

Grenoble, 18-19-20 février 1991

**MODELISATION DE PROPULSEURS
POUR UN PROJET D'ENGIN SOUS-MARIN**

Max AUCHER et Hervé KERMORGANT

Société ECA
Z.I. de Toulon-Est
Rue des Frères Lumière
B.P. n° 242
83078 TOULON CEDEX
Téléphone : 94 08 90 00

Résumé

A partir de la théorie du disque actionneur et de résultats de la méthode de la ligne portante, une méthode de calcul du rendement propulsif global de plusieurs propulseurs a été développée. Cette méthode incorpore des résultats expérimentaux pour, d'une part, prendre en compte les aspects visqueux ainsi que le phénomène de blocage, et pour, d'autre part, estimer les risques de cavitation. Seules sont prises en considération les caractéristiques globales du propulseur et de l'engin.

Cette modélisation permet l'étude de l'influence de divers paramètres sur les performances propulsives au niveau d'un avant-projet d'engin.

Comme application du modèle, une comparaison des performances de trois propulseurs est exposée ainsi que le dimensionnement et la simulation simplifiée d'un propulseur à hélices contra-rotatives carénées dans le sillage d'un engin rapide.

Summary

A predicting method of propulsive efficiency for some propellers has been worked out on the basis of actuator disk theory and results of lifting line method. This method incorporates experimental results in order to take in account viscous aspects and the blockage phenomenon on the one hand, and, on the other hand, to estimate inception of cavitation. General propellers and vehicle characteristics are only taken in consideration.

Thanks to this method, we can study the effect of any parameter upon the propulsive performances at the level of vehicle preliminary design.

As an application, the performances of three propellers are compared on the one part, and, on the other part, we examine the design and the simulation of a ducted contra rotating propeller operating in the wake of a fast vehicle.

1. INTRODUCTION

Dans la conception d'un engin sous-marin, le choix du propulseur occupe une place importante, par ses conséquences sur les qualités propulsives, évolutives, et acoustiques de l'engin, ainsi que par son poids, son encombrement et son coût.

Au stade du projet, les caractéristiques de la carène et des sources d'énergie sont rarement connues avec précision, et il peut en être de même des besoins opérationnels. L'architecte naval éprouve alors le besoin d'outils rapides de dimensionnement et de simulation des divers types de propulseurs envisageables, afin d'estimer l'influence de plusieurs paramètres sur les performances de l'engin [1].

Si les résultats expérimentaux concernant les séries systématiques d'hélices simples en eau libre sont largement répandus [2], il n'en est pas de même pour les systèmes plus complexes. De plus les résultats expérimentaux sont d'un maniement délicat lorsque l'on souhaite étudier l'influence d'un paramètre particulier ou l'influence des interactions engin / propulseur.

Dans cet esprit, des logiciels permettant la prédiction des performances propulsives de plusieurs types de propulseurs ont été développés. Les propulseurs considérés sont :

- L'hélice simple
- Les hélices contrarotatives
- L'hélice simple carénée (également appelée hélice sous tuyère)
- Les hélices contrarotatives carénées

Ces logiciels, implantés sur micro-ordinateur, sont des outils permettant, au niveau d'un projet, des études paramétriques de dimensionnement et de simulation des propulseurs dans le sillage d'un engin.

2. PRINCIPE DE CALCUL

Le principe de calcul repose sur la théorie du disque actionneur et utilise des résultats de la méthode de la ligne portante. Ces théories sont corrigées par des formules semi-empiriques afin de tenir compte de phénomènes particuliers tels que l'effet de l'épaisseur des pales, les pertes par frottement ou la cavitation. Les modèles de propulseurs obtenus sont donc des modèles hybrides.

Dans le cas des hélices contra-rotatives et contra-rotatives carénées, les deux hélices sont modélisées par une hélice moyenne de même diamètre moyen placée à mi-distance des deux hélices et n'induisant aucune vitesse tangentielle.

Le calcul ne prend pas en considération les détails du tracé des hélices, de la tuyère et de l'engin, mais est cependant suffisamment précis pour fournir des éléments de comparaison entre différents points de fonctionnement (vitesse d'avance, vitesse de rotation des hélices, immersion) ou différents choix de dimensionnement (diamètre du propulseur, du moyeu, ...).

Les principaux paramètres des modèles de propulseurs sont définis dans le

tableau 1.

Rappelons que le taux de ralentissement, noté Tau, est défini comme le rapport de la poussée des hélices sur la poussée totale (hélices + tuyère) du propulseur. Tau est principalement fonction du coefficient de charge du propulseur et de la géométrie de la tuyère, et plus particulièrement du rapport de l'aire du disque hélice sur l'aire de sortie de la tuyère [3]. On définit:

Tuyère accélératrice :	Tau < 1
Tuyère neutre :	Tau = 1
Tuyère décélératrice :	Tau > 1

DOMAINE DE VALIDITE :

Le domaine de validité des modèles est limité au cas du fonctionnement non cavitant. De plus, les paramètres des modèles sont soumis à certaines restrictions, dont les principales sont:

- Le diamètre du moyeu doit être inférieur à la moitié du diamètre D
- Le taux de ralentissement doit être compris entre 0,5 et 1,5
- L'épaisseur de la tuyère doit être inférieure à 20% de sa longueur

En outre, l'épaisseur des pales est supposée proportionnelle au diamètre des hélices. Il a été vérifié que cette hypothèse était suffisante en pratique, et avait pour principale conséquence une légère sous-estimation du diamètre optimum.

Les résultats de la méthode ont été validés par des résultats expérimentaux en ce qui concerne les trois premiers types de propulseurs.

Cette validation expérimentale n'a pu se faire pour le cas des hélices contra-rotatives carénées, faute de résultats expérimentaux disponibles.

Dans ce dernier cas, la validation a consisté en la comparaison des résultats de la présente méthode avec ceux d'une méthode de ligne portante [4][5]. Il reste cependant un phénomène sur lequel nous ne possédons pas de renseignement, c'est celui du comportement de l'extrémité des pales de l'hélice arrière rencontrant les tourbillons d'extrémité de pales issus de l'hélice avant. Cette difficulté est tournée dans le cas des hélices contra-rotatives non carénées en choisissant pour l'hélice arrière un diamètre plus petit que celui de l'hélice avant, solution peu satisfaisante pour un propulseur caréné.

3. METHODE DE CALCUL DU RENDEMENT PROPULSIF GLOBAL.

Les modèles de propulseurs sont représentés sous la forme de systèmes d'équations algébriques non linéaires, permettant le calcul du rendement propulsif global. La résolution de ces systèmes est effectuée par une méthode itérative (méthode de Raphson-Newton modifiée).

En pratique, il est nécessaire de fournir des valeurs initiales à cette méthode pour deux paramètres. Ainsi, dans le cas d'un dimensionnement, il faut donner des valeurs initiales au pas réduit (H/D) et au paramètre d'avance des hélices $V_s/(n.D)$. Des valeurs initiales égales à 1 suffisent à assurer la convergence du processus dans la grande majorité des cas de calcul : la méthode de calcul est robuste et rapide, et permet des études paramétriques.

- Expression des coefficients de poussée réelle que doit fournir le propulseur:

- Coefficient de poussée totale : C_{tt}
- Coefficient de poussée hélices : $C_{tp} = \tau \cdot C_{tt}$
- Coefficient de poussée tuyère : $C_{td} = (1 - \tau) \cdot C_{tt}$

Expression des diverses pertes en poussée et en couple (formules empiriques):

- Perte par frottement et épaisseur de la tuyère:

$$\delta C_{tdv} = 8 \cdot (L/D) \cdot (1 + 2(e/L)) \cdot C_f$$

avec C_f , coefficient de frottement suivant l'ITTC 57

- Perte par frottement des pales:

Le coefficient de traînée des pales est pris égal à 0,008.

$$\delta C_{qv} = k_{qv} \cdot Z \cdot (C/D) / (J_s \cdot J_s)$$

$$\delta C_{tpv} = k_{tpv} \cdot (H/D) \cdot \delta C_{qv}$$

Pour les hélices non carénées: $k_{qv} = 0,0051$ et $k_{tpv} = 1,24$

Pour les hélices carénées: $k_{qv} = 0,0061$ et $k_{tpv} = 1$

- Perte par épaisseur des pales (phénomène de blocage) [4][5]

On note $\Delta\alpha$, l'angle de déviation de l'écoulement entre les pales, dû à l'épaisseur des pales:

$$\Delta\alpha = k_\alpha \cdot (C/D) \cdot (Z - Z_0) \cdot Z \cdot J_s / (1 + \beta \cdot J_s \cdot J_s)$$

$$\delta C_{qe} = k_{qe} \cdot \Delta\alpha \cdot C_{tp_{id}}$$

$$\delta C_{tpe} = k_{tpe} \cdot (H/D) \cdot \delta C_{qe}$$

Avec $k_\alpha = 0,00053$, $Z_0 = 4,8$ et $\beta = 0,28$

Pour les hélices non carénées: $k_{qe} = 0,15$ et $k_{tpe} = 2,33$

Pour les hélices carénées: $k_{qe} = 0,22$ et $k_{tpe} = 1,36$

Contraintes de cavitation:

Les risques de cavitation sont représentés grossièrement par la valeur de la pression minimale sur les pales d'hélice (h_v): les risques sont d'autant plus faibles que la pression minimum sur les pales est supérieure à la pression de vapeur saturante.

Afin de réduire les risques de cavitation, la portance des pales est supposée créée par la cambrure (cambrure parabolique) et non par l'incidence. Cette hypothèse permet de relier explicitement les risques de cavitation à la longueur de corde moyenne des pales.

- Expression de la pression statique au niveau de l'hélice: h

Cette pression est la somme des pressions dues à :

- la pression atmosphérique
- la pression due à l'immersion
- la pression statique induite par la tuyère

- Expression de la vitesse de l'eau au niveau des pales : V_r

- Expression du paramètre de cavitation "étendu":

$$\sigma = 2.g.(h-h_v)/(V_r.V_r)$$

avec h_v = pression minimum sur les pales

Pour un problème de dimensionnement, h_v est une donnée égale à la pression de vapeur saturante, et, pour un problème de simulation, h_v est un résultat informant sur les risques de cavitation.

- Expression de la corde moyenne des pales évitant la cavitation :

$$(C/D) = f(\sigma, Z, C_{tp}, J_s)$$

Expression du coefficient de poussée idéal:

$$C_{tp_{id}} = C_{tp} + \delta C_{tdv} + \delta C_{tpv} + \delta C_{tpe}$$

Expression des vitesses induites par les hélices et la tuyère:

- Vitesse induite par les hélices :

$$u_{ap} = f(w, C_{tp_{id}}, C_{tp}, J_s, D_{moyeu}/D)$$

L'expression de u_{ap} est propre au type de propulseur choisi et donnée par le modèle du disque actionneur, en incorporant un terme de perte par mise en rotation du fluide dans le cas de l'hélice simple.

- Vitesse induite par la tuyère:

$$u_{ad} = C_{td}/(4.u_{ap}.(1-(D_{moyeu}/D)^2))$$

Expression du rendement idéal, avec prise en compte des pertes par énergie tourbillonnaire:

$$\eta_{id} = f(J_e, H/D, u_{ap}, Z, L/D, w, C_{tp_{id}}, D_{moyeu}/D)$$

Cette équation est issue de la théorie du disque actionneur et de la théorie de la ligne portante. J_e est le paramètre d'avance rapporté à la vitesse d'entrée d'eau à l'hélice. Le modèle du rendement idéal est donc un modèle de représentation issu des modèles de connaissance "théorie du disque actionneur" et "théorie de la ligne portante". Pour le cas de l'hélice simple, le modèle de rendement est explicité dans la référence 6.

Expression du coefficient de couple idéal fourni par les hélices:

$$C_{qid} = J_e.C_{tp_{id}}/(2\pi.\eta_{id})$$

Expression du coefficient de couple réel fourni par les hélices:

$$C_q = C_{q_{id}} + \delta C_{qv} + \delta C_{qe}$$

Expression des rendements propulsifs:

$$\text{Rendement propulsif en eau libre : } \eta_{a_0} = J_s.(1-w).C_{tt}/(2\pi.C_q)$$

$$\text{Rendement coque : } \eta_{a_h} = (1-t)/(1-w)$$

$$\text{Rendement d'adaptation : } \eta_{a_r} = 1$$

$$\text{Rendement propulsif global : } \eta_{a_g} = \eta_{a_0}.\eta_{a_h}.\eta_{a_r}$$

Cette représentation des calculs, apparemment linéaire, ne doit pas masquer le couplage des équations et l'aspect itératif du processus : ainsi, le calcul des pertes en poussée est déduit des contraintes de cavitation, qui sont fonctions des vitesses induites par le propulseur, lesquelles se déduisent de la poussée idéale, qui est calculée après prise en compte des pertes en poussée !

3. EXEMPLES D'APPLICATION

Les trois exemples d'application proposés permettent de mettre en évidence l'intérêt de la modélisation proposée :

- comparaison des propulseurs
- dimensionnement d'un propulseur à hélices contra-rotatives carénées
- simulation d'un propulseur à hélices contra-rotatives carénées

3.1 COMPARAISON DES PROPULSEURS

Rappelons l'intérêt principal des propulseurs carénés par rapport aux propulseurs non carénés (d'un point de vue rendement propulsif global) :

- En cas d'hélices très peu chargées (faible poussée ou vitesse d'avance élevée) et d'immersion faible, la mise en place d'une tuyère décélétratrice permet d'augmenter la pression statique au niveau des pales d'hélices et donc de diminuer les risques de cavitation.

- En cas d'hélices très chargées (grande poussée ou vitesse d'avance faible), la mise en place d'une tuyère accélératrice permet d'augmenter le rendement propulsif global.

Rappelons également que l'intérêt des hélices contra-rotatives par rapport aux hélices simples avec stator, réside dans leur meilleur rendement, la charge des hélices étant plus faible.

La figure 1 donne sous forme de courbes les résultats des calculs pour trois types de propulseurs derrière un même engin rapide (vitesse de 33.5 m/s) et à faible immersion :

- Hélices contra-rotatives
- Hélices contra-rotatives carénées (Tau = 1,15)
- Hélice simple carénée (Tau = 1,15), avec stator redresseur

Deux vitesses de rotation (pour chaque hélice) sont considérées : 2400 t/mn et 3600t/mn. Afin d'éviter la cavitation, les tuyères sont décélétratrices, le nombre de pales important et la fraction de surface des pales élevée. Dans des conditions de navigation moins difficiles, les rendements seraient plus élevés.

On remarque que, dans les conditions de vitesse et d'immersion choisies et pour un même risque vis-à-vis de la cavitation :

- La présence d'une tuyère décélétratrice induit, par sa trainée de frottement et l'augmentation de charge des hélices, une perte de rendement de l'ordre de 8 à 10 %

- Les hélices contra-rotatives permettent, principalement par diminution de la charge des hélices, un gain de l'ordre de 8 à 10% sur le propulseur à hélice unique.

Ces ordres de grandeur sont cependant sensibles aux conditions opérationnelles. De plus, la comparaison est effectuée pour une même vitesse de rotation des hélices : les contraintes de motorisation ne se posent pas obligatoirement dans ces termes. Ainsi, si nous comparons des propulseurs alimentés en puissance par le même moteur, il est plus cohérent de considérer la vitesse de rotation relative des deux hélices contra-rotatives égale à la vitesse de rotation de l'hélice carénée.

3.2 DIMENSIONNEMENT D'UN PROPULSEUR

La première étape d'un projet d'engin consiste à définir une configuration de propulseur nominale à partir d'une étude paramétrique globale, faisant intervenir au mieux les couplages existant dans le projet. Ainsi, dans un projet réel, l'aspect spécifiquement propulseur ne peut être dissocié du moteur (Relations Puissance / Vitesse de rotation / Encombrement / ...).

Limitons-nous néanmoins au seul propulseur et considérons l'exemple des hélices contra-rotatives carénées pour un projet d'engin rapide. Ce type de propulseur présente en effet un bon compromis pour certaines applications.

La géométrie de l'engin et le nombre de pales des hélices sont fixés, de plus les calculs sont effectués pour un même risque de cavitation.

Les figures 2 à 16 mettent en évidence la sensibilité du rendement propulsif global au choix de quelques paramètres :

- la vitesse de rotation des hélices n
- l'immersion de l'engin h_0
- la vitesse d'avance de l'engin V_s
- le taux de ralentissement τ

Ces figures permettent de retrouver et de quantifier des résultats généraux connus au niveau qualitatif :

- Le rendement augmente quand la vitesse de rotation n diminue.
- Le rendement augmente quand l'immersion choisie augmente.
- A grande immersion (100m), le rendement augmente quand le taux de ralentissement diminue.

Par contre, les figures 11, 12 et 13 à faible immersion mettent bien en évidence l'existence d'un taux de ralentissement optimal pour une navigation à faible immersion (25m).

Parallèlement aux courbes de rendement, il est utile d'examiner les courbes de pas moyen et de corde moyenne des hélices, afin de se rendre compte du caractère réaliste ou non des résultats de calcul: une solution aboutissant, par exemple, à une corde moyenne de l'ordre de grandeur du diamètre des hélices est à considérer avec méfiance !

3.3 SIMULATION D'UN PROPULSEUR

La deuxième étape d'un projet d'engin consiste à vérifier les performances d'une configuration de propulseur choisie pour l'ensemble des conditions opérationnelles fixées par le cahier des charges (par exemple l'immersion et la vitesse d'avance).

Dans ce type de problème (simulation d'un propulseur préalablement défini), le modèle de propulseur est encore utilisé pour estimer les variations du rendement et les risques de cavitation. Seul le choix des paramètres d'entrée et de sortie est à adapter au problème.

Supposons que le dimensionnement précédent du propulseur contra-rotatif caréné aboutisse au compromis suivant, pour un certain point de fonctionnement:

Diamètre moyen des hélices: $D = 0,28\text{m}$
 Corde réduite moyenne des hélices : $(C/D) = 0,161$
 Pas réduit moyen des hélices : $(H/D) = 2,386$
 Taux de ralentissement : $\text{Tau} = 1,15$

De ce qui précède, on remarque que pour un engin ayant un domaine de fonctionnement étendu (immersion / vitesse d'avance) un problème se pose: l'utilisation d'une tuyère accélératrice sera intéressante à basse vitesse mais augmentera les risques de cavitation à grande vitesse, alors que l'utilisation d'une tuyère décélératrice sera intéressante à grande vitesse mais grèvera le rendement à basse vitesse.

Les figures 17 et 18 placées en annexe permettent de rendre compte du comportement du propulseur en simulation, et de mettre en évidence la sensibilité du comportement du propulseur au taux de ralentissement.

La figure 17 représente le rendement propulsif global en fonction de la vitesse d'avance, pour différentes valeurs de Tau. La plus haute courbe correspond à $\text{Tau} = 0,7$, qui permet, dans notre cas, les plus grands rendements entre 87% et 90% suivant la vitesse.

La figure 18 représente la valeur de Tau adaptée pour chaque point du domaine de fonctionnement (Immersion / vitesse d'avance). Par valeur adaptée, il faut entendre la valeur de Tau permettant le meilleur rendement tout en évitant la cavitation. On a par exemple:

Immersion= 40m et Vitesse=10m/s, alors $\text{Tau}=0,7$
 Immersion= 70m et Vitesse=30m/s, alors $\text{Tau}=0,7$
 Immersion= 40m et Vitesse=35m/s, alors $\text{Tau}=1$
 Immersion= 70m et Vitesse=35m/s, alors Tau de l'ordre de 0,74 environ
 Immersion= 10m et Vitesse=35m/s, alors $\text{Tau}>1,5$ (en pratique, cavitation)

L'ensemble des deux figures permet d'estimer le rendement propulsif global et les risques de cavitation du propulseur, en fonction des conditions opérationnelles.

4. CONCLUSION

Les applications possibles des logiciels sont nombreuses et illustrent l'intérêt des modèles hybrides dans la conception des systèmes complexes.

Les modèles hybrides, utilisant au mieux les méthodes, résultats théoriques et résultats expérimentaux, permettent un bon compromis réalisme/simplicité et sont essentiellement des outils adaptés aux avant-projets :

- Aide à la définition des cahiers des charges.
- Outil pédagogique
- Outil exploratoire pour concepts nouveaux

Ce sont en fait, dans un contexte industriel, des outils complémentaires des codes de calcul de définition des propulseurs et des essais en bassin, seuls moyens permettant d'établir la forme exacte et les caractéristiques du propulseur définitif.

La relative simplicité des modèles hybrides rend possible le couplage d'un modèle de propulseur avec des modèles simples de lois de sillage et de suction, et des modèles de moteurs, de sources d'énergie, etc.

L'architecte naval peut alors envisager la constitution d'un outil global permettant de rendre compte des liens unissant différents paramètres d'un avant-projet d'engin (masse, encombrement, autonomie,...).

5. REFERENCES

- [1] A. BOVIS Evolution et perspectives des propulseurs navals. Séminaire "Hélices Marines", 1990
- [2] W.P.A. VAN LAMMEREN, J.D. VAN MANEN, M.W.C. OOSTERWELD
The Wageningen B-screw series, SNAME, Novembre 1969
- [3] M.W.C. OOSTERWELD Wake adapted ducted propellers, Publication n°345
du NSMB, 1970
- [4] M. AUCHER Calcul et théorie des pompes-hélices.
Document interne ECA, Mai 1987.
- [5] Evaluation de propulseurs pour torpille lourde, Document interne ECA,
Septembre 1989.
- [6] M. AUCHER, J.L. GUERMOND Calcul rapide des gains de rendement
possibles avec une nouvelle hélice adaptée à une modification de la
puissance d'un navire. Colloque "L'Hydrodynamique appliquée à
l'exploitation des navires". ATMA. Novembre 1986

RENDEMENT PROPULSIF GLOBAL

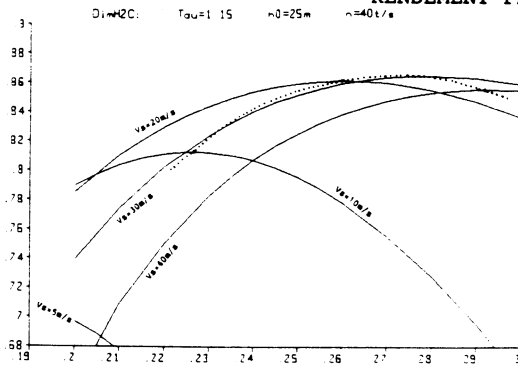


FIGURE 2

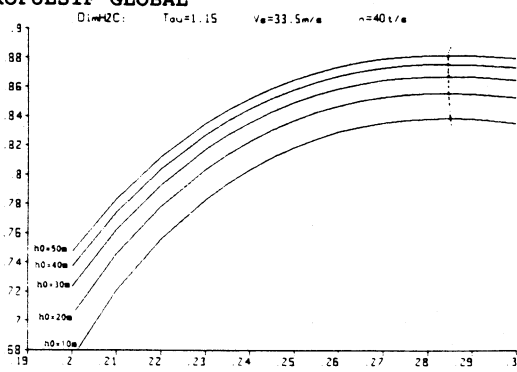


FIGURE 5

PAS REDUIT MOYEN (H/D)

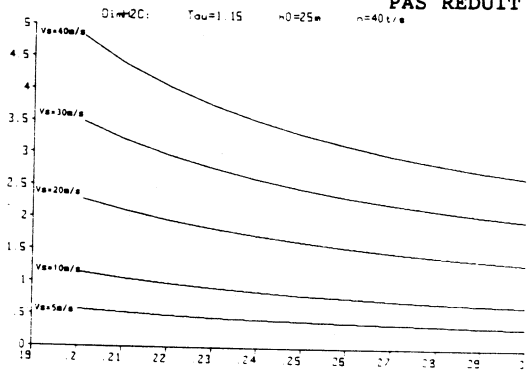


FIGURE 3

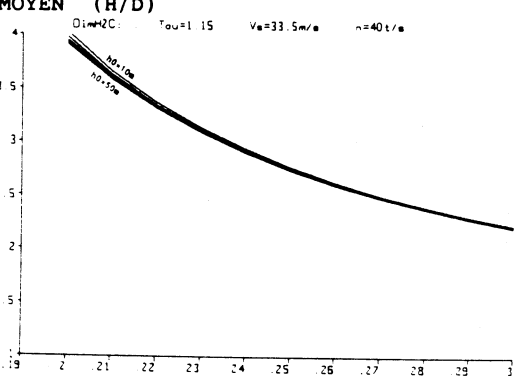


FIGURE 6

CORDE REDUITE MOYENNE (C/D)

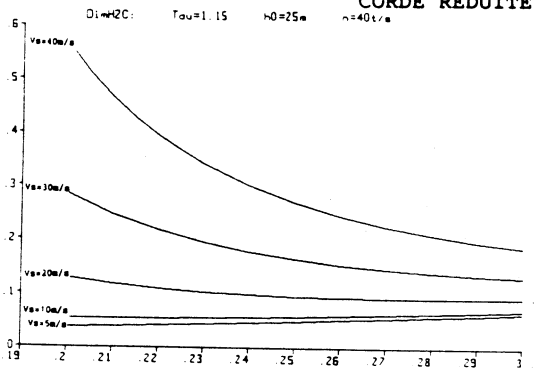


FIGURE 4

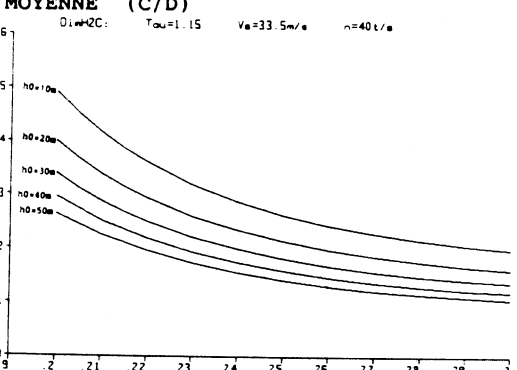


FIGURE 7

INFLUENCE DU CHOIX DE LA VITESSE D'AVANCE V_s

INFLUENCE DU CHOIX DE L'IMMERSION h_0

PREDIMENSIONNEMENT D'UN PROPULSEUR CONTRA-ROTATIF CARENE

TABLEAU 1		
PRINCIPAUX PARAMETRES DES MODELES DE PROPULSEURS :		
1. Hélice(s) :		
- Diamètre moyen	D	
- Diamètre du moyeu	Dmoyeu	
- Corde moyenne	C	
- Pas moyen	H	
- Nombre de pales hélices	Z	
2. Tuyère (le cas échéant) :		
- Longueur	L	
- Epaisseur maximum	e	
- Taux de ralentissement	Tau	
3. Interaction carène/propulseur :		
- loi de sillage	$w = w(D, Re)$	
- loi de succion	$t = t(D)$	
- loi de trainée	$Cx = Cx(Re)$	
4. Conditions opérationnelles :		
- Immersion	h0	
- Vitesse d'avance	Vs	
- Vitesse de rotation hélice(s)	n	
- Rendement propulsif global	etag	
- Pression minimum sur pale	hv	

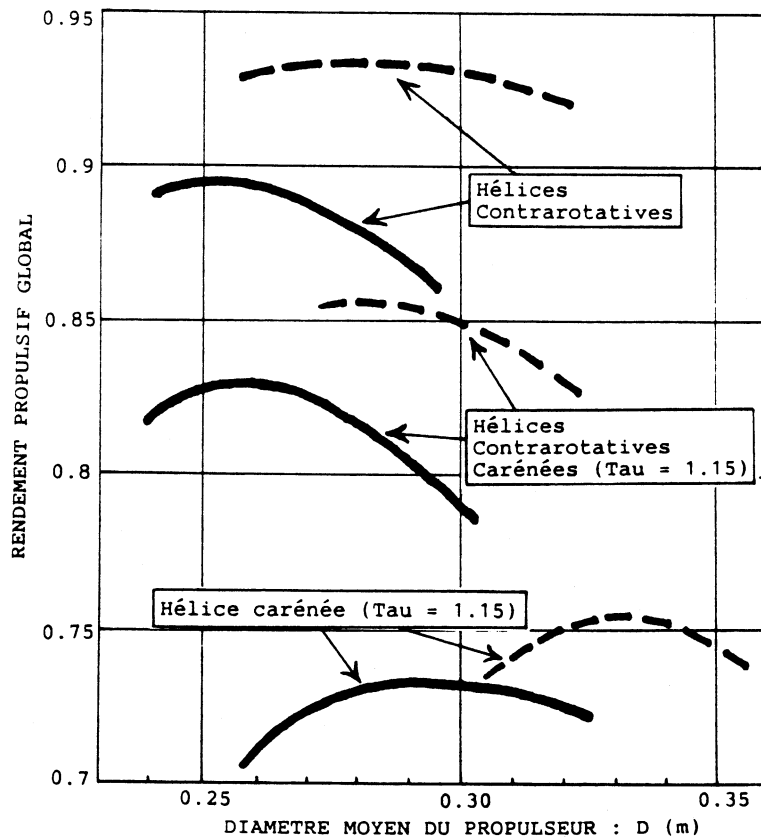


FIGURE 1 : COMPARAISON DES RENDEMENTS DES PROPULSEURS
 (Vitesse d'avance : Vs = 33.5 m/s)
 ——— n = 3600 t/mn
 - - - - n = 2400 t/mn

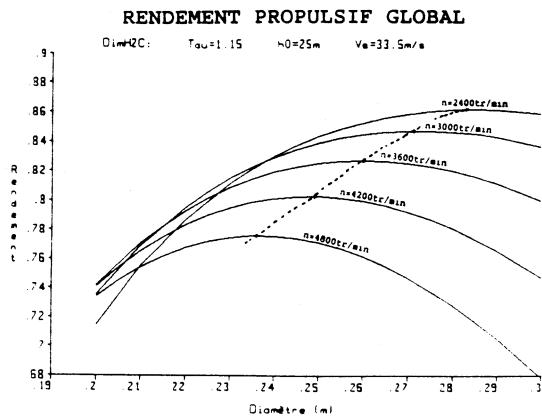


FIGURE 8

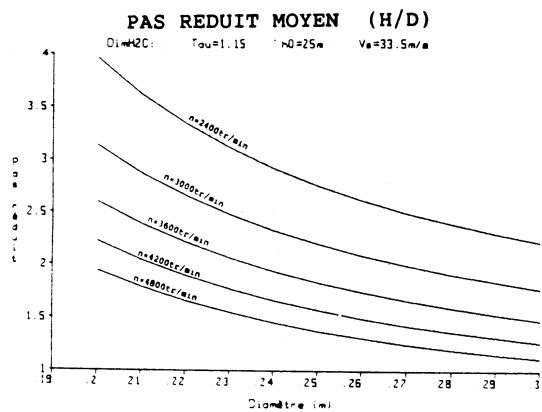


FIGURE 9

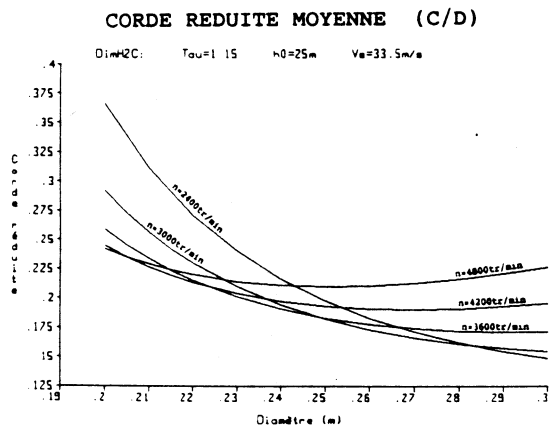


FIGURE 10

INFLUENCE DE LA VITESSE DE ROTATION n

PREDIMENSIONNEMENT D'UN PROPULSEUR CONTRA-ROTATIF CARENE

RENDEMENT PROPULSIF GLOBAL

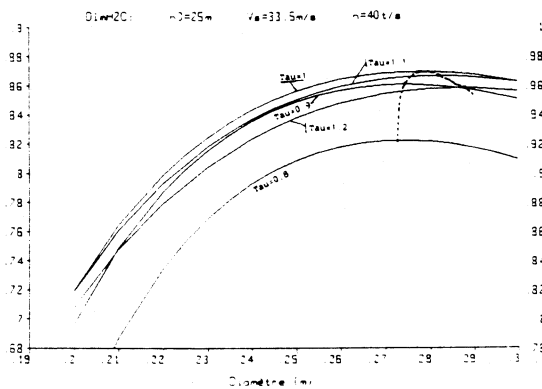


FIGURE 11

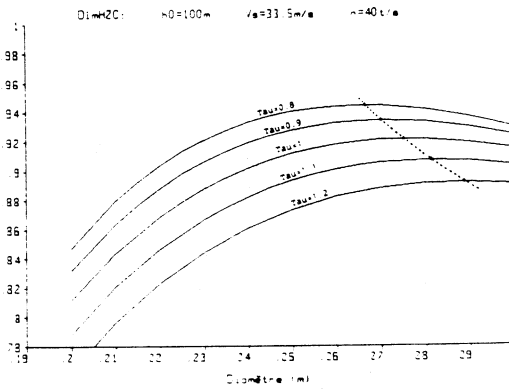


FIGURE 14

PAS REDUIT MOYEN (H/D)

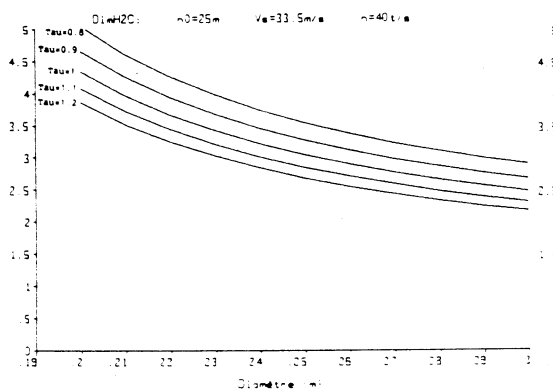


FIGURE 12

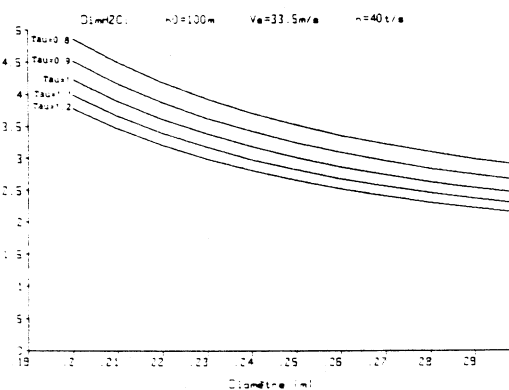


FIGURE 15

CORDE REDUITE MOYENNE (C/D)

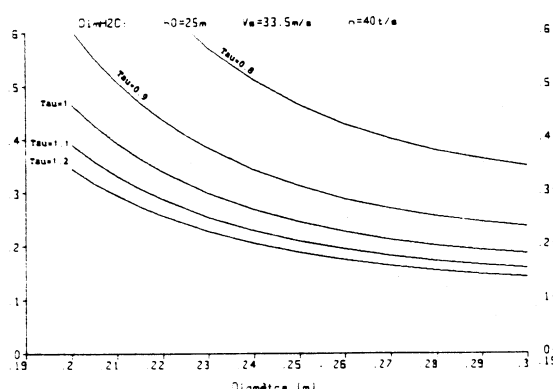


FIGURE 13

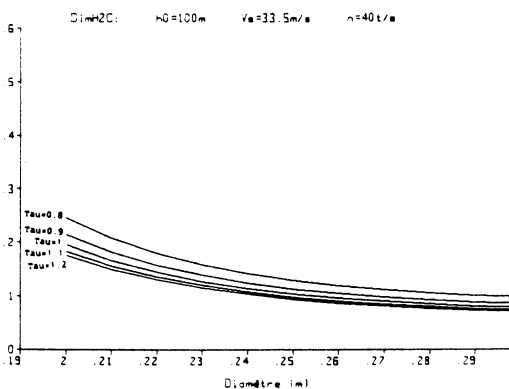


FIGURE 16

INFLUENCE DU TAUX DE RALENTISSEMENT Tau

PREDIMENSIONNEMENT D'UN PROPULSEUR CONTRA-ROTATIF CARENE

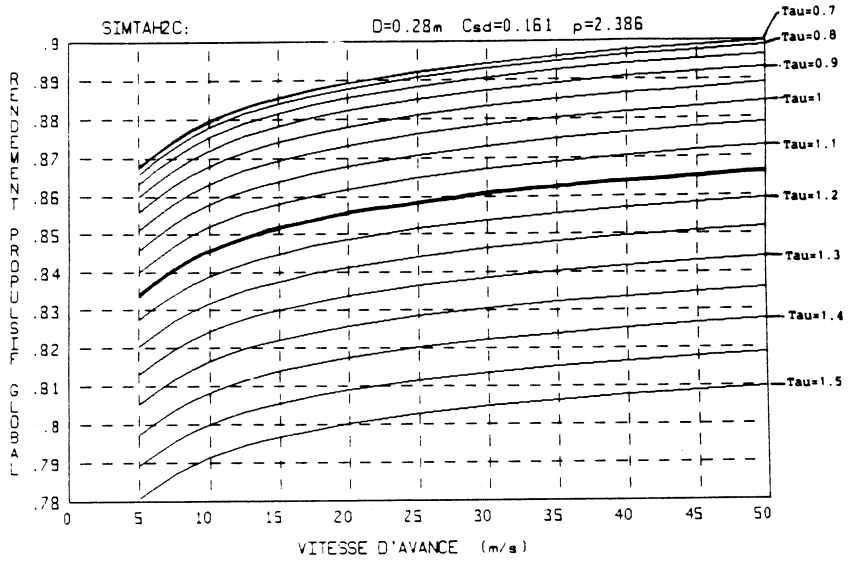


FIGURE 17

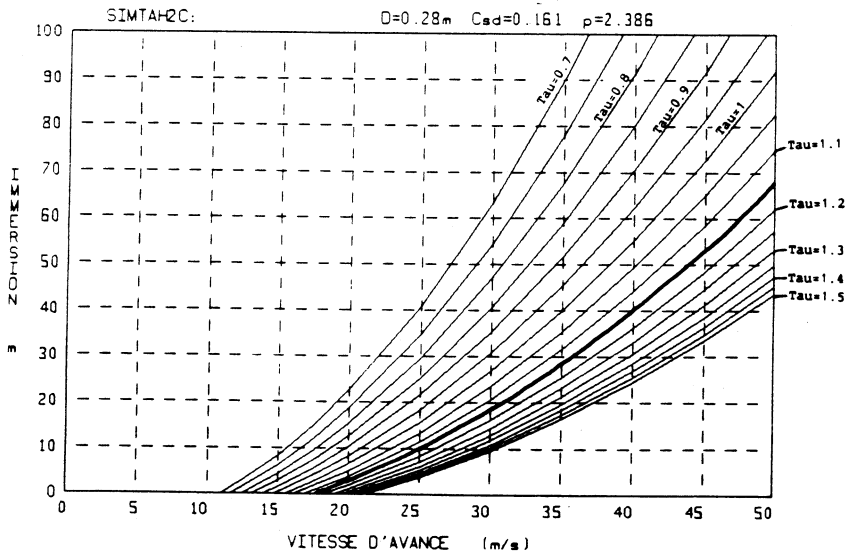


FIGURE 18

SIMULATION D'UN PROPULSEUR CONTRA-ROTATIF CARENE