

ÉVOLUTION DE L'APPAREIL PROPULSIF DES NAVIRES

PAR

André LEDERER

24514

1. Introduction

Cette communication décrit les grandes lignes de l'évolution de l'appareil propulsif des navires depuis le XIX^e siècle jusqu'à ce jour.

La vogue a été d'abord aux machines alternatives à vapeur avec ou sans condenseur et avec ou sans surchauffe ; puis, ce fut la turbine à vapeur avec les mêmes variantes.

Au début, les chaudières étaient fort simples, mais vers 1850, la vapeur était produite dans des chaudières du type écossais à tubes à fumée ; avec l'augmentation de la puissance et de la pression, les chaudières à tubes bouilleurs se généralisèrent ; afin d'augmenter leur rendement, la circulation de l'eau et de la vapeur fut étudiée simultanément avec l'adoption de la surchauffe, de la resurchauffe, de l'économiseur et du préchauffage de l'air.

Cependant, le moyen le plus radical pour augmenter le rendement est la suppression de la chaudière en brûlant directement le combustible dans les cylindres ; pour cela, il faut utiliser du combustible liquide. C'est ce que Diesel a réalisé dans des moteurs à piston-crosse avec aspiration de l'air à la pression atmosphérique.

On passe du moteur à 4 temps, réalisé en 1894 par Diesel, à celui à 2 temps, conçu en 1907 par les frères Sulzer.

Depuis 1950, avec l'augmentation de la puissance, les grands moteurs sont conçus avec tige de piston et crosse, ils sont à 2 temps et brûlent du combustible lourd, avec injection mécanique ; les engins modernes sont suralimentés au moyen d'un turbocompresseur actionné par les gaz d'échappement.

Ainsi, au cours des ans, le poids, le volume et la consommation de l'appareil propulsif ont décliné progressivement pour une même puissance.

Ci-dessous, les progrès des principaux types d'appareils propulsifs sont passés en revue dans leurs grandes lignes.

2. Les machines marines alternatives à vapeur

Les premières machines marines étaient horizontales ; ce type resta longtemps en vigueur sur les bateaux de rivière et sur les navires de guerre non cuirassés, de telle

manière que la machine était protégée par le fait qu'elle se trouvait entièrement sous la flottaison. Ces installations actionnaient des roues à pales fixes et, après 1842, des roues à pales articulées d'un meilleur rendement propulsif (fig. 1).

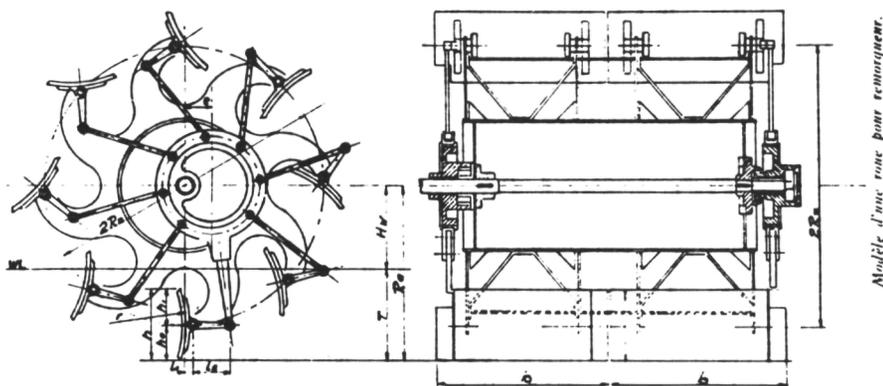


Fig 1. — Roue à pales articulées.

Les machines du type vertical furent adoptées par la marine marchande bien avant qu'elles ne furent introduites sur les navires de combat. Avec les machines du type vertical, c'en était fini des machines lentes et lourdes entraînant des roues ; dorénavant, la machine entraînait une hélice plus légère et tournant plus vite, d'où une réduction de poids considérable pour une puissance identique ; autre avantage non négligeable, le prix de ces installations était moindre. L'utilisation de l'hélice se généralisa.

La machine marine à vapeur est conçue de façon à pouvoir inverser son sens de rotation. Les premières réalisations étaient compliquées, mais en 1820, Stephenson, en inventant la coulisse, apporta un progrès considérable dans le domaine de la machine marine de propulsion. L'inversion du sens de rotation de la machine était obtenue en attaquant le coulisseau au choix par l'un ou l'autre excentrique, en faisant varier la position de la coulisse. Ainsi, un excentrique servait pour la marche avant et l'autre pour la marche arrière ; si on désire tourner à vitesse réduite, il suffit de déplacer la coulisse de telle façon qu'elle occupe une position intermédiaire (fig. 2).

Les premières machines fonctionnaient avec une pression de 100 à 200 k Pa¹, la vapeur étant produite dans une chaudière cylindrique verticale du type le plus simple, mais fragile ; la machine actionnait des roues à pales fixes. Au milieu du XIX^e siècle, les chaudières à tubes à fumée firent leur apparition et la pression monta entre 300 et 500 k Pa. Entre 1850 et 1860, il était devenu courant d'utiliser des pressions de 500 à 700 k Pa et l'utilisation du condenseur à surface réduisait les pertes provenant des dépôts de sulfate de calcium contenu dans l'eau de mer, d'où un gain de 15 à 20%.

¹ 1 k Pa = 1 kilopascal qui vaut environ 0,01 kg/cm².

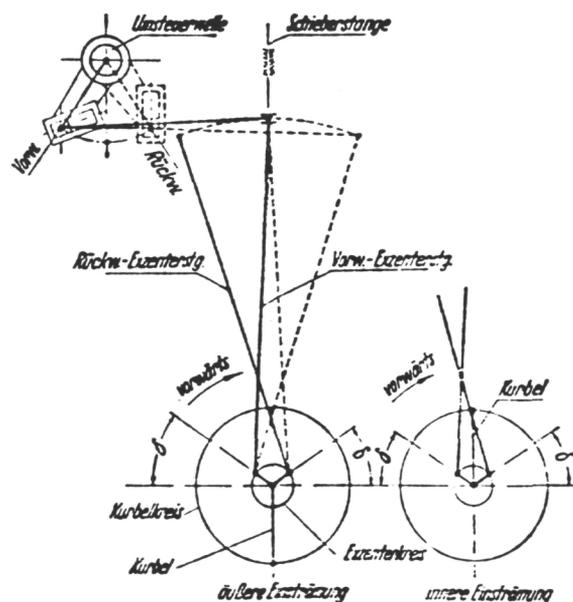


Fig. 2. — Coulisse de Stephenson.

En traits continus, marche avant ; en traits interrompus, marche arrière. À gauche : admission externe ; à droite : admission interne («Kurbel» = manivelle ; «Schieberstange» = tige de tiroir ; «Exzenterstang = barre d'excentrique).

À la même époque, deux améliorations furent introduites dans les machines marines. La chaudière cylindrique, connue sous le nom de chaudière écossaise, avec tube foyer de grand diamètre, à retour de flamme au travers de tubes à fumée, le tout contenu dans un cylindre d'acier (fig. 3). La seconde amélioration consistait en l'adoption de la double expansion, ou «machine compound» ; cette solution s'avéra nécessaire lorsque la pression monta jusqu'à 700 et 800 k Pa ; ce progrès procurait une nouvelle économie qui peut être estimée à 30 et à 40% et survint pendant la décennie de 1860 à 1870 (fig. 4).

Pendant la décennie suivante, la pression fut portée jusqu'à 900 k Pa et on vit sur le marché des machines marines à triple et même à quadruple expansion. Lorsque la pression s'éleva jusqu'à 1200 k Pa, le gain de rendement atteignit 15 à 20% par rapport aux premières machines compound (fig. 5).

Un ultime progrès pour améliorer le rendement des machines alternatives apparut vers 1910 ; c'est la turbine d'échappement pour abaisser la pression de détente de la vapeur, mais cette solution ne connut guère de succès à cause de la complexité pour reporter la puissance de cette turbine sur l'arbre de couche.

Avec l'augmentation de la puissance et de la pression de vapeur, la marine utilisa des chaudières à tubes bouilleurs, plus légères, plus solides et d'un rendement

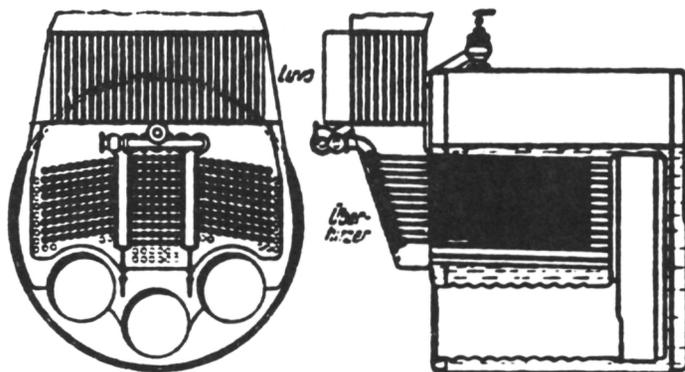


Fig. 3. — Chaudière écossaise à tubes à fumée.

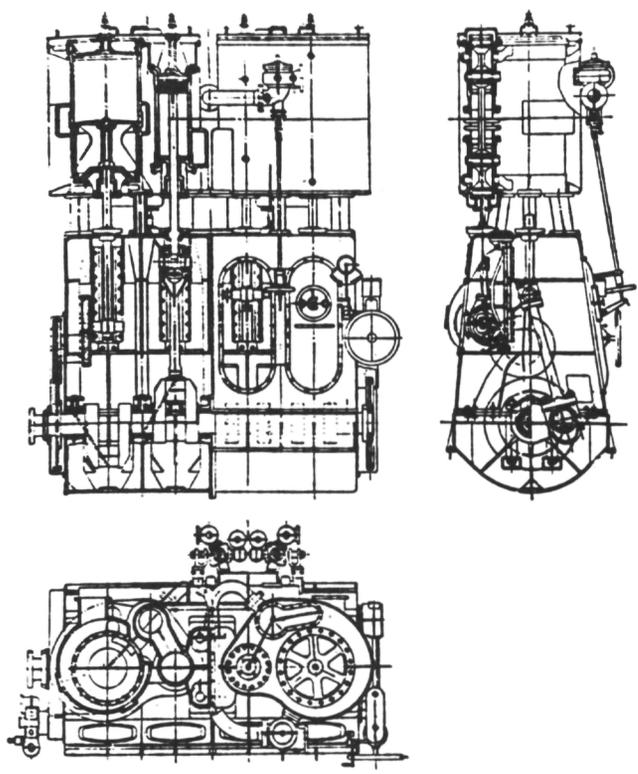


Fig. 4. — Machine compound double.

supérieur à celles à tubes à fumée (fig. 6). Vers 1890, Yarrow et Thornycroft défendaient, l'un les chaudières à tubes droits, l'autre à tubes courbes. La principale amélioration au début du xx^e siècle provint de l'utilisation du surchauffeur qui évitait de travailler avec de la vapeur saturée, source de condensation dans les cylindres, avec toutes les détériorations subséquentes. Cependant, la haute pression et la température élevée impliquaient l'utilisation d'huiles de qualité et à haute viscosité pour éviter le grippage des cylindres.

L'augmentation des puissances fut à l'origine de mise au point de méthodes pour équilibrer les machines, de façon à éviter les vibrations dans la coque et dans les superstructures.

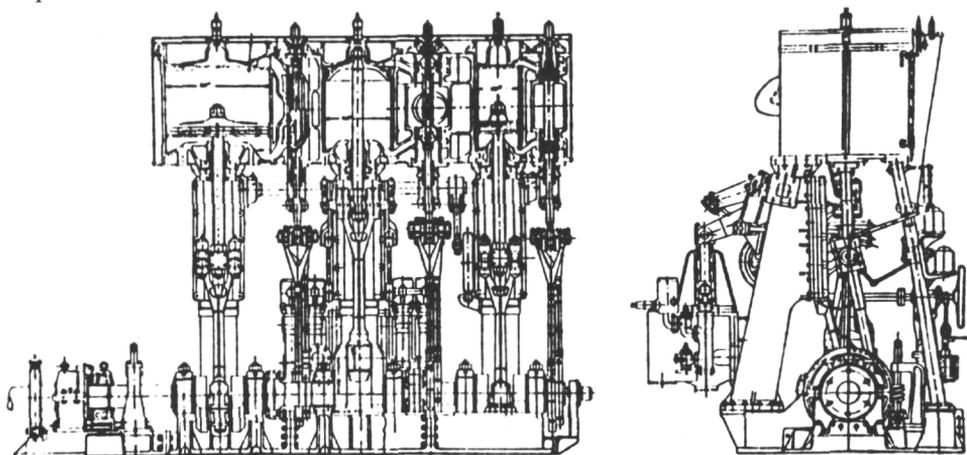


Fig. 5. — Machine à triple expansion.

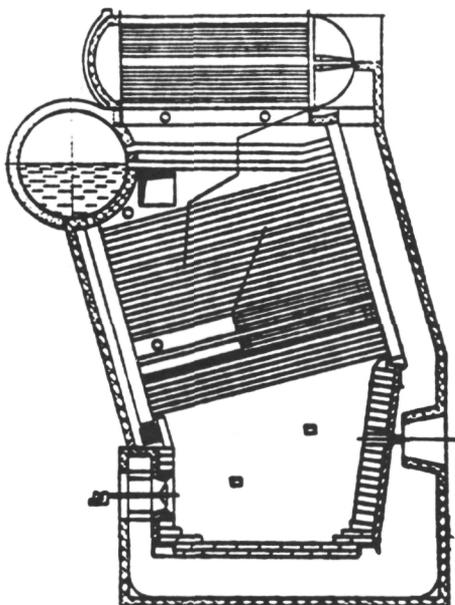


Fig. 6. — Chaudière à tubes bouilleurs, type Babcock-Wilcox.

Yarrow, Schlick et Tweedy réussirent à mettre au point un système grâce auquel les parties en mouvement de la machine, par leur travail propre, annulaient les vibrations.

La détente de la vapeur en deux, trois ou quatre étages est avantageuse, car avec la réduction de la variation de pression dans le même cylindre pendant l'expansion de la vapeur, la variation de température diminue. Lorsque la diminution de la pression, donc de la température, est divisée en deux, trois ou quatre étages, les variations de température dans un même cylindre sont plus faibles, ce qui réduit les inconvénients dus aux effets de la dilatation ou de la condensation.

En tout cas, la température de surchauffe restait modérée, pas plus de 275° C, afin d'éviter les problèmes de lubrification. À l'admission du cylindre basse pression d'une machine compound ou du cylindre intermédiaire d'une machine à triple expansion, la vapeur est toujours saturée.

Les machines à triple expansion sont souvent à quatre cylindres, l'échappement du deuxième cylindre étant dirigé vers deux cylindres basse pression, afin d'éviter que ces derniers ne soient de trop grandes dimensions et que le poids des pistons ne soit trop élevé ; cependant, pareille disposition complique la tuyauterie.

3. La turbine à vapeur

La turbine à vapeur fit son apparition vers 1897, mais les premières applications marines ne furent pas couronnées de succès, car leur rendement n'était pas assez élevé. La turbine devait tourner trop lentement et l'hélice trop rapidement, aucun des deux ne tournant à une vitesse leur convenant ; il en résultait une consommation plus élevée qu'avec les machines alternatives à la vitesse de croisière. En outre, les deux premiers destroyers, le «Cobra» et la «Vipère», après des essais officiels satisfaisants, furent perdus à la suite d'accidents qui n'avaient rien à voir avec le mode de propulsion. Cependant, durant des années, la Royal Navy ne voulut plus entendre parler de turbines pour ses navires.

Pendant ce temps, vers 1901, la flotte commerciale mit en ligne un bateau à turbine pour le transport de passagers sur la Clyde. L'excellent service de cette unité conduisit à des turbiniers pour le service transmanche entre Calais et Douvres, ainsi qu'entre Newhaven et Dieppe. Deux objections étaient fréquemment émises à l'égard de l'utilisation des turbines. C'était d'abord la faible manœuvrabilité eu égard aux petites dimensions des hélices entraînées directement par une machine irréversible, et aussi la consommation élevée de combustible à la vitesse de croisière.

Cependant, une roue indépendante de marche arrière fut installée dans l'enveloppe de la turbine du côté échappement, afin qu'elle tourne dans le vide du condenseur de façon à obtenir un effet de frein aussi faible que possible lorsqu'elle était entraînée dans le sens de la marche avant. Lorsqu'on inversait le flot de vapeur, la roue de marche arrière agissait d'abord comme un frein puissant, avant d'agir dans le sens de la propulsion en marche arrière.

Lorsque la roue de marche arrière tournait avec 20 à 25% de la puissance continue, elle développait un couple valant 35% de celui de la marche avant. Les essais ont montré que l'on obtenait une distance d'arrêt acceptable avec cette solution.

Au cours de l'année 1910, la turbine à vapeur connaissait une nouvelle phase très importante de son évolution. Après essais avec une turbine de faible puissance, la Parsons Marine Steam Turbine Cy avait acquis le cargo «Vespasian» pour y installer une turbine avec réducteur de vitesse à la place d'une machine alternative à triple expansion. La modernisation du «Vespasian» fut une réussite, car, pour une consommation de charbon identique, à plein régime, la vitesse était supérieure d'un noeud.

Le réducteur à engrenages fut la solution pour la transmission de la puissance à l'hélice. À l'origine, on réalisait une solution de compromis pour l'attaque directe ; l'ensemble tournait à environ 2000 tr/min, trop faible pour la turbine, trop rapide pour l'hélice. Puis on utilisa une solution avec réduction de vitesse à un étage, la turbine tournant aux environs de 3000 tr/min et l'hélice vers 500 tr/min ; c'était déjà mieux, mais pas encore suffisant. Depuis qu'on a réalisé des réducteurs de vitesse à double étage de réduction, on peut adopter des turbines en deux corps, l'un haute pression et l'autre basse pression, avec rotors tournant vers 5000 tr/min et arbre d'hélice à 100tr/min, soit un rapport de réduction de l'ordre de 1/50 (fig. 7).

La vitesse réduite de l'arbre de couche conduisait à des hélices de grand diamètre. Ce n'est qu'à partir de 1930 que la propulsion par turbines connut une certaine vogue. Elle fut adoptée surtout pour les pétroliers de grandes dimensions,

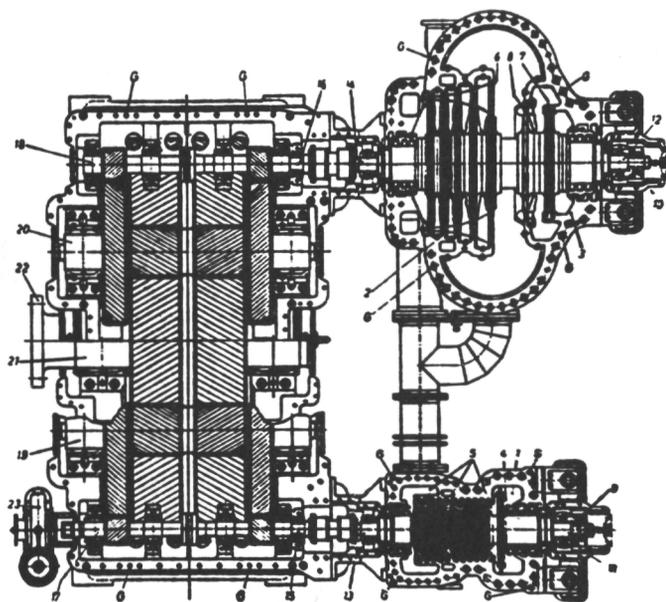


Fig. 7. — Turbine avec corps HP à action et corps BP à réaction ainsi qu'un réducteur de vitesse à deux étages de réduction.

lorsqu'on ne trouvait pas de moteur diesel de puissance suffisante sur le marché, mais aussi sur les paquebots pour le confort des passagers, vu l'absence de vibrations, celles-ci constituant un mal inhérent à toute machine alternative.

En fait, la turbine ne se justifie que pour des puissances supérieures à celles des moteurs diesel qu'on trouve de façon courante sur le marché, soit $23\,450\text{ kW}^2$ (ou $32\,000\text{ ch.}$). En effet, alors que la consommation spécifique d'un grand moteur diesel moderne n'est que de 170 gr/kWh , celle des meilleures turbines de propulsion est de 250 gr/kWh , soit 50% de différence ; à noter que les diesel actuels consomment un combustible aussi lourd que celui brûlé dans les chaudières.

Revenons-en aux turbines ; elles sont de deux types selon la forme des ailettes fixes et mobiles. Au début, on détendait la vapeur depuis la pression du timbre jusqu'à celle de l'atmosphère, ou du condenseur, si on en installait un, dans une couronne d'ailettes fixes à l'entrée de la turbine. La vitesse de la vapeur était très grande, d'où des pertes de rendement ; pour réduire ces pertes, on divise la chute de pression en plusieurs étages de pression comportant chacun plusieurs étages de vitesse ; il s'agit alors de turbines à action. On peut aussi diviser la chute de pression entre les ailettes fixes et celles mobiles du rotor ; on obtient alors une turbine à réaction. Ce sont celles de ce deuxième type qui sont les plus courantes sur les navires.

On a intérêt à ce que l'inertie des masses tournantes du rotor de la turbine ne soit pas trop élevée. Pour réduire la longueur de la turbine, à l'entrée de celle-ci, on place une roue de Curtis à un, deux ou trois étages de vitesse, d'où une sérieuse réduction de pression au sortir de la roue de Curtis, qui est une turbine à action ; la suite de la turbine se présente comme une turbine de Parsons avec, tournant dans le vide du condenseur, la roue de marche arrière, souvent à 3 étages de vitesse.

Sur les navires de la marine marchande, les installations motrices à turbine consomment généralement de la vapeur à 5000 kPa de pression à une température de surchauffe de 450°C . Dans ces conditions, on a une bonne turbine ne donnant pas lieu à difficultés en cours d'exploitation.

On trouve des installations à plus haute pression, à température de surchauffe plus élevée, mais elles ne se sont pas généralisées ni dans la marine marchande, ni dans les flottes militaires. Le moteur diesel a détrôné la vapeur étant donné sa moindre consommation et la suppression des chaudières, constituant un organe assez sensible.

4. La propulsion nucléaire

Dans la propulsion nucléaire, la chaudière est remplacée par un réacteur nucléaire qui produit de la vapeur destinée à alimenter une turbine de propulsion et, éventuellement, d'autres auxiliaires du navire.

Dans le réacteur, on charge un élément fissile, de l'uranium enrichi U235 ; en se dissociant, il libère des neutrons qui, à leur tour, bombardent d'autres atomes en

² 1 ch vaut $0,736\text{ kW}$ ou 1 kW vaut $1,36\text{ ch.}$

dégageant un rayonnement β et γ , dangereux pour l'homme, en même temps qu'il libère une importante quantité de chaleur. Pour obtenir la réaction en chaîne, il faut une masse critique ; pour rester maître de la réaction, on plonge plus ou moins profondément des barres de bore dans la masse critique, afin de régler la puissance dégagée.

Les neutrons libérés lors de la fission sont extraordinairement rapides, or ce sont les neutrons lents qui fissionnent le plus facilement le U235. L'entretien de la réaction en chaîne exige de ralentir leur vitesse par un modérateur qui est le plus souvent de l'eau qui freine la vitesse des neutrons sans les absorber. Le circuit pénétrant dans le cœur du réacteur est à une pression de 20 000 k Pa, de telle façon qu'il n'y ait pas possibilité d'ébullition massive ; l'eau sert à la fois de réfrigérant et de modérateur.

Elle constitue un circuit primaire qui passe par un échangeur thermique où elle réchauffe l'eau du circuit secondaire. Ainsi, on produit de la vapeur saturée sèche à une pression de 3000 k Pa et à une température de 310° C, qui alimente la turbine. Dès l'entrée dans cette dernière, la vapeur possède déjà un certain degré d'humidité ; finalement, avec la propulsion nucléaire, le fonctionnement de la turbine est de médiocre qualité comparé à celui des installations classiques (fig. 8).

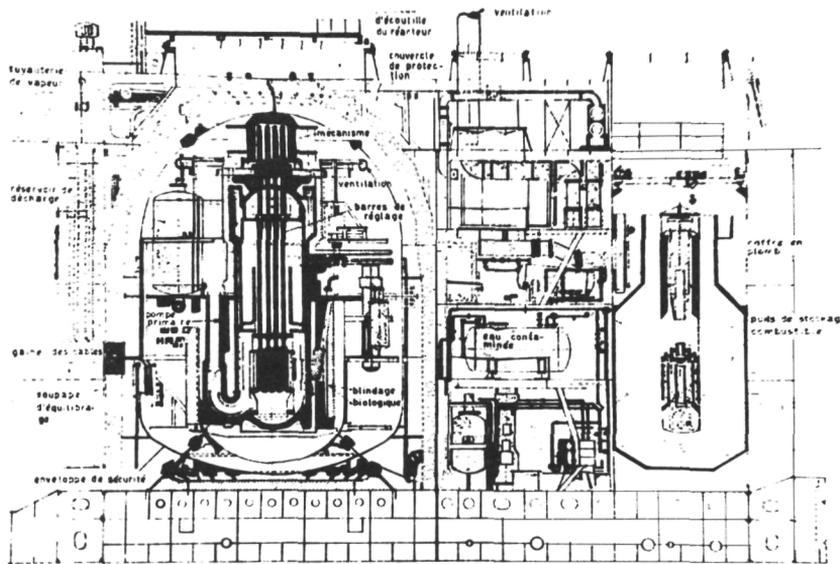


Fig. 8. — Réacteur nucléaire installé dans le navire.

Évidemment, on pourrait améliorer le rendement en surchauffant la vapeur dans un surchauffeur avec un brûleur à mazout ; il s'agit cependant d'une complication qu'on évite.

Avec ce genre d'installation à eau pressurisée, la vapeur passant par la turbine n'a pas pénétré dans le cœur du réacteur. Comme ce type de réacteur travaille à une

pression élevée, la cuve entourant le cœur est de forte épaisseur, ce qui conduit à un poids considérable. Pour éviter de soumettre l'équipage aux radiations, le circuit primaire est enfermé dans une enveloppe de sécurité dont l'accès est normalement interdit lorsque le réacteur est en fonctionnement.

Pour garantir le réacteur contre les collisions, il est protégé par des cloisons d'abordage devant et derrière, ainsi que sur les deux côtés.

Tout ceci, poids élevé, médiocre rendement de turbine, coût, fait que la propulsion nucléaire ne rencontre pas la faveur des armateurs. Ce genre de propulsion convient mieux pour des utilisations spéciales, comme les brise-glaces ou les sous-marins qui doivent rester plusieurs mois éloignés de leur source d'approvisionnement en combustible.

5. Les moteurs à combustion interne

Nous l'avons vu ci-avant, une façon radicale d'améliorer le rendement de l'appareil propulsif du navire est la suppression de la chaudière, de façon à se passer de l'intermédiaire vapeur pour actionner les pistons dans le moteur.

Le belge Étienne Lenoir fut le premier à avoir réalisé un moteur à combustion interne. En 1863, il avait concrétisé son invention en construisant un moteur à un cylindre fonctionnant à quatre temps, selon le cycle imaginé par le français Alphonse Beau de Rochas.

Ce moteur fonctionnait au gaz enflammé dans le cylindre par une étincelle électrique. On dit, sans que j'en aie trouvé la preuve, qu'il aurait, lors du siège de Paris en 1870, équipé une vedette propulsée par moteur Lenoir pour briser l'encerclement de la ville, mais ce petit bateau, le premier équipé d'un moteur à combustion interne, aurait été détruit dans l'aventure.

Il y eut aussi des petits bateaux à moteur à essence mis en ligne sur des rivières en Allemagne, notamment par des hommes comme Gottlieb Daimler et Carl Benz ; il s'agissait de petits moteurs rapides, de puissance inférieure à 27 kW (37 ch) ; l'essence très volatile, dont les gaz plus lourds que l'air s'accumulaient sous forme de vapeur dans le fond du bateau, comportait un risque d'explosion.

Quoiqu'il en soit, c'est avec le moteur imaginé par Rudolf Diesel que commença réellement l'ère de la propulsion des navires par moteur à combustion interne. Il publia en 1893 une étude : «Théorie et réalisation d'un moteur thermique rationnel».

Diesel, qui était un brillant thermodynamicien, s'avérait être plutôt un piètre réalisateur. Il s'écarta assez sensiblement de la version initiale qu'il avait imaginée et, au lieu de s'en tenir au combustible liquide, il essaya de brûler du charbon pulvérisé et de réaliser un cycle comportant une compression isothermique par injection d'eau, suivie d'une compression adiabatique à 2500 k Pa, une combustion isotherme et une détente adiabatique.

Diesel, après divers avatars, eut recours à l'usine M.A.N., à Augsbourg ; il eut le mérite d'adapter la construction de son moteur aux réalités des expériences et de

persevération dans son effort jusqu'à la mise au point du premier moteur, avec la collaboration de l'équipe de M.A.N.

L'utilisation des combustibles solides présentait l'inconvénient de ne pouvoir éliminer les cendres, d'où usure et grippage faisant écarter cette solution. On en vint alors au combustible liquide qu'on injectait dans l'air comprimé à l'intérieur du cylindre où régnait en fin de compression une pression de 3500 k Pa. L'injection du combustible se faisait au moyen d'air comprimé à 7000 k Pa ; ce système d'injection présentait deux inconvénients ; le compresseur d'air à 7000 k Pa était difficile à tenir en ordre et l'air à 7000 k Pa, en se détendant dans la chambre de combustion, se refroidissait, d'où des difficultés d'allumage du combustible lorsque la température n'était plus suffisante pour que la combustion se fasse d'elle-même.

Le remède à ces maux fut l'invention de la pompe Bosch (fig. 9). Le mouvement des pistons, un par cylindre du moteur diesel, est commandé par un arbre à cames ;

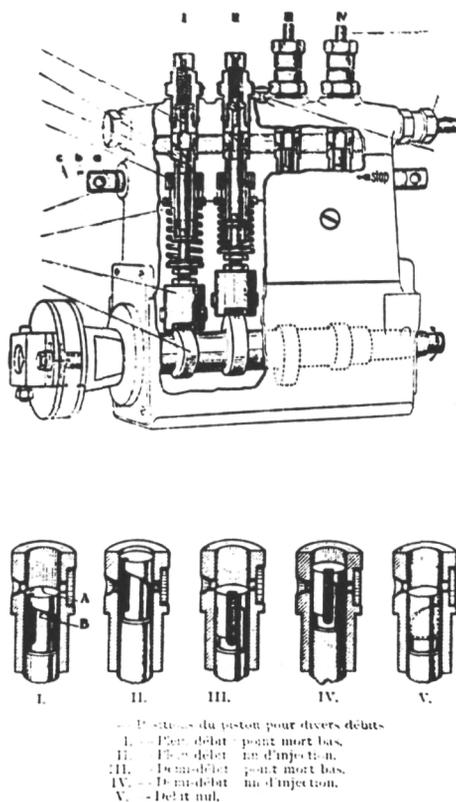


Fig. 9. — Pompe Bosch.

Position du piston pour divers débits. I. Plein débit : point mort bas ; II. Plein débit : fin de l'injection ; III. Débit moyen : point mort bas ; IV. Débit moyen : fin de l'injection ; V. Débit nul.

sur chaque came, un galet est appliqué par un puissant ressort. Au moyen d'une tige à crémaillère, appelée aussi cran de combustible, on peut faire pivoter les pistons autour de leur axe vertical, ce qui permet de régler la quantité de combustible injectée dans le cylindre à chaque cycle moteur. En effet, le combustible arrive par la gauche aux pistons de la pompe, l'ouverture de droite servant à recueillir, dans un petit réservoir, l'excédent de combustible ; la figure indique les positions du piston pour les différentes charges du moteur. Grâce aux pistons, munis d'une rampe hélicoïdale et d'une rainure verticale, il est possible de refouler tout le combustible par l'injecteur dans la chambre de combustion du cylindre (positions I et II), car dès que le piston entame sa course ascendante, les ouvertures de droite et de gauche sont obturées. On obtient la charge partielle en faisant pivoter le piston (positions III et IV) de telle façon que la rampe hélicoïdale découvre l'ouverture de droite après avoir parcouru une partie de la course ; il n'y a aucun refoulement de combustible vers l'injecteur si le piston présente la rainure verticale devant la lumière de gauche (position V), le débit de combustible, donc la puissance développée, étant nuls.

Cette pompe, qui fut commercialisée vers 1925, rendait le fonctionnement du moteur diesel plus sûr et plus souple. C'est à partir de ce moment que l'utilisation du moteur diesel se généralisa pour la propulsion des navires de mer.

N'empêche qu'avant l'invention de Bosch, la propulsion de navires de mer par moteur diesel commençait à se répandre. À l'exposition de Munich, en 1898, son moteur de 18,4 kW (25 ch) avait provoqué l'admiration des industriels car, à l'époque, il obtenait un rendement de 30%, alors que la machine à vapeur atteignait à peine 15% et le moteur à essence, 18%.

Aussi en France, en Angleterre, aux États-Unis, au Danemark, en Belgique, on obtint des licences pour construire ce moteur à 4 temps brûlant un combustible liquide, sans allumage artificiel.

Après M.A.N. à Augsburg, Carels à Gand fut la deuxième firme au monde à construire pareil moteur de 66,2 kW (80 ch) dès 1902, mais ce n'est qu'en 1913 qu'elle livrait un moteur de propulsion d'un navire d'une puissance de 1030 kW (1400 ch) pour l'Amirauté Anglaise ; c'était un beau succès pour la firme belge. Entretemps, dès 1903, la firme française Sauter-Harlé installait un moteur diesel de 18,4 kW à 360 tr/min pour la propulsion du chaland «Petit Pierre» et, la même année, un moteur de 88,3 kW (120 ch) à bord d'un sous-marin de la marine française. C'étaient les deux premières applications de ce genre dans le domaine maritime.

Tous ces moteurs fonctionnaient avec un cycle à 4 temps ; sur la culasse, on installait au centre l'injecteur qui projetait le combustible pulvérisé aussi finement que possible en envahissant tout le volume de la chambre de combustion, ainsi que deux soupapes, une à aspiration de l'air comburant, l'autre d'échappement des gaz de combustion. Le cycle à 4 temps ne comporte qu'une course motrice sur quatre, ce qui assure un bon balayage du cylindre ; le diagramme pression (p) - volume (v) d'un moteur à 4 temps est représenté à la fig. 10.

Les soupapes, surtout celles d'échappement, donnaient lieu à difficultés.

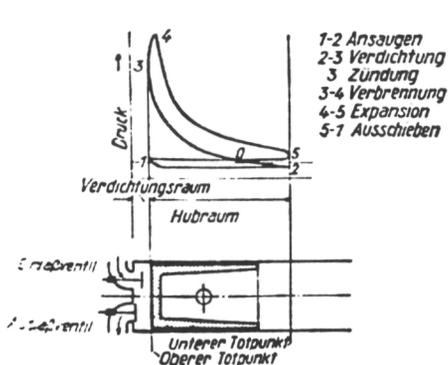


Fig. 10. — Diagramme 4 temps.

(«Hubraum» = cylindrée ; «Einlaßschlitze» = lumière d'admission ; «Auslaßschlitze» = lumière d'échappement.)

- | | |
|-----------------|-----------------|
| 1-2 Aspiration | 3-4 Détente |
| 2-3 Compression | 4-5 Détente |
| 3 Allumage | 5-1 Échappement |

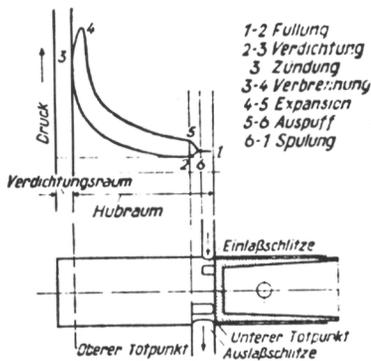


Fig. 11. — Diagramme 2 temps.

- | | |
|-----------------|-----------------|
| 1-2 Remplissage | 3-4 Combustion |
| 2-3 Compression | 4-5 Détente |
| 3 Allumage | 5-6 Échappement |
| | 6-1 Balayage |

Les frères Sulzer, en leur atelier de Winterthur, imaginèrent le moteur à 2 temps sans soupape ; dans cette version, le diagramme p-v se présente selon la fig. 11. La culasse ne comporte plus que l'injecteur placé en son centre. Dans la chemise du cylindre et le cylindre, on a prévu des lumières d'échappement et des lumières de balayage par lesquelles l'air pénètre en légère surpression par rapport à la pression atmosphérique, 20 à 30 k Pa. C'est le piston qui, par son mouvement de va-et-vient, découvre et recouvre les lumières ; pour que l'air comburant ne soit pas refoulé par les gaz d'échappement, ces dernières sont plus hautes que celles de balayage. Leurs dimensions et leur orientation a donné lieu à des études approfondies ; le balayage Sulzer est appelé le balayage transversal (fig. 12).

Pendant ce temps, le prudent Lloyd's Register of Shipping avait dépêché le Dr. James T. Milton pour discuter avec Rudolf Diesel en personne et les audacieux constructeurs lancés dans l'aventure. Il y avait à examiner des problèmes de fatigue, de refroidissement, de conception de l'architecture du bâti et du soubassement, ainsi que d'adaptation et de fixation à la structure de la coque.

Finalement, c'est en 1910 qu'un bateau océanique à moteur diesel reçut la classification du Lloyd's Register of Shipping ; il s'agissait du m/b «Vulcanus» de 1200 t, construit à la Nederlandsche Scheepsbouw Maatschappij d'Amsterdam. Ce fut en 1912 que le premier bateau à moteur fut construit en Grande-Bretagne, chez Barclay, Curie et Co ; c'était le m/b «Jutlandia» qui fut classé par la British Corporation.

La vénérable firme danoise, East Asiatic Company, suivit le mouvement en construisant chez Burmeister et Wain, à Copenhague, deux cargos de 5000 t, les m/b

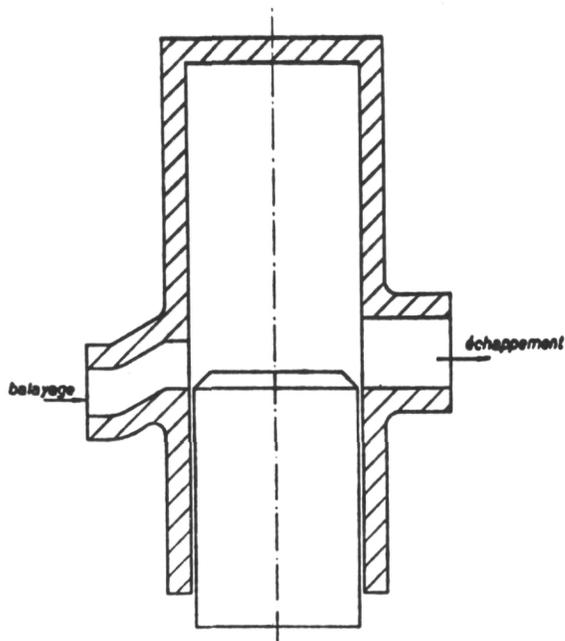


Fig. 12. — Cylindre de moteur à 2 temps à balayage transversal.

«Selandia» et «Fionia», sisterships du m/b «Jutlandia» ; le chantier avait aussi construit les moteurs à 4 temps, simple effet à huit cylindres, développant 1546 kW (2100 ch).

De leur côté, les Américains construisirent aussi des moteurs à combustion interne. En 1888, Forest équipa le m/b «Jolie Brise» d'un moteur à essence compound comportant cinq cylindres, un cylindre central basse pression à 2 temps, double effet, alimenté par les échappements de deux groupes de deux cylindres à 4 temps simple effet. Un an plus tard, Forest construisit le premier moteur à 4 temps à quatre cylindres pour le yacht «Ellen» et, la même année, le premier moteur à six cylindres pour la marine militaire française. Ces moteurs américains à essence ne convenaient que pour la propulsion d'unités modestes.

En 1914, la firme Doxford, de Sunderland, mettait au point un moteur à 2 temps, à pistons opposés, lorsque la première guerre mondiale obligea la firme anglaise à tenir ses études en veilleuse. Cette même année du déclenchement des hostilités, le Lloyd's Register of Shipping publiait son premier règlement sur les moteurs diesel de propulsion marine.

Avant 1914, peu de navires de mer étaient propulsés par ce type de moteur ; la Belgique pouvait s'honorer d'avoir livré, en 1912, un moteurs Carels à 2 temps de 1104 kW (1500 ch) de puissance, installé sur le m/b «Fordonian», construit sur la Clyde en Écosse.

De son côté, la firme belge Cockerill, à Seraing, prenait en 1912 le brevet de Diesel pour construire deux moteurs à 4 temps de 478 kW (650 ch), destinés à un bateau courrier du Haut-Congo.

La guerre marqua un sérieux temps d'arrêt dans le développement du moteur diesel. Un problème important à résoudre était la réversibilité de l'arbre d'hélice. Un moyen qui fut utilisé pour des puissances modérées, c'est l'inverseur-réducteur ; cet appareil comportait des engrenages, un frein et un embrayage ; pour la marche avant, il se comportait comme un tronçon de l'arbre de couche placé derrière le moteur ; en bloquant le boîtier au moyen de la bande de frein, l'arbre d'hélice tournait dans le sens inverse du vilebrequin du moteur. Pour les grandes puissances, ce système devenait trop délicat et trop encombrant (fig. 13).

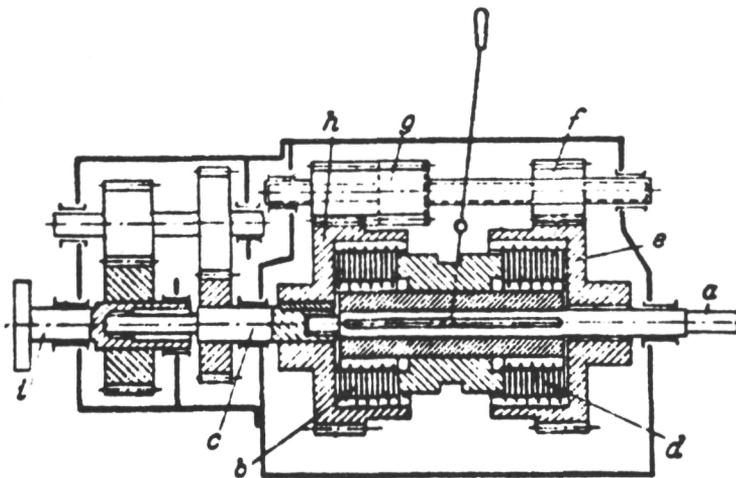


Fig. 13. — Inverseur - réducteur.

Au-dessus de 375 kW (510 ch), on utilise des moteurs directement réversibles dont le vilebrequin est accouplé directement à l'arbre de couche ; dans ces réalisations, le moteur lui-même change de sens de rotation. Ceci s'obtient en changeant la position des cames commandant les soupapes et les pompes à combustible par rapport à la position du vilebrequin, soit que les arbres à cames soient pourvus de deux jeux de cames et qu'en les ripant, on présente celles de l'autre sens de rotation sous les tiges commandant les culbuteurs, soit que les cames puissent, en pivotant autour de l'arbre à cames, occuper une position symétrique convenant pour l'autre sens de marche. Les deux systèmes sont en usage chez les grands constructeurs.

Pendant toute une époque entre les deux guerres, les moteurs à 4 temps avaient la vogue et, pour augmenter leur puissance, on adoptait des cylindres double effet. Cependant, les m/b «Britannic», en 1930, et «Georgic», en 1932, clôturaient la série des navires équipés de deux moteurs à dix cylindres double effet développant une puissance de 14 720 kW (20 000 ch). Les moteurs double effet présentent de

sérieuses difficultés pour le maintien de l'étanchéité aux gaz chauds au passage de la tige de piston et ils nécessitent, dans chaque chambre à combustion inférieure, deux injecteurs dont la simultanéité de fonctionnement reste aléatoire et dont les jets d'injection sont dirigés soit trop vers la tige de piston, soit vers la chemise de cylindre. En principe, les moteurs dont le volume de cylindre est inférieur à 10 l sont toujours à 4 temps, sauf l'américain General Motor ; pour les cylindres d'un volume supérieur à 100 l, ils sont toujours à 2 temps, les deux systèmes étant en vogue entre 10 et 100 l par cylindre.

Pour les puissances élevées exigées par les grands navires, on s'en tint au moteur à 2 temps dont on réussit à améliorer les performances. Il faut cependant distinguer deux périodes ; lors de la première, qui dura jusqu'en 1955, on construisit encore des moteurs à double effet, malgré les inconvénients précités, afin d'obtenir une puissance plus élevée pour un même poids et un même volume d'encombrement.

On en vint à construire des moteurs à 2 temps dont le piston découvrait dans le bas du cylindre les lumières de balayage, tandis qu'un deuxième piston à course plus faible dans le haut du cylindre découvrait les lumières d'échappement ; ce second piston constituait plutôt un tiroir d'échappement décalé de 180° par rapport au piston ; il découvre les lumières d'échappement avant celles de balayage, de façon à chasser les fumées et remplir le cylindre d'air frais avant que ne commence la compression. Le tiroir d'échappement était actionné au moyen de deux manivelles, deux bielles, deux crosses et deux tiges agissant sur une traverse solidaire du tiroir.

Dans un stade ultérieur et dans le but de tirer une plus grande puissance d'un même cylindre, on en vint à faire des moteurs à 2 temps double effet. Dans cette version, les tiroirs d'échappement haut et bas étaient rendus solidaires par les tiges agissant sur les traverses ; ils étaient décalés de 180° par rapport au piston dont la tige traversait le tiroir inférieur. Entretenir l'étanchéité du bourrage de la tige de piston au passage dans le tiroir inférieur était une gageure.

En outre, la tuyauterie était compliquée, car il fallait amener l'air sous une pression de 25 k Pa au milieu de la hauteur du cylindre, tandis qu'il fallait recueillir les fumées au bas et au haut du cylindre pour les évacuer par la cheminée.

Ce système fut abandonné, car le moteur Diesel accomplit des progrès considérables en quelques années grâce à la suralimentation qui consiste à introduire dans le cylindre, l'air comburant à une pression supérieure à la pression atmosphérique.

Ce procédé permet d'augmenter la puissance tirée d'un même cylindre, car elle dépend du nombre de grammes de combustible injecté par cylindre et sa combustion dépend de la quantité d'oxygène contenue dans le cylindre, donc aussi de la pression de l'air y introduit.

Tout ceci exigea pas mal de mises au point et d'études technologiques, notamment dans le domaine métallurgique, car les températures régnant dans le cylindre devenaient plus élevées ; de même, il fallut améliorer le refroidissement des cylindres et, surtout, des culasses et garnir les soupapes d'échappement des moteurs à 4 temps de carbure de tungstène résistant aux hautes températures.

Pour le balayage des moteurs à 2 temps, il fallait introduire l'air sous une pression de 20 à 30 k Pa au moyen d'un compresseur placé en bout du vilebrequin, soit entraîné par chaîne entre deux groupes de quatre cylindres, comme sur les moteurs Burmeister et Wain équipant des cargos mixtes de la Compagnie Maritime Belge (C.M.B.) après la deuxième guerre mondiale.

On obtint un supplément de puissance de l'ordre de 25% de ces moteurs en faisant travailler une deuxième soufflante en série, de façon à porter la pression de l'air à l'entrée des lumières à 40 à 50 k Pa.

Très sagement, à partir du m/b «Lufira», mis en service en 1955, on en revint au moteur à simple effet avec un taux de suralimentation de l'ordre de 50% obtenu en introduisant l'air sous une pression de l'ordre de 70 k Pa (fig. 14).

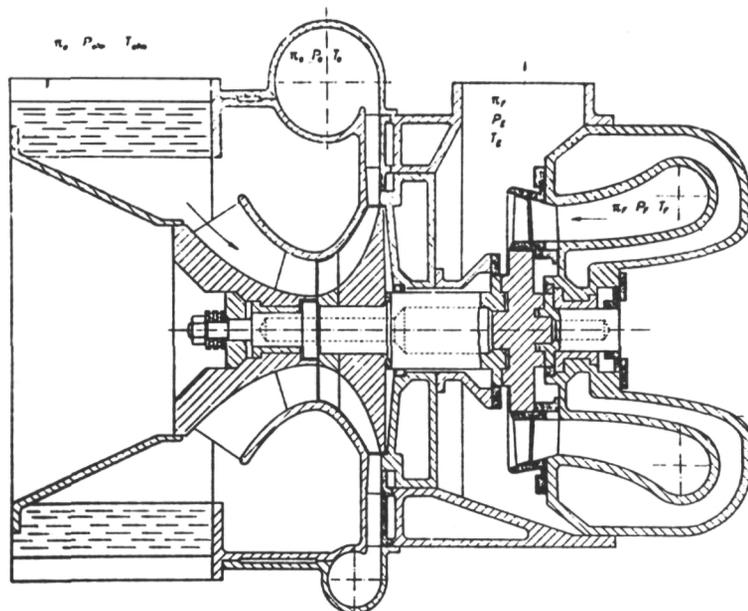


Fig. 14. — Groupe turbocompresseur de suralimentation.

Dans la période postérieure à la deuxième guerre mondiale, trois firmes se partageaient les trois-quarts du marché des moteurs de propulsion des navires de plus de 2000 t.d.w. ; il s'agit de Sulzer à Winterthur, de Burmeister et Wain à Copenhague et de M.A.N. à Augsburg. La conception du balayage de ces trois constructeurs était différente : Sulzer, nous l'avons vu, adopta le balayage transversal, les lumières de balayage étant situées face à celles d'échappement (fig. 15), Burmeister et Wain munit la culasse d'une unique soupape d'échappement et pratiqua le balayage longitudinal très efficace ; les lumières de balayage situées au bas du cylindre sont orientées de façon à ce que l'air monte en tourbillonnant, ce qui augmente les chances de

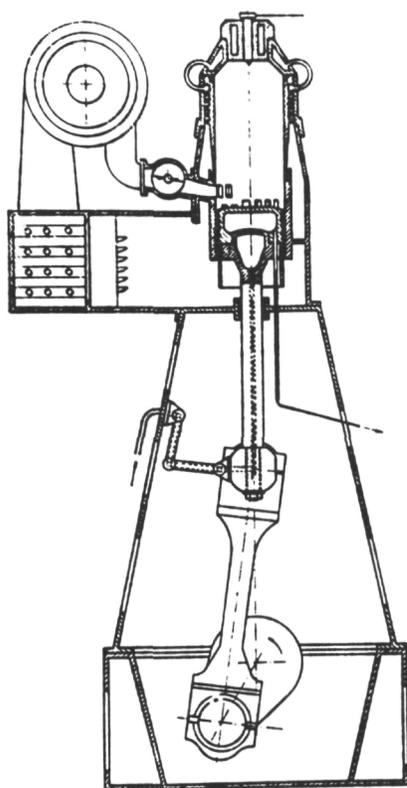


Fig. 15. — Coupe d'un moteur Sulzer, type RD.

rencontre des particules de combustible et des molécules d'oxygène, dans le but d'améliorer la combustion. Avec ce système de balayage longitudinal, on est maître de l'instant où s'ouvrent les soupapes d'échappement et de celui de l'injection ; cependant, la soupape d'échappement occupant le centre de la culasse, il faut placer deux injecteurs au moins et il faut surveiller la permanence de la simultanéité de fonctionnement de ceux-ci (fig. 16). Dans le moteur M.A.N., les lumières d'échappement sont situées au-dessus de celles de balayage sur une partie du pourtour de la chemise de cylindre et on obtient le balayage en boucle (fig. 17).

Tous ces grands moteurs ont été conçus avec tige de piston traversant un diaphragme qui isole le cylindre du bâti ; ainsi, la face inférieure du piston sert de pompe de balayage qui travaille en série, ou en parallèle selon le cas, avec l'air provenant d'un groupe turbo-compresseur actionné par les gaz d'échappement du moteur.

Les hautes puissances développées exigent particulièrement le refroidissement des cylindres et culasses, ainsi que de l'air de balayage. Les pistons sont également refroidis par un circuit qui entre et qui sort par la tige de piston ou de tubes trombones.

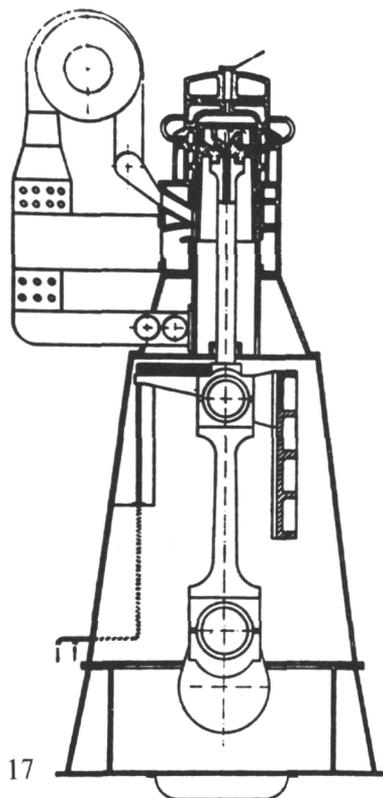
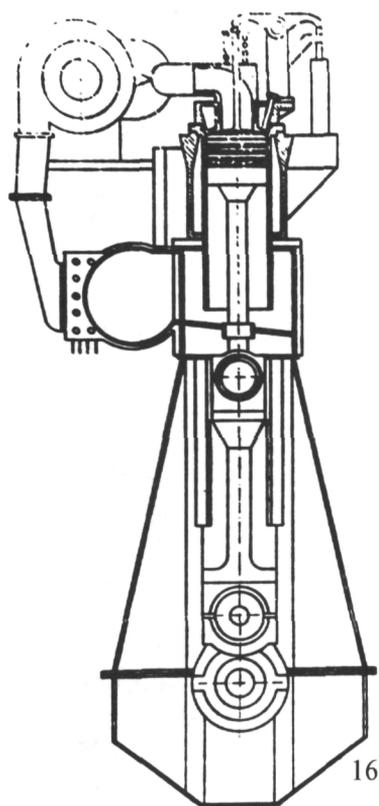


Fig. 16. - Coupe d'un moteur à 2 temps Burmeister et Wain à balayage longitudinal.

Fig. 17. - Coupe d'un moteur M.A.N. à 2 temps, type KZ.

Grâce à l'ensemble des dispositions prises, dont il est exclu que je donne ici les détails, on trouve couramment sur le marché des moteurs à 2 temps développant jusqu'à 2944 kW (4000 ch) par cylindre et pouvant comporter jusqu'à douze cylindres.

Alors que, vers 1930, un moteur diesel consommait 259 gr/kW h de gasoil, la consommation était tombée vers 1970 à 204 gr/kW h, avec un rendement de 42,0%. De plus, grâce à la suralimentation, d'une même cylindrée, on tire deux fois et demi plus de puissance.

Les turbiniéristes invoquaient en faveur de la turbine le meilleur rendement du propulseur qui pouvait tourner à un régime plus lent qu'un diesel et, dans les années de 1950 à 1975, on assistait à une joute entre ces deux modes de propulsion avec la croissance des tonnages des pétroliers. Chaque fois qu'on mettait en ligne des pétroliers d'une classe de tonnage plus élevée, les premiers exemplaires comportaient la propulsion par turbine à vapeur, mais quelques mois plus tard, les motoristes satisfaisaient aux besoins nouveaux en mettant sur le marché une gamme de moteurs

y répondant. La consommation du moteur diesel est tombée à 65% de celle d'une bonne turbine à vapeur, tout en brûlant un combustible aussi lourd que dans les chaudières.

Le champion de l'augmentation des dimensions des moteurs diesel et de leur puissance entre 1950 et 1970 fut le professeur Zinner de la Technische Hochschule à Munich.

Depuis la crise du pétrole, qui surgit vers 1972, les dieselistes ont concentré leurs efforts sur l'économie d'énergie, donc sur l'augmentation du rendement et la réduction de consommation des moteurs diesel.

On est arrivé à des résultats remarquables en augmentant la course des pistons ; alors qu'en 1972, le rapport c/d, c'est-à-dire course du piston sur diamètre, valait 1,80, il vaut dans les nouveaux moteurs 2,60. De plus, la plupart des constructeurs ont adopté le balayage longitudinal qui assure un meilleur remplissage d'air frais du cylindre et, comme la vitesse linéaire moyenne du piston avec tige et crosse est limitée à 6,30 m/s, la vitesse de rotation est réduite, d'où un meilleur rendement propulsif de l'hélice. On trouve actuellement sur le marché des moteurs diesel tournant à 78 tr/min, ne consommant pas plus de 167 gr/kWh (123 gr/ch/h), d'un rendement de 51,5%.

Vers 1960, alors que les dimensions des grands pétroliers croissaient de façon continue, une discussion s'éleva pour savoir s'il valait mieux assurer la propulsion au moyen d'une hélice unique ou de deux hélices et deux lignes d'arbre. La question fut bien vite tranchée en faveur de la ligne d'arbre unique ; en effet, dans ce cas, l'hélice travaille dans de meilleures conditions car elle est située dans une zone de plus grand sillage que les hélices latérales, d'où un meilleur rendement de propulsion. De plus, la construction de l'arrière d'un navire à deux hélices est plus onéreuse que celle à hélice unique. Il faut également considérer que l'entretien d'un moteur unique à grands cylindres coûte moins cher que celui de deux moteurs à plus petits cylindres.

6. La turbine à gaz

Quelques installations de propulsion par turbine à gaz ont équipé des navires. Le principal avantage de cette solution est son faible encombrement, mais elle exige un réducteur de vitesse à deux étages de réduction.

La mise au point des turbines à gaz a été laborieuse et ce n'est qu'après la deuxième guerre mondiale qu'on en a équipé quelques bateaux.

La turbine à gaz comporte trois organes principaux (fig. 18) :

- un compresseur C du type rotatif, qui porte l'air libre à une pression d'environ 600 k Pa ;
- une chambre de combustion qui augmente le volume des gaz en brûlant le combustible finement injecté ;
- une turbine T traversée par les gaz chauds qui se détendent.

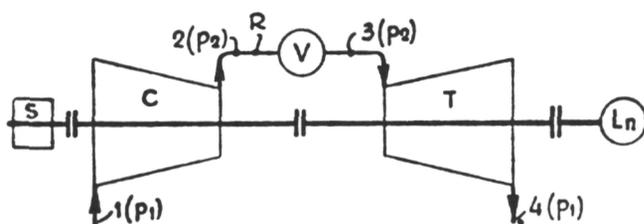


Fig. 18. — Turbine à gaz.

Le rendement de la turbine à gaz est nettement inférieur à celui du moteur diesel, car le flux des gaz traversant continuellement la turbine, on ne peut dépasser la température de 700°C , tandis que, dans un moteur diesel, la température de combustion peut atteindre 1500°C sans danger pour le métal de la chemise de cylindre, car, pendant la détente et le balayage, la température des gaz diminue considérablement.

Aussi, la consommation de l'ordre de 312 gr/kWh rend son utilisation onéreuse. D'autre part, ce qu'on gagne en poids d'installation est compensé par le poids supplémentaire de combustible embarqué.

La turbine à gaz a reçu peu d'applications dans la flotte commerciale, de même qu'à bord des navires des marines militaires.

Ce type de moteur est utilisé sur des unités qui n'effectuent pas de longs parcours. C'est le cas des aéroglisseurs, ou hovercraft, et sur les hydroptères, ou bateaux à ailes porteuses, avec un nombre élevé de passagers comme pour le trafic transmanche, ou entre Malmö et Copenhague, ou bien entre les îles des Cyclades et la partie continentale de la Grèce.

Il existe encore une variante dans laquelle la turbine est alimentée par un générateur à gaz à pistons libres ; cette solution n'a pas connu un grand succès à cause du poids de l'installation et sa consommation de 245 gr/kWh .

7. Conclusions

Nous avons dressé trois graphiques pour résumer les conclusions de cette communication.

Le premier graphique (fig. 19) se rapporte au poids en kg/kW (ou en kg/ch) de l'appareil propulsif depuis 1840 jusqu'en 1988. De 270 kg/kW pour une machine à vapeur chauffée au charbon en 1840 à 48 kg/kW pour un moteur diesel 2 temps suralimenté consommant du fuel extra lourd. On remarque pour la vapeur, en plus d'une réduction continue du poids unitaire, deux étapes importantes ; vers 1880, l'introduction de la détente en deux, puis en trois cylindres successifs et, vers 1907, l'invention de la turbine à vapeur, avec une grosse amélioration vers 1925, en introduisant un réducteur de vitesse pour attaquer l'arbre de couche et en utilisant de la vapeur à une pression de 5000 kPa avec surchauffe à 450°C et resurchauffes en

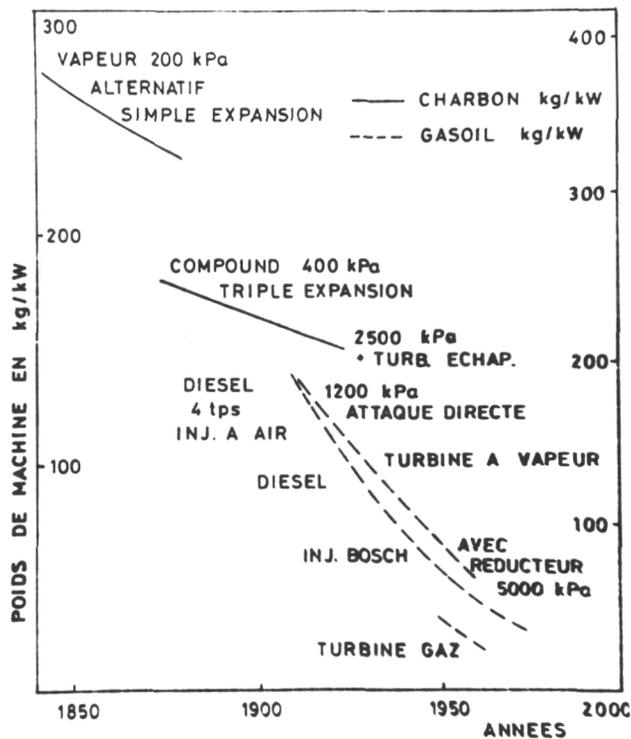


Fig. 19. — Poids des machines.

cours de détente. Bien sûr, il existe des applications avec pression et température plus élevées, mais elles connurent peu de succès dans la marine marchande.

Le passage au moteur à combustion interne constitue une grande étape dans l'évolution de l'appareil propulsif ; l'invention de la pompe Bosch et l'introduction de la suralimentation furent l'un, un facteur de sécurité, le second une étape décisive de la réduction de poids et, surtout, de consommation spécifique.

Quant à la propulsion nucléaire, à cause du poids prohibitif de sa protection et le médiocre rendement de la turbine, on ne peut y songer pour la flotte marchande.

Le second diagramme (fig. 20) se rapporte à la consommation spécifique des différents appareils propulsifs. Depuis 1840, lorsque la machine à vapeur consommait 2500 gr/kWh de charbon, on est tombé rapidement à 1500 gr/kWh vers 1880, avec la détente en deux ou trois cylindres successifs et l'utilisation du condenseur, puis à 700 gr/kWh avec la chauffe au gasoil en 1940, et à 250 gr/kWh avec du fuel oil en 1988. Malgré cette spectaculaire réduction de consommation, la turbine fut détrônée par le moteur diesel, surtout après la crise de 1972, car la consommation spécifique de ce dernier n'est que de 163 gr/kWh.

Le troisième diagramme se rapporte à quelques caractéristiques du navire qui ont évolué dans le temps (fig. 21).

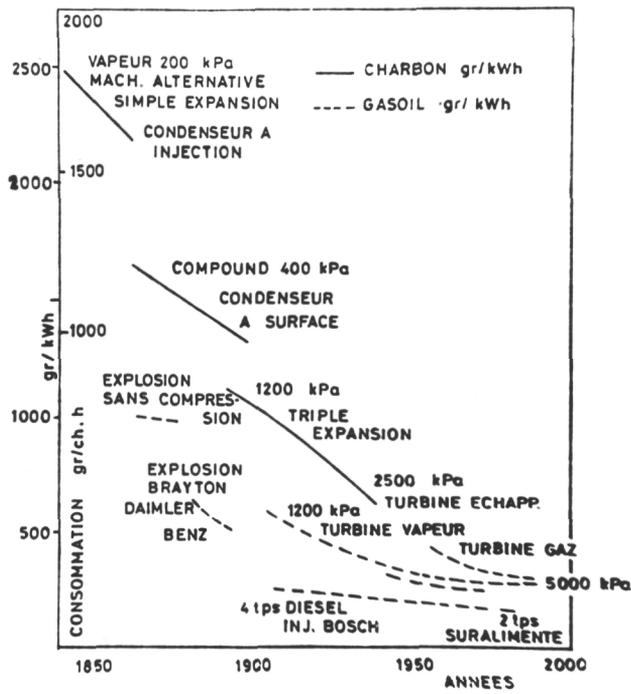


Fig. 20. — Consommation spécifique de combustible.

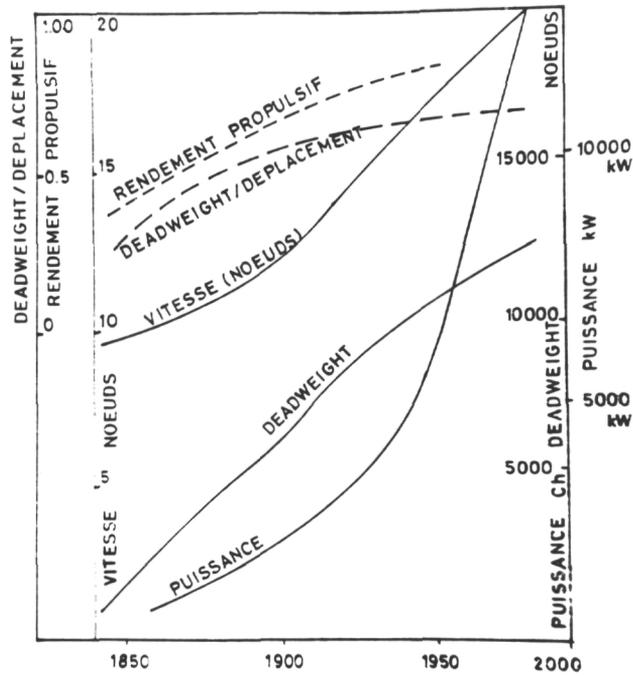


Fig. 21. — Caractéristiques des cargos.

D'une façon générale, le tonnage des navires a été croissant dans le temps ; de 1000 t.d.w. en 1840, le tonnage deadweight courant d'un cargo est passé à 12 800 t.d.w. en 1989, et la vitesse de 9 à 20 nœuds, ce qui a entraîné une augmentation de puissance corrélative de 736 kW à 15 456 kW (ou de 1000 ch à 21 000 ch).

En même temps, le rapport deadweight/déplacement passait de 0,25 à 0,70, ce qui indique une beaucoup meilleure utilisation de la matière et d'allègement de l'appareil propulsif.

En ce qui concerne l'amélioration du rendement propulsif, c'est l'œuvre des bassins de carènes qui ont amélioré le dessin des propulseurs et qui ont mieux adapté les formes au service du bateau. Autrefois, on recherchait la forme donnant la plus faible résistance à l'avancement pour une vitesse donnée, alors qu'actuellement, on recherche celle qui nécessite la plus faible puissance pour une même vitesse et un même déplacement.

Ces trois derniers diagrammes illustrent l'évolution de l'appareil propulsif des navires au cours de deux siècles. Mais tout ne se met pas en diagramme et il est certains progrès technologiques qui ont amélioré leur longévité et leur fiabilité, par exemple, les progrès métallurgiques et ceux en matière d'usinage et de lubrification.

Il est encore un autre point dont on ne parle guère : c'est la facilité d'inspection, d'entretien et de démontage des organes d'un moteur marin. Il ne faut pas oublier qu'il doit tourner pendant quinze jours, et davantage, sans arrêt et sans défaillances, alors qu'il est soumis à des accélérations 1 g omnidirectionnelles ; presque toujours, ces améliorations sont apportées à la suggestion de chefs mécaniciens ou de techniciens qui conçoivent le dessin du moteur et de ses organes et je tiens aussi à rendre hommage à leur précieuse collaboration.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) G. AERTSSEN, *Het historisch verband tussen voortstuwen en machine*, dans : *Communications de l'Académie de Marine*, Anvers, 1966, t. 13, pp. 53-66.
- (2) S. W. BARNABY, *Torpedo Boat Destroyers*, dans : *Transactions of the Institute of Naval Architects*, Londres, 1902, pp. 1-14.
- (3) H. BLACHE, *The Present Position of the Diesel Engine for Marine Purpose*, dans : *Transactions of the Institute of Naval Architects*, Londres, 1931, pp.156-188.
- (4) G. BLAKE, *Lloyd's Register of Shipping*, s.l., s.d.
- (5) E. BOGAERT, *Où en est la turbine à combustion interne*, dans : *Annuaire de l'Union Belge des Ingénieurs Navals (1941-1948)*, s.l., s.d., t. 2, pp. 425-447.
- (6) H. CARSTENSEN, *Modern Trends on the Development of Highpowered Diesel Machinery*, dans : *Transactions of the Institute of Naval Architects*, Londres, 1950, pp. 170-187.
- (7) E. COMHAIRE, *Le moteur Diesel léger*, dans : *Annuaire de l'Union Belge des Ingénieurs Navals (1930-1941)*, s.l., s.d., t. 1, pp. 81-122.
- (8) Compagnie Maritime Belge (Lloyd's Royal), 1895-1945, Anvers, 1947.
- (9) Compagnie Maritime Belge, 1895-1970, Anvers, s.d.
- (10) A. COPPENS, *Les moteurs marins Diesel à 2 et à 4 temps*, dans : *Annuaire de l'Union Belge des Ingénieurs Navals (1949-1953)*, s.l., s.d., t. 3, pp. 167-202.

- (11) W. DALBY, *A Comparison of Five Types of Engines with Respect to Their Inertia Forces and Couples*, dans : *Transactions of the Institute of Naval Architects*, Londres, 1902, pp. 271-284.
- (12) A. DE WINNE, *L'injection du combustible dans les moteurs Diesel*, dans : *Annuaire de l'Union Belge des Ingénieurs Navals (1949-1953)*, s.l., s.d., t. 3, pp. 203-258.
- (13) G. DUFOUR, *Application de la surchauffe à des machines alternatives existantes*, dans : *Annuaire de l'Union Belge des Ingénieurs Navals (1930-1941)*, s.l., s.d., t. 1, pp. 33-52.
- (14) C. J. HAWKES, *Some Experimental Work in Connection with Diesel Engines*, dans : *Transactions of the Institute of Naval Architects*, Londres, 1920, pp. 266-285.
- (15) W. HENSCHKE, *Schiffbautechnisches Handbuch*, Berlin, 1958, pp. 144, 204 et 215.
- (16) I. KNUDSEN, *Results of Trials of the Diesel-Engined Sea-Going Vessel Selandia*, dans : *Transactions of the Institute of Naval Architects*, Londres, 1911, pp. 78-87.
- (17) P. LAVAL, *Le phénomène d'injection des gros moteurs Diesel marins*, dans : *Annuaire de l'Union Belge des Ingénieurs Navals (1954-1956)*, s.l., s.d., t. 4, pp. 113-146.
- (18) A. LEDERER, *La propulsion des bateaux*, dans : *Revue des questions scientifiques*, Bruxelles, 1960, pp. 248-277.
- (19) A. LEDERER, *Le calcul des roues de bateaux*, dans : *Annuaire de l'Union Belge des Ingénieurs Navals*, Ixelles, 1956, t. 4, p. 358.
- (20) A. LEDERER, *Cours de chaudières, machines marines et auxiliaires*, Louvain-la-Neuve, 1971, ch. VII, Le moteur Diesel.
- (21) A., LEDERER, *Cours de chaudières*, *op. cit.*, ch. VIII, La turbine à gaz.
- (22) A., LEDERER, *Cours de chaudières*, *op. cit.*, ch. IX, La propulsion nucléaire.
- (23) J. T. MILTON, *Diesel Engines for Sea-Going Vessels*, dans : *Transactions of the Institute of Naval Architects*, Londres, 1911, pp. 53-102.
- (24) C. A. PARSONS, *The Applications of the Compound Steam Turbine to the Purpose of Marine Propulsion*, dans : *Transactions of the Institute of Naval Architects*, Londres, 1897, pp. 232-242.
- (25) C. A. PARSONS, *The Steam Turbine and its Application to the Propulsion of Vessels*, dans : *Transactions of the Institute of Naval Architects*, Londres, 1903, pp. 284-311.
- (26) PARSONS, C. A. et H. WHEATLEY RIDSDALE, *Some Practical Points in the Application of Marine Steam Turbine*, dans : *Transactions of the Institute of Naval Architects*, Londres, 1907, pp. 271-286.
- (27) C. A. PARSONS et H. WHEATLEY RIDSDALE, *The Combination System of Reciprocating Engines and Steam Turbines*, dans : *Transactions of the Institute of Naval Architects*, Londres, 1908, pp. 77-95.
- (28) C. A. PARSONS, *The Application of the Marine Steam Turbine and Mechanical Gearing to Merchant Ships*, dans : *Transactions of the Institute of Naval Architects*, Londres, 1910, pp. 168-183.
- (29) C. A. PARSONS, *The Application of the Marine Steam Turbine and Mechanical Gearing to Merchant Ships*, dans : *Transactions of the Institute of Naval Architects*, Londres, 1910, pp. 140-167.
- (30) C. A. PARSONS et J. A. WALKER, *Twelve Months' Experience with Geared Turbines in the Cargo Vespaian*, dans : *Transactions of the Institute of Naval Architects*, Londres, 1911, pp. 29-36.
- (31) J. PERRACHON, *Consideration on Motor Tankers*, dans : *Transactions of the Institute of Naval Architects*, Londres, 1959, vol. 101, pp. 63-80.

- (32) O. SCHLICK, *Balancing of Steam Engines*, dans : *Transactions of the Institute of Naval Architects*, Londres, 1900, pp. 135-165.
- (33) A. VANDEGHEN et P. LAVAL, *Réflexions sur la suralimentation du Diesel*, dans : *Actes du Troisième Congrès International des Ingénieurs Navals*, s.l., s.d., pp. 251-318.
- (34) H. W. VAN TIJEN, *Scheepsolomotoren en gasturbines*, Deventer-Anvers-Djakarta, 1956, p. 545.
- (35) A. VIERENDEEL, *Esquisse d'une histoire de la technique*, Bruxelles-Paris, 1921, t. 1, pp. 156-188 ; t. 2, pp. 219-243 et 244-267.
- (36) R. J. WALKER et S. S. COOK, *Mechanical Years of Double Reduction for Merchant Ships*, dans : *Transactions of the Institute of Naval Architects*, Londres, 1921, pp. 69-92.
- (37) H. YARROW, *Results of Experiments with Special Reference to Superheating*, dans : *Transactions of the Institute of Naval Architects*, Londres, 1912, pp. 159-174.