

Grenoble, 18-19-20 février 1991

ETUDES DE PROPULSION
PAR HELICES SEMI-IMMERGEES
POUR LE NAVIRE A EFFET DE SURFACE NES 24

Jean MARVALDI^{*}, Paul BEZZI^{**}, Didier FRECHOU^{***}

^{*} IFREMER Centre de Brest
Service Technologies Navales et Pêches
B.P. 70 - 29280 PLOUZANE

^{**} FRANCE-HELICES
Z.I. La Frayère
06150 CANNES LA BOCCA

^{***} BASSIN D'ESSAIS DES CARENES
Centre de Val de Reuil
Chaussée du Vexin
27100 VAL DE REUIL

RESUME

Cette communication présente les études entreprises pour évaluer les possibilités de propulsion du Navire à Effet de Surface NES 24 par hélices semi-immérgées. Les éléments du système propulsif et leur implantation dans les coques du navire sont décrits. On présente les courbes de performances en eau libre du projet d'hélice, mesurées en similitude de Froude et de cavitation en tunnel hydrodynamique. Ces résultats sont appliqués à la prédiction des performances propulsives du navire à grande vitesse. Une première approche de l'analyse du fonctionnement du propulseur aux vitesses intermédiaires est donnée.

SUMMARY

This paper presents the studies conducted to assess the possibility of propelling the Surface Effect Ship NES 24 by semi-submerged propellers. The components of the propulsion system and their lay-out inside the hulls are described. One presents the open-water performance curves of the propeller design, which have been measured in a hydrodynamic tunnel, in accordance with Froude and cavitation similarity laws. These results are used to predict the propulsive performance of the ship at high speed. A preliminary investigation into the operation of the propulsion system at intermediate ship speeds is proposed.

INTRODUCTION

Les navires à effet de surface (NES) sont des catamarans à coques élancées munis d'un coussin d'air confiné entre les coques. La reprise d'environ 80 % du poids du navire par la poussée aérostatique du coussin permet de réduire le tirant d'eau des coques. Comparé à un catamaran classique, un NES présente moins de résistance à l'avancement et offre un meilleur confort à la mer. Le NES 24 est le prototype d'un transporteur de passagers offrant 150 places sur des trajets de 1 à 2 heures à 30 noeuds de vitesse moyenne de service.

Plusieurs systèmes de propulsion sont envisageables pour les navires rapides et en particulier les NES : hélices immergées sur arbres inclinés, hélices tractrices sur bulbes, hélices semi-immersées sur arbres orientables ou fixes, hydrojets. Dans la production récente de navires rapides à passagers, on observe une prépondérance de la propulsion par hydrojets et quelques exemplaires d'hélices tractrices sur bulbe. Plusieurs constructeurs proposent des propulseurs à hélice semi-immersée. Hors les navires de compétition ou de loisir, les cas d'implantation sur des navires commerciaux ou militaires sont très limités et les informations quantifiées sur les performances peu nombreuses.

Dans le cadre du projet NES 24, l'IFREMER a entrepris, en association avec la Société FRANCE-HELICES, quelques pré-études de définition et d'implantation d'un propulseur à hélice semi-immersée adapté au navire. Les performances en eau libre de l'hélice proposée ont été mesurées en similitude dans le Petit Tunnel Hydrodynamique du BASSIN D'ESSAIS DES CARENES. Les résultats d'essais ont permis de prévoir les performances du propulseur à grande vitesse du navire et de faire une première approche des problèmes posés par la phase d'accélération et de déjaugage.

1 - AVANT-PROJET DE PROPULSEUR A HELICE SEMI-IMMERGEE POUR LE NES 24

Les caractéristiques principales du NES 24 sont les suivantes :

Longueur de coque :	23 m
Largeur :	6,8 m
Déplacement maximum en charge :	49 t
Tirant d'eau sur coque :	1,5 m

Quand le coussin d'air est en pression, l'extrémité avant des quilles affleure la surface et le tirant d'eau arrière est de l'ordre de 0,8 m. La pression du coussin est d'environ 5000 Pa. Des essais en bassin de traction sur une maquette au 1/15 et une modélisation mathématique ont permis de déterminer la courbe traînée-vitesse au réel qui présente l'allure caractéristique de la courbe de traînée des NES à grand allongement (fig. 5). L'écoulement en aval des tableaux arrière des coques évolue avec la vitesse. A partir de 15 noeuds environ, des souilles commencent à se former dans le prolongement des sections de coques.

La puissance des moteurs de propulsion est déterminée par l'obtention d'une vitesse de 35 noeuds sur mer 0 au déplacement de 45 tonnes. Les impératifs de poids et d'encombrement ont conduit au choix de moteurs diesel rapides. Le modèle retenu pour le navire prototype est le moteur MWM TBD 234 V 12 de puissance continue 626 KW à 2200 t/mn et maximum 720 KW à 2300 t/mn.

Une estimation préliminaire a montré que la vitesse attendue devait pouvoir être atteinte avec une hélice semi-immersée à 5 pales d'environ 1 m de diamètre et tournant à environ 1000 t/mn. Un avant-projet de propulseur a été défini sur ces bases ; celui-ci comporte une structure supportant l'arbre et l'hélice et un gouvernail dans le flux de l'hélice. Une pré-étude d'implantation sur la coque du NES 24 a conduit à concevoir une structure supportant l'arbre qui fasse partie intégrante de la coque (fig. 1).

2 - DEFINITION DE L'HELICE

L'hélice proposée par FRANCE-HELICES est une hélice à 5 pales à fraction de surface développée élevée : $FA/F = 0.95$. Le rapport pas/diamètre à $0.7 R$ vaut $P/D = 1.13$. Le pas est évolutif et croissant de l'emplanture à l'extrémité des pales selon une loi non linéaire. Les sections de pales sont des profils de type supercavitant à bord de fuite tronquée et cambrure modérée. Pour améliorer les performances en marche arrière, le bord de fuite se termine en becquet. L'angle d'inclinaison (rake) des pales est nul. L'hélice est représentée en figure 2.

Les raisons qui ont dicté le choix des caractéristiques géométriques de l'hélice sont les suivantes :

- Rapport pas-diamètre : il est connu qu'à degré d'avance J supérieur à 1, le rendement augmente quand le rapport pas-diamètre est supérieur à 1.
- Nombre de pales : il a été fixé à 5 pour éviter de tomber dans des harmoniques moteurs tout en augmentant la surface projetée au maximum afin de garantir une poussée maximum même en cas de faible immersion.
- Surface projetée : elle a été fixée en fonction de la technique d'usinage en commande numérique ainsi que des moyens de fonderie dont dispose FRANCE HELICES en tenant compte du nombre de pales.
- Type de pales : le type de pales et la forme des sections ont été définis à partir des profils couramment utilisés en hélice de surface, notamment en essayant de diminuer la masse d'eau entraînée. Malgré l'inefficacité notoire en marche arrière de ce type de profil, il a néanmoins été décidé un épaississement sensible du bord de fuite, notamment dans les rayons compris entre $0,2$ et $0,5 R$ afin de diminuer au maximum le risque de mise en résonance de la pale, le becquet (cup) agissant à ce niveau comme un raidisseur. Ce manque de rendement à la base de la pale est compensé par un affinement important des sections et du bord de fuite dans les rayons compris entre $0,5$ et $1 R$.
- Inclinaison (rake) : elle a été choisie nulle afin de limiter au maximum les contraintes mécaniques très élevées des hélices de surface et afin d'éviter la fatigue prématurée des emplantures de pales, compte tenu de la faible section d'entrée au niveau du pied des pales.
- Dévers (skew) : le tracé de la ligne des milieux des sections de pales répond à l'expérience de FRANCE-HELICES.
- Cambrure de pales : la cambrure a été définie à sa valeur minimum pour une hélice de surface, compte tenu du phénomène vibratoire important créé par ce type d'hélice, notamment à des vitesses d'avance J comprises entre $0,5$ et 1 . En effet, une cambrure trop accentuée aurait amplifié les contraintes cycliques risquant de générer des harmoniques dans la poussée propres à provoquer des ruptures d'arbre porte-hélice.
- Dimensionnement des sections : les sections ont été dimensionnées de façon à prévenir les ruptures de pales liées à la présence de modes de vibrations excités par les harmoniques. Le calcul de résistance des matériaux pour la section totale de l'emplanture des pales est basé sur le règlement du Bureau Veritas, avec coefficient de sécurité 7.

3 - ESSAIS EN TUNNEL HYDRODYNAMIQUE

Un modèle de l'hélice au $1/5$ (diamètre 200 mm) a été usiné par FRANCE-HELICES. Les essais de ce modèle ont été réalisés au Petit Tunnel Hydrodynamique du BASSIN D'ESSAIS DES CARENES à VAL DE REUIL dans sa configuration à surface libre.

3.1 - Conditions d'essais :

Les conditions de similitude de l'essai peuvent se résumer ainsi :

- similitude géométrique du propulseur à l'échelle 1/5,
- similitude de Reynolds (Re) : basé sur le diamètre de l'hélice, ce nombre sans dimension est dans la majorité des cas plus faible sur maquette ; cependant les essais ont été réalisés au Reynolds maximum compatible avec la gamme de degré de progression J à balayer et les limites de vitesses de rotation N de l'arbre moteur,
- similitude de cavitation (σ) : elle permet de faire fonctionner l'hélice dans un champ de pression équivalent à celui de l'hélice réelle ; pour satisfaire cette similitude, on règle la pression de la veine d'essai,
- similitude de Froude (Fr) : basé sur le diamètre de l'hélice, ce nombre sans dimension rend compte des variations de pression hydrostatique sur les pales au cours de leurs rotations ce qui peut être assimilé à une variation de nombre de cavitation en fonction de la position angulaire de la pale,
- similitude d'immersion relative (h_i/D) : dans le cas des hélices semi-immergées, ce paramètre a été fixé à deux valeurs 0 et 0.5,
- similitude de sillage de la carène : dans le cadre de cette étude, cette similitude n'a pas été observée ; on a cependant estimé à partir d'un calcul simple de couche limite, le ralentissement moyen (coefficient de sillage) provoqué par la carène.

3.2 - Résultats des essais :

Deux séries d'essais ont été réalisées :

pression 1025 mbars ; vitesse de 3 à 8 m/s \longleftrightarrow σ de 22 à 3

pression 220 mbars ; vitesse de 3 à 8 m/s \longleftrightarrow σ de 4 à 0.6

La table suivante donne quelques exemples des conditions d'essais et illustre le degré de satisfaction des conditions de similitude avec une gamme de points de vitesse réels.

REEL	σ	Fr	$10^6.Re$	ESSAIS	
				V(m/s)	pa(mb)
35	0.67	5.49	17.2		
	0.61	5.71	1.6	8	220
25	1.32	3.91	12.2		
	1.09	4.28	1.2	6	220
15	3.70	2.33	7.31		
	4.35	2.14	0.61	3	220
6.5	20.11	1.00	3.14		
	22.24	2.14	0.6	3	1025

Dans chaque série, le balayage en degré de progression J a été poussé jusqu'à la valeur minimum correspondant à la limite supérieure de vitesse de rotation de la ligne d'arbre ($J = 0.4$). Les courbes de poussée, couple et rendement propulsif ont été reportées en termes de coefficients sans dimension K_t , K_q , et η en fonction du degré de progression J , de l'immersion relative h_i/D et du nombre de cavitation σ (figure 3). Quelques points d'essais, en bassin à faible vitesse d'avance, ont permis des extrapolations jusqu'à $J = 0$.

Les courbes $K_t(J)$ et $K_q(J)$ présentent des allures caractéristiques déjà mentionnées dans les travaux antérieurs (voir références) où deux plages de fonctionnement de l'hélice se distinguent :

- une plage à forte valeur de J (faible poussée) similaire à un fonctionnement d'hélice immergée,
- une plage à faible valeur de J (forte poussée) similaire à un fonctionnement d'hélice ventilée ou super cavitante.

La transition entre ces deux types de fonctionnement est très brutale. La visualisation stroboscopique de la rotation de l'hélice permet d'observer le changement de l'écoulement autour des pales (planche photos) caractérisé par :

- aux fortes valeurs de J , la présence d'un tourbillon d'extrémité de pale généralement décroché de la pale,
- aux faibles valeurs de J , l'accrochage d'une poche d'air au bord d'attaque de chaque pale et enveloppant la pale.

Le point de transition est sensible au paramètre de cavitation σ : la transition est plus marquée aux fortes valeurs de σ et apparaît à des J plus faibles. Le rendement présente une zone de maximum assez plate de $J = 0.9$ à 1.2 . Des valeurs proches de 0.7 ont été mesurées.

L'augmentation de l'immersion relative a pour effet d'augmenter notablement la poussée du propulseur et d'élargir la zone de transition entre les deux types de fonctionnement.

Des enregistrements temporels des signaux de poussée et de couple avant filtrage montrent des fluctuations non négligeables modulées à la fréquence de rotation des pales. L'analyse de ces fluctuations demanderait des mesures plus approfondies, car elles peuvent être critiques pour la tenue mécanique de la ligne d'arbre.

4 - APPLICATION DES RESULTATS D'ESSAIS A LA PROPULSION DU NES 24

Du fait de la forme de la courbe "Traînée/Vitesse" du NES qui présente une singularité autour de la vitesse de déjaugage d'une part, et de la forme des courbes " K_t ou $K_t/J^2 - J$ " de l'hélice semi-immersée, qui présentent un maximum, il ne suffit pas de déterminer l'hélice pour des conditions de rendement optimum à la vitesse nominale du navire. Il faut vérifier en outre que l'hélice assurera l'accélération et la propulsion du navire sur toute la plage de vitesse sans que les limites du domaine de fonctionnement du moteur soient dépassées. Le problème est encore compliqué par le fait que l'immersion et l'écoulement en amont de l'hélice évoluent avec la vitesse du navire.

4.1 - Points de fonctionnement de l'hélice, à vitesse stabilisée du navire (fig. 4)

En situation semi-immersée, à grande vitesse du navire

Il s'agit du domaine des vitesses supérieures à 17 noeuds : la souille derrière le tableau arrière de coque est formée. Un coefficient de sillage de couche limite $w = 0.05$ est pris en compte ; la succion est considérée comme nulle.

La série des essais en tunnel hydrodynamique donne les courbes caractéristiques de l'hélice dans le domaine des vitesses du navire considérées, en respectant les similitudes de Froude et de cavitation.

La première étape est de déterminer les couples de valeurs "Diamètre d'hélice/Rapport de réduction moteur-hélice" qui permettent d'assurer la propulsion à la vitesse nominale en utilisant au mieux la puissance du moteur.

Pour les conditions nominales suivantes :

Vitesse navire $VN = 35$ noeuds Traînée $R = 45$ kN
 Puissance par moteur $P = 626$ KW Régime moteur $NM = 2200$ t/mn
 une variation sur le diamètre donne les résultats suivants :

Diamètre (m)	100 Kt/J^2 requis	Régime hélice (t/mn)	Rendement	Puissance (kW)	Réduction moteur/hélice
0.9	9.5	1160	0.64	595	1.90/1
1.0	7.7	975	0.63	605	2.25/1
1.1	6.4	845	0.61	610	2.6/1
1.2	5.3	750	0.58	630	2.9/1

En ne considérant que le fonctionnement au point nominal, on serait conduit à choisir le diamètre le plus petit correspondant au meilleur rendement de l'hélice. Mais il faut tenir compte qu'à diamètre donné, le Kt/J^2 requis (voir table des notations) va croissant quand la vitesse diminue, alors que le Kt/J^2 de l'hélice présente un maximum. En dessous de la vitesse correspondant à ce maximum, l'hélice (en situation semi-immersée) ne peut plus assurer la propulsion.

Le Kt/J^2 requis, à vitesse donnée, étant par ailleurs inversement proportionnel au carré du diamètre, le choix d'un diamètre plus élevé accroît donc la plage des vitesses où l'hélice en situation semi-immersée permet d'assurer la propulsion. On adopte pour la suite le diamètre $D = 1.1$ m, et le rapport de réduction $Rd = 2.6$.

Pour chaque vitesse VN du navire, la relation "Traînée/Vitesse" permet de calculer le Kt/J^2 requis. En introduisant cette valeur dans les diagrammes (Kt, J) ou ($Kt/J^2, J$) de l'essai d'hélice correspondant à la vitesse VN , on détermine le J de fonctionnement, d'où la vitesse de rotation de l'hélice N et le régime moteur NM . Les résultats d'essais donnent les valeurs de rendement et de coefficient de couple Kq . La puissance s'en déduit.

Ainsi la courbe d'hélice peut être positionnée dans le diagramme "Puissance/Régime" du moteur, sur lequel figure les limites de fonctionnement de ce dernier en régime continu et en régime intermittent. Partant de la vitesse $VN = 35$ noeuds calé à la puissance maximale continue du moteur, on constate que l'hélice en situation semi-immersée permet d'assurer la propulsion jusqu'à $VN = 20$ noeuds. Les rendements d'hélice sont compris entre 0.60 et 0.65.

En situation immergée, à petite et moyenne vitesse du navire

Ce domaine de vitesses s'étend de l'arrêt jusqu'à la vitesse où les souilles derrière les coques sont suffisamment formées pour que l'hélice se trouve en situation semi-immersée. Ce seuil de vitesse se situerait vers 17 noeuds.

Pour les vitesses inférieures, les interactions entre l'hélice et la carène sont probablement fortes ; le demi-disque supérieur de l'hélice, masqué par le tableau arrière, se trouve dans un écoulement sans doute très perturbé. L'étude des performances de l'hélice dans ces conditions exigerait des essais derrière une maquette de la partie arrière des coques. L'analyse qui suit doit seulement être considérée comme une première approche, visant à appréhender l'allure plausible des performances propulsives de l'hélice.

Les conditions de fonctionnement sont schématisées comme suit :

- à toutes vitesses, l'hélice est juste immergée, la surface libre affleure le haut des pales,
- l'effet de masque du tableau arrière sur la moitié supérieure de l'hélice est pris en compte dans un coefficient de sillage $w = 0.25$; l'effet de succion n'est pas pris en compte,
- à défaut d'essais en similitude leur correspondant, on applique aux vitesses supérieures à 12.5 noeuds les coefficients mesurés à cette vitesse.

La procédure de détermination des points de fonctionnement est identique à celle suivie précédemment. Les points de fonctionnement sont portés sur le diagramme moteur.

On constate que l'hélice, en situation immergée, permet d'assurer la propulsion jusqu'à 12.5 noeuds sans sortir des limites de fonctionnement continu du moteur. Au delà, on dépasse même les limites en régime intermittent : au nombre de tours nécessaires pour assurer la poussée, la limite de puissance du moteur est dépassée, ce qui signifie que l'hélice demande trop de couple. On notera que le décrochement à $V = 10.5$ noeuds correspond au passage du pic de traînée au déjaugage ; par ailleurs la stabilisation de la puissance à environ 200 KW de 12.5 à 17.5 noeuds correspond au passage du pic de la courbe (K_t , J), les rendements d'hélice croissant de 0.35 à 12.5 noeuds jusqu'à 0.61 à 17.5 noeuds.

A s'en tenir aux courbes de fonctionnement à vitesse stabilisée, il apparaît donc un hiatus entre la vitesse maximum réalisable avec l'hélice immergée, $V_N = 12.5$ noeuds et la vitesse minimum réalisable avec l'hélice semi-immersée ; $V_N = 20$ noeuds. En fait la figure 4 n'indique que les points de fonctionnement à vitesse stabilisée le long de la courbe traînée-vitesse et ne renseigne pas sur la marge de poussée qui reste disponible à vitesse donnée du navire, compte-tenu des limites de fonctionnement du moteur.

4.2 - Evolution du fonctionnement de l'hélice avec la vitesse du navire (fig. 5)

Pour chacun des deux domaines de vitesses, cette analyse est faite en déterminant les performances, poussée (pour 2 hélices) et puissance (par ligne d'arbre), pour une grille de couples de valeurs : Vitesse du navire/Régime de l'hélice. Les courbes de poussée à régime constant sont tracées en fonction de la vitesse dans le même diagramme que la traînée du navire. Les courbes de puissance à vitesse constante sont tracées en fonction du régime dans un diagramme où sont reportées les limites du moteur, par application du rapport de réduction moteur/hélice.

En situation semi-immersée

Les courbes "Poussée/Vitesse navire" ont une allure parabolique avec maximum d'autant plus haut que le régime est élevé.

Les points de fonctionnement stabilisés correspondent à l'intersection de la courbe de traînée du navire avec les branches descendantes des paraboles. Le sommet des paraboles correspond aux conditions de Kt maximum des courbes (Kt, J) de l'hélice. La vitesse minimum correspond schématiquement au cas où la parabole de poussée vient tangenter la courbe de traînée.

Les courbes "Puissance/Régime hélice", à vitesse donnée du navire, constituent un faisceau qui coupe les limites du domaine de fonctionnement soit sur la limite de puissance maximum soit sur la limite de régime maximum. A partir des couples des valeurs, "Vitesse navire/régime", aux points d'intersection, on détermine la poussée correspondante de l'hélice. Les points "Vitesse/Poussée" ainsi obtenus situent les limites moteur par rapport à la courbe de traînée du navire et permettent de déterminer la marge d'accélération du navire, ou encore la réserve de poussée disponible pour compenser l'augmentation de traînée sur houle.

En situation immergée

La procédure d'analyse est identique. Toutefois le réseau des courbes "Poussée/Vitesse navire" à régime constant est assez irrégulier, car les points de fonctionnement correspondent en majorité à la partie ascendante des courbes " Kt, J " qui présente des ruptures de pente marquées.

Dans le plan "Puissance/régime de l'hélice", en plus des limites de puissance maximum ou de vitesse de rotation maximum dans la partie supérieure du domaine de fonctionnement du moteur, on trouve, à bas régime de rotation, des surcharges en couple pour les vitesses du navire comprises en 15 et 22.5 noeuds.

Transposée dans le plan "Poussée/Vitesse" cette limite inférieure se traduirait par une courbe située au-dessus de la courbe de traînée. Ceci explique que les points de fonctionnement à vitesse stabilisée entre 15 et 22.5 noeuds sortent du domaine moteur (fig 4). En revanche on dispose dans cette plage de vitesse d'une marge de poussée qui permet d'atteindre le domaine des vitesses supérieures où la marche à vitesse stabilisée redevient possible en situation d'hélice semi-immersée.

Accélération du navire et passage d'une situation à l'autre

Globalement ce passage est possible à condition que l'hélice reste en situation immergée jusqu'à une vitesse suffisante pour recouper le domaine de viabilité du fonctionnement semi-immersé.

Schématiquement par exemple, le régime moteur est fixé à 1850 t/mn (700 t/mn hélice) ; le navire accélère, passe la bosse de déjaugage à 10.5 noeuds ; la poussée qui continue de croître avec la vitesse amène le navire vers 18 noeuds. A cette vitesse, le passage en situation semi-immersée laisse une poussée suffisante pour atteindre la vitesse stabilisée d'environ 25 noeuds. La montée en vitesse se poursuit alors par accroissement du régime jusqu'à la vitesse maximum de 35 noeuds à 2200 t/mn (845 t/mn hélice).

Mais il est clair aussi que si l'hélice passe en situation semi-immersée avant 17/18 noeuds, la poussée chutera, même à régime maximal du moteur, en dessous de la traînée et le navire sera bloqué en vitesse. Cette analyse illustre la difficulté du franchissement des vitesses intermédiaires quand les données du système

propulsif : inclinaison de l'arbre d'hélice, pas de l'hélice et rapport de transmission sont fixés.

5 - CONCLUSION

Une hélice semi-immersée, capable d'assurer la propulsion du NES 24 à haute vitesse, avec un rendement satisfaisant et en respectant les contraintes de dimension et de puissance installée, a été définie. Les courbes de performances en eau libre de cette hélice dans les conditions de similitude de cavitation ont été déterminées en tunnel hydrodynamique.

Ces courbes ont permis de faire une première approche du fonctionnement en situation immergée à basse vitesse du navire et d'appréhender les conditions de fonctionnement lors de la montée en vitesse. La plage de vitesses durant laquelle une souille se forme en arrière du tableau de la coque constitue une phase complexe. Cette phase peut être critique et l'on conçoit l'intérêt de pouvoir adapter certaines caractéristiques de l'ensemble propulsif en fonction de la vitesse et en particulier de maîtriser l'immersion de l'hélice par variation de l'inclinaison de l'arbre.

REFERENCES

- 1/ HADLER J.B. et HECKER R. : "Performance of partially submerged propellers"
7th ONR Symposium on Naval Hydrodynamics - ROME ; Août 1968.
- 2/ KRUPPA C. : "Testing of partially submerged propellers"
13th ITTC - BERLIN ; Septembre 1972.
- 3/ BRANDT H. : "Modell versuche mit Schiffspropellern an der Wasseroberfläche"
Schiff und Hafen, Heft 5 und 6 ; 1973.
- 4/ SHAO-ZONG L. et HENG-SHUN Z. : "An experimental study on the performance characteristics of partially submerged propeller"
International High-Performance Vehicle Conference - SHANGHAI ; Novembre 1988.

NOTATIONS

D	:	diamètre de l'hélice
Eta	:	rendement de l'hélice
Fr	:	nombre de Froude $Fr = V/\sqrt{gD}$
g	:	accélération de la pesanteur
hi	:	immersion du moyeu de l'hélice
J	:	degré d'avance $J = V/N.D$
Kt	:	coefficient de poussée
Kt/J^2	:	$Kt/J^2_{requis} = R/(2 \rho (1-w)^2 VN^2 D^2)$
N	:	vitesse de rotation hélice
NM	:	vitesse de rotation moteur
P	:	puissance (par ligne d'arbre) $P = 2 \pi Kq \rho N^3 D^5$
p	:	pression (a : ambiante ; v : vapeur saturante)
R	:	traînée du navire
Rd	:	rapport de réduction moteur/hélice $Rd = NM/N$
Re	:	nombre de Reynolds $Re = V.D/\nu$
T	:	poussée (pour 2 hélices) $T = 2 Kt \rho N^2 D^4$
V	:	vitesse d'eau à l'hélice $V = (1-w) VN$
VN	:	vitesse du navire
w	:	coefficient de sillage
ν	:	viscosité cinématique de l'eau
ρ	:	masse volumique de l'eau
σ	:	paramètre de cavitation $\sigma = (p_a - p_v)/(0.5 \rho V^2)$

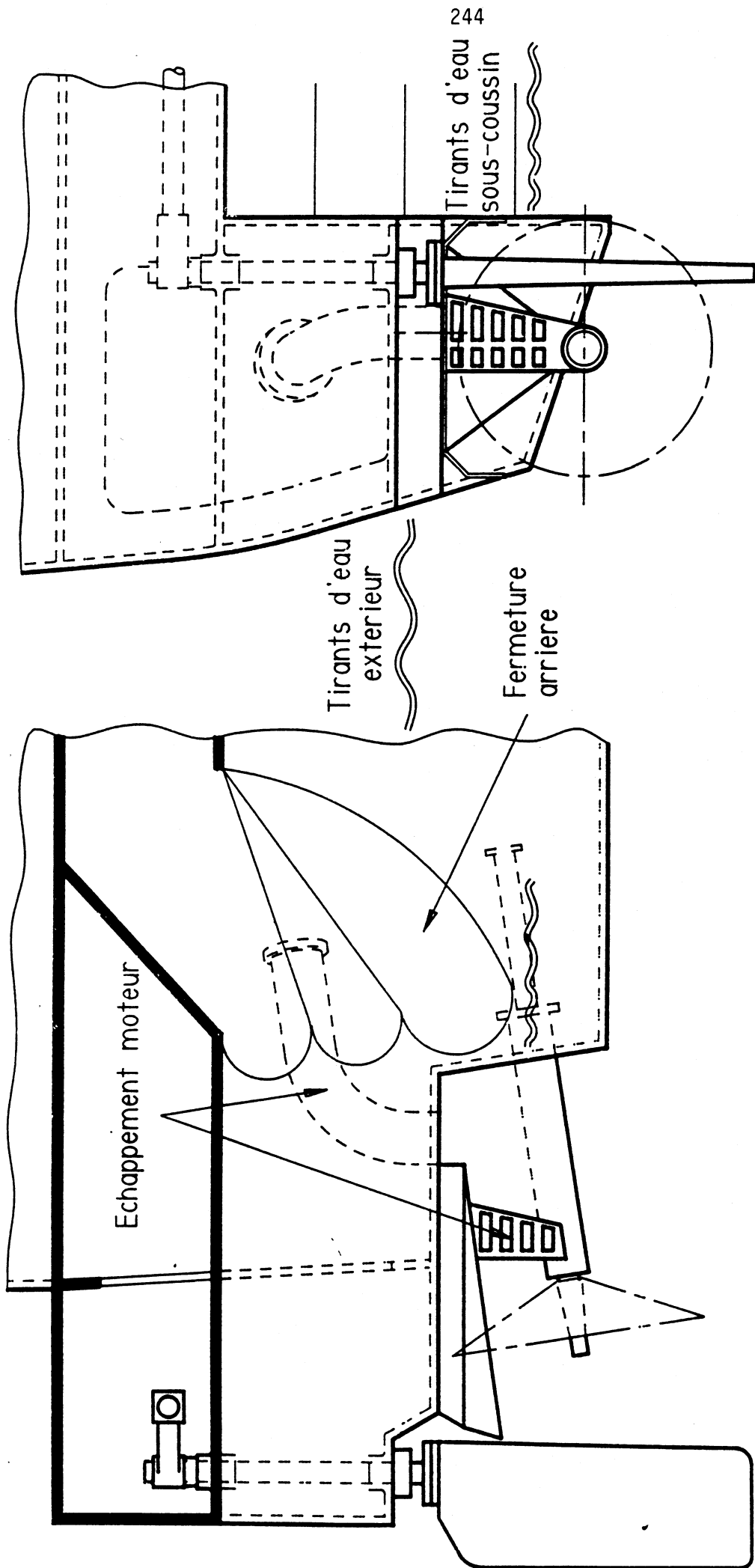


FIG 1: IMPLANTATION DU PROPULSEUR

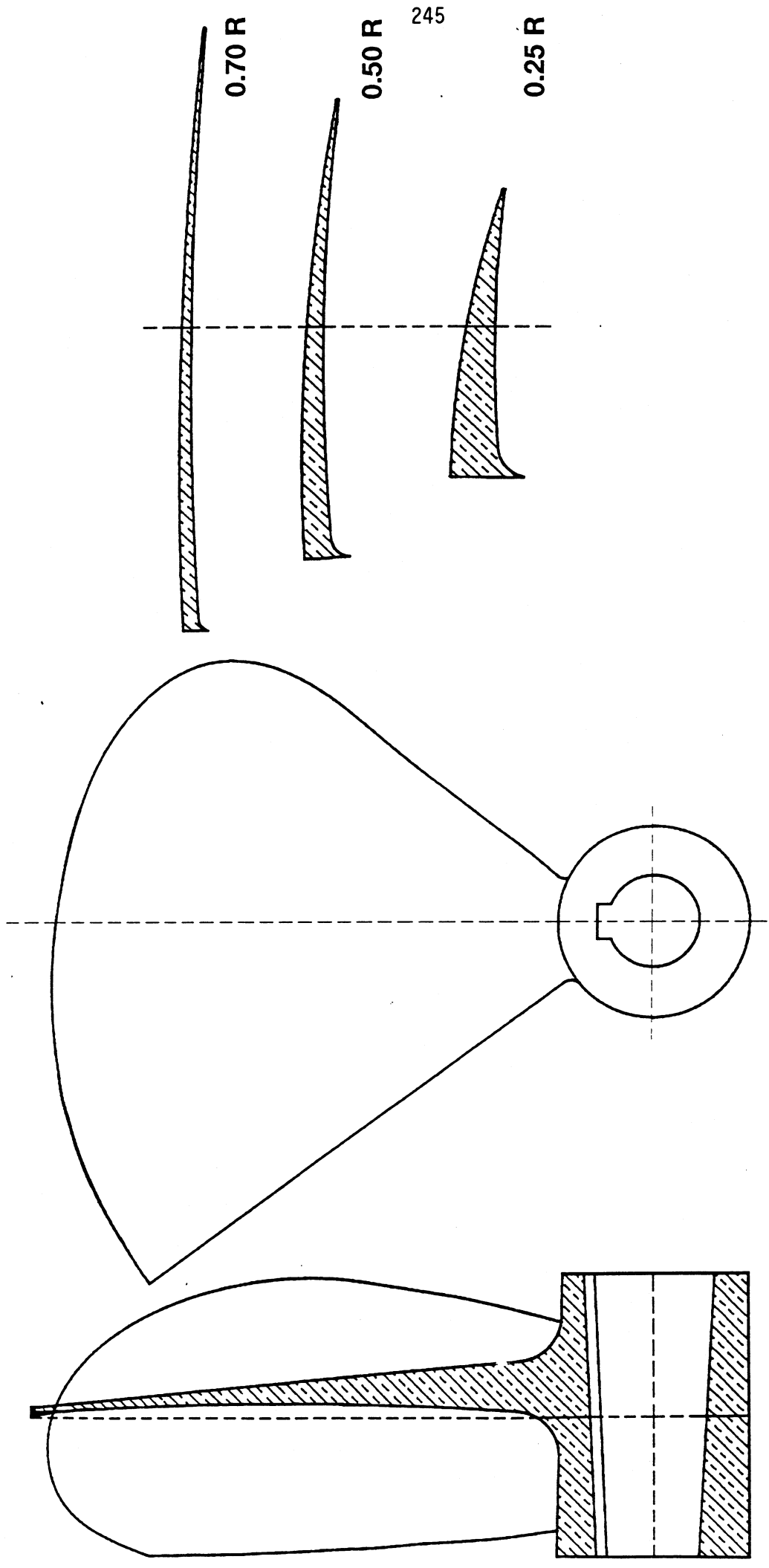
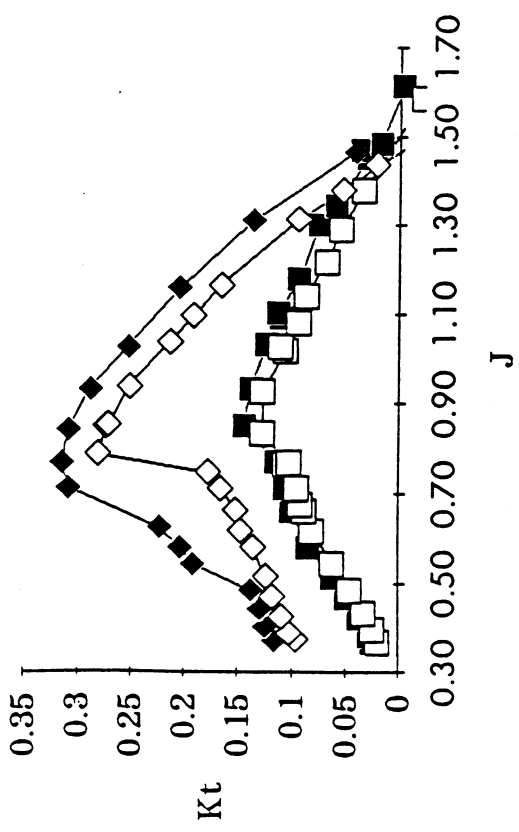
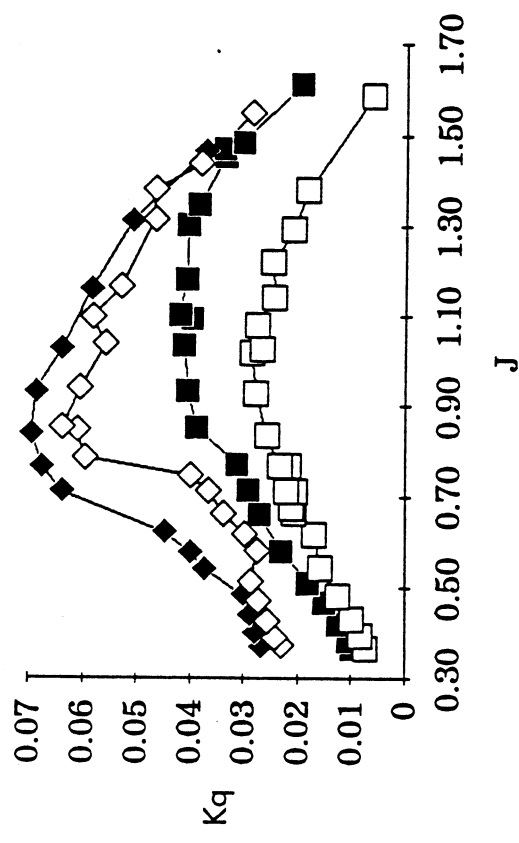


FIG. 2 : VUES DE L'HELICE

Courbe de Coefficient de poussée K_t



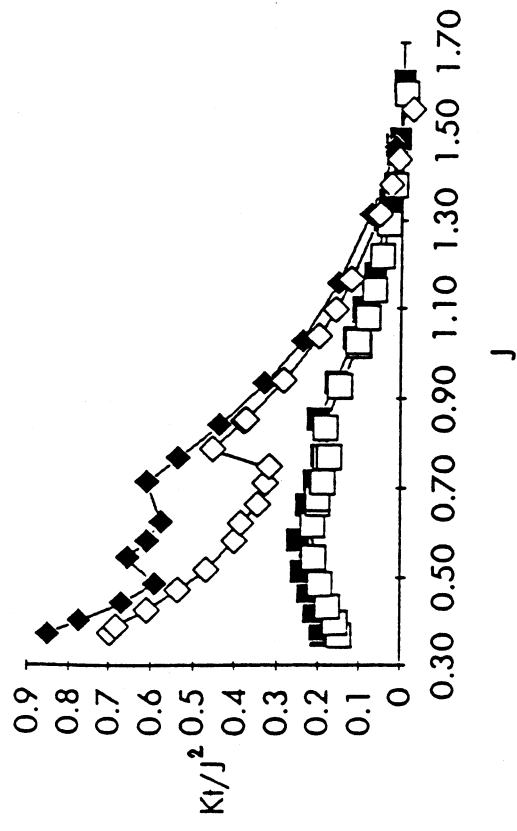
Courbe de coefficient de couple K_q



Vitesse tunnel = 3m/s

■	h/D=0 - Sigma=22.2
□	h/D=0 - Sigma=4.4
◆	h/D=0.5 - Sigma=22.5
◇	h/D=0.5 - Sigma=4.6

Courbe de coefficient K_t/J^2



Courbe de Rendement

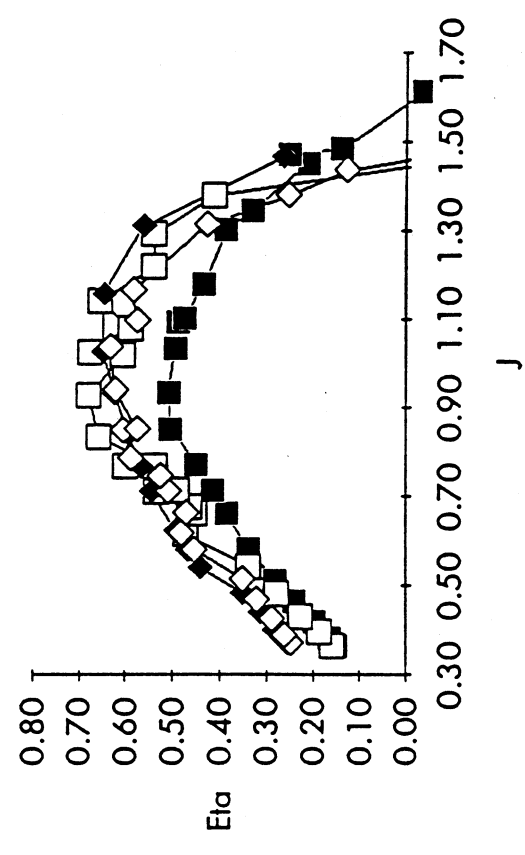


FIG 3 : Courbes de performances de l'hélice

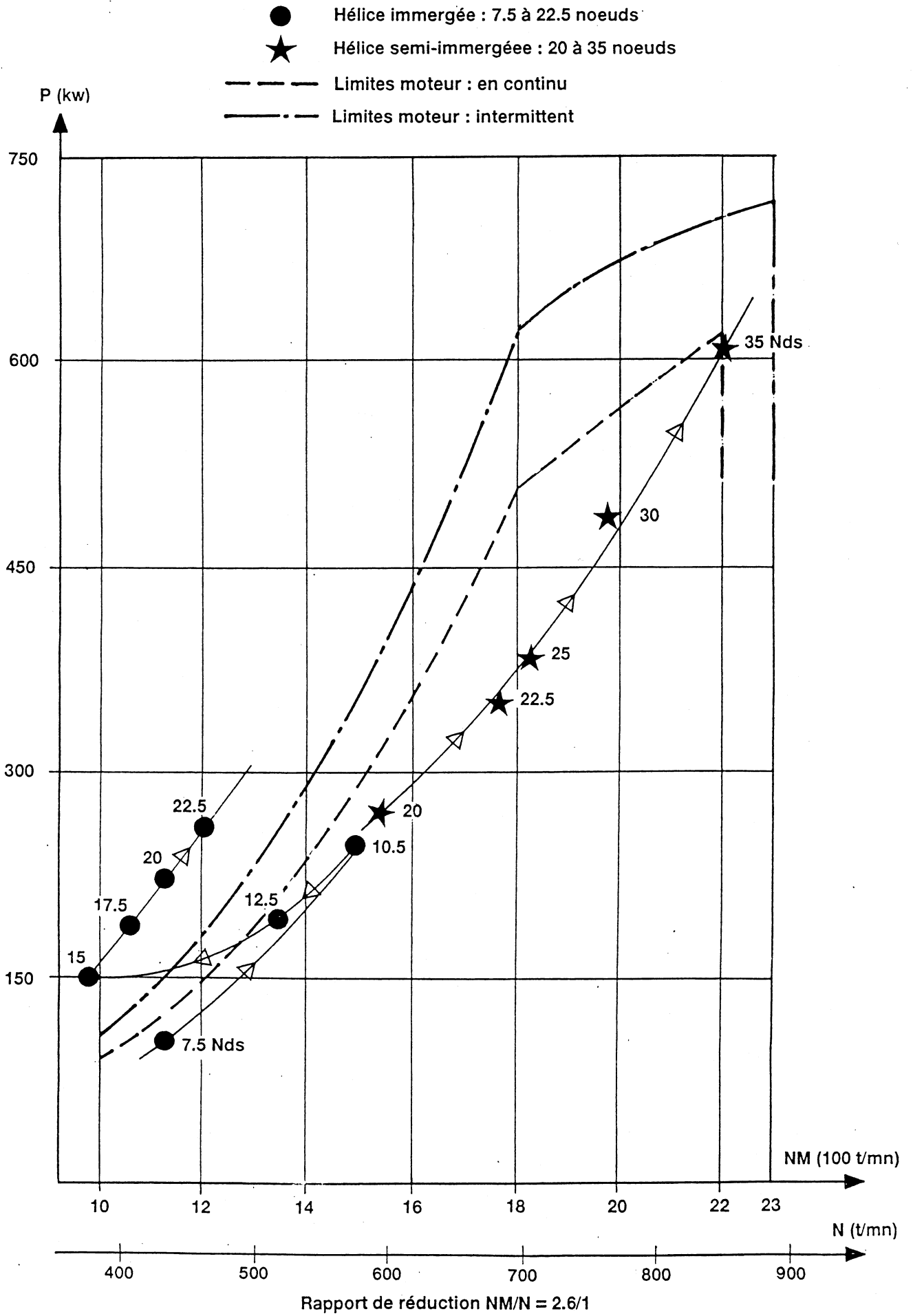


FIG 4 : POINTS DE FONCTIONNEMENT

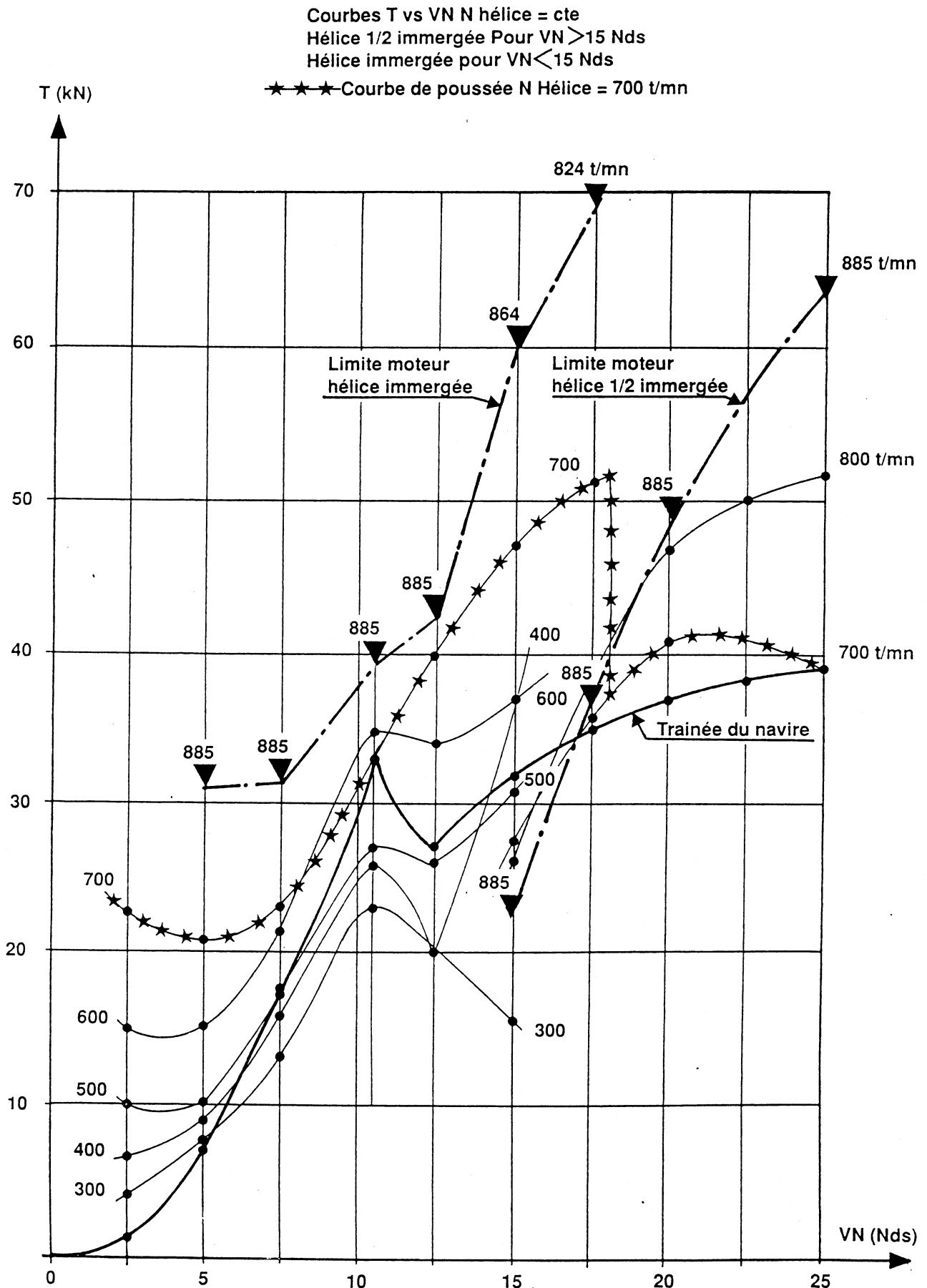
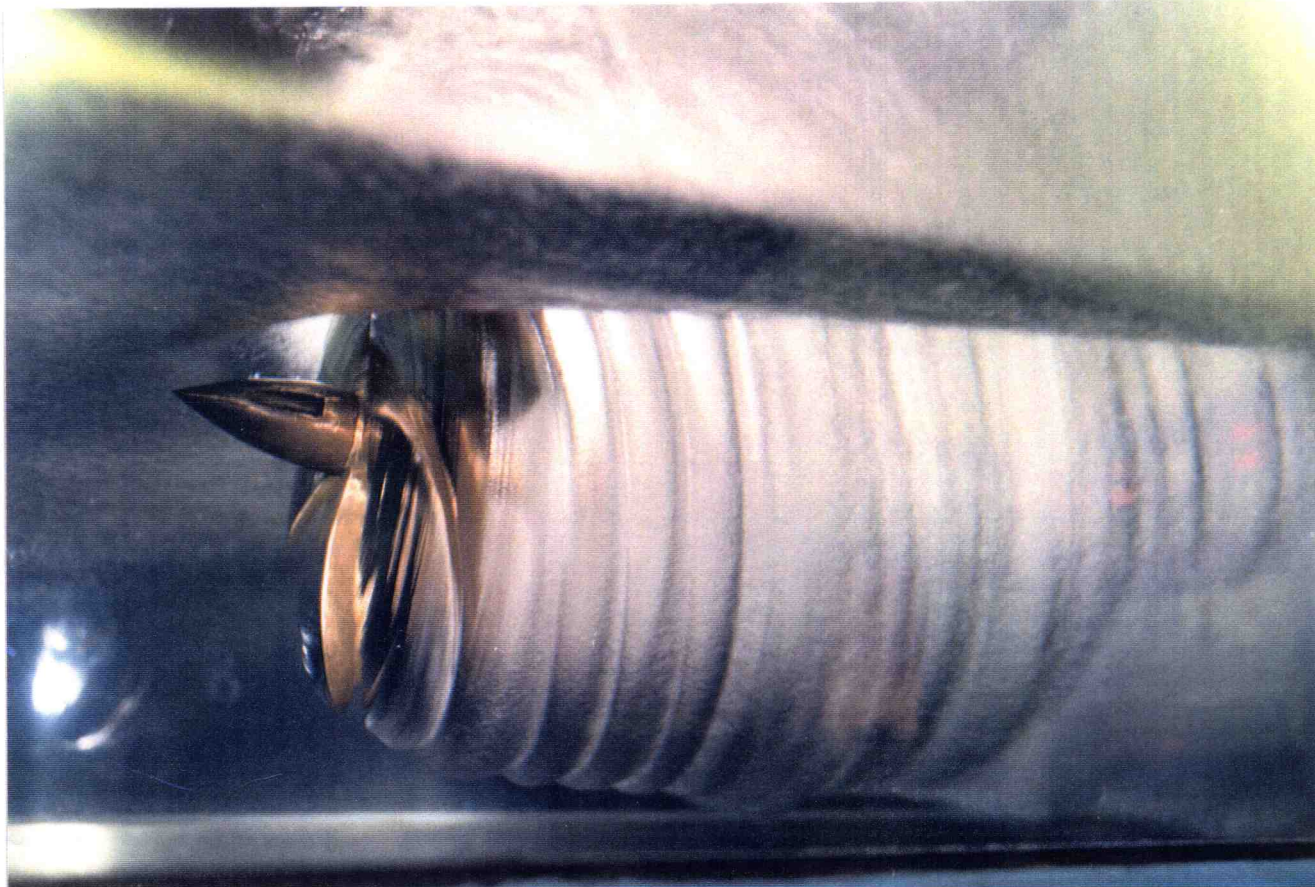
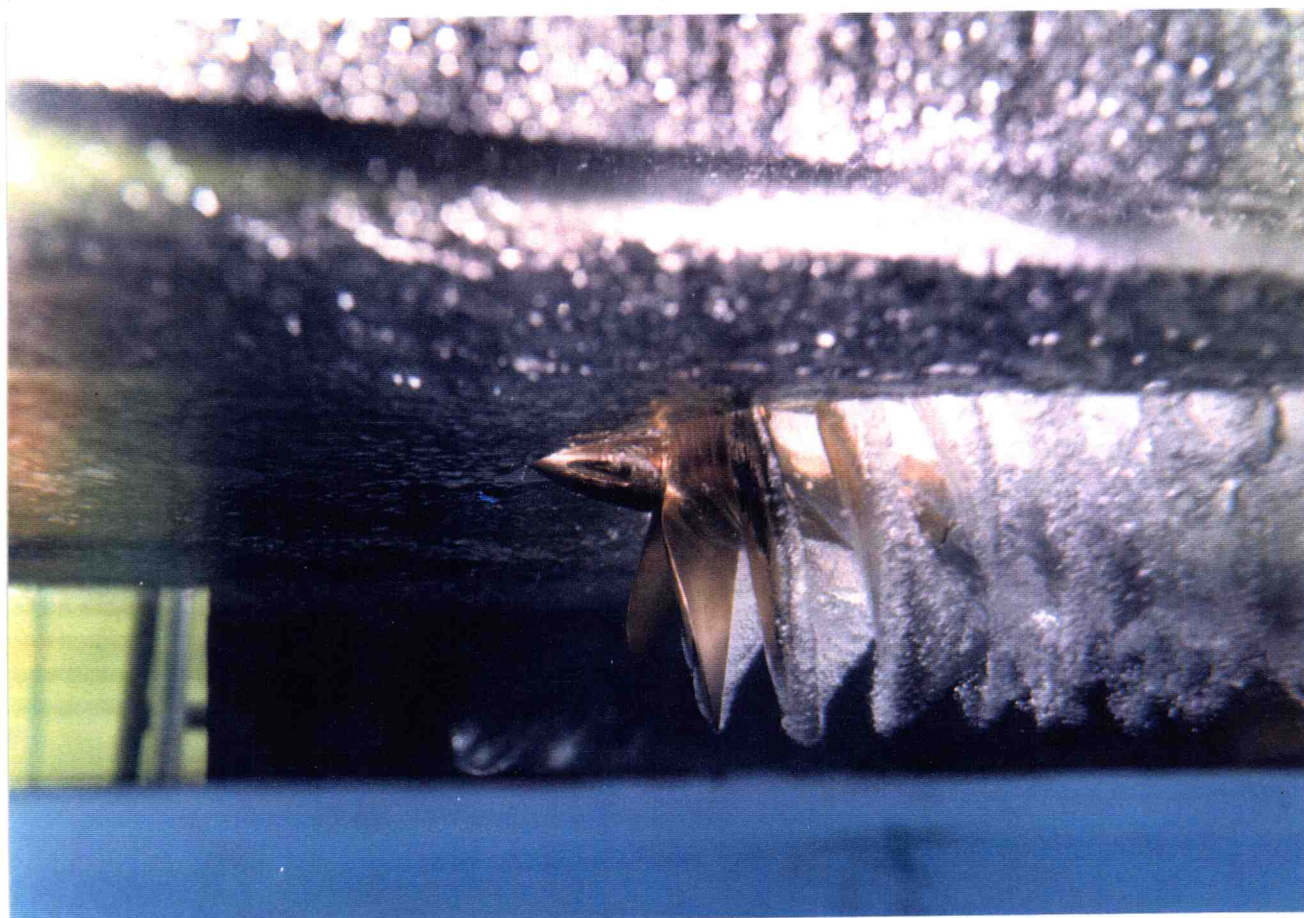


FIG 5 : Fonctionnement du propulseur avec hélice en situation immergée et semi-immergée



$\sigma = 12$ $J = 0.49$



$\sigma = 12$ $J = 0.95$

PLANCHE PHOTOS