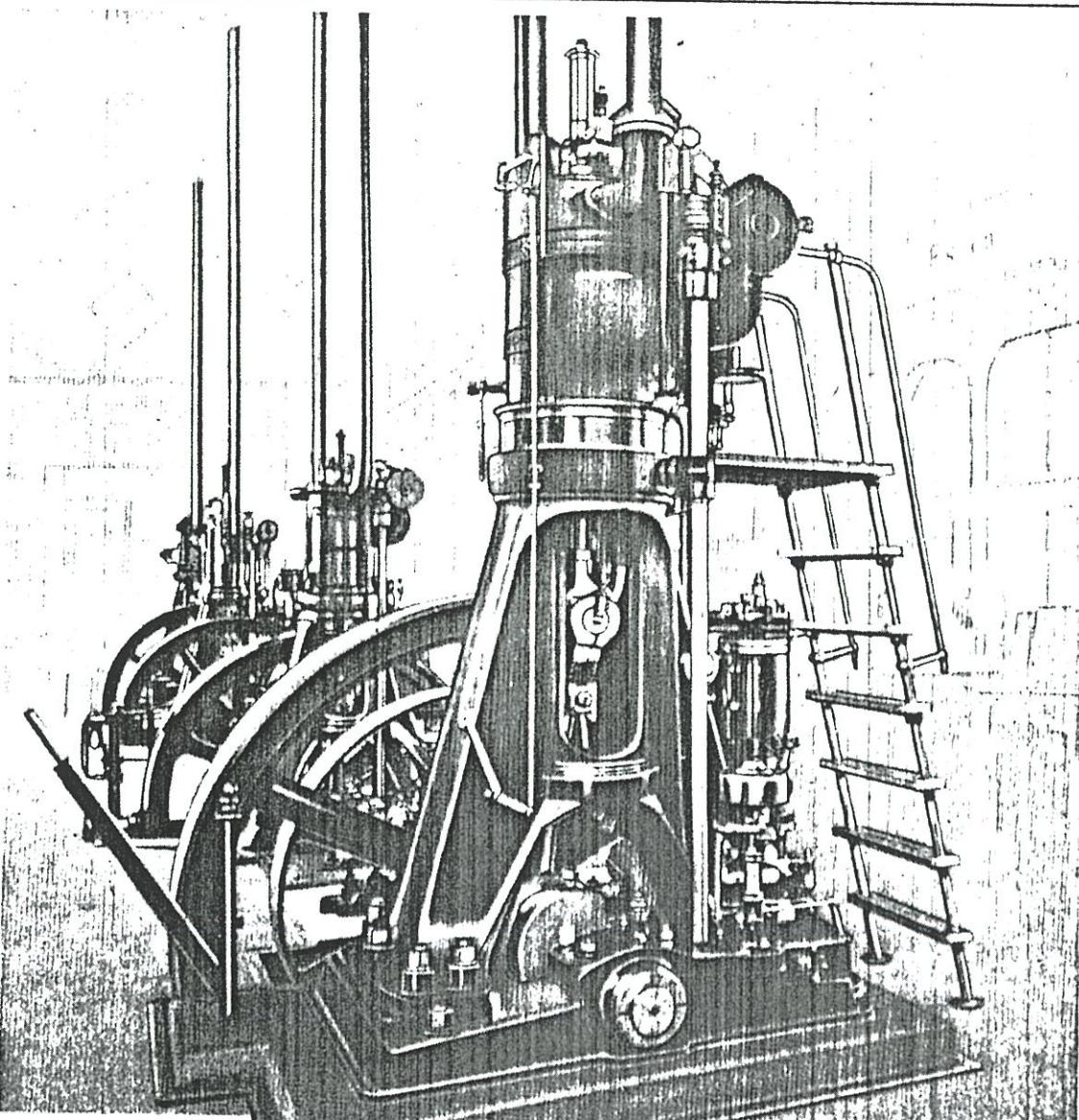
Pendant les essais, divers combustibles ont été testés : essence, gaz, charbon pulvérisé, produits pétroliers lourds. Le problème de l'injection du carburant constitua l'un des problèmes centraux des différentes étapes de recherche. La solution retenue en 1897 fut l'injection pneumatique



▲ Les tests du premier moteur Diesel ont donné les résultats suivants : puissance de 17,8 ch à 154 tr/mn avec une consommation de 238 g/ch/h, soit un rendement économique de 26,2 % (rendement thermique 34,7 %).

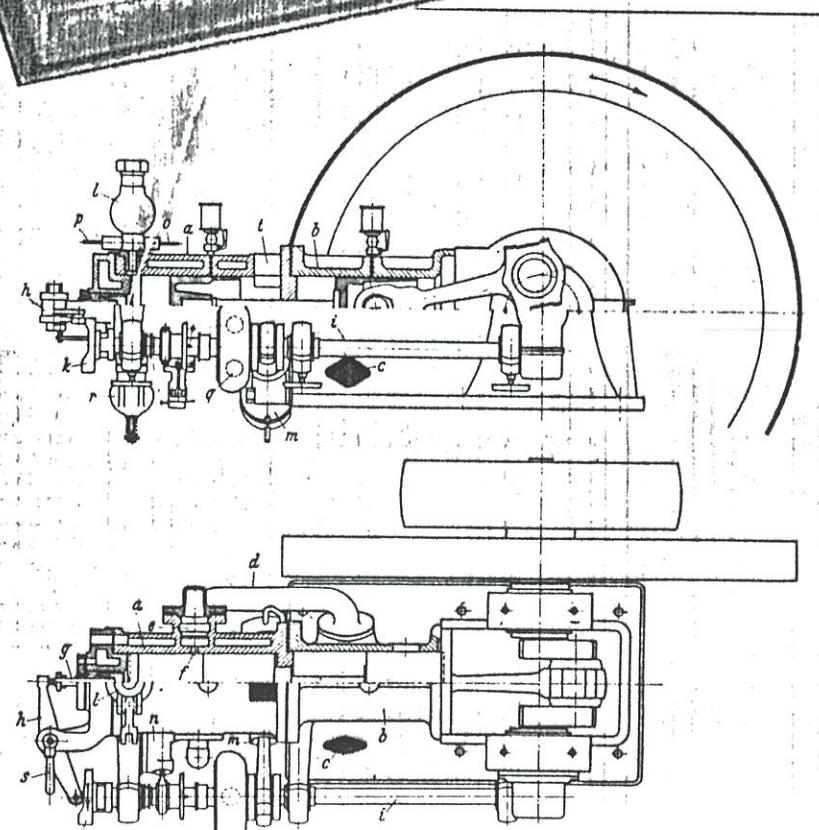
◀ Les semi-diesels à deux temps, dérivés de ceux d'Akroyd-Stuart, furent mis au point par l'ingénieur Rundolf en 1902 et connurent un succès prolongé.

## LE MOTEUR DIESEL



▲ Moteurs Diesel à l'exposition de Munich de 1898. Les performances de ce moteur déterminent de nombreux constructeurs à s'approprier le brevet et à construire le diesel. En tout 51 licences seront vendues jusqu'en 1900.

Le premier moteur Diesel à deux temps est construit en 1899 par la Maschinenfabrik Augsburg d'après les plans de l'ingénieur allemand Hugo Guldner. Il sera bientôt abandonné, mais le cycle à deux temps sera repris et de plus en plus utilisé.



sous pression de 40 atmosphères. La suralimentation par une pompe séparée ou par le carter est également testée. L'embielage est modifié plusieurs fois. Même la méthode d'allumage fait l'objet d'hésitations. Rudolf Diesel essaie divers procédés : allumage par tube incandescent, allumage électrique... C'est finalement l'allumage par la chaleur de compression qui va devenir la caractéristique essentielle de son moteur.

Pendant l'année 1897, le moteur Diesel est testé dans plusieurs pays : Allemagne, Angleterre, Suède, Etats-Unis. En France, une commission, constituée par Edouard Sauvage, professeur à l'Ecole des mines, Paul Carié, ingénieur en chef aux Chantiers de la Méditerranée, et les ingénieurs Dyckhoff et Merceron, fait des essais le 30 avril. Le bulletin de la Société des ingénieurs civils en rend compte et insiste sur les avantages du moteur Diesel par rapport aux autres moteurs.

Ces performances, et la publicité dont elles sont entourées, déterminent de nombreux constructeurs à s'approprier le brevet et à construire leurs premiers moteurs Diesel. En Allemagne (Krupp, Deutz...), en France (Sautter-Harlé), en Suisse (Sulzer), en Angleterre (Mirrlees, Weston et Yarman), aux Etats-Unis (Diesel-Motor Company de A. Busch), au Danemark (Burmeister et Wain) ; en tout 51 licences qui furent vendues jusqu'en 1900.

Un premier moteur de ce type est installé en 1898 en Allemagne. Deux cylindres en ligne, 60 ch à 180 tr/mn ; d'autres suivent aux Etats-Unis, en France, en Russie, en Roumanie, etc. Parallèlement, le premier moteur Diesel à deux temps était construit en 1899 par la Maschinenfabrik Augsburg d'après les plans de l'ingénieur allemand Hugo Guldner. C'est un moteur horizontal avec deux cylindres placés l'un derrière l'autre. Le premier est le cylindre « moteur » et le deuxième joue le rôle de pompe de balayage, en même temps que celui de guide pour la tige du piston. La pompe de balayage envoie environ 0,9 de l'air qu'elle fournit dans le bâti creux à 4-6 atmosphères, d'où il pénètre ensuite dans le cylindre moteur pendant l'admission, et le reste dans une pompe à air de haute pression qui fournit l'air comprimé à 45 atmosphères, nécessaire à l'injection du combustible. La construction des moteurs Guldner, entamée en Allemagne et en

## LE MOTEUR DIESEL

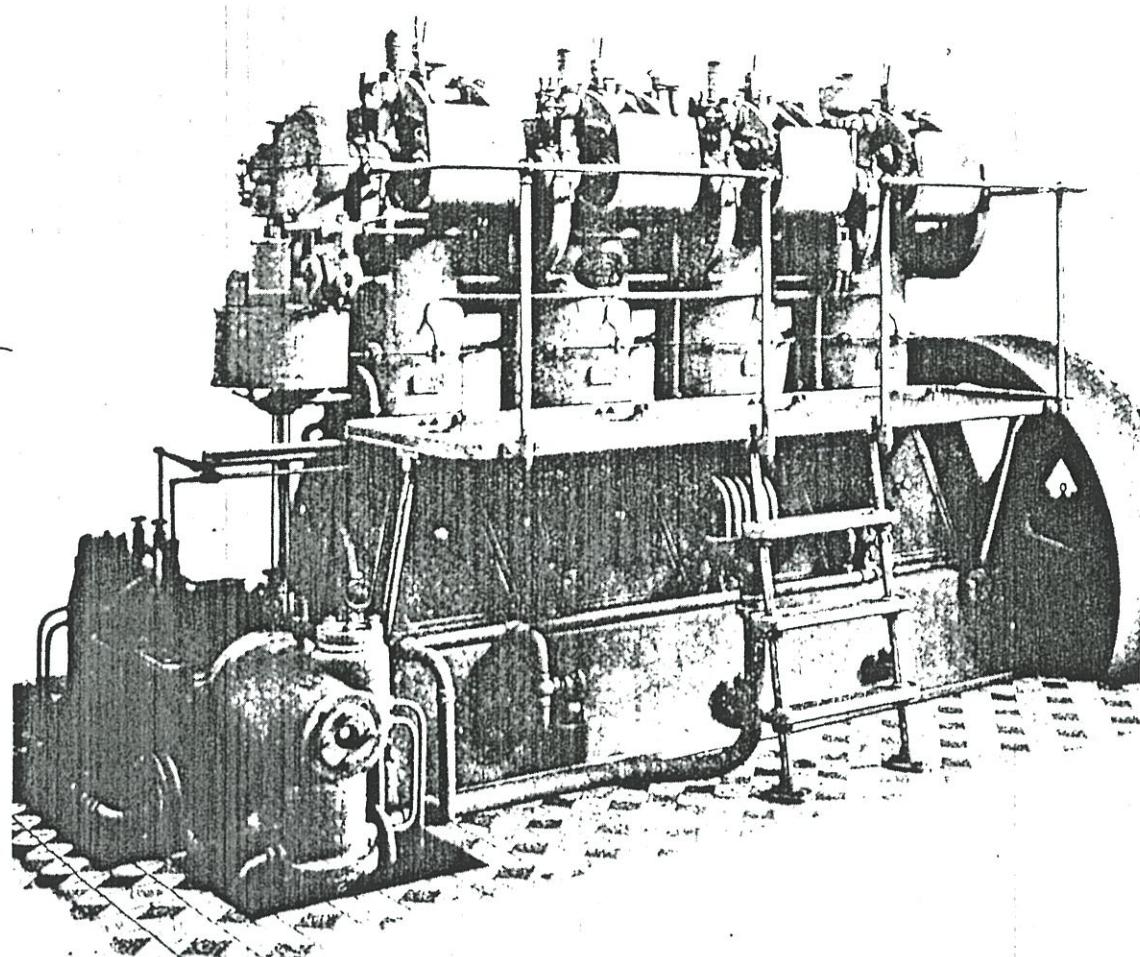
Angleterre, va être bientôt abandonnée. Mais le cycle à deux temps sera repris et de plus en plus utilisé. Cependant le moteur Diesel à deux ou quatre temps n'est pas encore parfaitement au point ; de nombreux accidents de parcours arrivent, et, jusque vers 1907, le succès n'est pas assuré. C'est surtout le système d'injection pneumatique qui est désaillant.

De 1900 à la Première Guerre mondiale, deux grandes étapes vont marquer la construction du moteur Diesel.

Première période : celle de 1900 à 1907 où la construction piétine. Autour de 1900, plusieurs maisons, parmi les plus prestigieuses (Deutz, Krupp, Sulzer, Burmeister et Wain, etc.) abandonnent. Un nombre restreint de constructeurs persévèrent. En tête se trouve la maison MAN, suivie par Carels de Gand, Diesel-Motorer de Stockholm, Sautter-Harlé de Paris, et la Société française des moteurs Diesel de Bar-le-Duc. Il s'agit de moteurs verticaux à quatre temps, avec une faible vitesse de rotation.

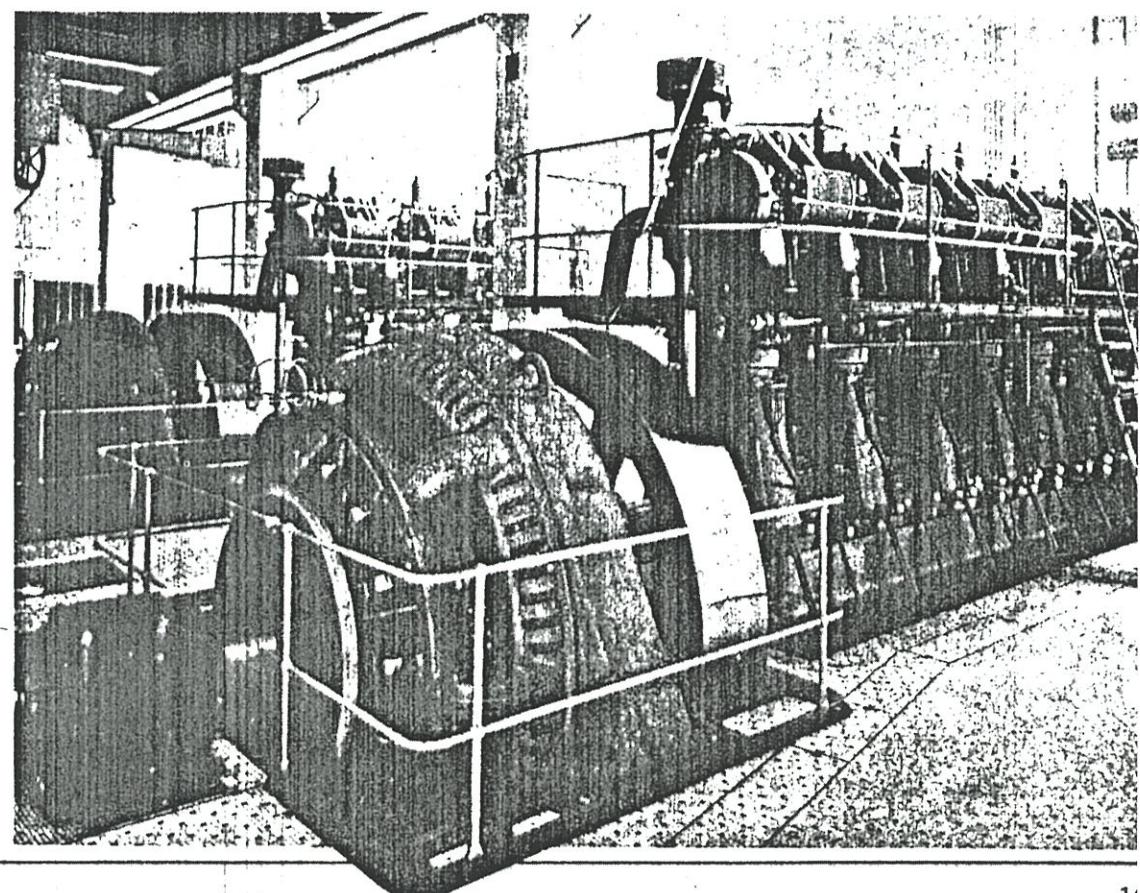
Avec la seconde période, de 1907 à la fin de la guerre, commence le véritable essor du moteur Diesel. C'est en 1907 que le brevet de Rudolf Diesel tombe dans le domaine public. La construction est reprise ou entamée par un grand nombre de maisons. Le moteur n'est plus réalisé seulement comme moteur à quatre temps mais on commence à utiliser beaucoup le cycle à deux temps. Le moteur Diesel à quatre temps est construit généralement comme moteur vertical à simple effet à un ou plusieurs cylindres en ligne. D'autres solutions de construction sont également essayées, dont celle à pistons opposés, la construction horizontale, le double effet, etc. La pression moyenne effective jusqu'en 1914 est assez faible : 4 à 5 kg/cm<sup>2</sup>.

Le moteur Diesel est généralement lent, 100 à 150 tr/mn, donc lourd, autour de 150 kg/ch. Vers 1914, il arrive à développer une puissance de 2 400 ch (400 ch par cylindre). Mais sous l'impulsion de la construction navale, c'est la construction des moteurs Diesel légers, obtenue grâce à l'augmentation de la vitesse de rotation, qui commence. Jusqu'en 1914, on construit des moteurs tournant à une vitesse de 600 tr/mn dont le poids spécifique descend jusqu'à 24 kg/ch. L'essor du moteur Diesel à deux temps, vers 1910, qui jouit d'une puissance spécifique bien plus élevée pour les mêmes dimensions, se situe dans la même

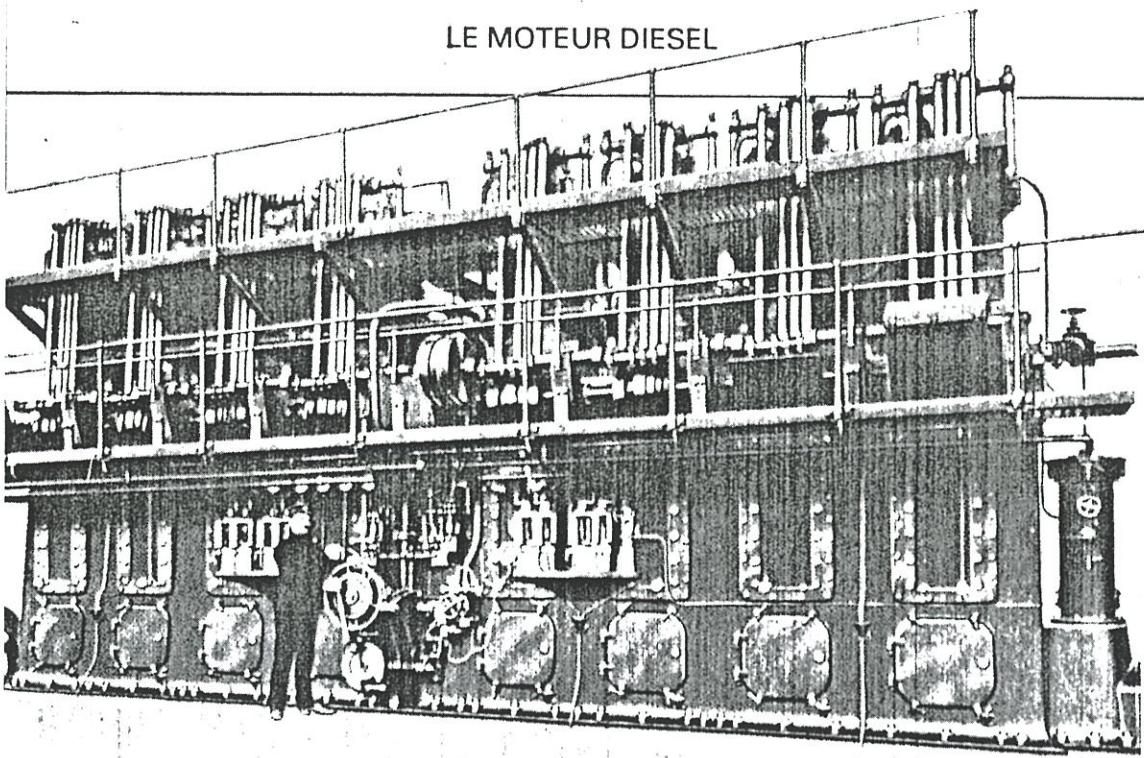


▲ Moteur Sulzer de 1909, à quatre temps, quatre cylindres, à grande vitesse. Le brevet de Rudolf Diesel est tombé dans le domaine public en 1907 et la construction a été reprise ou entamée par un grand nombre de maisons.

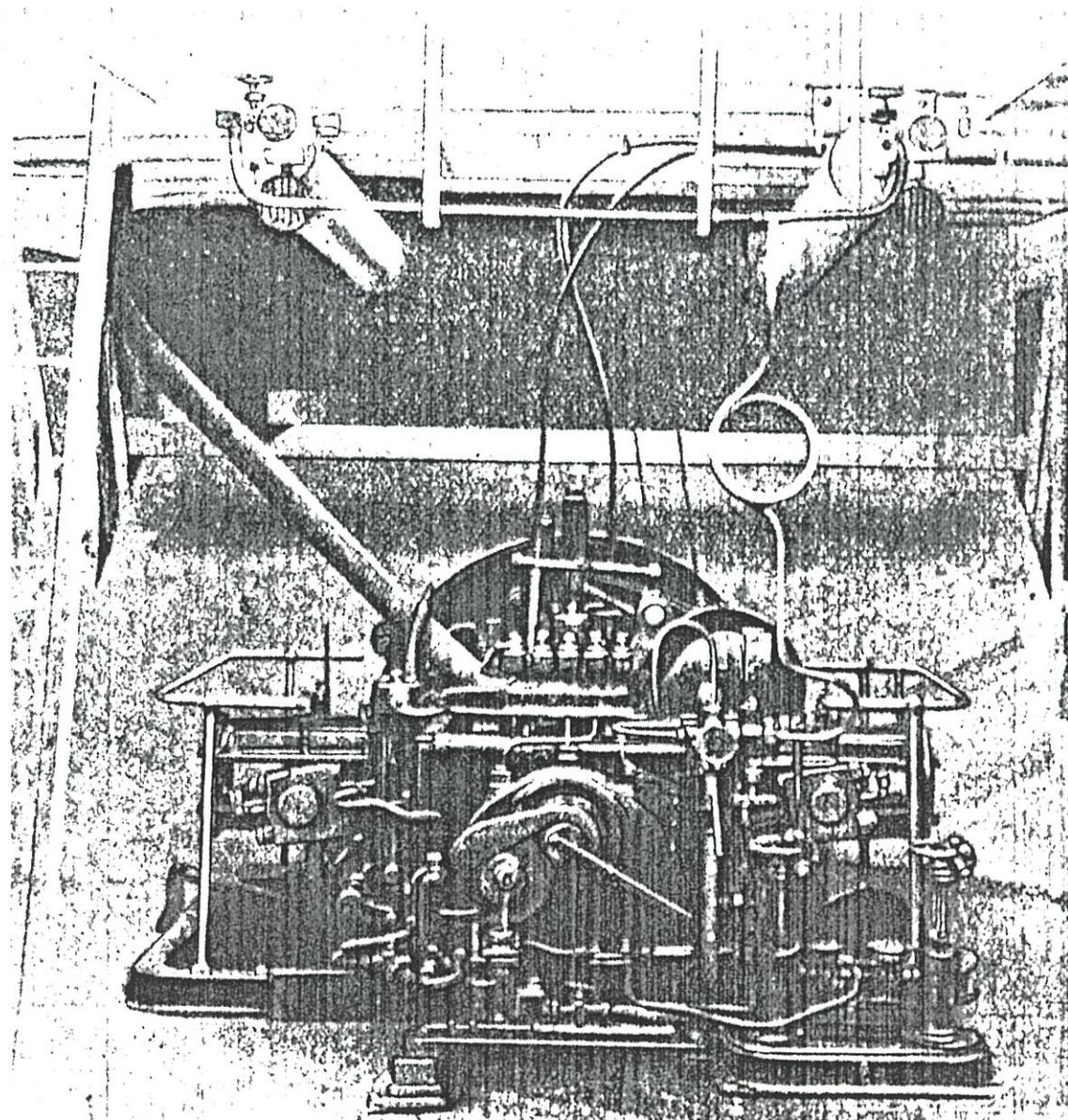
▼ En 1909, MAN construit un moteur quatre temps à six cylindres de 740 ch chacun pour une station électrique.



## LE MOTEUR DIESEL



Ci-dessus, moteur Diesel réversible de 1 250 ch pour le navire « Selandia ». Ci-dessous, premier moteur marin pour bateau de rivière. C'est un moteur de 20 ch à quatre temps, destiné à propulser une péniche allemande.



voie. Les sociétés françaises des moteurs Diesel de Bar-le-Duc et Sautter-Harlé ainsi que la maison allemande MAN s'engagent les premiers, dès 1899, dans la construction des moteurs Diesel de bateaux.

Le premier prototype haute vitesse de rotation fut conçu entre 1901 et 1903 en collaboration par la Société française des moteurs Diesel de Bar-le-Duc et les établissements Sautter-Harlé conformément aux plans conçus par Adrien Bochet. C'est un moteur à quatre temps à pistons opposés qui développe une puissance de 25 ch à 360 tr/mn et pèse 124 kg/ch. Il propulsera la péniche « Petit-Pierre ». En 1903, Sautter-Harlé construit deux autres petits moteurs Diesel à pistons opposés, à quatre temps à deux cylindres de 120 ch à 400 tr/mn montés pour la première fois sur un sous-marin, le « Z ». Six autres suivront pour les submersibles « Opale », « Emeraude » et « Rubis » de la marine française. Il s'agit cette fois-ci de moteurs à quatre temps simple effet, verticaux à quatre cylindres en ligne qui développent 300 ch à 340 tr/mn et pèsent seulement 62 kg/ch.

En Allemagne, MAN construit en 1903 un moteur vertical à quatre temps à quatre cylindres en ligne développant 140 ch à 400 tr/mn et pesant 75 kg/ch. En 1907, elle achève la construction de ses premiers moteurs de sous-marins. Il s'agit de quatre moteurs verticaux à quatre cylindres en ligne, d'une puissance de 300 ch à 400 tr/mn, livrés à la marine française, où ils équipent les sous-marins « Circé » et « Calypso ». Ils pèsent seulement 33 kg/ch. En 1909, c'est la marine allemande qui reçoit les premiers moteurs Diesel pour ses sous-marins « U19 » et « U22 ». Ces moteurs développent 850 ch à 450 tr/mn et pèsent 26 kg/ch. Les maisons Sulzer, Krupp, Burmeister et Wain, Deutz suivent la même voie.

Le cycle à deux temps est particulièrement adéquat pour la construction des moteurs Diesel. L'avantage obtenu par l'utilisation de ce cycle est résumé dans le fait que la puissance augmente de 60 à 80 % à égalité de course et d'alésage.

Jusqu'en 1913, le moteur Diesel à deux temps est construit généralement comme moteur à simple effet vertical à plusieurs cylindres en ligne. Certaines autres solutions sont également essayées, dont la construction horizontale : le double effet, solution qui donne des résul-

## LE MOTEUR DIESEL

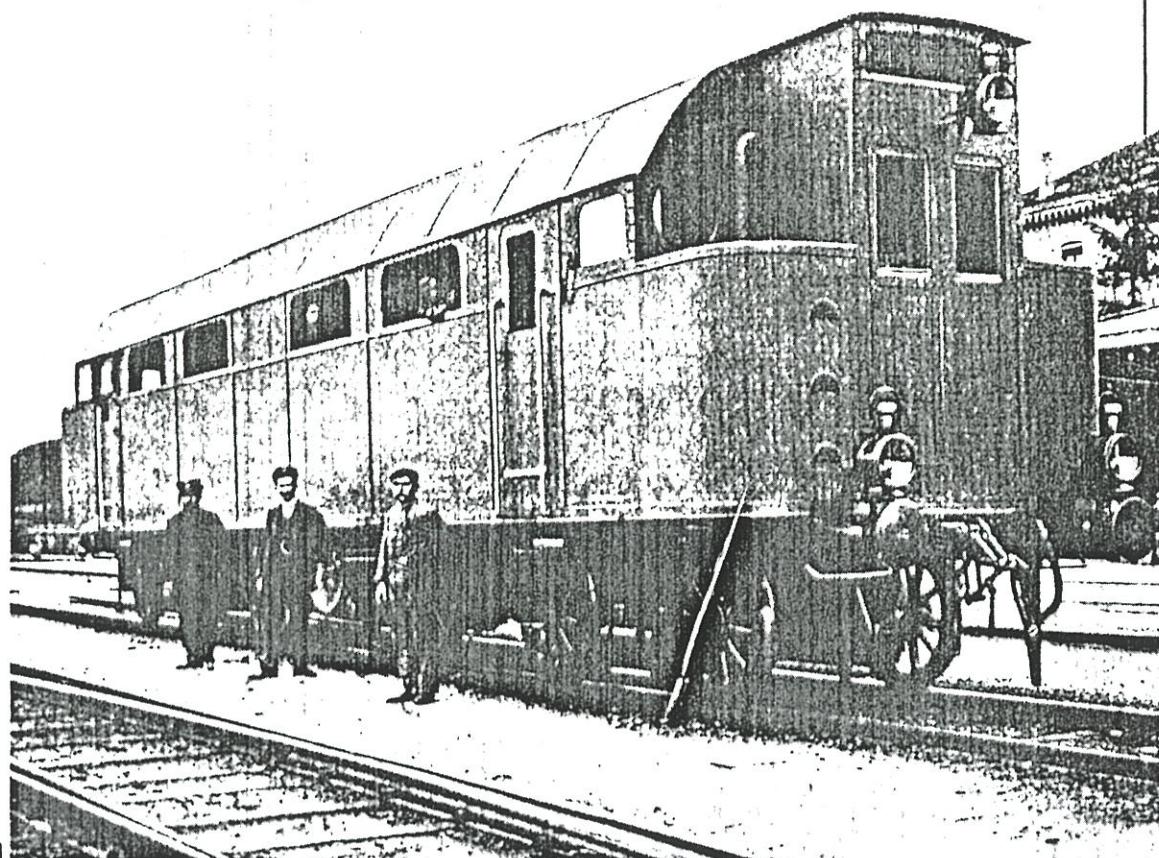
tats très favorables et qui va se développer dans l'avenir ; les pistons opposés, etc. La vitesse de rotation des moteurs à deux temps par rapport à ceux à quatre temps est assez élevée : souvent autour de 500 tr/mn. Les puissances maximales atteintes vers 1914 dépassent largement 2 000 ch : un moteur de 12 000 ch, six cylindres en ligne à double effet est même à l'étude chez MAN et chez Krupp.

Une attention particulière est consacrée au système de distribution et au balayage. La distribution se fait par soupapes (admission) et lumières (évacuation) ou par lumières uniquement. Le balayage le plus souvent utilisé à la suite de dispositions cinématiques est transversal. On fera plus rarement appel au balayage en U ou en boucle.

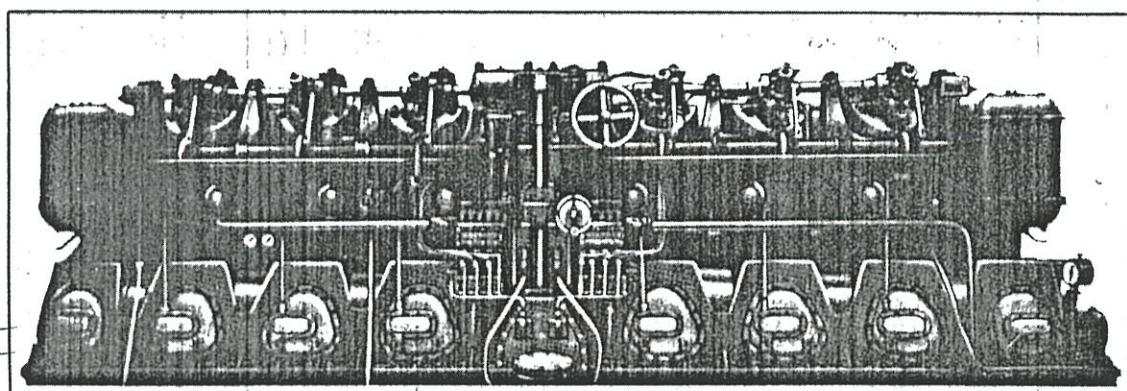
Le premier moteur Diesel marin à deux temps fut construit chez Sulzer en 1905 pour le bateau « Venoge » du lac de Genève : c'est également le premier modèle réversible. Vertical, avec ses quatre cylindres en ligne, il développait 100 ch. Il était muni d'une pompe de balayage à double effet placée sur la même ligne, dans le prolongement des cylindres moteurs. C'est le premier d'une série de même type construits par Sulzer. Ils sont à deux temps simple effet, réversibles, verticaux, à quatre ou six cylindres moteurs et un ou deux cylindres de balayage placés en ligne et arrivent à des puissances de 2 000 ch. Le succès remporté par Sulzer détermine plusieurs maisons à suivre l'exemple : Carels de Gand, MAN, Sautter-Harlé.

La Première Guerre mondiale va accélérer le développement des moteurs Diesel de sous-marins. Ils sont à simple action à quatre et à deux temps. Par exemple, la MAN construit vers 1917 des moteurs à quatre temps de dix cylindres, développant 3 000 ch à 390 tr/mn ; ou Krupp des moteurs à deux temps de six cylindres développant 1 650 ch à 350 tr/mn.

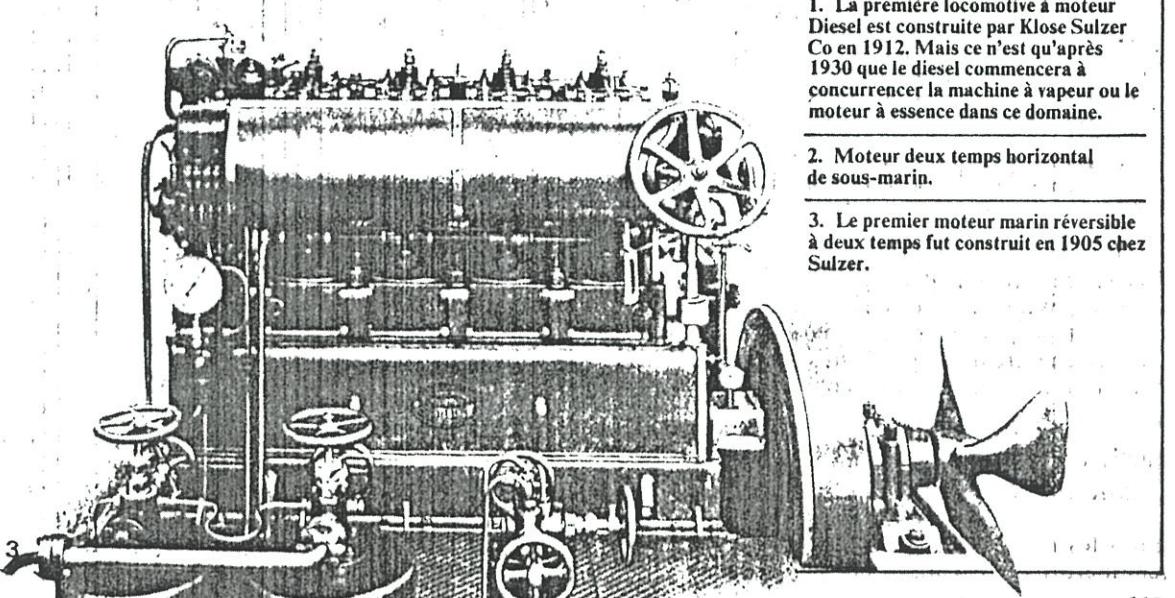
En dehors de ces utilisations principales, il faut également mentionner après 1910 les essais de moteurs de locomotive. Mais c'est seulement après 1930 qu'ils commencent à concurrencer sérieusement la machine à vapeur ou les moteurs à essence dans ce domaine. La première locomotive Diesel est construite par Klose-Sulzer Co en 1912. Elle est équipée d'un moteur à deux temps de quatre cylindres en V développant 1 000 ch. ALEXANDRE HERLEA



1



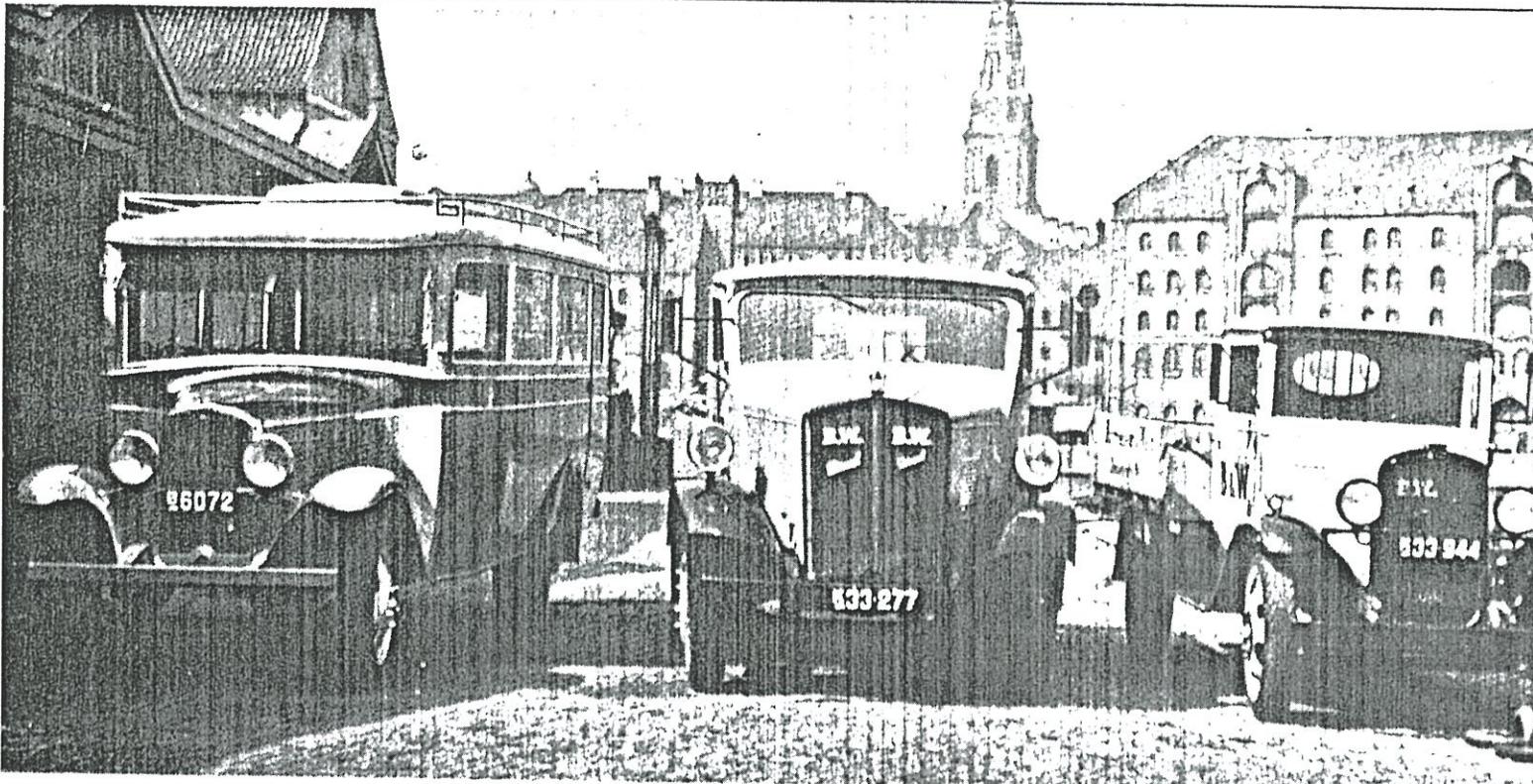
2



1. La première locomotive à moteur Diesel est construite par Klose Sulzer Co en 1912. Mais ce n'est qu'après 1930 que le diesel commencera à concurrencer la machine à vapeur ou le moteur à essence dans ce domaine.

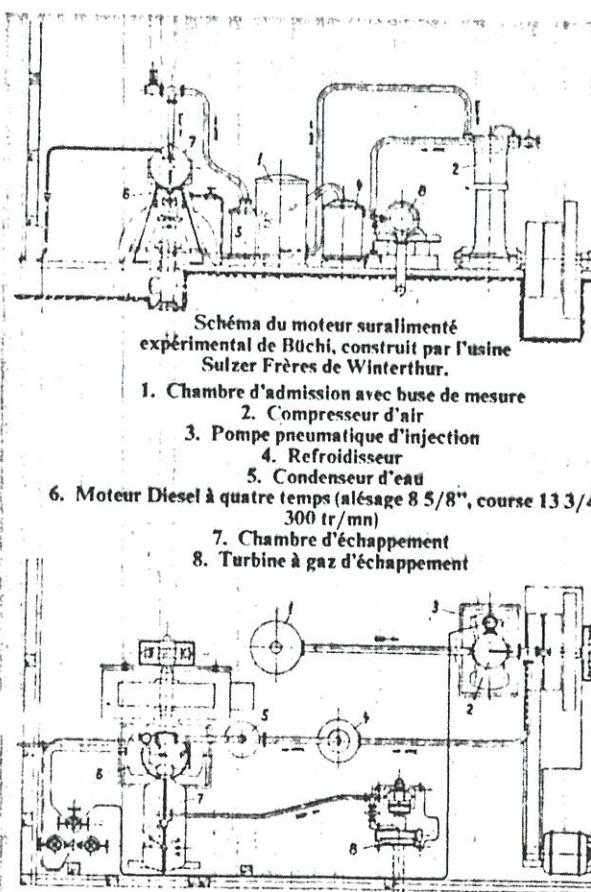
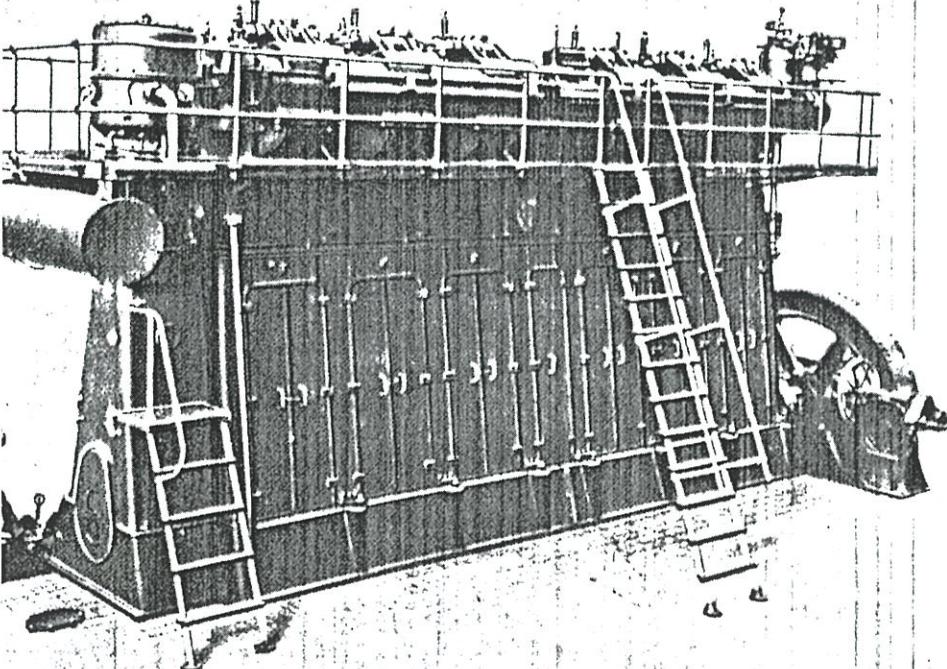
2. Moteur deux temps horizontal de sous-marin.

3. Le premier moteur marin réversible à deux temps fut construit en 1905 chez Sulzer.



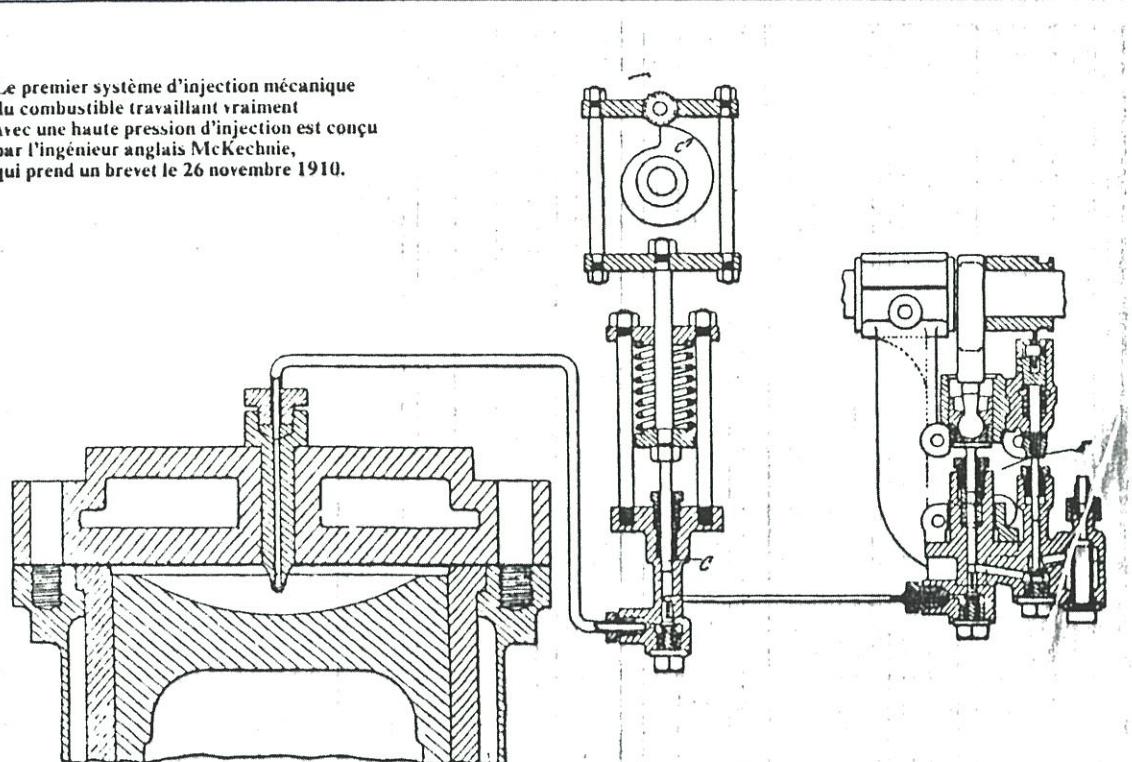
ces moteurs Diesel légers remplacent avec succès le moteur « à explosion à essence »  
sur les poids lourds, tracteurs, autocars, etc.

Moteur Diesel de 1 700 ch alimenté par turbo-soufflante,  
système Büchi.

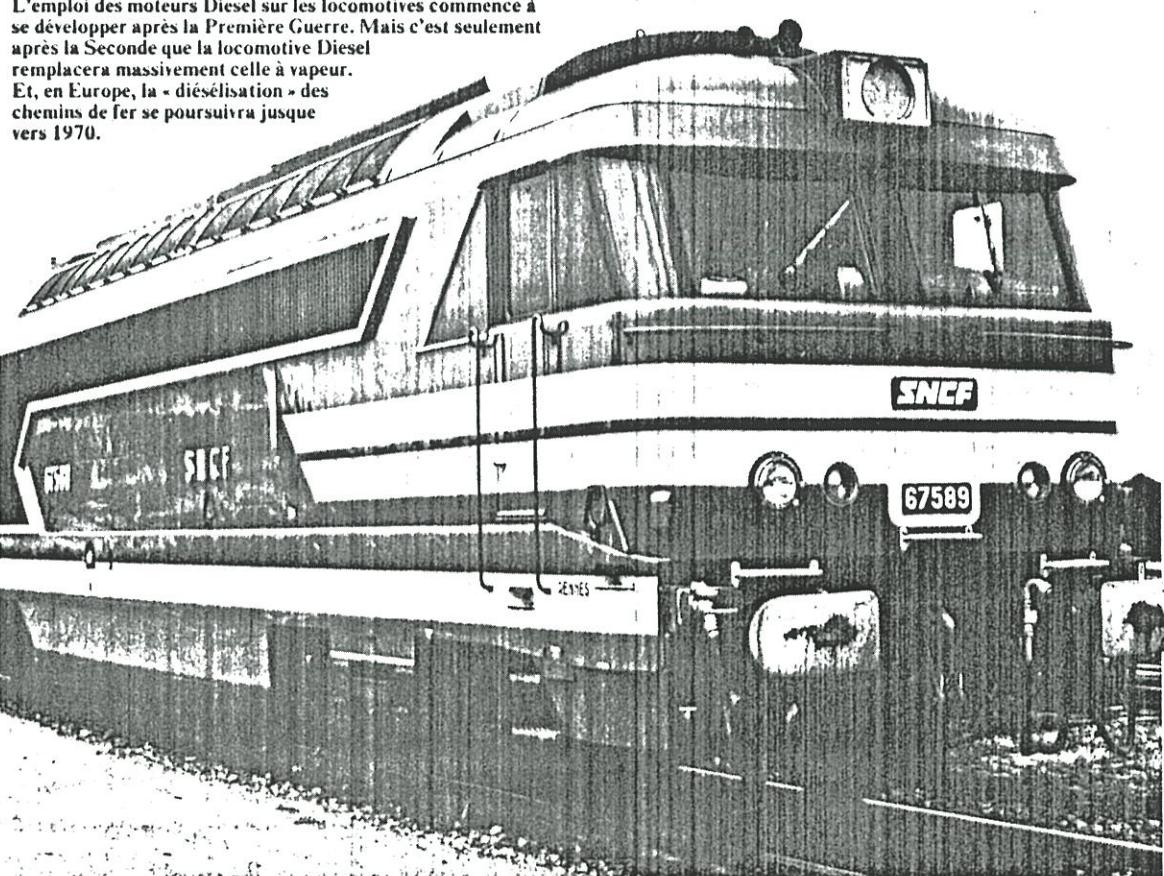


# Le moteur

Le premier système d'injection mécanique du combustible travaillant vraiment avec une haute pression d'injection est conçu par l'ingénieur anglais McKechnie, qui prend un brevet le 26 novembre 1910.



L'emploi des moteurs Diesel sur les locomotives commence à se développer après la Première Guerre. Mais c'est seulement après la Seconde que la locomotive Diesel remplacera massivement celle à vapeur. Et, en Europe, la « diésélisation » des chemins de fer se poursuivra jusque vers 1970.



Lorsque, en 1907, le brevet de Rudolf Diesel tombe dans le domaine public, le moteur qu'il a conçu prend son véritable essor. Cette seconde partie nous montre comment, par de constantes améliorations, il s'imposera sur les poids lourds, locomotives, engins militaires, certaines voitures... et même, provisoirement, sur les avions.

Plusieurs améliorations substantielles des moteurs Diesel sont envisagées, du moins sur le papier jusqu'à la Première Guerre, mais sans être matérialisées à cette date. Ces perfectionnements portent sur l'amélioration de la réalisation du mélange carburant et de la combustion, sur l'augmentation de la pression moyenne et de la vitesse de rotation, ce qui se traduit par l'augmentation du rendement et de la puissance spécifique. L'injection mécanique à haute pression, les chambres de combustion séparées et la suralimentation allaient bientôt voir le jour.

L'amélioration du système d'injection du combustible a été une préoccupation constante des constructeurs. La seule méthode d'injection utilisée pratiquement jusqu'à la Première Guerre est l'air comprimé. L'injection pneumatique du combustible présente deux inconvénients : l'abaissement du rendement mécanique et l'encombrement du compresseur. Le réglage n'était pas précis. Pourtant, les compresseurs à plusieurs étages donnent encore de bons résultats. Ce qui explique que l'injection mécanique, même après l'utilisation de la haute pression, s'imposera avec difficulté.

L'injection mécanique à haute pression avait été préconisée par Diesel lui-même, dès 1905. Il fait même une demande de brevet en janvier 1905 sous le nom de Oscar Lintz pour une solution très avancée pour son temps. Il prévoit notamment une pompe-injecteur montée dans la culasse, qui travaille à des pressions de plusieurs centaines d'atmosphères. Cette conception ne sera mise au point et utilisée que vers... 1950 ! Plusieurs systèmes d'injection mécanique sont réalisés, dont on doit citer celui de l'Anglais Brandstetter en 1905 et celui de l'ingénieur français Wissler chez Sautter-Harlé.

# Diesel

2<sup>e</sup>  
partie

## LE MOTEUR DIESEL

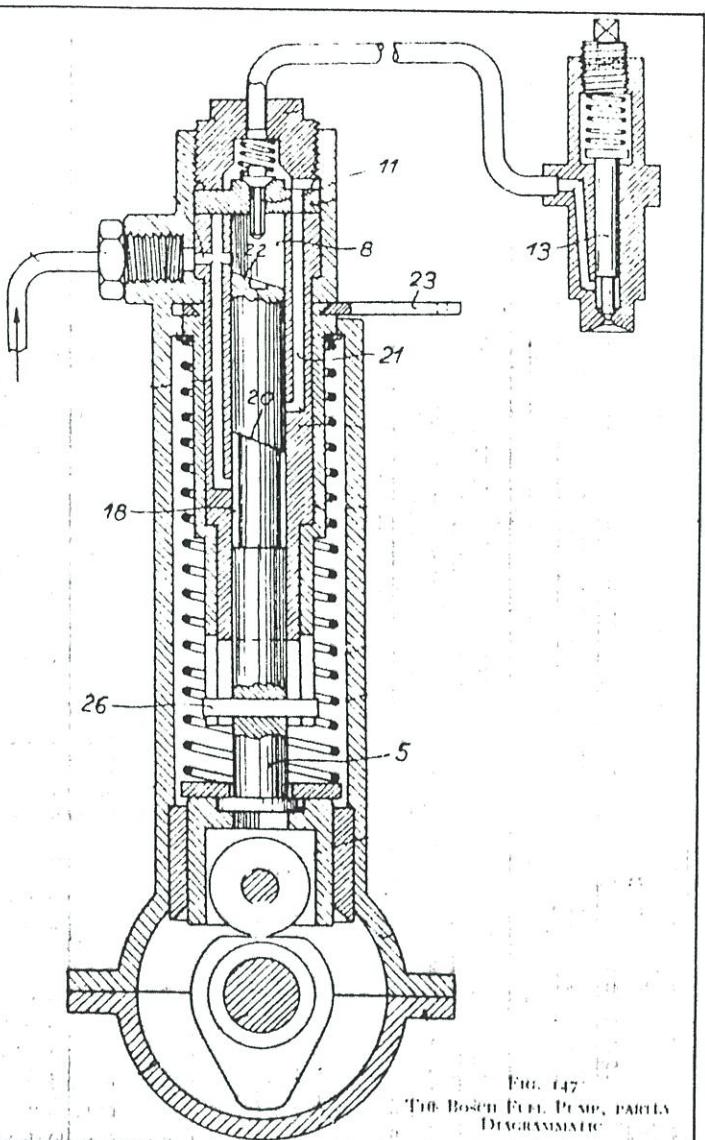
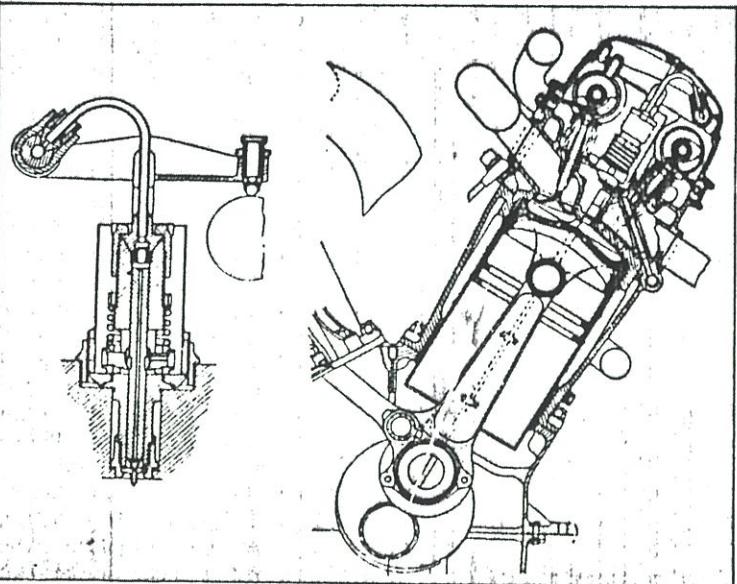


FIG. 147  
THE BOSCH FUEL PUMP, PARTLY  
DIAGRAMMATIC

Le problème essentiel du système d'injection mécanique de McKechnie était le réglage convenable de la quantité de combustible en fonction des différents régimes de fonctionnement. C'est Robert Bosch qui trouve la solution en 1926.

En France, des études poussées de l'amélioration du système d'injection sont réalisées entre les deux guerres. Entre autres, Coatalen présente en 1936 un dispositif d'injection à pression constante de  $800 \text{ kg/cm}^2$ , avec une consommation extrêmement basse de  $150 \text{ g/ch/h}$ .



Mais le premier système d'injection mécanique travaillant vraiment avec une haute pression d'injection fut conçu par l'ingénieur anglais McKechnie, directeur technique de la maison Vickers.

La construction imaginée par McKechnie est formée d'un injecteur à buses ouvertes, d'une pompe mécanique de haute précision à piston plongeur et à ressort actionnée par came et alimentée par une pompe mécanique de basse pression. La pompe de haute pression envoie le combustible dans l'injecteur à travers une soupape à chaque fin de course de compression. La haute pression est obtenue par la détente du ressort commandé par la came qui agit sur le piston plongeur de la pompe. La pression de travail préconisée par McKechnie était comprise entre 140 et 420 atmosphères. Pour son invention, McKechnie prend un brevet le 26 novembre 1910. Un problème essentiel était le réglage convenable de la quantité de combustible en fonction des différents régimes de fonctionnement. La solution, devenue classique, devait être proposée en 1926 par Robert Bosch en Allemagne.

Au début, ce sont uniquement les injecteurs ouverts qui sont utilisés ; puis, dans les années 20, apparaissent les injecteurs à buses fermées, actionnées hydrauliquement par la pression du combustible. Un autre système d'injection, beaucoup moins répandu que celui décrit plus haut, utilise une pompe d'injection fonctionnant en mode continu, maintenant dans un accumulateur le combustible sous pression. Les injecteurs sont fermés, actionnés mécaniquement par came au moment de l'injection du combustible dans le cylindre. Ce système présente l'avantage d'une construction simple employant une seule pompe sur les moteurs à plusieurs cylindres. Il dérive du système d'injection à accumulateur élastique et injecteurs fermés de Wissler.

En France, des études poussées portant sur l'amélioration du système d'injection furent réalisées entre les deux guerres : René Retel réalise en 1930 la première pompe d'injection mécanique à variation de pression limitée ; Coatalen présente en 1936 un dispositif d'injection à pression constante de  $800 \text{ kg/cm}^2$  avec une consommation extrêmement basse de  $150 \text{ g/ch/h}$ . André Labarthe étudie la propagation des ondes de pression dans les conduites reliant pompes et injecteurs ; Clerget propose l'injection simultanée de gasoil et d'alcool, etc.

La construction des moteurs Diesel avec chambres de combustion séparées trouve son point de départ dans les moteurs d'Akroyd-Stuart. Ce système s'est poursuivi et développé sur certains moteurs semi-Diesel. Sur les moteurs Diesel, trois types de chambres de combustion séparées se sont développés : les « préchambres », les chambres séparées à turbulence et les chambres séparées à réserve d'air.

La « préchambre » représente une faible partie de la capacité totale de la chambre de compression (20 %), étant liée à celle-ci par des orifices de très faible section. L'injection du combustible est effectuée dans la préchambre à des pressions relativement faibles. Ici, le combustible s'allume et brûle incomplètement faute d'une quantité suffisante d'air. La pression dans la préchambre augmente fortement après l'allumage et les gaz brûlés incomplètement sont éjectés à haute pression dans la chambre de combustion principale où la combustion s'achève. La préchambre joue donc le rôle d'un système d'injection à haute pression. Cette construction a été envisagée pour réaliser une injection efficace sans l'aide de l'air comprimé et sans emploi de hautes pressions d'injection. Parallèlement, en Allemagne, chez Benz et Cie, l'ingénieur Prosper L'Orange a proposé cette solution dès 1909 et va la mettre au point en 1919. En Suède, chez Svenska Maskinverken à Söder-tälje, l'ingénieur Harry Laisner travaille dans la même direction à partir de 1913.

Les chambres à turbulence se développent à la suite de recherches faites par de nombreux constructeurs sur la turbulence comme moyen de réaliser un meilleur mélange combustible ; aussi bien pour les moteurs Diesel que pour d'autres types de moteurs à combustion interne. Elles représentent 50 à 80 % du volume total de compression et sont conçues sous différentes formes, surtout sphériques, soit dans la culasse, soit encore dans le piston.

C'est en 1919 que Ricardo sort sa célèbre chambre de combustion en culasse en I, dont un modèle rudimentaire avait été réalisé par Strickland en 1904. En 1920, Taylor va lui donner une forme semi-sphérique. Tartrais, en 1921, l'utilise dans la construction du premier diesel rapide français. Toujours en France, entre les deux guerres, des études approfondies sont faites afin de réduire la chaleur cédée aux parois dans les chambres séparées à turbulence.

## LE MOTEUR DIESEL



1

Sur les moteurs Diesel, trois types de chambres de combustion séparées se sont développés : les « préchambres », les chambres séparées à turbulence et les chambres à réserve d'air.

1 et 2. Prosper L'Orange et la préchambre qu'il a mise au point en 1919.

2

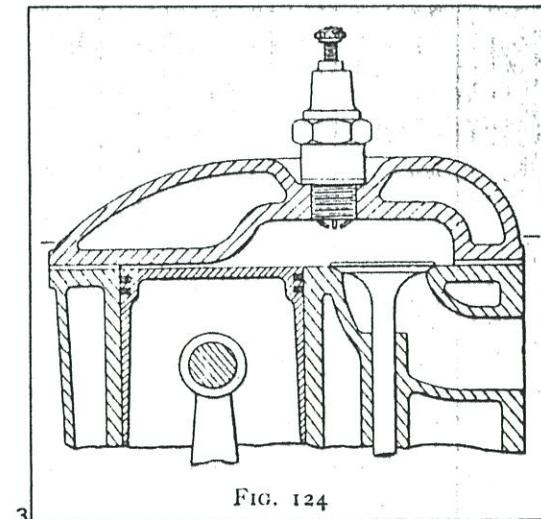
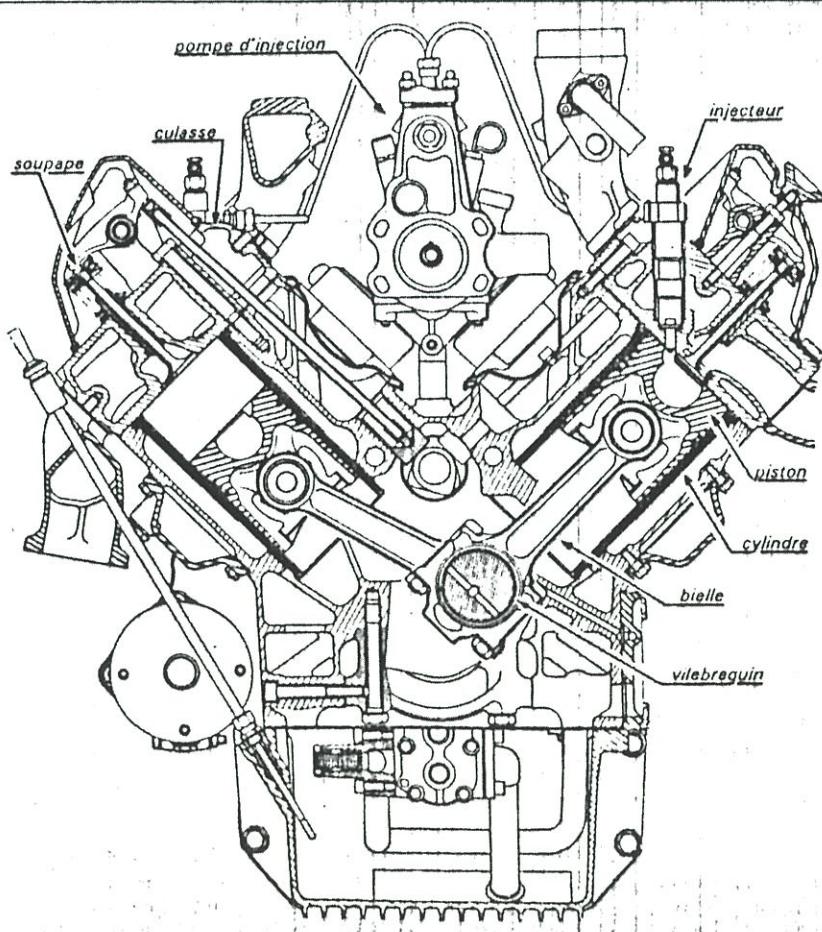
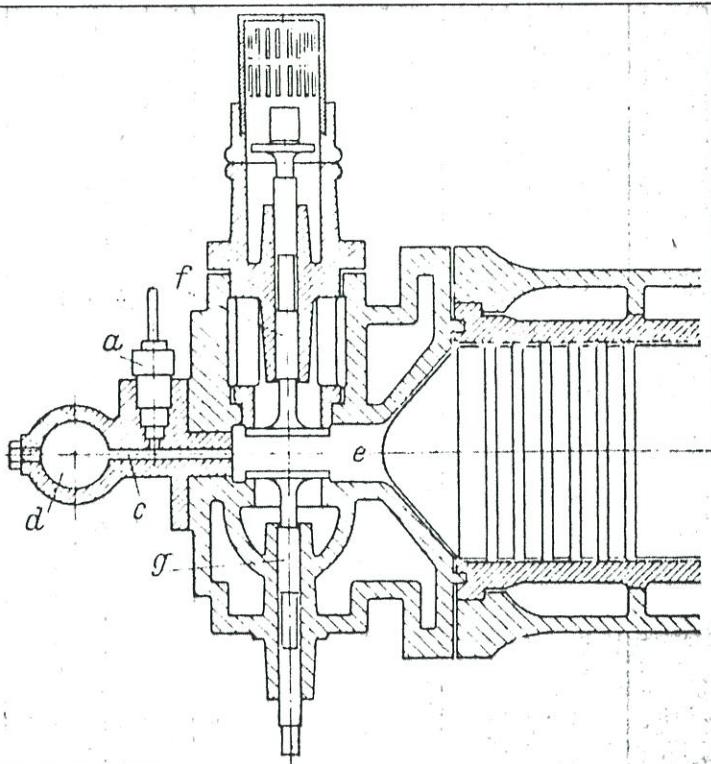
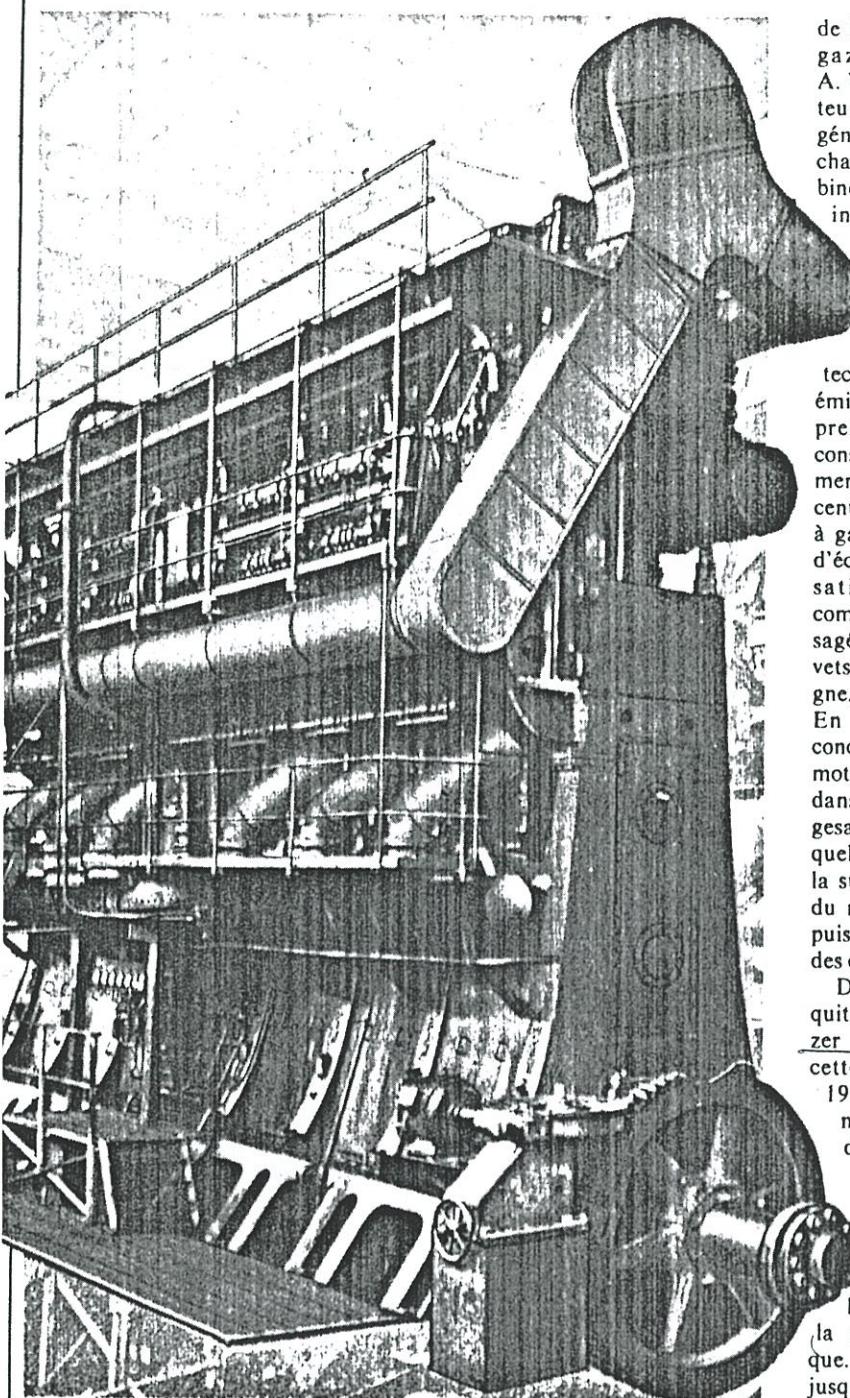


FIG. 124

3. Chambre de turbulence de Ricardo en culasse en T.

4. Coupe d'un moteur à huit cylindres en V avec chambre auxiliaire dans le piston, ou chambre à réserve d'air.

## LE MOTEUR DIESEL



Moteur à quatre temps à double effet qui développe une puissance totale de 16 500 ch. Il est installé sur le « Gripsholm », un des premiers navires de passagers construits après guerre et équipés avec des moteurs Diesel.

(Comet de Renault et de Berliet).

Avec le troisième type de chambre séparée, la chambre auxiliaire emmagasine une partie de l'air pendant la course de compression. C'est la chambre à réserve d'air. L'injection se produit dans la chambre principale où existe une quantité insuffisante d'air, et la combustion est moins violente. L'air accumulé s'écoule dans le cylindre pendant la course détente, contribuant de la sorte à une bonne combustion. Ce type de chambre annexe a été conçu par l'ingénieur

allemand Franz Lang en 1926.

La suralimentation est un moyen d'augmenter la puissance et le rendement des moteurs à combustion interne. C'est la pression moyenne du cycle de fonctionnement qui est accrue en alimentant les cylindres moteurs à l'aide d'un compresseur. Les moteurs Diesel dans lesquels on comprime l'air pur se prêtent parfaitement à la suralimentation.

Vers 1905, le jeune ingénieur Alfred Büchi, qui travaillait chez Carels, de Gand, où il était chargé

de la construction d'une turbine à gaz conçue par l'Autrichien A. Vogt, envisage d'utiliser un moteur à combustion interne comme générateur de gaz à la place de la chambre de combustion de la turbine. Il voulait ainsi éliminer les inconvénients liés aux hautes températures et pressions développées dans une turbine à gaz. Ses recherches l'amènent à la suralimentation des moteurs à combustion interne, technique dont il devient le plus éminent spécialiste. En 1905, il prend un brevet concernant la construction d'un moteur suralimenté à l'aide d'un compresseur centrifuge entraîné par une turbine à gaz, mue elle-même par les gaz d'échappement du moteur. L'utilisation de plusieurs types de compresseurs et turbines est envisagée. Dès cette année-là, des brevets sont pris par Büchi en Allemagne, en Suisse et aux Etats-Unis. En 1909, il publie une étude concernant la suralimentation des moteurs à gaz, à essence et diesel dans la revue « Zeit-Schrift für das gesamte Turbinenwesen », dans laquelle il présente les avantages de la suralimentation : augmentation du rendement thermique et de la puissance ; diminution du poids et des dimensions, etc.

Déjà, en 1908, Büchi avait quitté la maison Carels pour Sulzer frères de Winterthur. C'est cette dernière qui construit en

1911 le premier moteur suralimenté. Il s'agit d'un monocylindre à quatre temps à injection pneumatique (diamètre du cylindre 220 mm ; course du piston 350 mm ; vitesse de rotation 300 tr/mn). Le compresseur à piston monocylindre fournit également l'air à la pompe d'injection pneumatique. L'air qu'il débite est refroidi jusqu'à la température ambiante et emmagasiné ensuite dans des réservoirs d'où il pénètre dans le cylindre à pression constante. Les gaz d'échappement sont également collectés dans un réservoir qui alimente à pression constante la turbine à gaz. Cette technique a été testée chez Sulzer Frères entre 1911 et 1914, avec des pressions d'alimentation allant de 1 à 3 atmosphères (ce qui signifie une pression à la fin de la course de compression de 90 atmosphères et une pression moyenne de 15,3 atmosphères).

Büchi avait envisagé dans son étude de 1909 des pressions d'alimentation allant jusqu'à 6 atmosphères. Les résultats obtenus pendant les tests ne sont pas très encourageants : bien que le rende-

ment thermique augmente sensiblement, le rendement total est inférieur à celui du moteur Diesel non suralimenté. Plusieurs propositions sont faites ensuite en 1915 par Büchi, mais aucune ne se matérialise. Le diesel suralimenté ne va devenir une réalité qu'après la Première Guerre, d'abord sur les moteurs à quatre temps, ensuite sur ceux à deux temps. Le premier moteur Diesel turbo-suralimenté, effectivement employé, est construit seulement en 1923 par la maison Vulcan-Werke, de Hambourg, pour le navire allemand « Preussen ». La puissance du moteur passe de 1 750 ch à 2 500 ch. Un grand nombre de constructeurs adopteront cette solution, les performances s'améliorant continuellement.

Devenue courante vers 1930 sur les moteurs Diesel, la suralimentation ne sera appliquée qu'aux moteurs à quatre temps jusqu'en 1945. Après cette date, les moteurs à deux temps l'adopteront à leur tour. Aujourd'hui, le système de suralimentation par turbo-soufflante est généralisé, aussi bien sur les moteurs à deux temps que sur les moteurs à quatre temps. Certains problèmes restent pourtant encore posés, notamment dans le cas de moteurs de traction à régimes et à charges très variables.

Si dans les années 30, en utilisant la suralimentation, on augmentait la puissance d'un moteur Diesel de 60 % au maximum, on atteint aujourd'hui les 200 %, la pression de suralimentation allant de 1 à 3 atmosphères. Souvent, l'air de suralimentation est refroidi après la compression (par un échangeur de chaleur) en vue de permettre un meilleur remplissage du cylindre.

Après la Première Guerre, l'évolution des moteurs Diesel va déterminer l'apparition de trois types assez différents : les moteurs Diesel lents, 100 à 500 tr/mn, de très grande puissance, les moteurs Diesel de puissance moyenne avec une vitesse de rotation de 500 à 1 200 tr/mn et les diesels rapides avec une vitesse de rotation allant de 1 200 à 4 000 tr/mn.

Le moteur Diesel lent continue à être construit pour des puissances de plus en plus élevées. Si pendant la Première Guerre, la puissance des plus grands moteurs est de 3 000 ch (bien que des projets plus puissants aient été conçus), elle arrive à 1 500 ch vers 1930 pour atteindre presque 30 000 ch de nos jours (avec 300 ch/cylindre). Sur ces moteurs, jusque vers 1930, l'injection du combustible est faite en

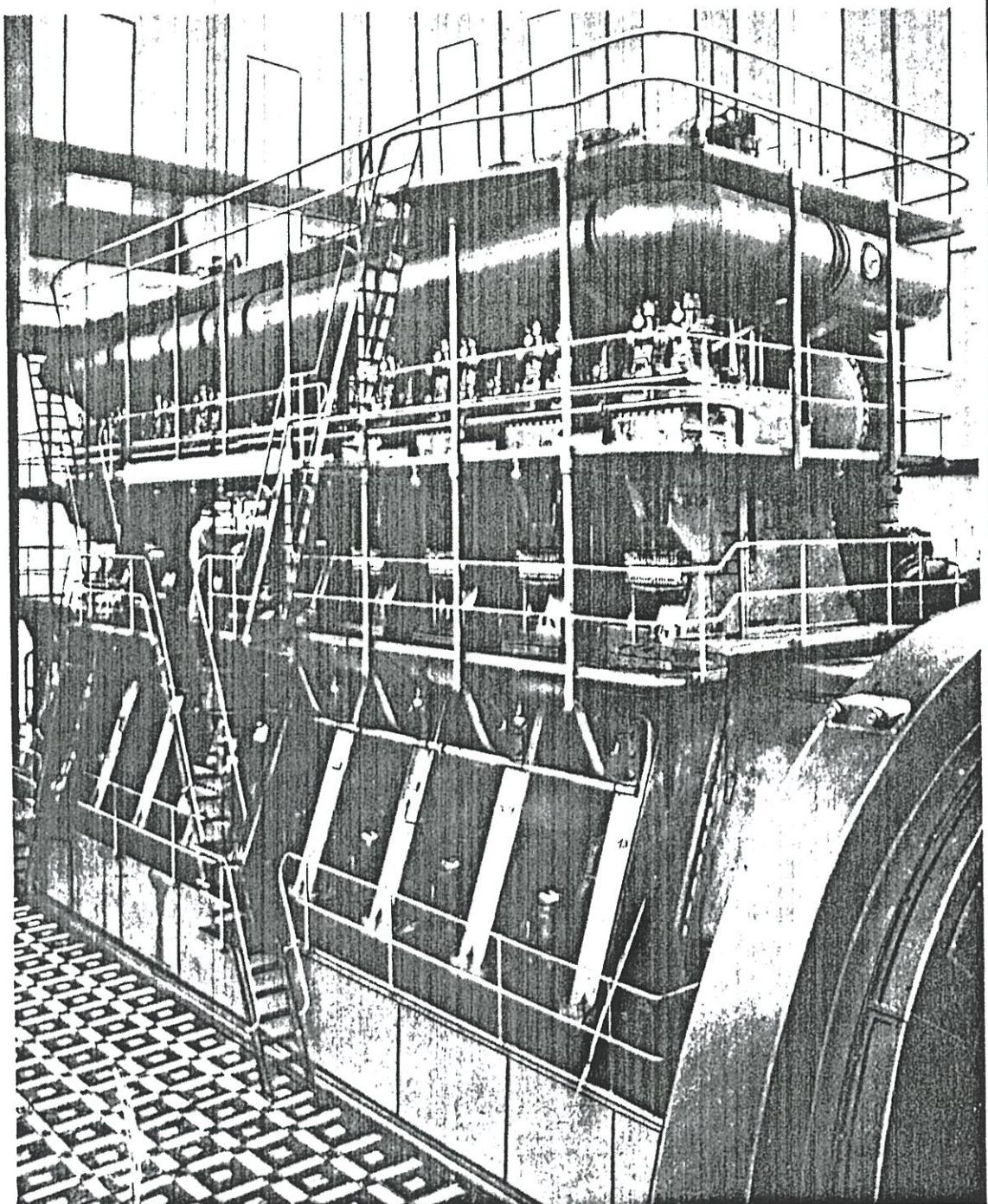
## LE MOTEUR DIESEL

core presque exclusivement à l'aide de l'air comprimé. Ils sont construits généralement avec la liaison entre le piston et le vilebrequin par bielle et tige avec crosse, solution qui demande un graissage moins fort dû à des sollicitations moins grandes. De même, le bloc moteur n'est pas coulé mais construit par des cylindres coulés séparément, fixés sur un bâti commun. On trouve plusieurs cylindres, jusqu'à 16 en ligne (une ligne ou deux lignes parallèles). La combustion se déroule à pression constante. Dans les années 20-30, ces moteurs sont à quatre temps à double effet (Burmeister et Wain, 10 000 ch en 1924) ou encore à deux temps à simple effet à balayage longitudinal (Sulzer 13 000 ch en 1924 pour le bateau « Aorangi »). Dans la décennie suivante, les moteurs à quatre temps à double effet sont abandonnés à cause de leur construction trop compliquée et remplacés par les moteurs à quatre temps à simple effet suralimentés.

C'est vers la même époque que les moteurs à deux temps commencent à gagner du terrain. Ces moteurs vont être réalisés avec beaucoup de succès, non seulement comme moteurs simple effet, mais aussi comme moteurs à deux temps à double effet et à pistons opposés. Le premier moteur à deux temps à double effet a été réalisé par Blohm et Woss pour le bateau « Magdeburg » en 1924. Les moteurs Diesel lents, très lourds, sont employés dans les centrales électriques et comme moteurs de navires. Leur développement a été favorisé après la Première Guerre par la reconstruction des flottes des différents pays où ils remplacent les machines à vapeur. Parmi les premiers navires de passagers construits après guerre et équipés avec des moteurs Diesel : l'« Aorangi » (Nouvelle-Zélande, 1924), le « Gripsholm » (Suède, 1925), l'« Asturias » (Angleterre, 1925), l'« Augustus » (Italie), etc.

Après la Seconde Guerre mondiale les moteurs Diesel de très grande puissance ont été construits exclusivement comme moteurs à deux temps à plusieurs cylindres en ligne : à simple action, à double action et à pistons opposés. De nos jours, ces moteurs sont sérieusement concurrencés par les turbines à vapeur et aussi par les turbines à gaz.

Parallèlement se développent les moteurs Diesel d'une puissance moyenne jusqu'à 2 000-3 000 ch, qui tournent avec une vitesse de rotation encore assez lente bien que supérieure aux premières de 500 à 1 200 tr/mn. A quatre temps



Les moteurs Diesel lents, très lourds, sont souvent utilisés dans les centrales électriques.

et simple effet, suralimentés ou à deux temps et simple effet ou encore à pistons opposés, à plusieurs cylindres, en ligne ou en V... ces moteurs sont employés comme moteurs fixes ou navires et surtout comme moteurs de locomotives.

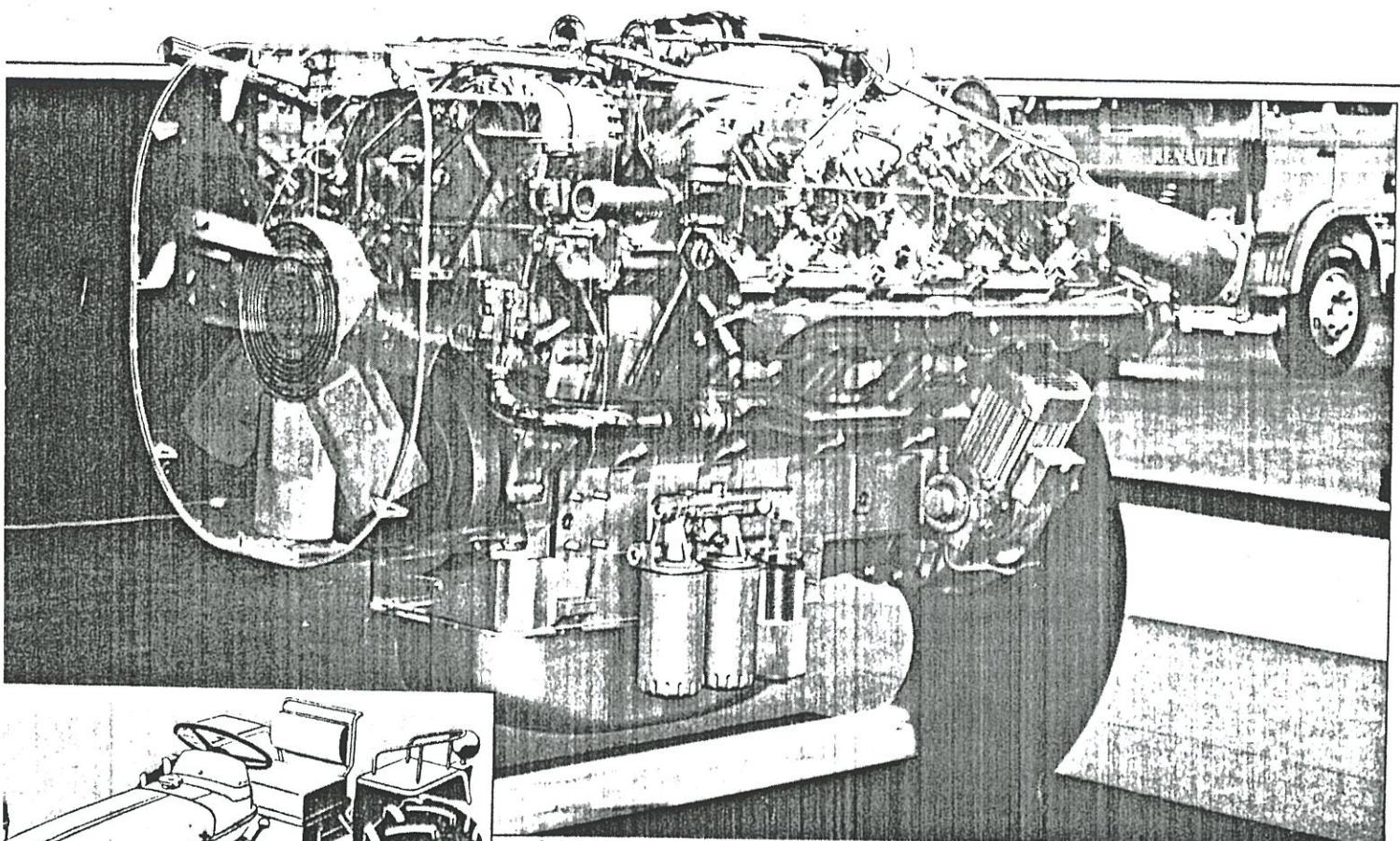
Après la Première Guerre, l'emploi des moteurs Diesel sur des locomotives, déjà envisagé comme on l'a vu, commence à se développer. Mais c'est seulement après la Seconde Guerre que la locomotive à vapeur va être remplacée massi-

vement par la locomotive Diesel. Ainsi, aux Etats-Unis, le diesel remplace complètement la machine à vapeur sur les locomotives en 1960, alors qu'en 1951 existaient encore dans ce pays plus de locomotives à vapeur que de diesels. En Europe, la « diésélisation » des chemins de fer va se poursuivre jusqu'en 1970.

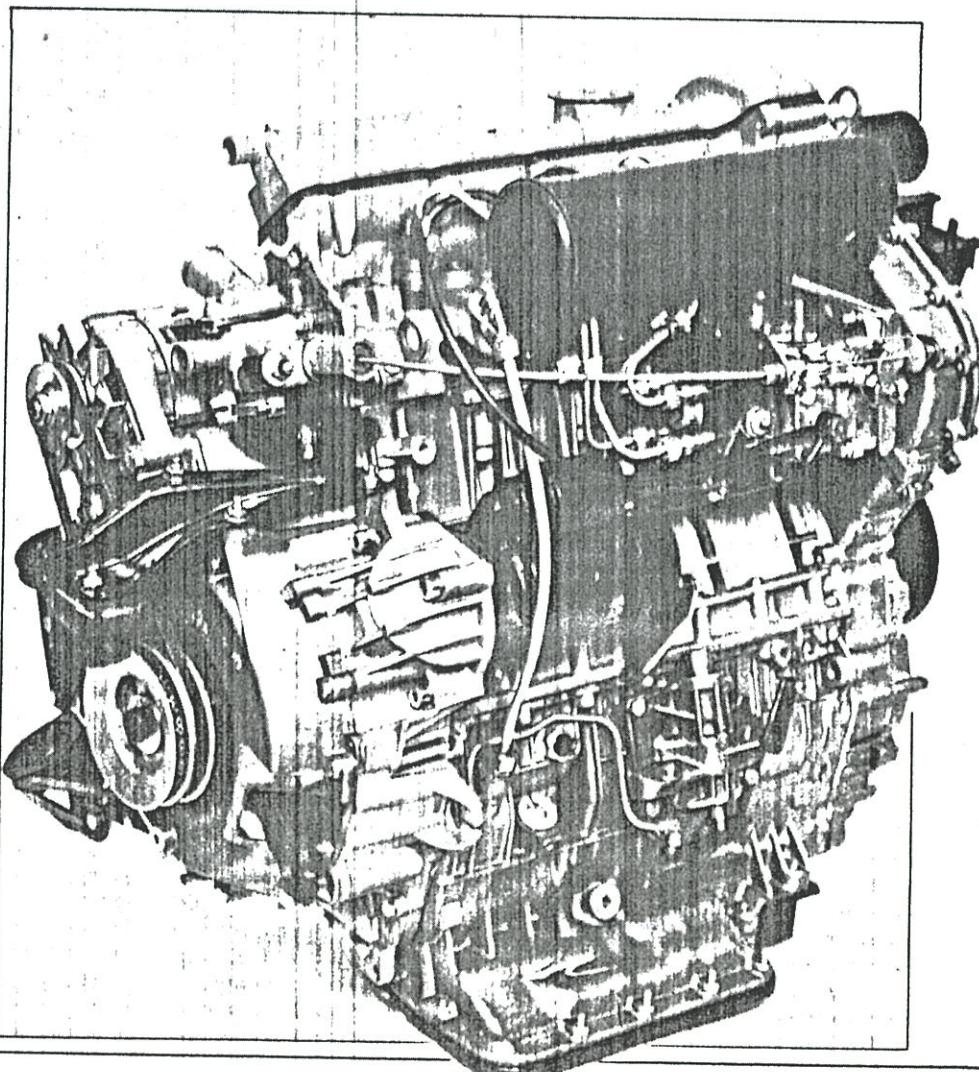
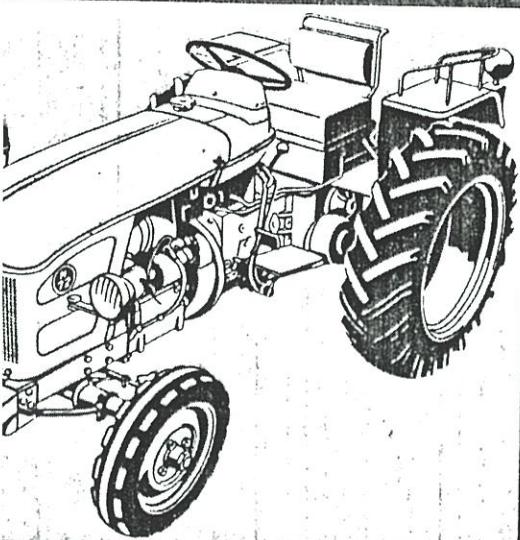
Un problème essentiel dans l'emploi des moteurs Diesel sur les locomotives était le choix de la transmission, le moteur Diesel ne s'adaptant pas assez vite au changement

de régime. Sur les locomotives, la transmission électrique s'est montrée la plus favorable. La première locomotive Diesel électrique a été construite en Angleterre en 1928 ; en Allemagne, en 1932 (Felden-Hamburger), aux Etats-Unis, en 1934 (Pioneer Zephyr).

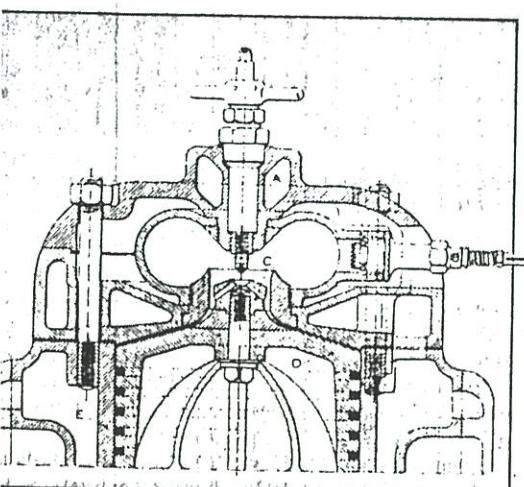
Mais ce sont les moteurs Diesel rapides construits après la Première Guerre qui vont élargir d'une manière spectaculaire les domaines de l'utilisation du moteur Diesel. Dans les moteurs Diesel rapides, le processus de combustion



Tracteur agricole et moteur Diesel en V pour camion (Renault). L'effort principal porté sur les moteurs Diesel légers a été dirigé vers l'augmentation du rendement et de la puissance spécifique.



Chambre Peugeot-Tartrais (ci-dessus) et moteur Diesel de la 305. En France, c'est Tartrais, en collaboration avec la société Peugeot, qui réalise en 1921 le premier moteur Diesel léger à grande vitesse qui sera monté sur des voitures.



## LE MOTEUR DIESEL

est moins simple, en raison d'une durée très réduite de la combustion. En effet, les moteurs restent assez proches des modèles conçus avant la Première Guerre, fonctionnant d'après un « cycle Diesel » à combustion à pression constante. Au contraire, les moteurs Diesel rapides décrivent un cycle de fonctionnement « mixte ». On injecte le carburant un peu avant le point mort extérieur, l'inflammation du combustible commençant après un délai d'inflammation, et, aussitôt enflammé, il brûle spontanément à volume constant. Cette combustion à volume constant, qui n'est pas complète, continue jusqu'à la fin de l'injection à pression constante. Voilà schématiquement le cycle mixte appelé aussi cycle Sabathé.

Le moteur Diesel rapide a pu être réalisé grâce à la mise au point du système d'injection mécanique de haute pression et des chambres de combustion séparées. Le problème de l'injection du combustible dans les moteurs Diesel rapides est longtemps resté l'un des plus délicats en raison de l'extrême pétitesse de début unitaire du combustible, qui réclame une grande précision, donc une étanchéité parfaite. En particulier, l'adaptation des pompes d'injection au moteur Diesel rapide à plusieurs cylindres, de manière à débiter les quantités de combustible nécessaires aux différents régimes de fonctionnement, a été très difficile. Aujourd'hui, la modernisation de l'équipement industriel et l'emploi de nouveaux matériaux ont permis d'abaisser le prix de revient et d'assurer d'une manière entièrement satisfaisante l'alimentation de ces moteurs. Ils fonctionnent d'après le cycle à quatre ou à deux temps à simple effet.

Si après la Seconde Guerre la suralimentation par turbo-soufflante s'est généralisée sur les diesels lents, elle est moins répandue sur les rapides. Ceux-ci comportent plusieurs cylindres. Ils vont être construits comme moteurs en ligne ou en V sans que d'autres solutions cinématiques empruntées aux moteurs « à explosion à essence » soient écartées. La construction des moteurs Diesel rapides a été envisagée déjà vers 1900 chez MAN par Rieppel et Lucien Vogel. Mais à cette époque les moyens techniques ne permettaient pas une telle construction. Les premiers modèles de ce type sont réalisés en Allemagne et en France. En Allemagne, en 1920, Ernst Frey et Karl Fischer réalisent un moteur Diesel à grande vitesse de rotation (2 400 tr/mn) qui développait 7 ch. Ce monocy-

lindre avec injection directe, refroidi par air, est monté sur une moto NSU, qui, paraît-il, est le premier véhicule routier mû par un diesel léger. En Allemagne, c'est ensuite Dorner qui construit des moteurs Diesel légers à un et deux cylindres, à injection directe pour des voitures. A partir de 1922, la société Benz commence à s'orienter vers la construction de moteurs Diesel rapides à injection indirecte, avec antichambre. Benz lui-même se préoccupe de cette mise au point. En France, c'est Tartrais, en collaboration avec la société Peugeot, qui réalise en 1921 le premier moteur Diesel léger à grande vitesse. Il s'agit d'un moteur à deux temps à deux cylindres avec injection indirecte, le moteur ayant une chambre de turbulence en culasse. Ce moteur monté sur des voitures a même participé à la course automobile Paris-Bordeaux.

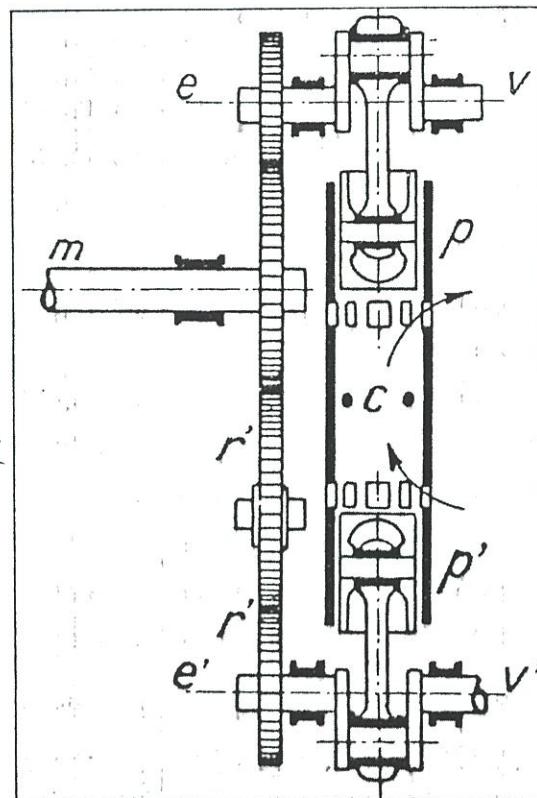
Les moteurs Diesel légers se développent, l'effort principal étant dirigé évidemment vers l'augmentation du rendement et de la puissance spécifique. Ils arrivent à remplacer avec succès le moteur « à explosion à essence » sur les poids lourds, tracteurs, autobus, machines de construction, locomotives, certaines voitures et même les avions. Et la plupart des engins militaires, dont les chars, sont équipés également avec des moteurs Diesel.

Le processus d'emploi des moteurs Diesel rapides va s'accélérer fortement après la Seconde Guerre, sauf en aéronautique. De tels moteurs d'avion ont été essayés entre les deux guerres. Par exemple, Junkers réalise des moteurs à deux temps à pistons opposés à six cylindres et Packard un moteur radial à neuf cylindres. Mais aujourd'hui les diesels d'aviation ont été pratiquement abandonnés, ceux-ci étant surclassés par le moteur à essence et surtout par les moteurs à réaction. Dans ce domaine, survivra seulement le moteur compound couplé avec une turbine.

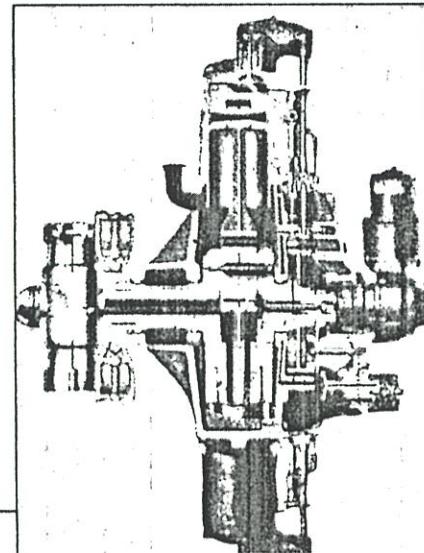
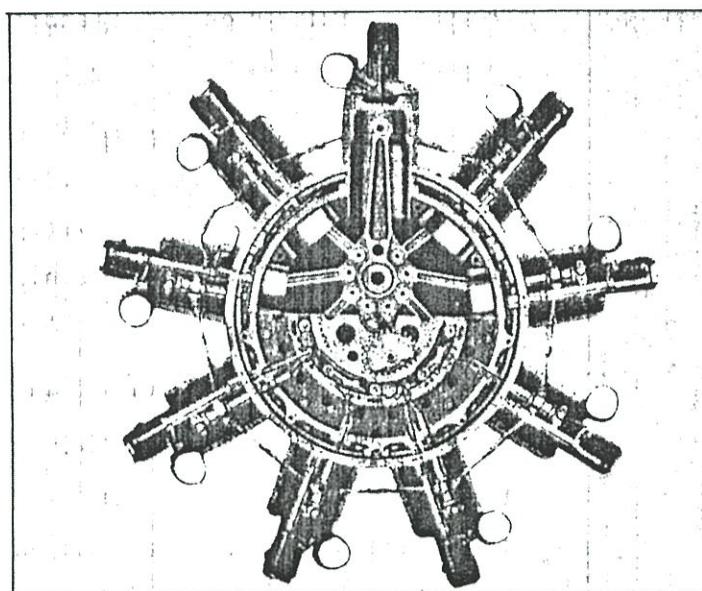
Le moteur Diesel reste à certains points de vue inférieur au moteur à explosion à essence : sa puissance spécifique est nettement plus faible, son fonctionnement est moins uniforme, les sollicitations thermiques et mécaniques plus grandes, il est plus polluant, son prix de construction plus élevé. Pourtant ses avantages (rendement supérieur - 45 % sur les diesels suralimentés - combustible meilleur marché, robustesse) l'ont imposé.

ALEXANDRE HERLEA

Iconographie : Kharbine



Principe du moteur d'avion Junkers :  
m : arbre moteur  
v et v' : vilebrequins accouplés par e, r, r', e' (train d'engrenages)  
p et p' : pistons opposés dans le même cylindre c.



Dispositif du moteur Packard :  
ci-dessus élévation et coupe partielle ;  
ci-contre coupe longitudinale

Aujourd'hui les diesels d'aviation ont été pratiquement abandonnés.