



SILLAGES : du rêve à la réalité

par l'ingénieur en chef de l'Armement Dern

Chef de la section navires, études, essais
au service technique des Constructions et armes navales

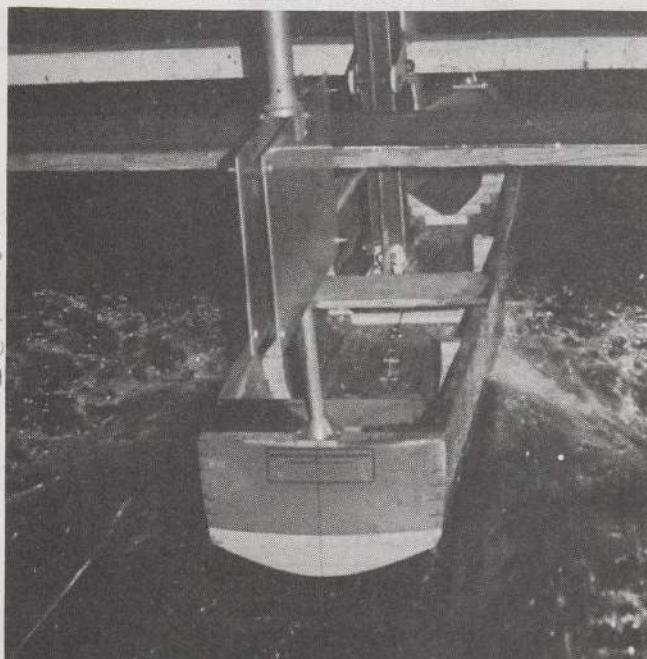
Peut-on encore rêver sur un bâtiment de guerre ? Oui certes : installez-vous sur la plage arrière, assis sur un chautard, les coudes sur les filières, laissez vos yeux dériver au gré du sillage ; ce sillage mystérieux, relié au plus profond de l'âme humaine, symbole puissant et poétique des traces laissées par le temps qui s'écoule... Mais peut-être avant de vous laisser engourdir, penserez-vous à ceux pour qui cette évasion n'est plus possible : des hydrodynamiciens en tout genre ont conçu la coque et le propulseur qui sont à l'origine du spectacle. Pour eux le sillage ne sera toujours que le résidu d'une imperfection : là où vous percevez un train de vagues bien régulières ou une remontée grondante d'écu-

me, ils revoient la série d'intégrales triples qui n'a pas suffi à créer ce produit idéal que serait le bâtiment sans sillage, ce vaisseau fantôme qu'un rien d'énergie met en branle, sans gaspillage et sans bruit.

Des sillages et non pas un sillage

Il n'y a pas un sillage mais des sillages, provenant chacun de phénomènes différents. Le mot sillage évoque aussi bien cette trace blanche laissée par le passage d'un navire à la surface de l'eau que les vagues qui accompagnent le navire dans son déplacement (et, pour cette raison, appelées vagues d'accompagnement). Mais le mot couvre aussi d'autres manifestations moins visibles

Fig 1 : Vagues créées par un navire à coque semi-planante



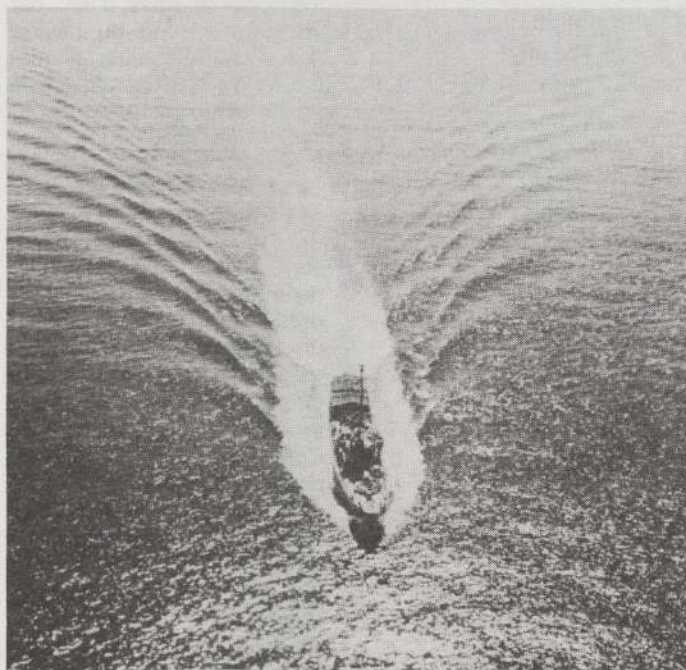
dont la principale est un déplacement des masses d'eau qui s'effectue par viscosité le long du navire. Tous ces types de sillage sont bien en accord avec la définition qu'en donnent les hydrodynamiciens : « perturbation de l'eau créée par le passage du navire et qui se manifeste par une variation de pression ou une variation de vitesse de la masse fluide ». Les deux premiers, sillage d'écume, sillage d'accompagnement rentrent dans la catégorie des sillages de pression, le troisième, déplacement des masses d'eau, constitue le sillage de vitesse.

Outre son côté spectaculaire, le sillage d'écume a la propriété de rester visible loin derrière le bateau : il est donc source d'indiscrétion vis-à-vis d'un guetteur, voire d'un senseur approprié.

Les vagues d'accompagnement ou les $19^{\circ} 30'$ du dièdre de Kelvin

Le champ de pression créé par la vitesse d'avance du

Fig. 2 : Sillage de vagues d'accompagnement



Le sillage d'écume : comme le coca-cola

Le sillage d'écume s'explique essentiellement par deux caractéristiques de l'eau de mer : sa grande tension superficielle et sa teneur élevée en air libre (microbulles d'air en suspension de quelques dizaines de microns de diamètre) et en air dissous. Les dépressions créées par le déplacement du navire sur l'eau ont pour effet de faire partir l'air libre et dissous sous forme de grosses bulles qui vont mousser (création d'écume), tout comme la bouteille de coca-cola se met à faire des bulles et à mousser dès qu'on la décapsule après l'avoir agitée. Cette apparition d'écume est également favorisée par le déferlement des vagues d'accompagnement.

navire se caractérise par un pic de pression positive (surpression) situé à l'extrême avant du navire, auquel va succéder une série de pics de pression alternativement négative (dépression) et positive. Une surpression se traduit par une surélévation du niveau d'eau (crête de vague) telle la vague d'étrave ; une dépression se traduit par un creux de vague. Le champ de pression crée ainsi un sillage de vagues d'accompagnement qui s'étend, comme le sillage d'écume, loin du navire (figure n° 2). Moyennant l'utilisation d'un ordinateur très puissant, ces vagues d'accompagnement peuvent se calculer. La théorie montre d'ailleurs que ces vagues sont confinées à l'intérieur d'un dièdre (dièdre de Kelvin) dont le demi-angle au sommet vaut $19^{\circ}30'$ (figure n° 3).

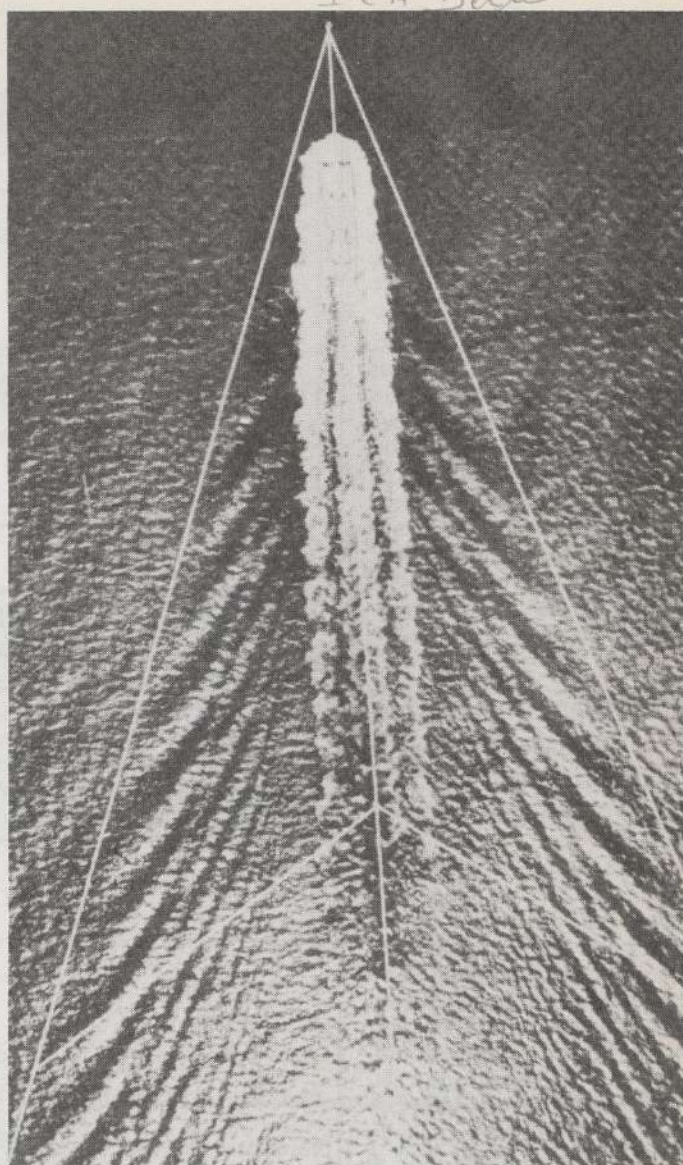
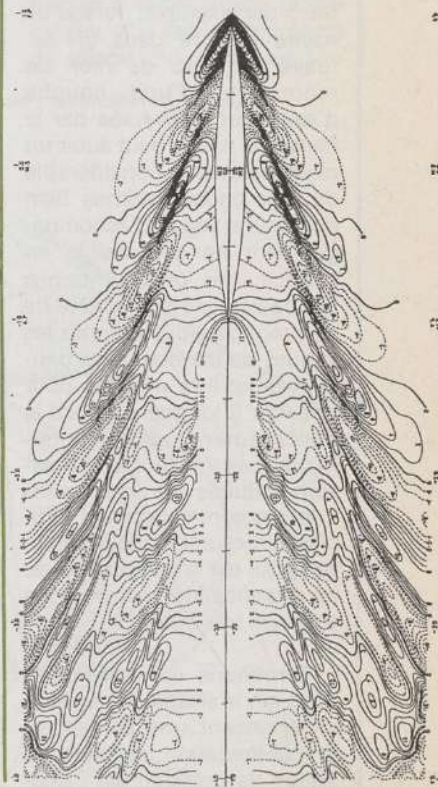


Fig. 3 : Le dièdre de Kelvin

Fig. 4 : Ligne de crête des vagues d'accompagnement.

Au bord de ce secteur les vagues ont une ligne de crête faisant un angle de 35° avec la route du navire. Un exemple de résultat de calcul est donné sur la figure n° 4 qui montre les lignes de niveau d'eau, c'est-à-dire les lignes le long desquelles la dénivellation de l'eau est constante (les cotes, après multiplication par 4, donnent en centimètres la dénivellation de l'eau ; les cotes négatives correspondent à des creux de vagues, c'est-à-dire à des dépressions — données valables pour un navire de 100 mètres de long marchant à 18 nœuds).

L'énergie nécessaire pour créer et entretenir le champ des vagues d'accompagnement est fournie par le système propulsif du navire. A cette dépense d'énergie est associée la résistance de vagues que doit vaincre la poussée de l'hélice et qui est particulièrement élevée pour



les navires rapides voir encadré). Une bonne répartition des aires des couples et un dessin approprié des formes du navire permettent de réduire le sillage de vagues d'accompagnement, donc la perte d'énergie correspondante. L'adjonction d'un bulbe est également de nature à diminuer la résistance de vagues.

Le sillage des vagues d'accompagnement n'est pas propre aux bâtiments de surface. Les sous-marins naviguant au voisinage de la surface créent aussi un sillage de vagues d'accompagnement qui se calcule comme celui des bâtiments de surface. Ce sillage est un indice flagrant de la présence du sous-marin.

Un sillage de pression plus sournois : la résistance d'onde interne

Les sous-marins et les bâtiments de surface créent un autre type de sillage de vagues d'accompagnement associé non plus aux vagues de surface mais aux ondes internes. Ce sillage d'ondes internes tire son origine de la stratification en densité de l'eau de la mer et devient appréciable lorsque la vitesse du navire est faible. Il induit pour le navire une dépense d'énergie et une résistance d'ondes internes qui peut être dans certaines conditions considérable ; par exemple, lorsqu'un navire pénètre dans un estuaire où l'eau de mer est recouverte d'une couche d'eau douce déversée par le fleuve, le navire peut subir un ralentissement considérable dû aux ondes internes bien qu'aucune vague d'accompagnement ne soit visible en surface. Les ondes internes ont également la propriété de se propager tout comme les vagues de surface. Elles peuvent donc être utilisées pour détecter à longue distance le déplacement d'un sous-marin. Les variations de pression induites par ces ondes internes sont cependant difficiles à mesurer car leur amplitude qui est en proportion de la stratification est presque toujours très faible.

Terminons ces considérations sur le sillage de pression en énonçant une évidence : la manifestation première du sillage de pression est l'exis-

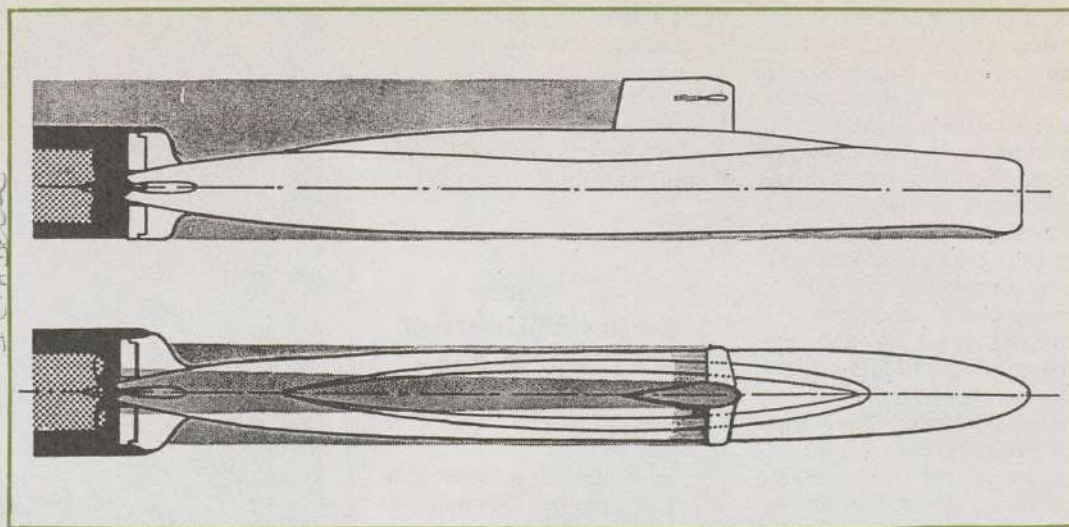


Fig. 5 : Sillage de vitesse.

Qu'est-ce qu'un navire rapide ? Ou le nombre de Reech-Froude

On dénomme ainsi les navires dont la vitesse V (exprimée en ms^{-1}) est grande vis-à-vis d'une vitesse de référence égale à $\sqrt{gL}$ où $g = 9,81 ms^{-2}$ est l'accélération de la pesanteur et L est la longueur du navire exprimée en mètres, ce que l'on exprime en disant que le nombre de Reech-Froude $F = V/\sqrt{gL}$ est grand (supérieur à 0,3 environ).

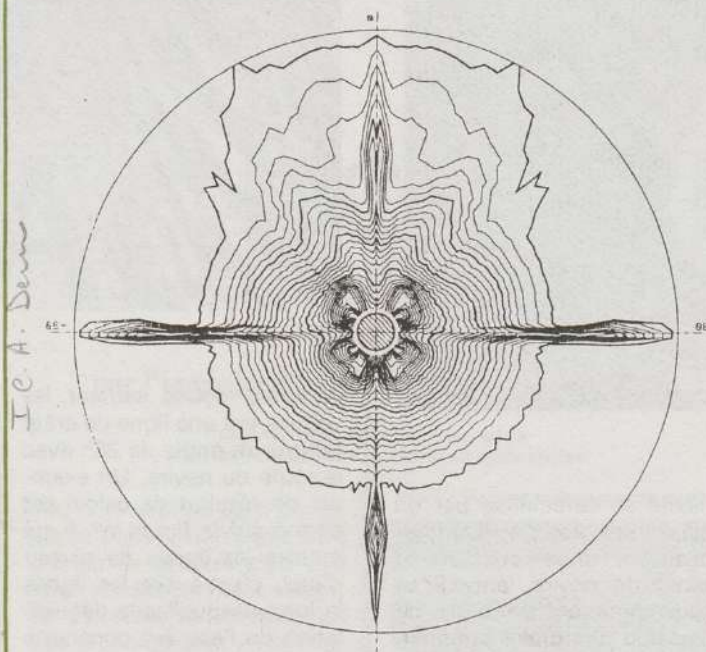


Fig. 6 : Carte du sillage moyen d'une maquette de sous-marin dans le plan de l'hélice en l'absence de celle-ci. On distingue le sillage, en forme de croix, des barres de plongée et de direction arrière, les quatre tourbillons situés entre les branches de cette croix et tout près du cône arrière du sous-marin, le sillage du pont (le sillage du massif n'apparaît pas sur cette maquette démunie de massif).

tence d'une signature dépressionnaire en tout point du fluide lorsque le navire passe près de ce point. La connaissance, par des essais sur modèle ou par le calcul, de cette signature dépressionnaire est primordiale pour la sécurité du navire de surface ou sous-marin vis-à-vis des mines à dépression. Les mesures propres à réduire le sillage de vagues d'accompagnement sont en général favorables

pour la réduction de la signature dépressionnaire.

Le sillage de vitesse : invisible mais déterminant pour la propulsion

Le sillage de pression est un phénomène difficile à appréhender, du moins présente-t-il à l'œil des manifestations spectaculaires. Avec le sillage de vitesse, déplace-

ment des masses d'eau par viscosité le long du navire, rien d'extraordinaire, ni même de visible. Par contre le phénomène, se prolongeant sur l'arrière de la coque influe fortement sur le rendement de l'hélice ; nous voici plongés dans le domaine exclusif de l'ingénieur. Les calculs sont encore plus ardues que dans le cas précédent : la pression se caractérisait par un nombre, la vitesse en nécessite trois, autant que de composantes géométriques du vecteur qui la représente. Contrairement au sillage de pression qui occupe un espace important (dièdre de Kelvin), le sillage de vitesse ne prend des valeurs significatives que dans un tube s'appuyant sur la carène et s'étendant sur l'arrière de celle-ci. La figure n° 5 indique la forme de ce tube tandis que la figure n° 6 montre une coupe de ce tube par le plan contenant l'hélice. On remarque que l'hélice est complètement noyée dans ce sillage qu'on serait tenté d'appeler sillage de couche limite. Mais bien que la couche limite soit à l'origine de ce sillage de vitesse, il n'y a plus de couche limite dans le plan de l'hélice ou dans les plans situés en arrière de celui-ci puisqu'il n'y a plus de carène à ces endroits-ci : il y a par contre un écoulement cisailé avec éventuellement des tourbillons et des remous. La figure n° 6 pourrait donner à penser que, dans la zone ombrée, le sillage est uniforme. Pour montrer qu'il n'en est rien, la figure n° 7 indique les courbes d'isovaleurs de la vitesse axiale ou plus précisément du déficit de vitesse axiale (différence entre la vitesse de route du navire et la vitesse axiale) : cette carte de

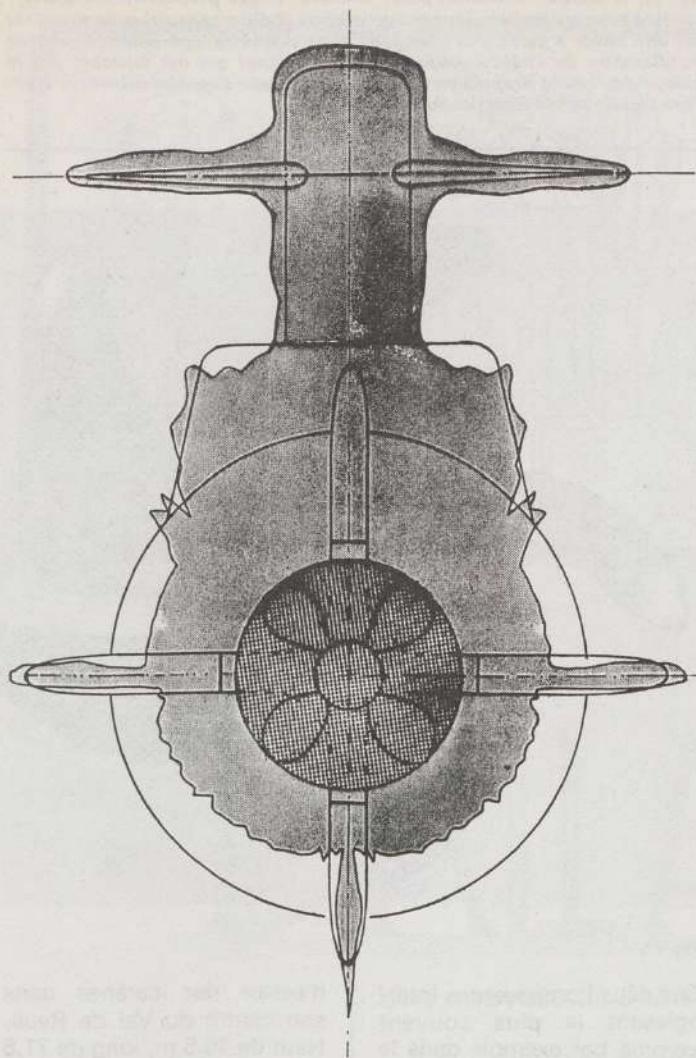


Fig. 7 : Sillage de vitesse (courbes d'isovaleurs du déficit de vitesse axiale).

sillage détermine les conditions d'alimentation de l'hélice en donnant la répartition dans l'espace du sillage moyen (sillage moyenné dans le temps) : elle permet de voir comment varie le sillage moyen d'un point à un autre (gradient de sillage moyen). Mais le sillage de vitesse varie également avec le temps de façon plus ou moins aléatoire (sillage fluctuant). Si bien que le sillage de vitesse doit être caractérisé de trois façons : sa valeur moyenne dans le temps et dans l'espace (zone ombrée), c'est le sillage global moyen ; son irrégularité qui provient de sa non uniformité dans l'espace (gradient de sillage moyen) et de sa non stationnarité dans le temps (sillage fluctuant). Bien évidemment ces trois aspects du sillage de vitesse doivent être étudiés pour chacune de ses trois composantes géométriques. L'importance du sillage dans le plan de l'hélice tient au fait que sa connaissance est indispensable pour calculer l'hélice la mieux adaptée au navire du point de vue du

rendement et du bruit rayonné.

Le sillage de vitesse : un compromis

Est-il plus favorable d'avoir un sillage de vitesse fort ou un sillage de vitesse faible ?

La réponse dépend des qualités sur lesquelles on veut mettre l'accent. Pour avoir un rendement propulsif global le plus grand possible, on a intérêt à faire en sorte que le sillage de vitesse global moyen soit le plus élevé possible, mais dans le même temps que l'on augmente le sillage moyen global on augmente l'épaisseur de la couche limite qui se développe sur la carène et on accroît donc la résistance à l'avancement du navire. Il y a ainsi un compromis à trouver pour que cette augmentation de résistance n'annule pas le gain obtenu sur le rendement. Par ailleurs le sillage doit être le plus régulier possible car les irrégularités de sillage sont néfastes pour les vibrations des pales d'hélice, de la coque, de la ligne d'ar-

bre et pour le bruit rayonné. Il faut donc à la fois augmenter le sillage global moyen sans trop augmenter la résistance et réduire les irrégularités de sillage : exigences difficilement conciliables et qui montrent combien est délicat l'art de dessiner une bonne coque du point de vue du sillage de vitesse.

vient par exemple en dessinant des formes arrières dont la carte de sillage présente une symétrie de révolution autour de la ligne d'arbre de telle sorte que les pales de l'hélice durant leur rotation voient toujours le même écoulement et n'induisent donc pas des vibrations (figure n° 8).

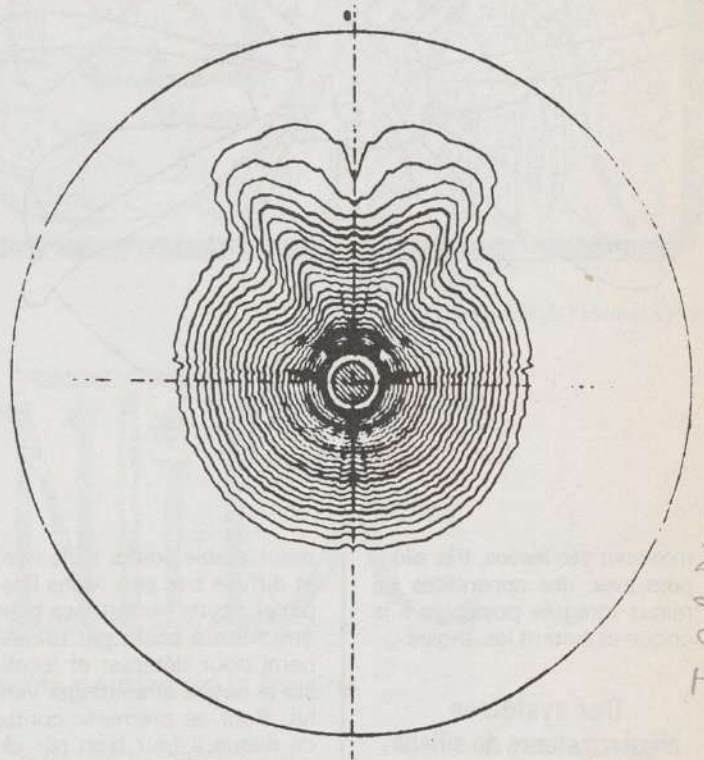
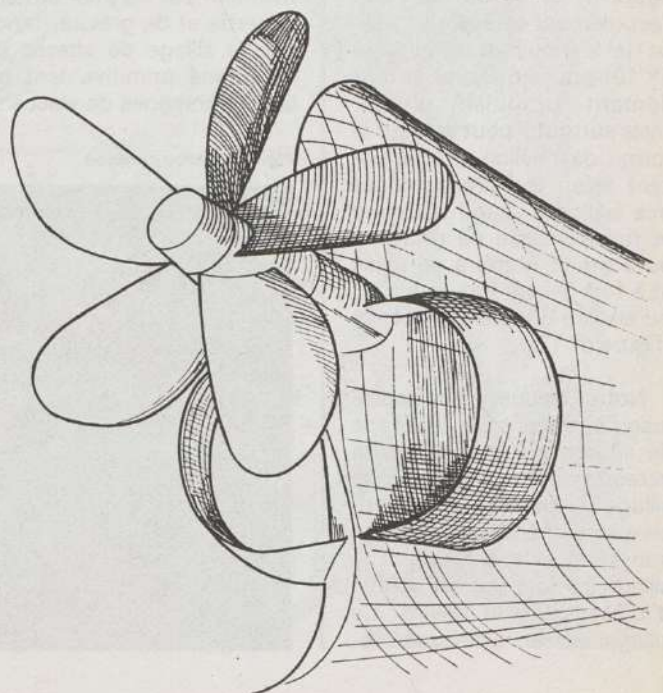


Fig. 8 : Ce navire présente un fort sillage global et de faibles irrégularités.

Pour les navires marchands dont le souci principal est d'économiser l'énergie, une des tendances récentes est de développer des formes de navires présentant un fort sillage global moyen et de faibles irrégularités. On y par-

Pour les navires de combat dont un des soucis principaux est la discrétion acoustique, les efforts se sont dirigés jusqu'à présent vers des formes à faible sillage global moyen et à faible irrégularité de sillage. Pour cela les for-

Fig. 9 : Un exemple d'anneau distributeur : les oreilles de Mickey.



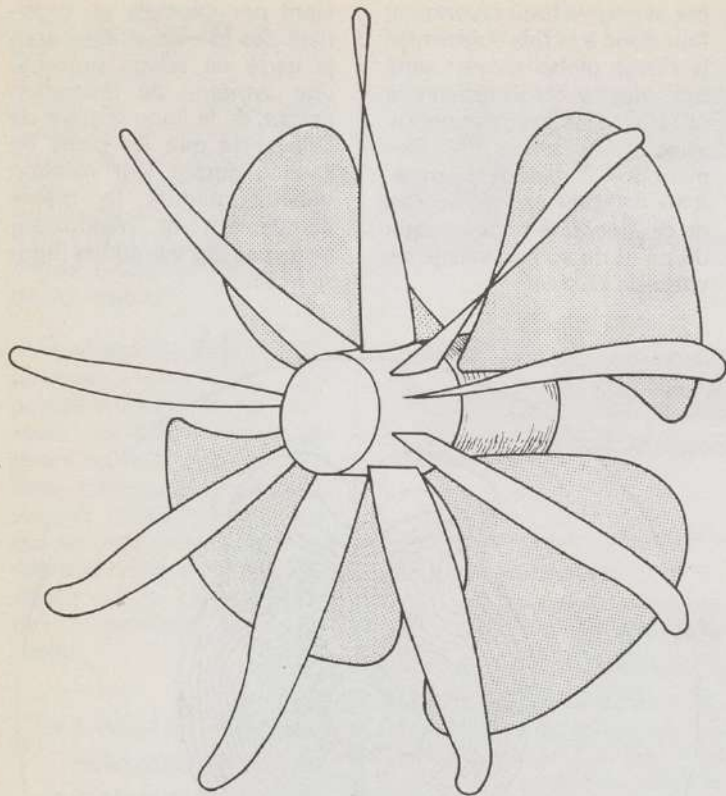


Fig. 10, ci-contre : Moulinet placé derrière l'hélice propulsive (en grisé) : destiné à redresser l'écoulement en aval de l'hélice propulsive, le moulinet est une hélice à pales très allongées et de diamètre légèrement supérieur au diamètre de l'hélice propulsive. Le moulinet qui est entraîné par le sillage de l'hélice propulsive fournit une poussée supplémentaire et améliore ainsi le rendement propulsif global.

mes sont très lissées, très allongées avec des appendices les mieux intégrés possibles à la coque et évitant les angles.

Des systèmes régularisateurs de sillage

Ayant dessiné au mieux la forme, il convient ensuite de réduire les effets néfastes du sillage de vitesse restant. L'hydrodynamicien dispose pour cela d'une panoplie de systèmes dont la vocation est de régulariser le sillage (bras et anneaux distributeurs placés juste devant l'hélice, comme par exemple les « oreilles de Mickey » de la figure n° 9) ou de redresser l'écoulement en aval de l'hélice (tel le moulinet de la figure n° 10) pour améliorer le rendement propulsif global. Mais surtout il peut agir sur la forme de l'hélice en choisissant selon les circonstances une hélice à grand diamètre et faible vitesse de rotation, ou à grand nombre de pales et à fort devers (figure n° 11) ou encore une hélice carénée (figure n° 12).

Notre discussion a porté jusqu'à présent sur le sillage de vitesse vu par un observateur embarqué. Le type de sillage vu par tout autre observateur mérite aussi d'être considéré et spécialement le sillage lointain qui est source d'indiscrétion du navire. Ce sillage est en effet relative-

ment stable (dans le temps) et diffuse très peu (dans l'espace) : cette persistance peut être mise à profit par un ennemi pour détecter et localiser le navire et se diriger vers lui. Pour se prémunir contre ce risque il faut bien sûr réduire le sillage, aussi bien sa composante moyenne que sa composante fluctuante (sillage turbulent).

Un grand tunnel hydrodynamique

Sillage de pression et sillage de vitesse sont les deux composantes du sillage hydrodynamique. Le sillage de pression est déterminé primitivement par les phénomènes d'inertie et de gravité, tandis que le sillage de vitesse est déterminé primitivement par les phénomènes de viscosité.

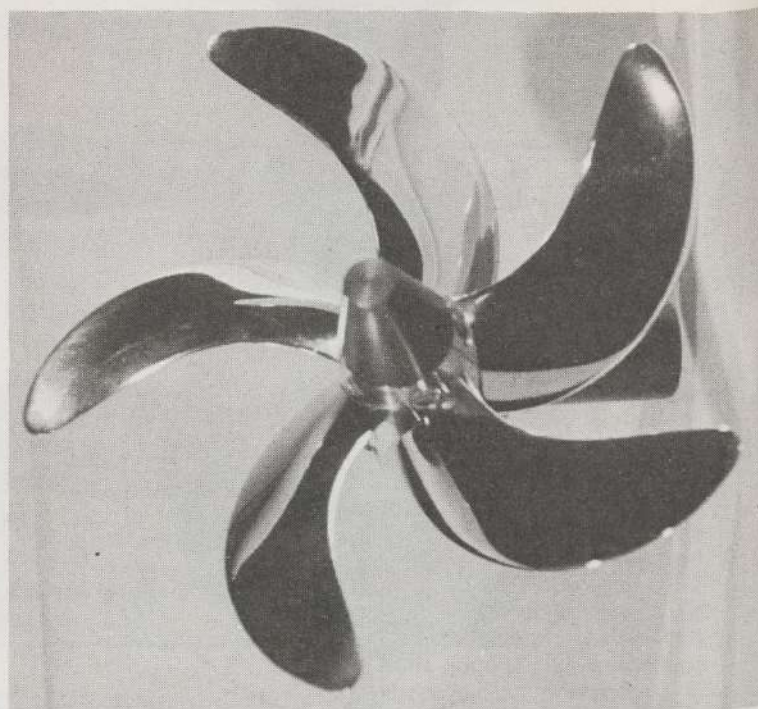


Fig. 11.

Ces deux composantes interagissent le plus souvent comme par exemple dans le cas des fluctuations de pression sur coque, source de vibration, de bruit propre et de bruit rayonné.

Pour étudier ces phénomènes et réduire leurs effets néfastes il est nécessaire d'avoir recours à des codes de calcul très gros mais qui ne peuvent suffire et doivent donc s'appuyer sur des expérimentations très fines sur modèles de grandes dimensions. C'est ce besoin qui a motivé la construction actuellement en cours du Grand tunnel hydrodynamique du Bassin

d'essais des carènes dans son centre du Val de Reuil. Haut de 16,5 m, long de 71,5 m et contenant 3 000 m³ d'eau, avec une puissance installée de 2 megawatts, ce moyen d'essais unique en son genre permettra des progrès considérables dans le domaine des écoulements, des sillages et des propulseurs.

Un seul prix à payer : la complexité des expériences qui y seront menées.

Mais que cela n'empêche personne d'oublier Reech-Froude et de retourner à ses rêves.

Fig. 12 : Hélice carénée

