



transmission : la ligne d'arbre

La puissance des moteurs ainsi que les dimensions des hélices sont des éléments souvent mentionnés lorsqu'il s'agit des performances d'un yacht à moteur équipé de lignes d'arbres classiques. Cependant, entre ces deux éléments du système propulsif, de nombreux organes s'intercalent et peuvent influencer le rendement d'une installation mécanique. Une description simple de ces éléments, de leurs dimensions et de leurs rôles est utile pour une meilleure compréhension de leurs fonctionnements et de leurs maintenances.



L'ensemble des organes d'une ligne d'arbre permet de transformer la puissance du moteur en poussée de l'hélice. Ce système se compose généralement d'un inverseur de marche, d'un réducteur, d'un accouplement, d'un arbre, d'un ou plusieurs paliers supportant cet arbre et parfois des arbres intermédiaires. Afin d'obtenir un système homogène et fiable, tous ces composants doivent être déterminés et échantillonnés en fonction de la puissance, de la vitesse de rotation et de la distance entre le moteur et l'hélice. La ligne d'arbre classique se compose généralement en partant du moteur des éléments suivants : l'inverseur-réducteur, l'accouplement, l'arbre porte-hélice, les éventuels paliers intermédiaires, le presse-étoupe ou le joint d'étanchéité, le tube d'étambot et enfin la chaise d'arbre avec sa bague hydro-lube.

► L'INVERSEUR-RÉDUCTEUR

Cet organe de transmission a pour fonction principale d'inverser le sens de rotation de l'arbre et donc de l'hélice pour obtenir une marche arrière et une posi-

tion neutre. Il a également pour rôle d'adapter le régime initial du moteur à la vitesse de rotation optimale pour le type de carène et l'hélice utilisée. Un inverseur peut comporter des systèmes d'embrayage mécanique, hydraulique ou même électrique. Les principaux types sont ceux à pignons droits ou coniques et à train épicycloïdal qui fonctionnent suivant le principe utilisé pour les boîtes de vitesses automatiques. Quant aux arbres de sortie, ils peuvent être positionnés dans l'axe du vilebrequin du moteur, décentré ou surbaissé par rapport à cet axe. Ils existent également des modèles dit à casseur d'angle qui permettent de modifier l'angle entre l'axe du vilebrequin du moteur et celui de l'arbre porte-hélice. Ils sont connus sous le nom de V-drive ou parfois U-drive. Ils permettent par exemple de monter les moteurs à plat ou en arrière du yacht. Ils donnent ainsi aux architectes navals beaucoup plus de liberté pour positionner les différents éléments du système propulsif afin d'optimiser la répartition des masses ou l'angle de l'arbre porte-hélice et donc le rendement du système propulsif. Rappelons que la position longitudinale du centre de gravité de l'ensemble des



Le passage de l'arbre au travers de la coque est à surveiller au moyen de cales d'épaisseur.



L'installation d'une salle des machines avec la pose des V-Drive et d'un arbre.

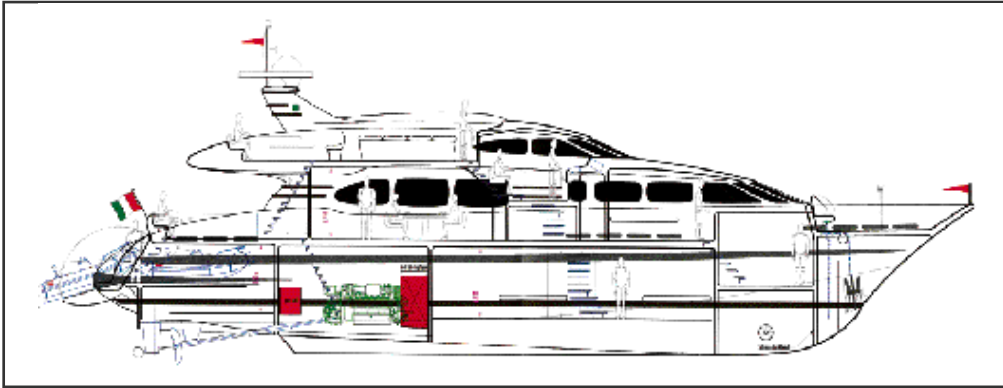


Le rôle d'une chaise est de soutenir l'arbre en avant de l'hélice. Sa forme est donc très importante.



A cause du peu d'espace, le démontage d'un arbre ou d'un inverseur doit être prévu dès la conception.

dossier technique



Une installation en ligne directe avance les moteurs et le centre de gravité.

Le poids affecte de façon particulièrement importante les performances d'un yacht notamment pour les coques planantes.

La sélection du rapport de réduction est particulièrement importante pour l'optimisation des performances. Le choix de ce rapport est gouverné par les trois données suivantes :

- Le régime nominal du moteur,
- La vitesse de fonctionnement du yacht,
- Le diamètre maximum admissible pour l'hélice.

Si les coques planantes légères peuvent être équipées d'un inverseur à prise directe avec une hélice de petit diamètre, il n'en est pas de même pour les unités plus lourdes. En effet, afin de générer la portance nécessaire pour déjauger et donc planer, les yachts plus lourds ont besoin d'une poussée plus importante. L'augmentation de cette poussée est obtenue par le montage d'une hélice de plus grand diamètre pour transmettre un couple plus important. Le couple croît proportionnellement au rapport de réduction.

Ces unités comme les yachts à déplacement et à semi-déplacement sont toutes équipées d'inverseur-réducteurs pour obtenir un rendement propulsif optimum. De façon simple, plus la vitesse d'un yacht est faible plus la vitesse de rotation de l'arbre porte-hélice devra être réduite. Le rapport de réduction est déterminé en fonction du rapport vitesse/longueur ou du nombre de Froude qui sont universellement utilisés pour classer les yachts suivant leur

régime de fonctionnement et qui pour mémoire est le rapport de la vitesse et de la racine carré de la longueur à la flottaison statique.

Pour les unités dont la vitesse est inférieure à 35 nœuds, l'augmentation du rapport de réduction permet généralement d'utiliser une

hélice de plus grand diamètre à puissance et poids de moteur égaux tout en conservant la même consommation. Les rapports de réduction les plus utilisés sur des yachts varient généralement entre 2:1 et 3:1 avec de nombreux rapports intermédiaires. Lors de la conception du système propulsif, il est plus simple et plus économique d'optimiser le diamètre de l'hélice en fonction des rapports de réduction standards des fabricants plutôt que de faire réaliser un réducteur sur mesure.

Comme tout ensemble mécanique, un inverseur absorbe de l'énergie et crée donc des pertes de puissance. Elles varient suivant le type de l'inverseur, la présence d'un réducteur ou non, ainsi que d'autres éléments comme la viscosité et le volume de l'huile utilisée. Compte tenu du grand nombre de variables, il est difficile de donner une valeur absolue, néanmoins on peut considérer

qu'en moyenne la perte est de l'ordre de 3 % de la puissance nominale du moteur mesurée à l'arbre.



► L'ACCOUPLLEMENT

La liaison entre l'inverseur et l'arbre se fait généralement par un accouplement qui peut être rigide ou souple. Le montage rigide se fait par la liaison de flasques ou tourteaux. C'est à ce niveau que l'on procède à l'alignement de l'arbre par vérification du jeu entre les flasques du réducteur et du tourteau d'accouplement. Ce jeu ne doit pas dépasser certaines tolérances afin d'éviter les risques d'usure ou de rupture de l'inverseur. Ces tolérances exprimées en dixièmes ou en centièmes de millimètre sont mesurées à l'aide de jauges d'épaisseur ou d'un comparateur. Cet alignement doit être réalisé avec soin et méthode par des professionnels familiers de cette opération. Un mauvais alignement peut provoquer des contraintes importantes au niveau des divers organes de la ligne d'arbre et entraîner leur usure prématurée et même la rupture de certains éléments. L'absence d'alignement se manifeste généralement par des vibrations importantes. Pour éliminer en partie ces vibrations et compenser les défauts d'alignement, il est possible de monter un accouplement dit souple ou flexible dont plusieurs modèles sont disponibles sur le marché. Sa sélection doit être faite avec soin et prudence en fonction de la puissance à transmettre et de la vitesse de rotation de l'arbre.

► L'ARBRE PORTE-HÉLICE ET SES PALIERS

Cet élément central de la ligne d'arbre doit pouvoir résister aux contraintes de torsion créées par le

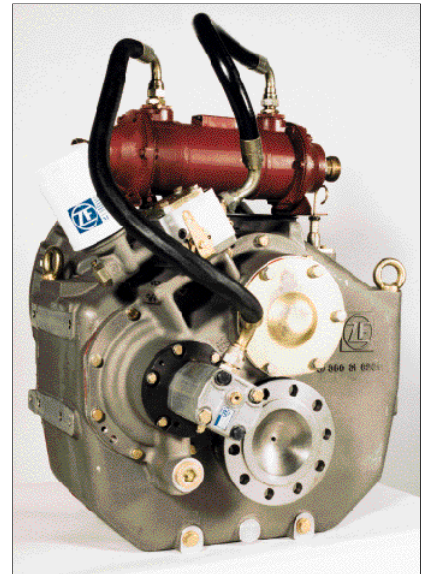
Chaise pour hélice silencieuse.



Chaises obtenues en fonderie.



Inverseur à commande hydraulique.



couple du moteur et la résistance de l'hélice. Les arbres porte-hélice ont été fabriqués en acier doux ou en bronze. Aujourd'hui, ils sont réalisés dans différentes nuances d'acier inoxydable dont les propriétés mécaniques peuvent varier de façon sensible. De plus la résistance à la corrosion peut également varier suivant les types d'alliage. Cette caractéristique est importante. En effet, il n'est pas rare de déceler, lors d'une inspection d'arbres, de la corrosion dite en crevasses au niveau des paliers ou des bagues. En règle générale, les arbres doivent être démontés et contrôlés à intervalles réguliers, tous les cinq ans au plus. A noter que des arbres en matériaux composites de fibres de Carbone sont également fabriqués et installés sur certaines unités de pointe.

Le calcul du diamètre par exemple peut se faire à l'aide de la simple formule suivante :

$$D = 116C^3 \frac{P}{N}$$

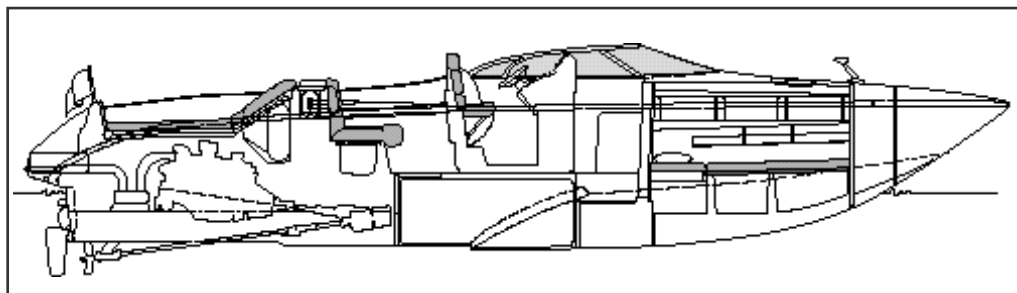
D : diamètre en millimètres

P : puissance moteur en chevaux

N : vitesse de rotation de l'arbre en tours/minute

C : constante variant suivant l'acier inoxydable utilisé

De façon plus empirique, on considère que le diamètre de l'arbre ne doit pas être inférieur au diamètre de l'hélice divisé par 14 et la portée entre deux paliers doit être inférieure à 48 fois le diamètre de l'arbre. Ces règles sont à utiliser avec la plus grande prudence, elles permettent néanmoins une vérification ou une estimation rapide de l'échantillonnage d'une ligne



Le V-Drive permet de reculer considérablement le moteur tout en conservant les avantages d'une ligne d'arbre.

d'arbre classique. En ce qui concerne l'écartement entre paliers il est communément admis qu'un écartement inférieur à 20 fois le diamètre de l'arbre est déconseillé pour éviter la création d'un point dur avec les concentrations de contraintes associées. Un palier intermédiaire peut également jouer le rôle de butée qui absorbera la poussée de l'hélice en soulageant ainsi l'inverseur-réducteur de contraintes importantes et en augmentant ainsi sa durée de vie. Il faut en effet savoir que pour chaque cheval développé par le moteur, la ligne d'arbre encaisse une poussée d'environ 15 kg. L'ensemble de l'appareil propulsif doit donc pouvoir supporter une poussée de l'ordre de 15 tonnes pour un moteur de 1 000 ch. En terme de rendement, il est généralement admis que chaque palier provoque une perte de puissance de l'ordre de 1 %.

► **LE TUBE D'ÉTAMBOT**

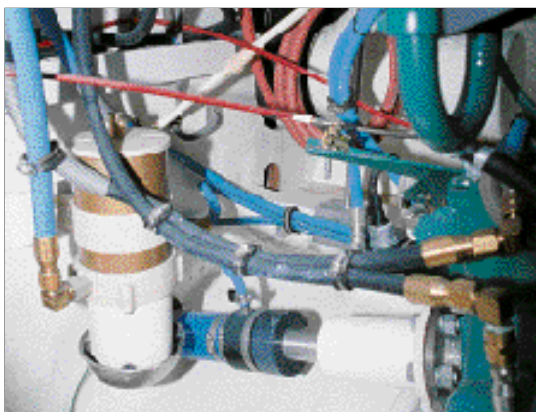
Le tube d'étambot permet le passage de l'arbre d'hélice à l'extérieur de la coque. Il peut être muni d'un palier ou d'une bague mais il est toujours équipé d'un presse-étoupe ou d'un joint d'étanchéité. Cet élément de la ligne d'arbre doit faire l'objet d'une attention particulière et être régulièrement vérifié et ajusté afin d'éviter des entrées d'eau ou pire encore une rupture de l'ensemble. Les presse-étoupes classiques sont montés sur le tube d'étambot par une durite fixée à l'aide de colliers métalliques. Il est important que cette durite soit de bonne qualité et en bon état, sans craquelure ou autre défaut. Les colliers doivent être en acier inoxydable et montés par paire, un collier simple peut se desserrer ou casser et provoquer une voie d'eau importante dont les conséquences peu-

vent être dramatiques. Depuis quelques années, ces presse-étoupes ont été remplacés par des joints tournants ou des joints à lèvres. Ces systèmes sont plus faciles à entretenir, mais ils doivent néanmoins être régulièrement

► **LA CHAISE D'ARBRE**

vérifiés et les soufflets remplacés dès l'apparition de défauts.

A l'extérieur de la coque, l'arbre porte-hélice peut être supporté par une ou deux chaises d'arbre. Ces supports sont généralement fabriqués en bronze ou en acier



Le presse étoupe doit être d'une étanchéité parfaite et vérifié fréquemment.

inoxydable et peuvent être à simple ou double pattes de fixation. Sur les coques en matériaux composites, les chaises peuvent être boulonnées ou stratifiées, mais dans tous les cas cette zone doit être renforcée et le montage fait suivant les règles de l'art pour assurer une bonne rigidité et résistance de l'ensemble. Ces chaises sont munies de bagues dites hydrolube (lubrifiée à l'eau) qui sont constituées d'une enveloppe extérieure métallique (acier inoxydable,

laiton ou bronze) ou synthétique et d'une bague intérieure en caoutchouc rainuré. Ce caoutchouc, bien que particulièrement résistant, est soumis à des agressions mécaniques et physiques importantes. L'usure qui en résulte doit être régulièrement surveillée. Une usure maximum de 20/10 de millimètre est généralement tolérée pour les arbres entre 50 et 100 mm de diamètre. Là encore une usure excessive provoquera des vibrations et une fatigue des divers organes de la ligne d'arbre. Inverseur-réducteur et tous les organes de la ligne d'arbre jouent un rôle important dans les performances et la fiabilité d'un yacht à moteur. Ils doivent être sélectionnés avec discernement et être entretenus avec rigueur pour préserver la sécurité et l'agrément de la navigation.

Eric A Ogden.
Photos : Renaud Jourdon