

D'après un article de **Laurent Mazodier** paru dans la **Revue de l'Electricité et de l'Electronique**.

Quels avantages peuvent convaincre un nombre croissant de chantiers et d'armateurs d'insérer entre le moteur diesel et l'hélice, des équipements additionnels augmentant le coût de l'investissement initial et diminuant le rendement de la chaîne propulsive ?

1. HISTORIQUE DE LA PROPULSION DES NAVIRES

Les premiers navires à hélice, à propulsion mécanique, étaient équipés de machines à vapeur alternatives avec pistons et bielles. Avec l'arrivée des grands paquebots transatlantiques, les turbines à vapeur font leur apparition, avec le mauvais rendement qu'on leur connaît. Puis les moteurs diesel s'imposent, diesel lent (80 à 200 tr/mn) ou diesel semi-rapide (400 à 900 tr/mn) avec réducteur.

Ce; moteurs permettent l'amélioration des rendements, la réduction du volume des machines, mais ont également les inconvénients suivants : propulsion bruyante, mauvaise flexibilité impliquant l'utilisation d'hélices à pales orientables et un mauvais comportement de la propulsion aux faibles régimes. Néanmoins, les systèmes équipant actuellement la majorité des navire; remplissent correctement leur fonction.

Cependant, l'électricité, dès sa découverte il y a environ un siècle et demi, a rapidement envahi les navires, essentiellement pour sa grande flexibilité. Les principales étapes ont été les suivantes :

- 1860 : un sous-marin est équipé d'une propulsion électrique alimentée à partir de batteries.

- Début du 20^{ième} siècle : plusieurs gros sous-marins sont équipés en électrique essentiellement pour la discrétion acoustique.

- Années 20 : propulsion turbo-électrique pour 6 cuirassés de 40 000 CV et 2 porte-avions de 180 000 CV pour l'US Navy ; plusieurs brise-glace et navires de recherche sont également équipés d'une transmission électrique.

- Années 30 : plusieurs paquebots en turbo-électrique, tels le *Patria* en Allemagne, ou le *Normandie* en France (160 000CV), sont lancés.

- Deuxième guerre mondiale : les Etats-Unis construisent plus de 300 navires de guerre de surface et des pétroliers en turbo ou diesel-électrique.

- Après guerre : utilisation de groupes Ward-Léonard, puis apparition des convertisseurs à thyristors dans les années 1970.

Les progrès de l'électronique de puissance ont permis, depuis, l'application de la propulsion électrique à des types de navires de plus en plus variés.

2. COMPOSITION D'UNE PROPULSION ÉLECTRIQUE

Un navire électrique comprend deux ensembles : production d'énergie et propulsion (cf Figure 1).

- La centrale d'énergie comprend plusieurs alternateurs entraînés soit par des moteurs Diesel, soit par des turbines à gaz. Elle alimente tous les utilisateurs du bord et notamment un ou plusieurs équipements de propulsion.

L'équipement de propulsion comprend un moteur électrique à vitesse variable associé à un convertisseur, ou très rarement un moteur à vitesse fixe entraînant une hélice à pas variable.

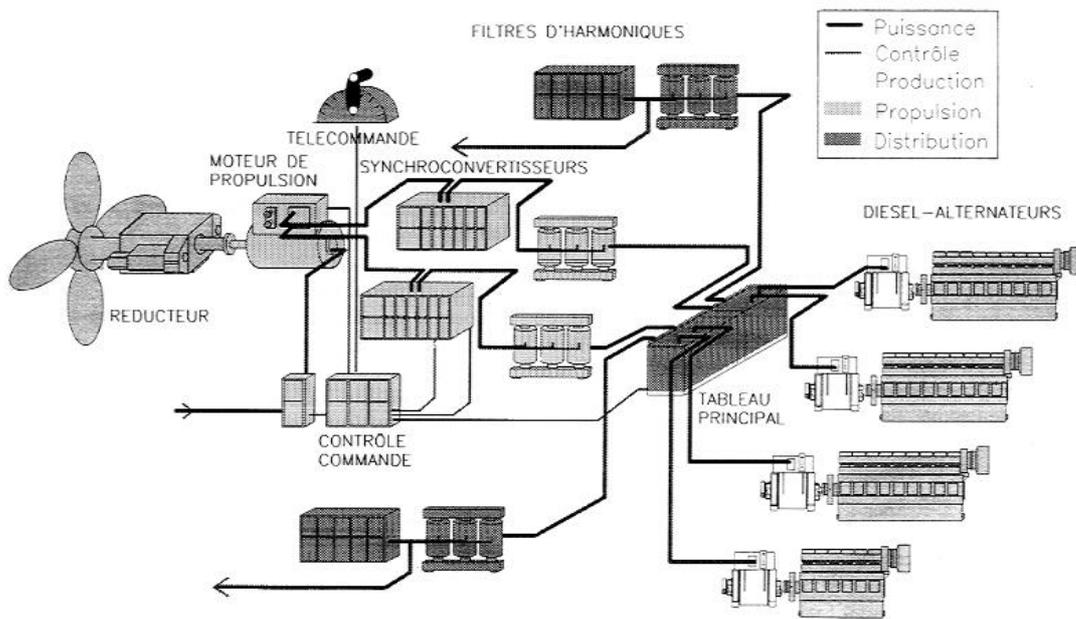


Figure 1

Quatre familles de convertisseurs de puissance sont utilisées en propulsion électrique :

. Le redresseur associé à un **moteur à courant continu** (Fig. Figure 2)

Cette solution n'est pratiquement plus utilisée de nos jours. Elle est limitée en puissance (de l'ordre de 5 MW). compte tenu des limitations en tension et en courant dues à la commutation et pose des problèmes de maintenance, dus à l'usure du collecteur et des balais et à l'encrassement pouvant conduire à un flash au collecteur. Les moteurs à aimants permanents développés ces 10 dernières années sont malheureusement limités à de faibles puissances.

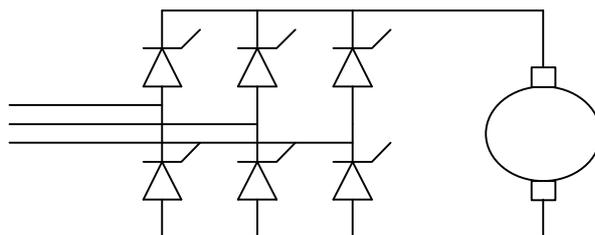


Figure 2

Le cycloconvertisseur associé à un moteur synchrone (cf. Figure 3)

Dans les applications marines, à ce jour, seules des machines synchrones ont été utilisées, alors que des machines asynchrones ont déjà été utilisées dans de; applications industrielles, telles que les laminoirs.

Les moteurs synchrones sont préférés aux moteurs asynchrones pour leur aptitude à fournir des entrefers importants sans être pénalisés par des courants magnétisants anormalement élevés. Cette solution est particulièrement adaptée aux navires brise-glace, qui nécessitent un couple élevé à basse vitesse ; il est ainsi possible de libérer une hélice prise dans la glace ou de couper un bloc de glace sans caler l'hélice.

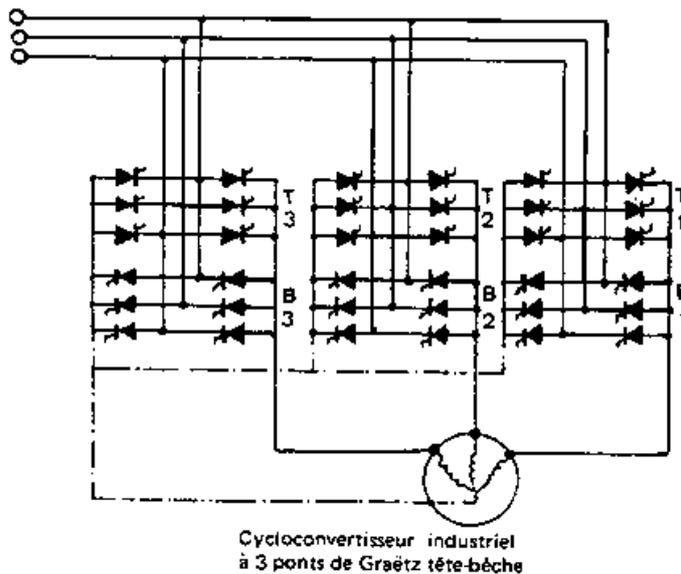


Figure 3

Le synchroconvertisseur associé à un moteur synchrone (cf. Figure 4).

Cette association est sans équivoque la meilleure pour tout ce qui est entraînement propulsif des navires autres que brise-glace, du fait de ses qualités intrinsèques de simplicité et de fiabilité. En effet, il comprend 3 fois moins de thyristors, commandés indépendamment que le cycloconvertisseur, d'où un encombrement et un poids moindre, un rendement meilleur une fiabilité accrue et une meilleure disponibilité.

Ses autres avantages par rapport au cycloconvertisseur sont :

- un dimensionnement en kVA plus favorable pour les convertisseurs et transformateurs de propulsion,
- un meilleur facteur de puissance côté réseau, d'où une puissance apparente et donc un encombrement et un poids des alternateurs plus faibles,

une pollution harmonique du réseau plus faible. Contrairement au cycloconvertisseur qui génère des harmoniques à fréquence variable en fonction de la vitesse machine, le synchroconvertisseur génère des harmoniques à fréquence proportionnelle à la fréquence fixe du réseau, donc parfaitement identifiés et facilement filtrables ; ainsi, là où des convertisseurs, tournants sont nécessaires avec un cycloconvertisseur pour alimenter un réseau ("propre" pour utilisateurs sensibles (navigation, éclairage, T.V.. vidéo, systèmes Hi-fi..), de simples filtres statiques suffisent pour un synchroconvertisseur,

- une meilleure sûreté de fonctionnement. Sur un synchroconvertisseur, le contrôle et les protections du pont réseau et du pont machine sont séparés et indépendants ; dans ces conditions, un défaut d'un des ponts peut être facilement maîtrisé par l'autre pont, et les valeurs de courant de court-circuit restent ainsi très faibles,

- un bruit et vibrations faibles. Le niveau de bruit et de vibrations d'une transmission électrique est très bas, et les résultats sont bons et similaires pour les 2 types d'entraînement.

Les seuls avantages du cycloconvertisseur sont :

- des pulsations de couple côté moteur légèrement meilleures, mais elles sont de toute façon négligeables vis-à-vis de celles produites par un moteur diesel ou par l'hélice elle-même

- un dimensionnement du moteur un peu plus faible, la différence, en kVA, est due au facteur de puissance côté moteur meilleur pour le cycloconvertisseur que pour le synchroconvertisseur ; le dimensionnement étant en théorie inversement proportionnel au facteur de puissance, plus le facteur de puissance est bas, plus gros est le moteur,

- des performances dynamiques en couple et vitesse. Le cycloconvertisseur a une meilleure réponse dynamique que le synchroconvertisseur. Néanmoins, pour un navire (autre que brise-glace) à propulsion diesel-électrique, les possibilités du synchroconvertisseur lui-même excèdent largement ce qu'un navire peut accepter (hélice, palier butée, centrale de production d'énergie. ...). Dans ces conditions, le contrôle doit fournir les limitations adéquates (pentes. vitesse et couple, ..) pour ne pas endommager d'autres équipements, et ceci aussi bien en cycloconvertisseur qu'en synchroconvertisseur.

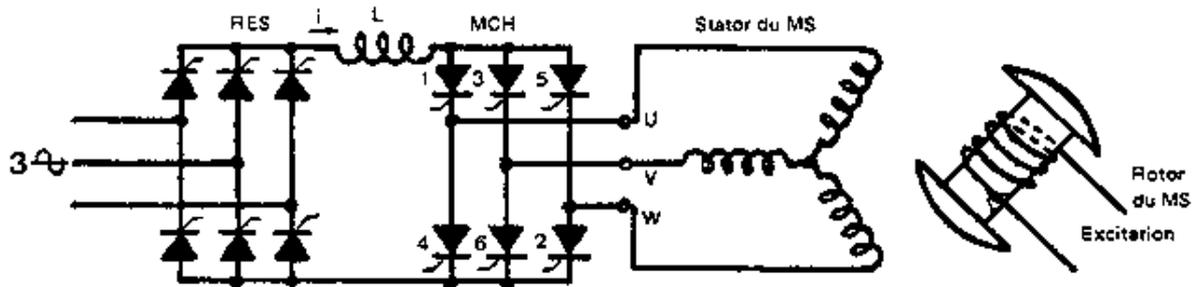


Figure 4

L'onduleur à commutation forcée associé à un moteur asynchrone (cf. Figure 5).

Cette solution n'est utilisée que sur quelques navires dans le monde, notamment sur les navires équipés de nombreux propulseurs de faible puissance. En fait, elle présente des limitations à la fois au niveau puissance maximale et au niveau vitesse du moteur rendant l'utilisation d'un réducteur indispensable. De plus, le convertisseur à commutation forcée étant plus complexe, sa maintenance nécessite la présence d'un électricien très qualifié.

Quel que soit le type de convertisseur utilisé (sauf pour l'onduleur à commutation forcée), dans la plupart des cas, le moteur de propulsion est accouplé directement à la ligne d'arbre ; cependant, quand l'encombrement et le poids doivent

être limités, la solution à retenir est un moteur à vitesse élevée (1000 à 1500 tr/mn) associé à un réducteur.

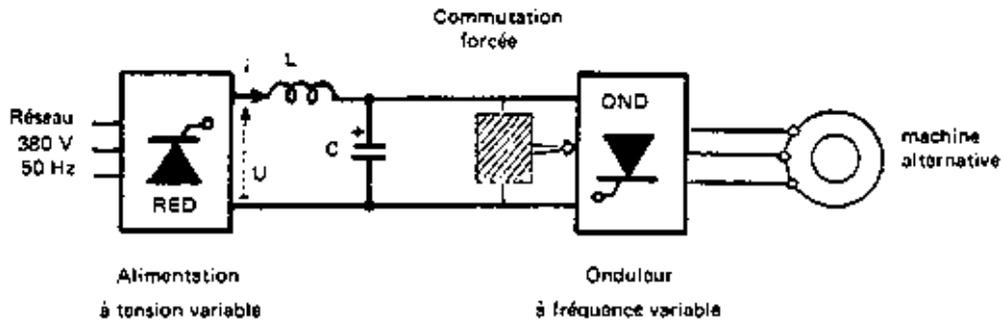


Figure 5

3. AVANTAGES DE LA PROPULSION ÉLECTRIQUE

3.1 Optimisation de l'architecture des navires :

Les moteurs Diesel sont dissociés de la ligne d'arbre, ce qui permet d'implanter les matériels aux meilleurs emplacements possibles et d'obtenir des gains de place substantiels. Ainsi, le choix d'une propulsion électrique pour une série de 10 transporteurs de produits chimiques a permis de rajouter 2 cuves supplémentaires sur 40 cuves pour certains de ces navires ou de raccourcir les navires de 8 m sur les autres.

La Figure 6 montre la différence d'encombrement entre une solution Diesel lent et la solution diesel-électrique retenue.

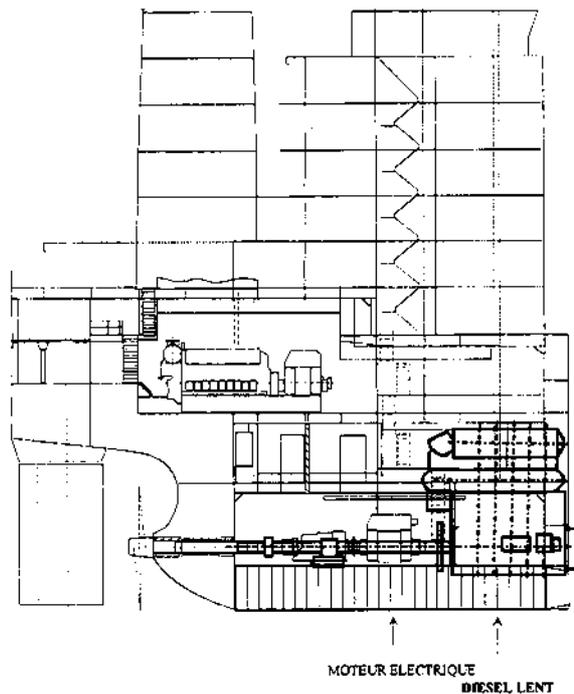


Figure 6

Sur des navires nécessitant un positionnement dynamique, tels les pétroliers navette, la dissociation centrale d'énergie/système de propulsion permet de mieux répartir la puissance en plusieurs points du navire. Sur des ferries de type ro-ro, l'arrangement optimum des équipements permet d'accroître la facilité de chargement des navires. Sur les navires de croisière, le gain de place peut permettre d'augmenter le nombre de cabines. Cette souplesse d'implantation peut également permettre d'optimiser les formes arrière du navire ainsi que l'hélice, et ainsi de compenser les pertes de rendement de la propulsion.

C'est ce qui a été réalisé de manière très réussie sur les chimiquiers mentionnés plus haut : par rapport à une solution classique Diesel 2 temps, l'encombrement réduit de l'ensemble moteur électrique + réducteur a permis de les localiser à l'extrême arrière de navire, en épousant au mieux les formes de la coque

3.2 Diminution de la puissance installée et de son coût :

Dans de nombreux navires sont installés les équipements de propulsion d'une part, une centrale alimentant le réseau de bord d'autre part. En propulsion électrique, les mêmes diesel-alternateurs peuvent être utilisés alternativement pour l'une ou l'autre fonction. Ceci est particulièrement intéressant pour des tankers, où puissance de propulsion et puissance nécessaire aux pompes de chargement/déchargement sont utilisées alternativement. De plus, étant découplés de la ligne d'arbre, les diesels peuvent être dimensionnés pour des vitesses supérieures (600-900 tr/mn au lieu de 450 à 514 tr/mn), donc être plus économiques.

3.3 Diminution des coûts de maintenance sur les diesels :

En propulsion diesel-mécanique, vitesse et charge du Diesel principal dépendent de celles de la ligne d'arbre à laquelle il est directement lié.

En propulsion électrique, les diesels tournent à une vitesse constante correspondant à la fréquence fixe du réseau.

D'autre part, en contrôlant en permanence le nombre de groupes électrogènes couplés sur le réseau, par un système de gestion de la production d'énergie électrique, il est possible de faire fonctionner les diesels à leur charge optimale (50 à 90 %) quelles que soient les conditions de fonctionnement du navire (route libre, manœuvre, chargement,...). Ces conditions de vitesse fixe et charge optimisée permettent une réduction significative de l'usure des moteurs et donc des coûts de maintenance, les équipements électriques de propulsion ne demandant pratiquement pas de maintenance. De plus, un Diesel tournant à vitesse constante et charge nominale a un meilleur rendement et produit moins d'oxydes d'azote, dont les émissions tendent à être limitées par les lois nationales et internationales.

3.4 Réduction du niveau de vibrations transmis à la structure du navire :

Sur les systèmes de propulsion mécanique, on constate que les moteurs diesel principaux lents de forte puissance à vitesse variable génèrent des vibrations dont le spectre est large et variable, et comprend des fréquences basses difficiles à atténuer. L'utilisation de la propulsion électrique présente les avantages suivants :

- l'amplitude des vibrations est réduite, le nombre de groupes en service étant toujours minimal,

- les moteurs des groupes tournant à vitesse fixe, le spectre de fréquence des vibrations est étroit et parfaitement cerné; il est donc facile de dimensionner des systèmes d'amortissement efficaces,

- du fait de la position très en arrière des moteurs électriques de propulsion, les lignes d'arbre ont une longueur réduite contribuant également à diminuer l'amplitude des vibrations,

- la liberté de choix de la vitesse de l'hélice permet de choisir l'hélice la plus appropriée au navire en question et ayant le meilleur rendement possible.

La réduction du bruit et des vibrations est un facteur décisif sur les bâtiments militaires, les navires de recherche et les navires de croisière.

3.5 Flexibilité de manœuvre accrue :

Le propulsion électrique permet un contrôle précis et progressif de la vitesse de rotation des hélices, tout en évitant l'utilisation d'une hélice à pales orientable, dispositif plus coûteux, plus fragile et complexe, donc moins fiable, et d'un rendement moindre qu'une hélice à pas fixe. Contrairement au moteur Diesel, qui ne développe de couple utile qu'à partir d'environ 40 % de sa vitesse nominale, le moteur électrique est capable de fournir son couple maximum sur la totalité de sa plage de vitesse; ceci permet une précision de manœuvre inégalable, utilisée notamment pour des navires de type câbliers, navires de recherche océanographiques, ferries, navires nécessitant un positionnement dynamique tels que les shuttle tankers.

3.6 Grande disponibilité et sécurité des équipements :

une propulsion électrique requiert très peu de maintenance.

Les transformateurs et convertisseurs de propulsion sont des équipements statiques, et les moteurs de propulsion ne possèdent pas de pièces d'usure. Les diesel des groupes électrogènes, utilisés toujours de manière optimale, ont un taux de fiabilité élevé. D'autre part, les diverses redondances permettent une continuité de service en cas de panne : redondance au niveau de la centrale de production d'énergie (en cas de panne ou d'opération de maintenance sur un des groupes, les autres peuvent assurer un fonctionnement quasi normal du navire pendant la réparation de ce dernier, sans immobilisation du navire) et redondance au niveau des équipements de propulsion (l'utilisation de moteurs électriques à double enroulement procure une indépendance complète des transformateurs et convertisseurs de chaque 1/2 moteur, qui peut encore fournir la moitié du couple nominal du moteur complet.

4. AVENIR DE LA PROPULSION ELECTRIQUE :

Un grand nombre de chantiers de d'armateurs ont opté en faveur de la propulsion électrique pour les raisons évoquées précédemment. Ceux qui construisent et exploitent les navires brise-glace, les câbliers, les navires de recherche ou offshore, les navires de croisière sont aujourd'hui convaincus du bien-fondé de la propulsion électrique. D'autres commencent à s'y intéresser, dans le domaine des cargos, porte-conteneurs, transporteurs de produits chimiques, ferries, navires de pêche... Dans un secteur en perpétuelle évolution, certaines tendances se dessinent.

4.1 Propulsion par «POD»

La Figure 7 montre le principe d'un propulseur de type «POD» ; le moteur électrique de propulsion, ses paliers, des joints étanches, sont entièrement intégrés dans une nacelle orientable fixée sous la coque à l'extérieur du navire, entraînant une hélice à pas fixe. La puissance est transmise au POD par un système de bagues et balais.

Ses avantages sont:

- excellente manœuvrabilité, la poussée de l'hélice pouvant être orientée sur 360°,
- réduction importante de l'encombrement et du poids des machines à bord du navire,
- suppression de la ligne d'arbre classique, du gouvernail et éventuellement de certains propulseurs d'étrave,
- bon rendement hydrodynamique, en particulier à vitesse élevée,
- possibilité d'installation tardive, quelques semaines seulement avant le lancement du navire.

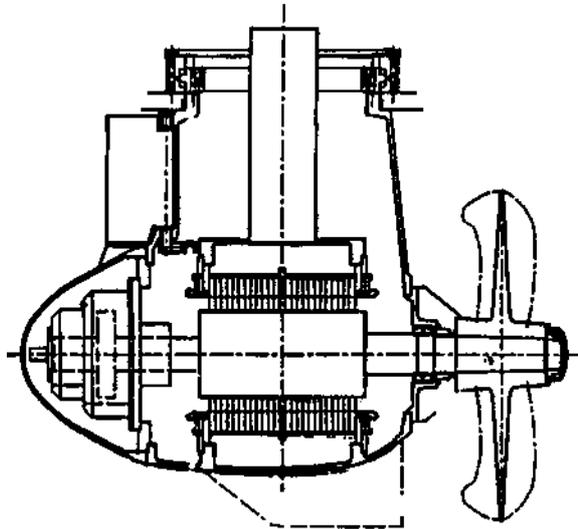


Figure 7

Bien sûr, la propulsion par POD est avant tout une propulsion électrique, avec les avantages mentionnés précédemment.

4.2 Utilisation de turbines à gaz :

Les turbines à gaz sont devenues une option intéressante pour les raisons suivantes :

- les puissances installées à bord ne cessent de croître, principalement à cause de vitesses navires de plus en plus élevées (ferries, porte-conteneurs,...), et d'installations hôtelières et autres de plus en plus importantes (navires de croisière),
- malgré l'accroissement du niveau de puissance, l'espace machine n'est pas autorisé à s'étendre,
- les préoccupations croissantes concernant les émissions de gaz polluants favorisent l'utilisation de fuel léger type MDO ou MGO.

Ainsi, la configuration des centrales d'énergie en propulsion électrique pourrait évoluer dans un futur proche.

Les solutions les plus attractives en turbo-électrique à gaz seraient (cf Figure 8):

- CODLAG (combiné diesel-électrique et turbine à gaz): Le principe est d'utiliser le mode diesel-électrique en exploitation normale et une turbine à gaz en booster de propulsion pendant des périodes transitoires.

Ce système est applicable aux navires de croisière, ferries rapides ou à d'autres navires nécessitant deux régimes de puissance différents.

- COGES (cycle combiné gaz-turbine à vapeur) :

Cette solution est basée sur une propulsion électrique et des générateurs entraînés par turbine à gaz et turbine à vapeur. Les turbines à gaz sont connectées directement aux générateurs. Des chaudières de récupération sont alimentées par les gaz d'échappement des turbines à gaz, la vapeur produite alimentant un turbo-générateur à vapeur. La conséquence est une courbe de consommation de fuel pratiquement constante sur toute la plage de fonctionnement. De plus, la vapeur pour les besoins du navire est prise directement sur l'extraction de la turbine à vapeur, ainsi il n'y a à priori pas besoin de chaudières auxiliaires ; ce système est donc particulièrement adapté aux gros navires de croisière qui ont de gros besoins en chaleur.

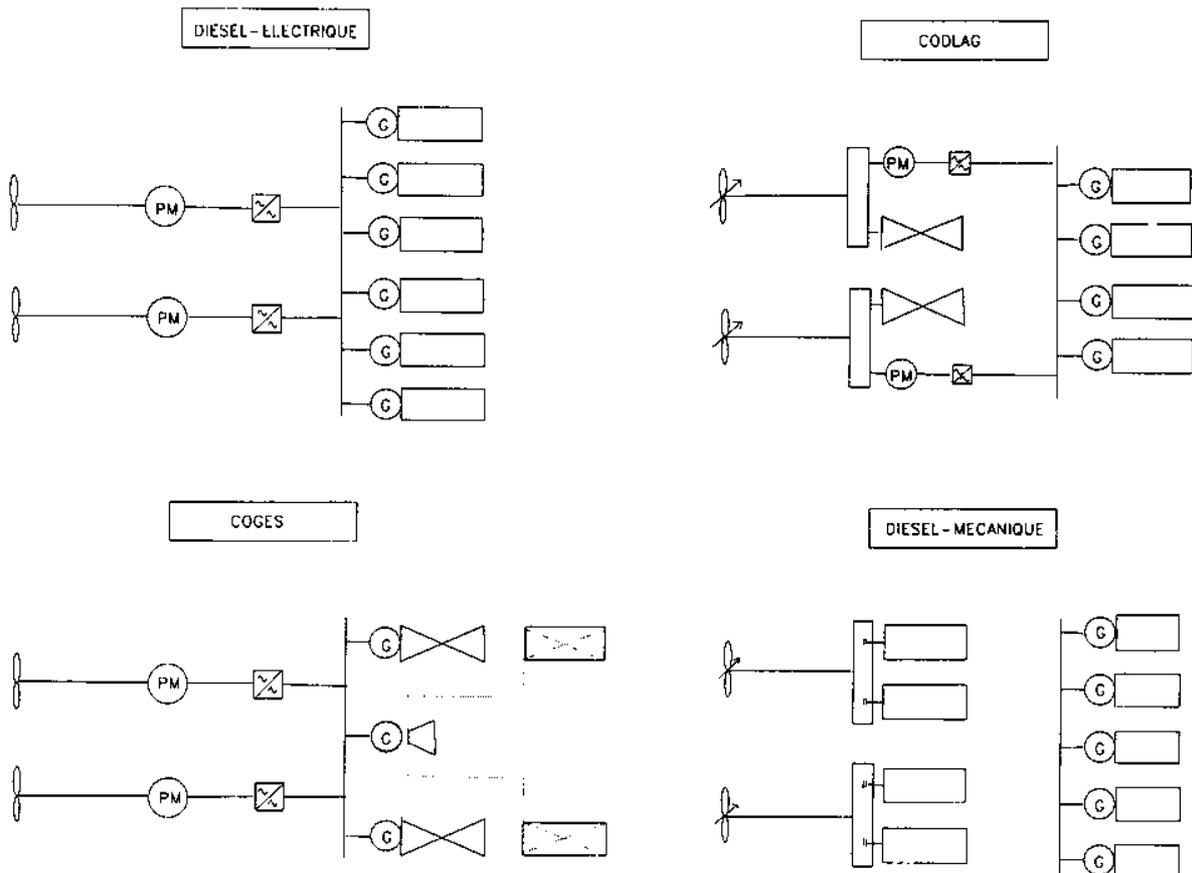


Figure 8

5. CONCLUSION :

Les critères de décision majeurs pour l'adoption d'une propulsion électrique varient d'un type de navire à l'autre : discrétion acoustique pour les sous-marins, navires de recherche, bâtiments militaires, bas niveau de bruit et vibrations pour un navire de croisière, parfait contrôle du couple à toutes les vitesses pour un brise-glace, précision et souplesse de manœuvre pour des navires à positionnement dynamique, des ferries ou des navires de pêche, gain de place sur des tankers, permettant d'augmenter la cargaison ou de diminuer la longueur des navires.

A ces critères viennent s'ajouter les avantages communs à tous les types de navire, tels : maintenance diminuée, sécurité de fonctionnement accrue, pollution réduite, ... Quoiqu'il en soit, il apparaît clairement que l'étude d'un projet de propulsion électrique ne doit en aucun cas se limiter à un calcul de coût d'investissement, mais au contraire faire l'objet d'une approche globale.

Grâce aux chantiers navals français orientés vers les navires haut de gamme tels les Chantiers de l'Atlantique, les Ateliers et Chantiers du Havre ou Leroux et Lotz, grâce à plusieurs chantiers étrangers et armateurs français ou étrangers qui ont pris la peine d'adopter *cette* approche globale, CEGELEC occupe aujourd'hui une position de leader mondial dans le domaine de la propulsion électrique des navires.

6. Quelques exemple de réalisations en matière de propulsion électrique :

Since December 1992, Cegelec has been awarded 14 main electric contracts with the most appropriate drive technology for the purpose : whether it is a fixed speed mater with variable pitch thruster or a variable speed mater with fixed pitch propeller, high or low power, high or low RAM, Synchrodrive or Cydodrive solutions.

* 2 **cruise** ships from Chantiers de l'Atlantique for RCCL :
LEGEND OF THE SEAS and SPLENDOR OF THE SEAS,

* 2 cruise ships from Fincantieri for P&O Cruises :
SUN PRINCESS *and* STAR PRINCESS,

* 1 oceanographic vessel from Leroux et Lotz for Ifremer :
THALASSA,

* 1 antarctic research vessel from ACH for CGbQTAAF : *MARION DUFRESNE*,

* 1 polar **icebreaker** from Avondale Shipyard for US Coast Guard :
USCGC HEALY

* 1 flexible pipe and câble laying vessel for Coflexip : *SUNRISE 2000*,

- * 7 chemical tankers from Danyard for Stolt Nielsen,
- * 2 **cruise** ships from Kvaerner Masa Yards for RCCL :
GRANDEUR OF THE SEAS and *ENCHANTMENT OF THE SEAS*,
- * 2 **cruise** ships from Chantiers de l'Atlantique for RCCL :
RHAPSODY OF THE SEAS and *VISION OF THE SEAS*,
- * 3 chemical tankers from ACH for Stolt Nielsen.
- * 2 tuna fishing vessels from H-J- Barreras (AESAs) for Saupiquet.
- * 1 cruise ship from Chantiers de l'Atlantique for Services & Transports SA *PAUL GAUGUIN*
- * 1 103K mufti purpose shuttle tanker from Samsung for Statoil.

These 26 ships will benefit from Cegelec's recognized expertise in the fields of main electric propulsion drives, on board electric power generation and dynamic positioning and automation systems.

1. HISTORIQUE DE LA PROPULSION DES NAVIRES.....	1
2. COMPOSITION D'UNE PROPULSION ÉLECTRIQUE	2
3. AVANTAGES DE LA PROPULSION ÉLECTRIQUE	5
3.1 Optimisation de l'architecture des navires :	5
3.2 Diminution de la puissance installée et de son coût :	6
3.3 Diminution des coûts de maintenance sur les diesels :	6
3.4 Réduction du niveau de vibrations transmis à la structure du navire :	6
3.5 Flexibilité de manœuvre accrue :	7
3.6 Grande disponibilité et sécurité des équipements :	7
4. AVENIR DE LA PROPULSION ELECTRIQUE :	7
4.1 Propulsion par «POD»	8
4.2 Utilisation de turbines à gaz :	8
5. CONCLUSION :	10
6. Quelques exemple de réalisations en matière de propulsion électrique :	10