

La propulsion par jet d'eau

Michel Visconti

NEYRTEC-Etablissement de Grenoble d'ALSTHOM-ATLANTIQUE

Notations

Symbole	Dimension	Unité	
D	L	m	Diamètre de rotor de la pompe
S_R	L^2	m^2	Aire de la section de rotor $S_R = \frac{\pi D^2}{4}$
S_j	L^2	m^2	Aire de la section transversale du jet
H_p	L	m	Hauteur à engendrer par la pompe
H_n	L	m	Hauteur nette
ΔH	L	m	Pertes de charge
H_{na}	L	m	Hauteur nette d'aspiration
V_o	LT^{-1}	m/s	Vitesse d'avance du navire
V_j	LT^{-1}	m/s	Vitesse de jet
Q	L^3T^{-1}	m^3/s	Débit propulsif
T	MLT^{-2}	N	Poussée
P	ML^2T^{-3}	w	Puissance absorbée
ρ	ML^{-3}	kg/m^3	Masse volumique de l'eau
g	LT^{-2}	m/s^2	Accélération de la pesanteur
n	T^{-1}	rpm	Vitesse de rotation de la pompe
n_q	$L^{3/4} T^{-3/2}$		Vitesse spécifique de la pompe
S	$L^{3/4} T^{-3/2}$		Vitesse spécifique d'aspiration
w			$w = \frac{V_j}{V_o}$
λ			$\lambda = \frac{H_p}{H_n}$
k			$k = \frac{2g \Delta H}{V_o^2}$
η_p			Rendement de la pompe
η_{pr}			Rendement propulsif global
η_i			Rendement idéal de propulsion
m			Facteur de mérite : $m = \frac{T}{P} \sqrt{\frac{T}{\rho S_R}}$

Introduction

La propulsion par jet d'eau des navires est connue depuis longtemps puisqu'on retrouve des tentatives concrètes d'application au XVII^e siècle, en Angleterre. Benjamin Franklin propose également, en 1775, de pomper l'eau à l'avant du navire pour la refouler à l'arrière et James Rumsey l'applique en 1782 à un bateau de 80 pieds, naviguant entre Washington et Alexandrie.

Au début du XIX^e siècle apparaît l'hélice qui supprime petit à petit pratiquement toutes les autres techniques de propulsion et dont le développement va progresser en liaison étroite avec celui de la technique navale.

Cependant, la propulsion par jet d'eau va continuer de susciter l'imagination des chercheurs qui trouvent ainsi des solutions originales aux problèmes que l'hélice résoud mal. Aujourd'hui, de même que les limitations rencontrées par les navires classiques sont à la base du développement des navires qu'on appelle non conventionnels, on peut dire que les limitations rencontrées par l'hélice classique sont les raisons motivantes du développement de la propulsion par jet d'eau. On constate en effet une extension importante de l'utilisation de ce procédé dans des domaines très variés, que l'on considère le type de *navire*, le domaine de *vitesse* ou la *fonction* recherchée.

Présentation des dispositifs de propulsion par jet d'eau

Définition et schéma de principe

Le propulseur par jet d'eau est un ensemble hydro-mécanique permettant de créer une poussée par la réaction d'un jet d'eau.

Nous nous limiterons ici aux dispositifs les plus fréquemment rencontrés, qui sont équipés d'une turbo-pompe pour transformer le travail mécanique fourni par le moteur en énergie de propulsion et qui fonctionnent avec un jet d'eau pure, excluant les systèmes polyphasiques qui utilisent des fluides bien distincts (par exemple air et eau).

La figure 1 donne le schéma de principe d'un propulseur à jet d'eau et la dénomination des différents éléments qui le constituent.

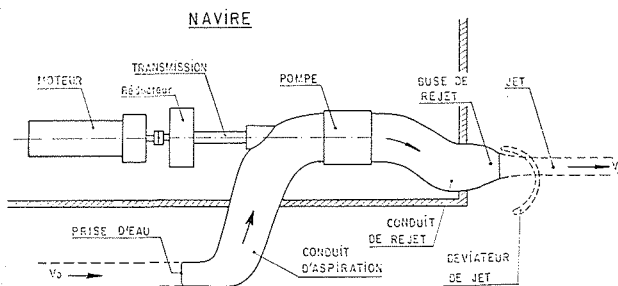


Figure 1 — Propulsion par jet d'eau : schéma de principe.

L'eau est aspirée par une prise immergée et amenée à la pompe par un conduit d'aspiration. Après augmentation d'énergie par la pompe, elle est éjectée par un conduit de rejet équipé d'une buse. Le jet propulsif peut être déflécté par un déviateur.

La pompe est entraînée par un moteur, par l'intermédiaire d'une transmission. Le propulseur est complété par les appendices nécessaires à son implantation à bord du navire.

Ce schéma très général couvre en fait des appareils ayant des caractéristiques géométriques et fonctionnelles très variées, comme nous allons le voir.

Les différents types d'appareils

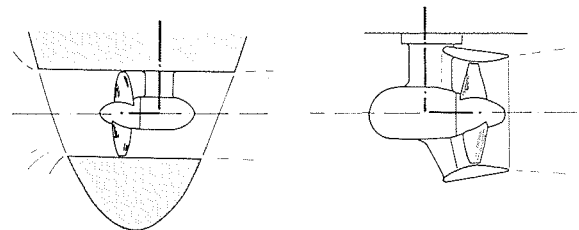
La classification des propulseurs à jet d'eau peut se faire en fonction de différents critères fonctionnels ou structuraux comme par exemple :

- la fonction principale : propulsion, positionnement dynamique, auxiliaire de manœuvre...
- le domaine de vitesse d'utilisation : vitesse nulle ou faible, vitesse moyenne ou grande vitesse
- la géométrie du circuit : circuit axial ou avec coudes, court ou long
- le type de pompe ou de prise d'eau.

La combinaison de tous ces critères conduirait à une multitude d'appareils différents. En fait, la majorité des propulseurs existants ou en développement peut se rattacher à un nombre réduit de classes ayant chacune des caractères communs bien définis.

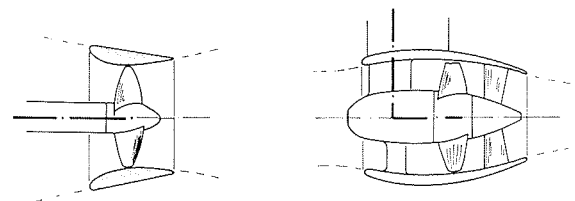
Les figures 2 et 3 illustrent différents types de propulseurs que l'on peut ranger en deux catégories :

- les propulseurs axiaux, complètement immergés, à écoulement axial (donc sans coude) et avec un circuit le plus souvent court
- les hydrojets dont la pompe est généralement placée à bord du navire. Le circuit comporte donc un ou plusieurs coudes et sera plus ou moins long selon le type d'application et les contraintes d'implantation.



a / Propulseur transversal ($V_0=0$)

b / Propulseur de point fixe



c / Propulseur caréné de navire

d / Pompe-jet

Figure 2 — Propulseurs axiaux.

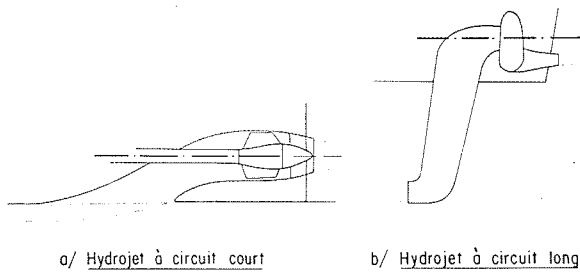


Figure 3 - Hydrojets.

Caractéristiques générales des propulseurs à jet d'eau

Présentation

Tout projet d'utilisation d'un système de propulsion comporte d'abord la définition des caractéristiques fonctionnelles requises pour les conditions d'emploi envisagées et impose des contraintes structurales pour l'implantation à bord.

Pour répondre au cahier des charges ainsi exprimées, le projeteur doit définir l'assemblage des composants conduisant à la meilleure solution pour l'ensemble propulseur-navire.

Cette définition du système de propulsion nécessite de prendre en compte non seulement les performances mais également d'autres critères concernant les options mécaniques et constructives, la fiabilité, les coûts de développement, de fabrication, d'entretien...

Nous nous limiterons ici essentiellement à l'aspect hydrodynamique pour juger des possibilités et de l'efficacité des propulseurs à jet d'eau.

Définition des performances

Poussée

La poussée développée par un propulseur à jet d'eau est égale à l'augmentation de quantité de mouvement du débit propulsif traversant le système.

Si nous posons comme hypothèse que les distributions de vitesse devant la prise d'eau et dans le jet sont uniformes, pour simplifier les formules, et en utilisant les notations définies en tête du mémoire, l'expression de la poussée s'écrit :

$$T = \rho Q (V_j - V_0) = \rho S_j V_j (V_j - V_0) \quad (1)$$

La charge H_p développée par la pompe est la somme de la charge nette utile H_n et des pertes de charge ΔH :

$$H_p = H_n + \Delta H \quad (2)$$

$$\text{avec} \quad H_n = \frac{V_j^2}{2g} - \frac{V_0^2}{2g} \quad (3)$$

$$\Delta H = \Sigma \Delta h \quad (4)$$

Les pertes de charges sont de différentes natures :

pertes dans la prise d'eau qui ne récupère pas toute l'énergie cinétique $V_0^2/2g$, pertes par frottement et pertes singulières dans les différents organes (prise, conduits, coudes, buse de rejet...), éventuellement charge supplémentaire correspondant à la hauteur de refoulement du jet au-dessus du niveau du plan d'eau, en cas de rejet dans l'air.

Dans le cas du propulseur au point fixe, on a $V_0 = 0$ et les formules s'écrivent simplement :

$$T = \rho Q V_j = \rho S_j V_j^2 \quad (5)$$

$$\text{et} \quad H_n = \frac{V_j^2}{2g} \quad (6)$$

Puissance absorbée

La puissance absorbée sur l'arbre de la pompe du propulseur est donnée par :

$$P = \frac{\rho g Q H_p}{\eta_p} \quad (7)$$

η_p étant le rendement de la pompe.

Rendement propulsif global

En restant dans le cadre d'une présentation simplifiée, le rendement propulsif global est donné par :

$$\eta_{pr} = \frac{TV_0}{P} \quad (8)$$

En remplaçant les valeurs de la poussée et de la puissance par les expressions données ci-dessus, et en posant $w = V_j/V_0$ et $\lambda = H_p/H_n$ ($\lambda > 1$), on trouve :

$$\eta_{pr} = \frac{\eta_p}{\lambda} \frac{2}{1+w} \quad (9)$$

Cette formule fait apparaître le rendement idéal de propulsion :

$$\eta_i = \frac{2}{1+w}$$

et on a donc

$$\eta_{pr} = \frac{\eta_p \eta_i}{\lambda} \quad (10)$$

On voit que le rendement propulsif global dépend de trois facteurs principaux :

- le rendement de la pompe η_p
- le rendement idéal de propulsion η_i
- les pertes de charge

Le rendement de la pompe est déterminé par le choix du type de la pompe que nous examinerons plus loin. En fait, ce rendement varie dans des limites assez étroites pour des tracés bien adaptés (entre 0,8 et 0,9 environ).

Le rendement idéal de propulsion dépend uniquement du rapport $w = V_j/V_0$ et est d'autant plus élevé que ce rapport est voisin de 1. Mais pour une poussée requise T , l'expression (1) montre que, si l'on fait tendre w vers 1 pour augmenter η_i , il est nécessaire de faire croître le débit propulsif Q , donc les dimensions du pro-

pulseur, et en conséquence son poids, son encombrement, son prix...

Les pertes de charge sont un facteur pénalisant pour le rendement global et il est intéressant de les diminuer. Mais elles ne sont pas indépendantes en particulier des vitesses d'écoulement dans le propulseur.

Le choix des caractéristiques du propulseur résultera donc d'une optimisation dont on peut voir la tendance en supposant que les pertes de charge s'expriment sous la forme :

$$\Delta H = k \frac{V_o^2}{2g} \quad (11)$$

on a alors :

$$\frac{\eta_{pr}}{\eta_p} = \frac{2}{1 + w + k \frac{1}{w - 1}} \quad (12)$$

représenté sur la figure 4 pour différentes valeurs de k .

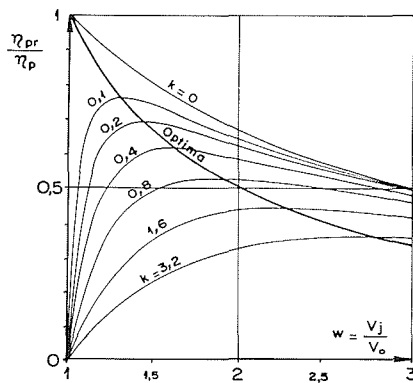


Figure 4 - Optimisation.

Cette figure met en évidence l'importance des pertes de charge dans l'expression du rendement propulsif global, surtout pour les faibles valeurs de w .

D'autre part, pour les valeurs courantes de k (0,2 à 2 environ), les courbes de rendement présentent un optimum assez plat, ce qui laissera une certaine marge de choix pour les autres paramètres que nous n'avons pas pris en compte : encombrement, masse, vitesse de rotation.

Nous pouvons situer les différents types de propulseur par quelques valeurs indicatives :

Les propulseurs axiaux (figure 2), à circuit court, ont des pertes faibles et l'optimisation conduit à des valeurs de w comprises entre 1,2 et 1,5. Pour les hydrojets à circuit court (figure 3a), on a $1,4 < w < 2$ environ, et pour les hydrojets à circuit long (figure 3b) $w < 2$. Le graphique ci-dessus donne une bonne approximation du rendement propulsif global de ces différents types de propulseurs.

Nous avons volontairement simplifié la présentation ci-dessus pour alléger les calculs. En fait, il est nécessaire dans l'optimisation complète d'un système, de prendre en compte d'autres facteurs :

— les traînées parasites du propulseur (différence entre

la poussée brute donnée par la formule (1) et la poussée nette obtenue en eau libre)

- les traînées résultant des appendices et modifications de carène nécessaires à l'implantation du propulseur
- les interactions entre carène et propulseur (sillage, succion ...)
- les limitations concernant la masse et l'encombrement du système
- les limitations imposées par le fonctionnement des composants (pompe, prise d'eau, circuit ...).

Facteur de mérite

Pour les propulseurs au point fixe, la définition du rendement donnée ci-dessus n'est plus applicable car sa valeur devient nulle pour $V_o = 0$. Il est utile de définir un facteur de comparaison applicable à tous ces dispositifs.

Nous avons retenu comme facteur de mérite, le coefficient adimensionnel suivant :

$$m = \frac{T}{P} \sqrt{\frac{T}{\rho S_R}} \quad (13)$$

avec $S_R = \frac{\pi D^2}{4}$, D étant le diamètre caractéristique de la pompe.

En utilisant les formules données ci-dessus, on obtient :

$$m = \frac{2\eta_p}{\lambda} \sqrt{\frac{S_j}{S_R}} \quad (14)$$

L'analyse de ces deux expressions permet de tirer quelques conclusions :

- pour deux propulseurs de même diamètre de pompe, le plus performant est celui qui a le facteur de mérite le plus élevé, car il fournit plus de poussée ou consomme moins de puissance
- le facteur de mérite dépend du rendement de la pompe, des pertes de charge et du rapport de la section de jet à la section de rotor. On est donc conduit à conclure qu'il est intéressant d'avoir une diffusion importante ($S_j > S_R$) pour augmenter la valeur de m . En fait, ceci entraîne une augmentation des pertes (donc de λ) et une diminution du rendement de pompe η_p . Le choix des caractéristiques de la pompe et du circuit dépend donc, comme précédemment, d'une optimisation de m .

Enfin, nous ajouterons une remarque concernant l'expression souvent utilisée pour les appareils de point fixe, la "poussée au cheval" ou rapport T/P . En effet, ce terme n'est pas adimensionnel et peut conduire à des erreurs de jugement, s'il est manié sans discernement.

Un exemple évident : deux propulseurs de même tracé, géométriquement semblables ont même facteur de mérite. Or, le plus grand en dimensions fournira une "poussée au cheval" supérieure à celle du plus petit, comme le montre la formule (13).

A titre d'exemple, on trouve comme valeurs de facteur de mérite :

- pour les propulseurs axiaux de positionnement dynamique :

$$m = 1,4 \text{ à } 1,5$$

- pour les propulseurs transversaux de navire (avec poussée réversible symétrique) :

$$m = 0,8 \text{ à } 1$$

Caractéristiques fonctionnelles

La fonction de base du propulseur est naturellement la création d'une poussée. Mais le propulseur doit souvent assurer des fonctions complémentaires et être utilisable dans des conditions de marche variées. Nous allons examiner les caractéristiques fonctionnelles le plus fréquemment recherchées et citer quelques moyens utilisés pour les assurer.

La variation de poussée

Elle peut se faire continûment ou par tout ou rien. Elle est nécessaire à l'ajustement de la poussée à la traînée de l'engin à propulser ou à la force à vaincre en cas de positionnement dynamique à vitesse nulle.

Cette variation peut être obtenue par :

- variation de la vitesse de rotation de la pompe
- variation du pas des pales de la pompe (dans le cas d'une pompe-hélice)
- contrôle du débit propulsif par vanne réglable sur le conduit ou la buse de rejet.

Il y a lieu de considérer dans chaque cas les limites de fonctionnement qui peuvent compromettre la bonne marche du propulseur, du fait par exemple, de l'apparition de la cavitation au niveau de la pompe ou de la prise d'eau.

La réversibilité ou possibilité d'inverser le sens de la poussée.

Un propulseur a généralement un sens préférentiel de marche et l'inversion de poussée n'est utilisée que pour des fonctionnements exceptionnels (manœuvre d'arrêt, marche arrière...), on ne recherche alors ni la symétrie des poussées dans chaque sens, ni l'optimisation du fonctionnement en marche inversée.

La réversibilité peut être obtenue par :

- l'inversion du sens de rotation ou du pas de l'hélice (dans le cas d'une pompe-hélice)
- la commutation sur deux circuits de rejet
- la déflexion totale du jet.

Dans certains cas, il peut être nécessaire d'avoir une symétrie exacte des poussées dans chaque sens, par exemple, pour les auxiliaires de manœuvre (propulseur d'étrave). Des contraintes supplémentaires s'imposent alors pour les deux premières méthodes proposées ci-dessus, conduisant respectivement à :

- des tracés spéciaux des pompes et circuits
- des tracés de circuits ayant des caractéristiques hydrauliques équivalentes.

On remarquera que la variation et la réversibilité de la poussée peuvent être facilement combinées dans le cas des pompes-hélices.

L'adaptabilité ou possibilité d'avoir un fonctionnement optimisé du propulseur pour différents régimes de marche correspondant à des caractéristiques traînée-vitesse d'avance du navire variables (en fonction de l'état de la mer, des conditions de charge, du type de navigation dans le cas des navires spéciaux : déjaugeage et croisière...).

Ce caractère est très important car il permet d'étendre le domaine d'utilisation du navire dans les conditions les plus économiques.

Cette adaptabilité est obtenue par l'action combinée sur plusieurs paramètres, comme par exemple, la vitesse de rotation de la pompe et la géométrie variable de la prise d'eau et/ou de la buse de rejet.

L'orientation de la poussée

Elle permet d'obtenir un pilotage efficace et économique assurant la manœuvrabilité du navire.

Elle est possible par :

- déflexion du jet par orientation de la buse de rejet ou par un organe défecteur extérieur
- orientation totale du propulseur.

Ces différents procédés permettent d'orienter la poussée avec une très bonne efficacité, sans perturber le fonctionnement normal du propulseur. Ils présentent de ce fait un avantage intéressant sur les gouvernes classiques.

Caractéristiques structurales et choix des composants

Sur le plan structural, il est difficile de dégager des caractères spécifiques des propulseurs à jet d'eau, du fait de la grande variété de conceptions possibles. Alors que l'hélice classique impose un cadre de mise en œuvre assez rigide, les propulseurs à jet d'eau présentent une souplesse d'installation très intéressante. Il est en effet possible d'aménager dans certaines limites les tracés des circuits, le choix de la pompe et l'implantation des organes de prise et de rejet sans répercussion importante sur les performances.

On peut définir deux types de conception qui recouvrent partiellement la classification donnée en début de mémoire :

- les propulseurs complètement (ou presque) intégrés dans la coque du navire. Ils sont du type hydrojets. Ils permettent d'éviter pratiquement toute protubérance du navire et de diminuer ainsi les risques d'avarie;
- les propulseurs en nacelle qui sont le plus souvent du type axial. Ils peuvent être escamotables à l'arrêt dans certaines applications.

Comme nous l'avons déjà dit, le choix d'une solution résulte à la fois des objectifs d'utilisation et des possibilités de conception dépendant des caractéristiques des composants et de leurs limitations.

La prise d'eau

Elle doit capter le débit propulsif (en récupérant le maximum d'énergie cinétique) et alimenter correctement la pompe dans toutes les conditions de fonctionnement

du propulseur. De plus sa traînée externe doit être aussi réduite que possible.

On dispose pour cela de tracés très variés qui vont de la prise en paroi à la prise frontale (figure 2). En fait, le problème de la prise d'eau est difficile à résoudre et nécessite souvent le recours à l'expérimentation sur modèle. Il devient particulièrement critique pour les propulseurs à grande vitesse à cause des problèmes de cavitation et de ventilation et parce que les pertes liées à la prise représentent une part importante des pertes totales. On peut être amené à l'utilisation de prises à géométrie variable pour assurer l'adaptabilité du propulseur.

La pompe

Elle assure la charge nécessaire à l'accroissement d'énergie cinétique du débit propulsif (Cf. Expressions 2 et 3). L'optimisation des performances du propulseur permet de définir les caractéristiques requises : charge H_p et débit propulsif Q . Le choix du type de pompe le mieux adapté se fait alors à partir de la valeur du paramètre caractéristique suivant, appelé "vitesse spécifique" :

$$n_q = \frac{n Q^{1/2}}{H^{3/4}}$$

dans lequel n est la vitesse de rotation de la pompe.

Il est toujours intéressant de choisir une vitesse de rotation aussi élevée que possible pour réduire les masses et encombrements du moteur, de la transmission et du propulseur. Mais on est limité par les risques de cavitation. On peut calculer une valeur approchée de cette vitesse de rotation limite en sachant qu'il ne faut pas dépasser certaines valeurs critiques de la "vitesse spécifique d'aspiration" définie par :

$$S = \frac{n Q^{1/2}}{H_{na}^{3/4}}$$

où H_{na} est la hauteur nette d'aspiration disponible à l'entrée de la pompe.

Les valeurs courantes de vitesses spécifiques pour les différents types de pompes sont :

- pompes centrifuges : $n_q < 80 - 90$
- pompes hélico-centrifuges : $80 < n_q < 150 - 200$
- pompes axiales : $n_q > 150$

Ces valeurs correspondent à un seul étage de pompe. Or il est possible de faire des combinaisons d'étages de pompe en série ou parallèle. On peut alors obtenir les mêmes caractéristiques avec des pompes différentes. Le choix dépendra d'autres considérations. Par exemple, une pompe-hélice à plusieurs étages pourra être moins encombrante en diamètre que la pompe hélico-centrifuge équivalente.

La vitesse spécifique d'aspiration a pour valeur $S = 130$ à 160 pour un tracé normal. On peut atteindre 240 à 280 pour des tracés adaptés en cavitation, en tolérant une légère diminution du rendement, et même 400 pour certaines pompes spéciales (avec inducteur).

Les propulseurs axiaux utilisent en général une pompe-hélice à un étage, les hydrojets à circuit court une pompe-hélice mono ou multi-étagée ou une pompe

hélico-centrifuge et les hydrojets à circuit long une pompe hélico-centrifuge ou centrifuge.

Il est à noter que les conditions dont résulte le choix de la pompe ne sont pas toujours celles correspondant au fonctionnement de croisière, en particulier, si le propulseur doit assurer une forte poussée aux régimes de vitesse intermédiaires pour lesquels la hauteur nette d'aspiration est faible (navires rapides avec bosse de déjaugage).

Le circuit

Son tracé relève de l'hydraulique classique et l'objectif primordial est toujours la réduction des pertes de charge.

La buse de rejet

La buse est divergente ou convergente selon le type de propulseur et son tracé ne pose pas de problèmes particuliers. Elle peut être combinée avec un dispositif de réglage de poussée et de déviation de jet, comme nous l'avons vu plus haut.

Les applications de la propulsion par jet d'eau

Présentation

Les applications citées ci-après ne sont pas limitatives. Elles permettent d'illustrer la présentation que nous venons de faire et de mieux dégager les caractères et possibilités de chaque type de propulseur.

Les propulseurs axiaux

Quelques applications types

Les propulseurs axiaux trouvent leur utilisation dans tous les domaines de vitesse, soit comme dispositifs de propulsion principale, soit comme auxiliaires de manœuvre. Nous allons examiner quelques applications courantes par domaines de vitesse.

a) Point fixe et très faibles vitesses

On peut citer deux types d'appareils :

- Les propulseurs carénés avec pompe-hélice en tuyère accélératrice utilisés sur les remorqueurs et pour l'aide à la propulsion ou le positionnement dynamique des plates-formes off-shore.

Ces appareils peuvent être partiellement ou complètement orientables sur 360° . Ils sont de conception modulaire, avec un entraînement par transmission généralement à renvoi d'angle en bulbe, ce qui facilite leur implantation. Ils peuvent être rétractables. Leurs performances sont élevées (facteur de mérite : $m \approx 1,4$ à $1,5$). Ils permettent d'obtenir des poussées supérieures de 30 à 50% à celles de l'hélice libre de même diamètre.

- Les propulseurs transversaux utilisés pour la manœuvre des navires (propulseurs d'étrave ou de poupe) ou

des plates-formes flottantes ou immergées. Ils assurent généralement une poussée variable et symétriquement réversible et sont le plus souvent complètement intégrés dans la carène. La symétrie de poussée impose des contraintes de tracé (symétrie de la pompe, prise d'eau fonctionnant également en buse de rejet...) qui en réduisent les performances. Ils ont un facteur de mérite d'environ 0,8 à 1.

Ces applications connaissent un développement important depuis une quinzaine d'années. On peut en prévoir l'extension à moyen terme vers des puissances unitaires plus élevées. Ces appareils ne posent pas de problèmes hydrodynamiques particuliers ; les limites actuelles sont technologiques et viennent du renvoi d'angle de la transmission de puissance (3000 à 4000 ch).

b) Vitesses moyennes

On trouve dans ce domaine les propulseurs à hélices carénées utilisés pour la propulsion principale d'engins ou de navire. Parmi les réalisations récentes les plus marquantes, nous retiendrons les hélices carénées utilisées sur certains gros pétroliers (diamètre d'hélice de 8 m environ et puissance de 30 000 ch à 16 nœuds).

Ces propulseurs remplacent avantageusement les hélices fortement chargées. La tuyère accélératrice permet d'augmenter la vitesse de rotation et le rendement idéal de propulsion malgré la traînée induite supplémentaire. Le gain de rendement est de 5 à 15 %, (selon les résultats d'essais sur modèle et à la mer) et la manœuvrabilité du navire est améliorée. Cette disposition permet également de réduire les forces excitatrices de vibrations.

Il semble qu'à moyen terme cette solution constitue une alternative fructueuse, malgré une certaine réticence liée à l'augmentation du coût, de la complexité et des risques d'avarie, par rapport à l'hélice classique.

c) Vitesses élevées

C'est le domaine du propulseur axial à tuyère décélétratrice, appelé aussi "pompe-jet". Cette solution permet d'améliorer les conditions de fonctionnement de la pompe du point de vue cavitation, en assurant un ralentissement de l'écoulement interne et donc une augmentation de la pression. Il est ainsi possible de dépasser 50 nœuds en régime subcavitant avec un rendement propulsif global élevé (supérieur à 65 %) grâce à un faible recul (Cf. figure 4). La traînée externe de la navette reste inférieure à 10 % de la poussée nette si elle est bien tracée.

Une application de ce type de propulseur sera plus largement analysée dans une communication à la prochaine session de l'ATMA, avec la présentation de la pompe-jet ISERE pour la propulsion des hydroptères.

On peut également citer l'application à la propulsion des torpilles où l'un des objectifs recherchés concerne la réduction du bruit rayonné dans l'eau.

Caractères essentiels des propulseurs axiaux

Les propulseurs axiaux peuvent être caractérisés par :

- l'association d'une pompe-hélice à un circuit ou carénage court
- une conception modulaire
- de bonnes performances du fait du faible recul et des pertes de charge réduites
- une bonne adaptabilité aux régimes de marche variés
- un développement faisant appel à des technologies classiques
- des domaines d'applications très variées
- des limitations liées en particulier au développement des transmissions de puissance à renvoi d'angle.

Les hydrojets

Quelques applications-types

La variété des applications des hydrojets est grande et nous n'en considérerons que quelques-unes parmi les plus fréquentes, éliminant les cas particuliers qui n'ont d'intérêt que comme marque de diversité des possibilités de la propulsion par jet d'eau. Comme pour les propulseurs axiaux, nous considérons les domaines de vitesse.

a) Point fixe

On trouve peu d'applications dans ce domaine essentiellement couvert par les propulseurs axiaux. Nous citerons seulement le réacteur d'étrave en Y.

b) Faibles vitesses

Les applications des hydrojets sont ici nombreuses pour la propulsion des navires et barges à faible tirant d'eau, la propulsion aquatique des engins amphibies...

On trouve essentiellement des hydrojets à circuit court, à pompe-hélice mono ou multi-étagée ou hélicocentrifuge, les puissances unitaires correspondantes ne dépassent guère quelques centaines de chevaux. Les rendements de ces appareils sont relativement médiocres (inférieurs à 50 %) mais leur conception leur confère une robustesse et une fiabilité intéressante.

c) Vitesses élevées

La propulsion des navires rapides (vitesses supérieures à 45-50 nœuds) est l'un des domaines les plus prometteurs du développement de la propulsion par jet d'eau et nous traiterons des problèmes de son application aux navires non conventionnels rapides à la prochaine session de l'ATMA. On peut retenir :

- l'utilisation des hydrojets à circuit long pour la propulsion des hydroptères qui permet de s'affranchir des problèmes de transmission de puissance et dont le développement ne fait appel qu'à des technologies connues. L'inconvénient majeur reste leur rendement faible, de l'ordre de 50 % et leur limite de vitesse à 55 nœuds environ;
- l'utilisation des hydrojets à circuits courts qui équipent des bateaux de plaisance (avantage particulier de la sécurité vis à vis des nageurs) et dont l'application aux navires aéroglosses à quilles latérales est prometteuse du fait de leur maturité technologique. Des prototypes de 6 000 ch fonc-

tionnent aux Etats-Unis et l'extension à des appareils de 25 000 ch environ est décidée. Leur rendement est de l'ordre de 55 % et les vitesses d'utilisation vont jusqu'à 80 nœuds.

Caractères essentiels des hydrojets

Les hydrojets sont caractérisés par :

- une grande variété de conceptions, corrélative d'une grande souplesse d'intégration et d'implantation
- une simplification des problèmes de transmission mécanique
- la possibilité de décomposition de l'étude au niveau des composants
- un développement avancé et l'extension possible en puissance par l'utilisation des technologies connues
- un domaine de vitesse d'utilisation très large
- des performances moyennes (et même parfois médiocres) et une puissance massique faible qui devraient pouvoir être améliorées.

Conclusion

La propulsion par jet d'eau est particulièrement bien adaptée pour certaines applications : poussée au point fixe, propulsion des navires à faible tirant d'eau et engins spéciaux, propulsion de certains navires classiques, propulsion à grande vitesse (hydroptère, AQL...).

La poursuite de la tendance actuelle d'extension des applications de la propulsion par jet d'eau nécessite certainement de continuer à mettre en œuvre des programmes d'études et d'essais hydrodynamiques pour en améliorer les performances et des recherches technologiques pour en augmenter en particulier la puissance massique ; ces objectifs doivent permettre des progrès sensibles sans rencontrer de problèmes insurmontables.

La propulsion par jet d'eau pourra alors vraiment prendre la place qui lui revient, comme relais de l'hélice classique ou en remplacement d'autres procédés mal adaptés.

Discussion

Président : M.S. BINDEL

Merci, M. VISCONTI, dit M. le Président, pour cette bonne présentation d'ensemble de la propulsion par jet d'eau. En ouvrant la discussion sur cette technique, je voudrais faire observer que sa définition reste assez floue et peut, en fait englober à volonté des systèmes très divers.

Si l'on adopte un point de vue très large, elle doit comprendre la propulsion classique par hélice ; dans une optique très stricte, la propulsion par hydrojet ne comportera que des systèmes dans lesquels une pompe alimente le jet propulseur par l'intermédiaire d'un conduit d'une certaine longueur et l'hélice classique se trouvera alors éliminée et même peut être aussi le propulseur de point fixe et l'hélice carénée de certains navires. Je conserverai pourtant parmi les hydrojets le propulseur transversal car le fonctionnement de l'hélice y dépend des conditions à l'intérieur du conduit.

Effectivement, constate M. VISCONTI, il existe des zones où la propulsion par hydrojet et par hélice classique se recouvrent. J'ai inclus dans la propulsion par jet d'eau tous les systèmes où il y a physiquement séparation entre "l'écoulement interne" et "l'écoulement externe", (ce qui ne veut pas dire qu'il n'y a pas interaction entre ces deux écoulements). La différence entre les propulseurs axiaux et l'hélice réside essentiellement dans la présence d'une tuyère permettant de contrôler le jet - tuyère accélératrice ou décélératrice -.

A ce point de vue, il me semble un peu aberrant de voir sur certains pétroliers une hélice carénée dont l'allure est celle d'une hélice classique. Il y a peut être eu modification du pas, mais non de la surface projetée des pales. Or, la présence du carénage devrait conduire à des profils d'extrémité de pale différents à portance non nulle.

En fait, observe M. le Président, cette aberration se justifie dans une large mesure. Ce qui empêche d'adopter des sections larges en bout de pale sur une hélice classique, c'est essentiellement la cavitation par tourbillon d'extrémité. Si l'on dispose d'une tuyère à l'extérieur de l'hélice, on peut théoriquement supprimer les tourbillons d'extrémité du fait que ceux-ci

s'échappent sur le bord de fuite de la tuyère et se trouve, alors, très dilués. En pratique cependant, on s'aperçoit que la suppression des tourbillons exige des jeux extrêmement faibles entre l'hélice et la tuyère ; si on ne peut les réaliser, il vaut mieux adopter des sections de pale moins larges à la périphérie.

En fait d'une part, certains spécialistes de l'hydrodynamique navale ont voulu perfectionner l'hélice classique en la plaçant dans une tuyère à la façon des aérodynamiciens ; d'autre part, des spécialistes des turbo-machines hydrauliques - tel M. VISCONTI - ont évolué en réduisant progressivement les circuits associés généralement à ces machines pour aboutir aux hélices carénées en tuyère. Malgré la convergence de leurs réalisations, chacune des catégories de spécialistes classe l'hélice à sa façon...

M. FELDSTEIN (Dubigeon-Normandie) souhaiterait obtenir du Conférencier quelques renseignements sur les trois points ci-après concernant les hydrojets :

1 - Bien que connues d'assez longue date, les connaissances sont assez maigres quand à l'interaction "pompe-tunnel-coque" d'un navire. De même que pour une propulsion classique par hélice, des effets de succion - et autres - contribuent au rendement d'adaptation à la coque. Quelle a été la contribution d'Alsthom dans ce domaine ?

2 - Du point de vue hydrodynamique, le tunnel d'adduction, en tant qu'appareil directeur vers le propulseur, a une influence de taille sur le rendement. La géométrie du tunnel, et par voie de conséquences, les vitesses et leur distribution doivent influencer le rendement. Quelle est, sur ce point, l'opinion d'Alsthom ?

3 - Le Constructeur a-t-il rencontré des problèmes au démarrage pour les propulseurs par hydrojets ? Dans l'affirmative, est-ce qu'un dispositif de démarrage s'impose ?

Sur le premier point, M. VISCONTI répond que les interactions coque-propulseur sont de même nature que celles rencontrées avec l'hélice classique, avec en plus, une grande variété de configurations d'implantation des prises d'eau. Chaque appli-

cation doit faire l'objet d'un examen spécifique. Ce problème est particulièrement important dans le cas des prises d'eau pariétales.

D'autre part, poursuit M. VISCONTI, par nature, les hydrojets par exemple ont des rendements moyens de l'ordre de 50 % ; il y a donc, dans ce cas, grand intérêt à réduire toutes les pertes et en particulier, celles qui réduisent le rendement de la pompe du fait d'une mauvaise répartition des vitesses à l'aspiration de celle-ci.

Le problème devient très important dans le cas des hydrojets de très grande puissance pour l'application aux navires rapides. Aussi, poursuivons-nous des recherches expérimentales, sous la direction de la D.R.M.E., notamment dans le domaine des prises d'eau pariétales, en vue, tout d'abord, d'une récupération maximale de l'énergie cinétique de l'eau aspirée ; en outre, cette prise doit fournir à l'entrée de la pompe un écoulement aussi uniforme que possible, lequel sera pris en compte dans le tracé de la pompe. Dans ce genre d'application, le fonctionnement de la pompe est très critique du point de vue "cavitation" ; une répartition non-uniforme des vitesses à l'entrée complique encore le problème et peut limiter beaucoup les performances du système.

Le problème se pose différemment suivant que l'hydrojet est à circuit court ou à circuit long. Dans ce dernier cas, une

bonne disposition du circuit permettra d'avoir à l'entrée de la pompe un écoulement pratiquement indépendant des conditions de prise ; en outre, la prise d'eau se trouvera souvent complètement indépendante de la coque du bateau et se trouvera dans un milieu pratiquement non perturbé.

Sur le troisième point évoqué par M. FELDSTEIN, M. VISCONTI apporte les précisions suivantes. Le tracé de la prise doit être adapté aux vitesses de croisière, notamment pour les navires rapides. Or au démarrage, alors que la vitesse de la carène est faible, il faut créer une poussée relativement forte pour accélérer le bateau et, en conséquence, aspirer un débit élevé ; la prise risque alors de "caviter" ; c'est une des limitations de la poussée au démarrage. Ce problème peut être en partie résolu par l'utilisation d'une prise d'eau à géométrie variable. La pompe devra également pouvoir assurer les caractéristiques correspondant aux différents fonctionnements avec des performances acceptables.

D'une façon générale, ce sont les problèmes de prise d'eau et de fonctionnement de la pompe qui sont critiques au démarrage.

Monsieur le Président clôt la discussion et lève la séance en remerciant chaleureusement tous ceux qui ont contribué à l'animer.

Abstract

Water-jet propulsion

Water-jet propulsion for watercraft, a long-known principle, is finding an extensive range of applications today. Propulsion units of widely varying geometry and performance operate on this principle (Fig. 1), under the two main headings of (1) axial units and (2) hydrojets (Figs. 2 and 3 respectively).

Performance of such units can be expressed in simple forms (formulae 1-12) allowing determination of such important factors as pump and ideal propulsion efficiency, internal pressure drop and other significant efficiency-optimization factors (Fig. 4). In the case of fixed-point units, the "merit factor" is optimized (formula 13).

Basic operating characteristics of a propulsion unit include variation, reversibility, adaptability and direction of thrust.

Some flexibility is required in designing a water-jet propulsion unit for a given application. One has to know the characteristics of its water intake, pump, circuit and discharge nozzle. These are briefly analysed, with indicative flow data.

Overall features and performance of axial and hydrojet units are illustrated by examples of applications covering the whole speed range of such designs, i.e. constant, medium and high speeds. The report is intended to allow analysis of the basic features of each type of unit.