

4e JOURNEES DE L'HYDRODYNAMIQUE

1, 2, 3 mars 1993 - Nantes

ETUDE EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES VOILIERS EN GITE ET DERIVE

C. TALOTTE - G. DELHOMMEAU - J.M. KOBUS

Division Hydrodynamique Navale, Laboratoire de Mécanique des Fluides

Ecole Centrale de Nantes

Résumé

La prédiction des performances des voiliers nécessite la connaissance des efforts auxquels il est soumis. L'objet de l'étude présentée dans cet article est de substituer aux formules empiriques utilisées jusqu'à présent un calcul plus précis des efforts hydrodynamiques. Les résultats d'essais en bassin en traction droite, puis en gîte et dérive, sont comparés aux résultats obtenus par le code de résistance de vagues en fluide parfait REVA, avec condition de surface libre linéarisée. Nous décrivons ensuite le montage expérimental utilisé pour les essais, avec ses limites d'utilisation. Un autre montage devant permettre d'effectuer les essais avec plus de facilité est ensuite présenté.

Summary

The velocity performance prediction on sailing yachts needs to know the forces acting on the boat. The aim of this paper is to present another way of determination of hydrodynamic forces than the usual empirical expressions. We use therefore the perfect fluid code REVA adapted to sailing yachts with linearised free surface conditions to compare the results to the towing tank tests first for zero leeway and then with heel and leeway. We present here the measurement apparatus used to obtain hydrodynamic forces exerted on the yacht in heel and leeway, and its limitations. Another apparatus is then described, which is supposed to avoid the previous difficulties.

L-INTRODUCTION

L'un des principaux soucis dans l'étude du voilier de compétition est d'évaluer ses performances à partir des données géométriques de la carène, des voiles et des conditions de navigation (vent, plan d'eau). L'utilisation des codes de prédiction des performances V.P.P (Velocity Prediction Program) nécessite la connaissance des efforts auxquels est soumis le voilier. Jusqu'à présent, les efforts hydrodynamiques étaient évalués empiriquement, l'objet de cette étude est donc de les calculer pour les voiliers en gîte et dérive et progressant à vitesse constante sur eau calme.

On s'attachera dans un premier temps à mettre au point un montage expérimental permettant d'effectuer des essais systématiques de voiliers dans des positions (dérive, assiette, gîte) correspondant à des points de fonctionnement réalistes, éventuellement sur houle.

Les résultats de ces essais vont permettre la validation de codes de calcul en fluide parfait tel que le code de résistance de vagues REVA et donneront des idées sur les modifications à apporter pour tenir compte des spécificités du voilier (carène plate en gîte et dérive et comportant des profils portants).

Le voilier étudié est un "WOR 60" de 60 pieds (18 m) dessiné par J.BERRET et initialement prévu pour la course autour du monde en équipage WHITBREAD. La maquette utilisée est au 1/7e et elle est munie de ses appendices: safran et quille avec un bulbe à l'échelle.

Dans toute la suite nous considérerons les repères suivants (O,X,Y,Z) repère de calcul, l'axe OX étant imposé par la vitesse d'avance, (O,x,y,z) repère lié à la balance de mesure.

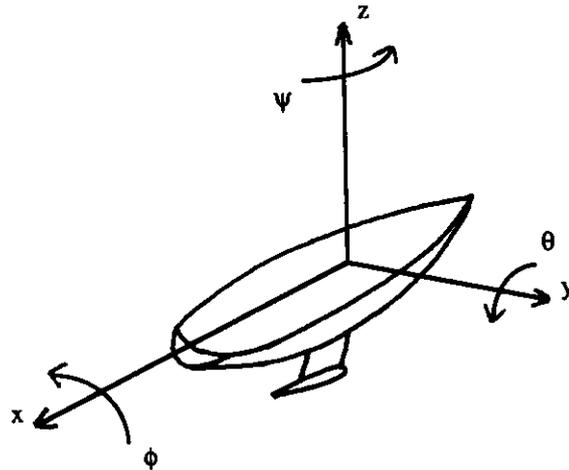


Figure 1. Repère

Ψ représente la dérive, θ l'assiette et ϕ la gîte

Nous présenterons tout d'abord les résultats concernant le voilier en traction droite, la comparaison de ces essais avec les calculs REVA ainsi qu'avec les formules de régression de Gerritsma. Pour le voilier en gîte et dérive, nous exposerons deux types de montage possibles ainsi que les comparaisons du 1er montage avec les calculs REVA.

II-TRACTION DROITE

II.1 -Description du montage

Les essais ont été réalisés au bassin des carènes de l'ECN (70m de long, 5m de large et 3m de profondeur). La maquette est équipée de deux colonnes en aluminium qui sont fixées dans un premier temps sur un plancher situé à la flottaison puis ensuite au voisinage du centre de voilure à l'aide d'une structure en Nomex-carbone. Elle est libre en assiette et pilonnement. La balance de mesure utilisée permet de déterminer la traînée et la force transversale à l'aide de capteurs à quartz et les enfoncements des deux colonnes avec des capteurs à transformateurs différentiels (LVDT) à partir desquels on déterminera l'assiette dynamique. Les efforts sont déterminés dans un repère lié au bateau, pour les essais en traction droite, le réglage de l'incidence 0 par rapport à la vitesse d'avance s'effectue en annulant la force transversale.

Afin d'obtenir un écoulement turbulent on place à l'avant de la maquette une bande de sable. La répétitivité des mesures est assez bonne, la traînée est obtenue avec 2 à 5% d'erreur, celle-ci diminue avec la vitesse. Par contre le chariot n'est pas réglé pour des vitesses inférieures à 0,5 m/s (Froude < 0,1) et les mesures obtenues pour ces vitesses ne sont pas très précises. Plusieurs déplacements ont été envisagés pour les essais: A,B et C. Le déplacement A correspond à la jauge à vide, B le cas chargé et C le cas chargé et ballasté. Contrairement aux essais en traction droite, il n'a pas été possible de tester ces trois déplacements pour le montage en gîte du fait du poids de la maquette, on a donc choisi d'effectuer ces essais avec un seul déplacement intermédiaire entre B et C.

II.2-Extrapolation et résultats des essais

L'écoulement autour d'un navire est régi par deux phénomènes: les effets de viscosité traduits par le nombre de Reynolds $Re = \frac{VL}{\nu}$ et les effets de gravité traduits par le nombre de Froude $Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}$, L étant une longueur de référence, prise ici égale à la longueur à la flottaison. L'hypothèse de Froude consiste à séparer ces deux effets; la résistance à l'avancement sur eau calme en traction droite se décompose ainsi:

$$RT = RW + RF + Rf$$

RW est la résistance de vagues, $RW = RW(Fr)$

RF la résistance de frottement, $RF = RF(Re)$

Rf la résistance de forme, elle est proportionnelle au frottement, $Rf = k RF$

On a ainsi $RT = RW + (1+k) RF$ que l'on va mesurer, $1+k$ est appelé coefficient de forme. $RW + Rf$ est également appelé résistance résiduaire. Afin d'extrapoler les résultats expérimentaux au réel, on utilise les lois de similitude de Froude. On définit les coefficients adimensionnels:

$$C = \frac{R}{\frac{1}{2} \rho S V^2}$$

On a ainsi $CT = CW + (1+k) CF$, CW est le même pour les essais et les calculs puisqu'il traduit les effets de gravité et que le nombre de Froude est conservé, par contre le CF qui traduit les effets visqueux et dépend donc du nombre de Reynolds de l'écoulement n'est pas conservé. Pour calculer le CF sur une carène, on utilise usuellement la formule I.T.T.C 57:

$$CF = \frac{0.075}{(\text{Log}_{10}(Re) - 2)^2}$$

Le CF peut également être déterminé par un calcul de couche limite en fluide visqueux. Nous avons utilisé le code 3C3D développé par le CERT-ONERA, dans les mêmes conditions d'écoulement que les expériences (déclenchement de la turbulence au même endroit sur la carène et sur le maillage de la maquette). Les résultats du calcul convergent vers la formule ITTC 57 qui sera donc utilisée pour les extrapolations des essais.

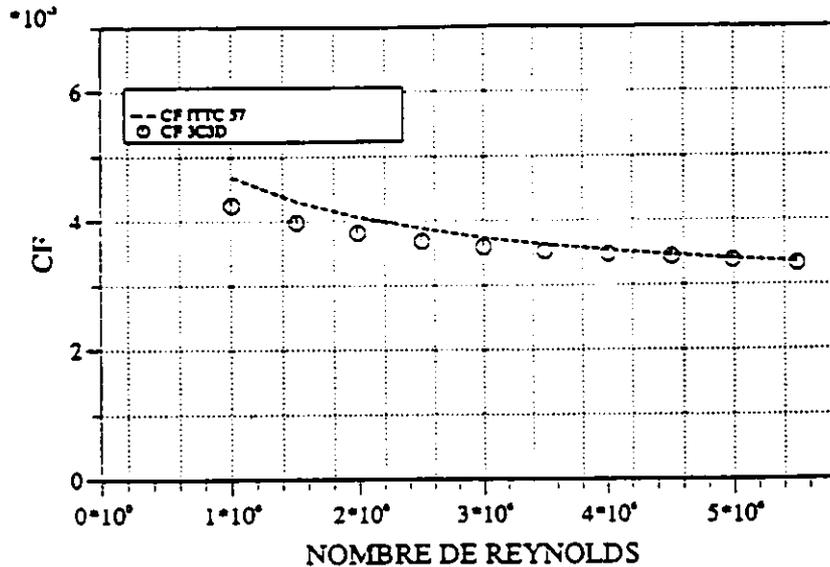


Figure 2. Coefficient de frottement maquette.

II.2.1-Calcul du coefficient de forme.

Il est déterminé expérimentalement par deux méthodes:

1. On suppose qu'aux basses vitesses la résistance de vagues est négligeable on a $CT \rightarrow (1+k) CF$

2. Méthode de Prohaska [1]: le principe est de considérer qu'aux basses vitesses la résistance de vagues est proportionnelle à V^n , on a alors $CT = (1+k) CF + a Fr^{n-2}$, $1+k$ est déterminé par l'ordonnée à l'origine de la courbe $\frac{CT}{CF_{ITTC}}$ en fonction de $\frac{Fr^{n-2}}{CF_{ITTC}}$ qui est une

droite aux faibles nombres de Froude. On a $n-2 = 4$. Pour le WOR et par les deux méthodes on obtient $1+k = 1,2$, il faut noter que pour les très basses vitesses, les mesures ne peuvent être prises en compte du fait de la mauvaise régulation du chariot.

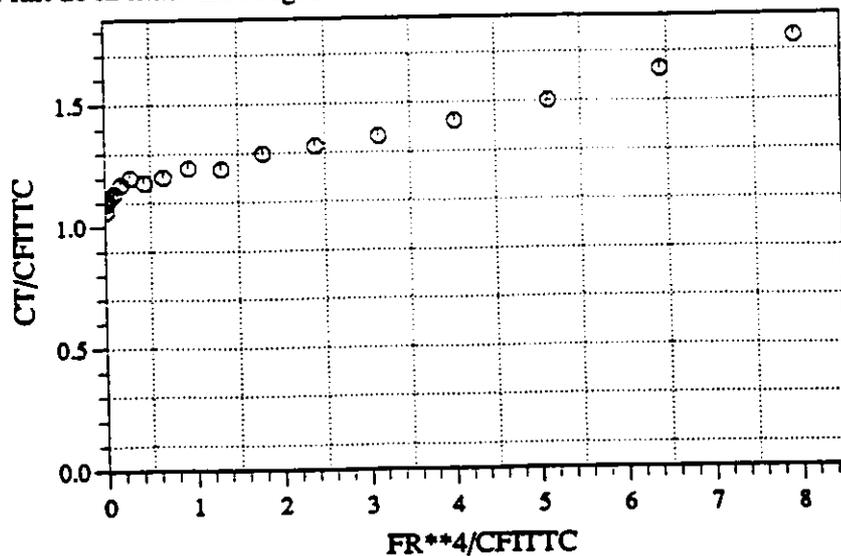


Figure 3. Méthode de Prohaska.

Cette valeur qui paraît importante vient confirmer des essais antérieurs effectués sur une carène de voilier de type Selection. Sur cette carène, en plus des deux méthodes précédentes le coefficient de forme a été calculé en soustrayant à la traînée totale mesurée la traînée d'une maquette de double modèle à la même échelle. Par ces trois méthodes on a obtenu pour le Selection $1+k = 1,2$.

Il nous a semblé alors intéressant de traîner une plaque plane avec le même montage que pour les voiliers mais en fixant tous les degrés de liberté et de calculer son coefficient de forme. Ces essais ont montré que pour la plaque plane on a bien $1+k = 1$, la valeur importante du coefficient de forme obtenu pour les voiliers n'est donc pas due à une mauvaise procédure d'essai.

Pour rendre l'écoulement turbulent sur les maquettes d'essais, on place à l'avant une bande de sable, nous regardons alors l'influence de la position de cette rugosité sur le coefficient de frottement. Elle est importante sur une plaque plane, par contre elle est négligeable sur la carène du WOR pour lequel trois positions ont été testées en insistant sur les basses vitesses ($Fr < 0,2$).

Le déplacement longitudinal de cette bande n'augmente pas la surface mouillée en zone laminaire de façon aussi significative sur une carène que sur une plaque plane, d'où une influence moindre sur le coefficient de frottement d'une carène.



Figure 4

La traînée de la bande de sable est négligeable devant la traînée totale.

II.2.2-Modification du point de traction:

Pour les essais en gîte et dérive, il convient de traîner la maquette par son centre de voilure, comme nous le verrons ultérieurement; le cas traction droite est également testé avec ce montage. L'assiette et l'enfoncement mesurés sont inférieurs aux résultats expérimentaux de traction droite à la flottaison; la maquette qui avait tendance à se cabrer sur l'arrière conserve maintenant une assiette négative (vers l'avant). Cette différence de position est due au décalage vertical de l'axe de rotation Oy . Il en résulte une résistance mesurée légèrement plus faible que précédemment.

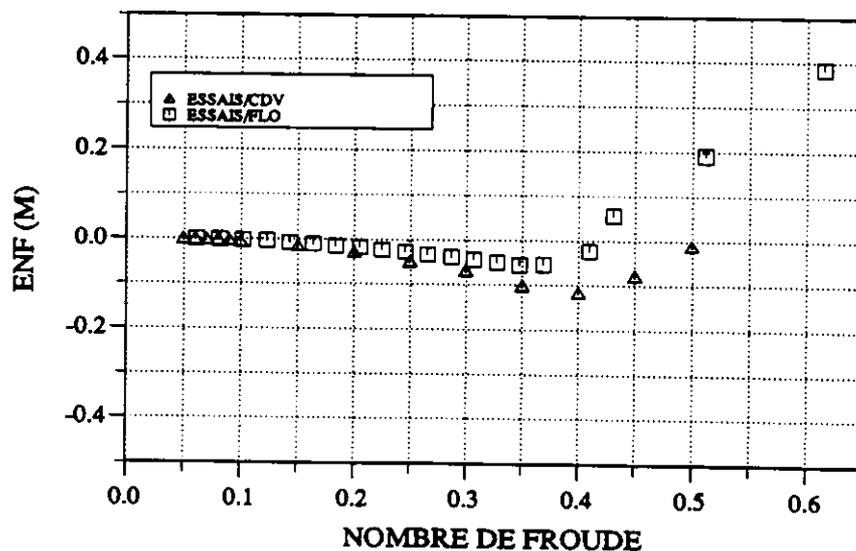


Figure 5. Enfoncement réel.

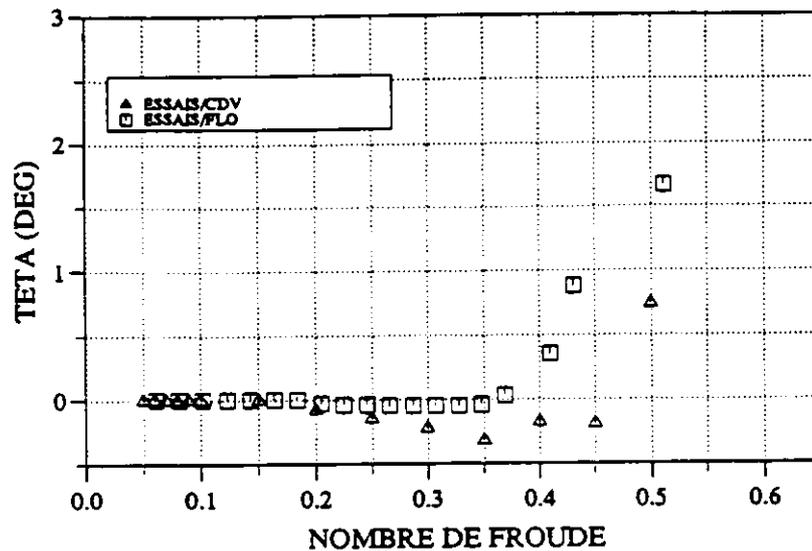


Figure 6. Assiette dynamique.

II.3-Comparaison des formules de Gerritsma avec les essais.

Des essais systématiques sur des carènes de voiliers ont été effectués au bassin de l'Université de Delft et ont permis d'établir par régression polynomiale des formules de résistance résiduaire en fonction des divers paramètres géométriques des carènes [2].

Ces formules sont appliquées au WOR et comparées aux essais en bassin. Pour les trois déplacements considérés la résistance résiduaire calculée par la formule de Gerritsma se rapproche de celle mesurée; aux grandes vitesses, elle est légèrement supérieure. On présente sur la figure 7 les résultats obtenus pour le déplacement intermédiaire choisi pour les essais en gîte.

II.4-Présentation du code REVA [3][4] et comparaison avec les essais.

On a vu précédemment que l'écoulement autour d'un navire est régi par deux types de phénomènes qui peuvent être isolés. On s'intéresse ici au calcul de la résistance de vagues et on va donc considérer le fluide comme parfait. On résout le problème de l'écoulement autour d'un navire avançant à vitesse constante en présence d'une surface libre initialement calme, par une méthode des singularités de Rankine dont on présente ici les grandes lignes.

Il s'agit de résoudre l'équation de continuité qui traduit la conservation de la masse avec les conditions aux limites suivantes: condition de glissement (le fluide ne traverse pas les parois) et conditions de surface libre.

Les vitesses dérivent d'un potentiel scalaire ϕ tel que $\vec{V} = \vec{\text{grad}} \phi$ et les lignes de courant sont définies par $\frac{dx}{\phi_x} = \frac{dy}{\phi_y} = \frac{dz}{\phi_z} = \frac{dl}{\phi_1}$. Le problème va s'écrire:

Equation de continuité

$\Delta \phi = 0$ dans le domaine fluide.

Condition de glissement

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \text{ sur la carène}$$

Conditions de surface libre

$$\varphi_1^2 \varphi_{11} + g\varphi_z = 0 \text{ sur la surface libre d'élévation } \zeta = \frac{1}{2g}(V^2 - \varphi_1^2)$$

Condition de radiation

$$\varphi \rightarrow Vx \text{ à l' } \infty$$

La méthode de résolution est la suivante: on écrit les équations intégrales du problème à partir de la 3e formule de Green. La carène et une partie de la surface libre sont maillées en facettes afin de discrétiser les équations intégrales. Les dérivées des vitesses sont évaluées par différences finies, on obtient alors un système linéaire dont les inconnues sont les densités de sources supposées constantes par facettes. On obtient alors les efforts, les déplacements et la déformée de surface libre. Les déplacements calculés lors d'une première itération permettent de remailler le corps et de refaire un calcul dans sa nouvelle position d'équilibre dynamique.

La carène du WOR est maillée en 600 facettes (avec la quille) et la surface libre en 650 facettes. La condition de surface libre exacte est non linéaire et appliquée sur une surface à priori inconnue. Elle est linéarisée de la façon suivante: on décompose le potentiel total $\varphi = \varphi_r + \varphi_w$, φ_r étant le potentiel de perturbation du double modèle et φ_w un potentiel complémentaire d'ordre supérieur dont on néglige les termes quadratiques devant les autres termes. La condition de surface libre développée au 1er ordre en φ_w , va alors s'écrire:

$$\varphi_{r_1}^2 \varphi_{11} + 2\varphi_{r_1} \varphi_{r_1} \varphi_1 - 2\varphi_{r_1}^2 \varphi_{r_{11}} + g\varphi_z + \zeta g\varphi_{zz} = 0$$

Pour les voiliers, la condition de Dawson modifiée par Nakatake où $\varphi_{wzz} \ll \varphi_{zz}$ et $\zeta_w \ll \zeta_r$ est préconisée par plusieurs auteurs [5]

$$\begin{cases} (\varphi_{r_1}^2 \varphi_1)_1 + g\varphi_z + g\zeta_r \varphi_{zz} = 2\varphi_{r_1}^2 \varphi_{r_{11}} \\ \zeta = \frac{1}{2g}(U^2 - \varphi_1^2) \end{cases} \quad \text{sur } z=0$$

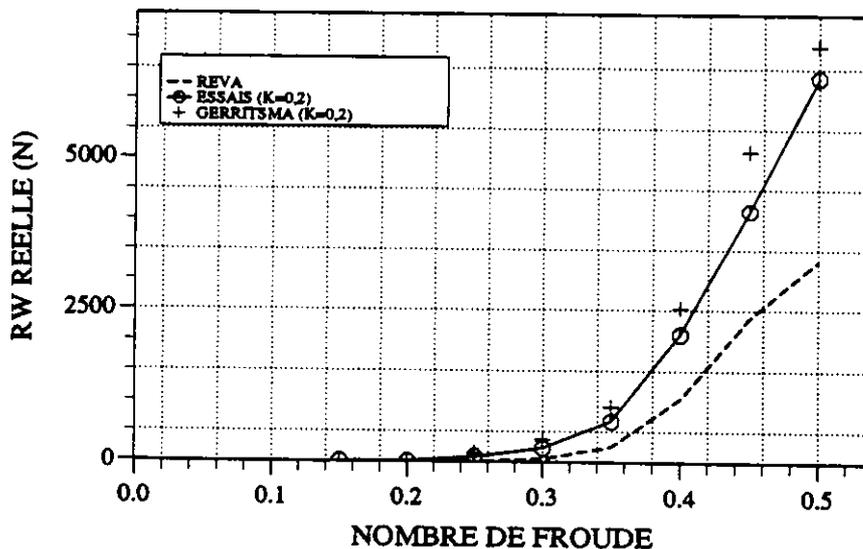


Figure 7. Résistance de vagues

Les résultats obtenus sur le WOR sont inférieurs aux résultats expérimentaux, ce qui nous laisse supposer que la condition de surface libre linéarisée utilisée dans le code REVA, même avec la modification de Nakatake, ne rend pas bien compte de la surface libre réelle obtenue sur des carènes de voilier très plates comme celle étudiée ici. Une formulation non linéaire est en cours de réalisation et devrait permettre une meilleure estimation de la surface libre dans ce cas. La partie immergée de la carène est représentée sur les figures 8 et 9, on remarque ici les formes très plates, surtout à l'arrière de la carène.

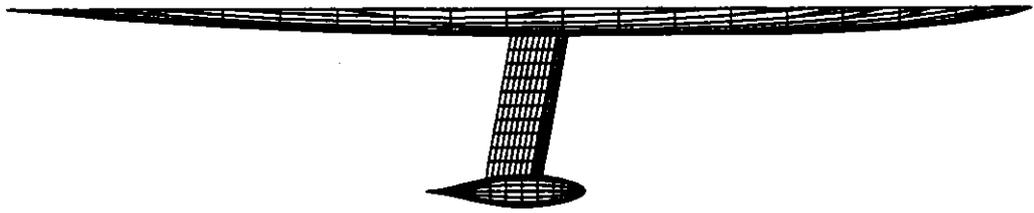


Figure 8

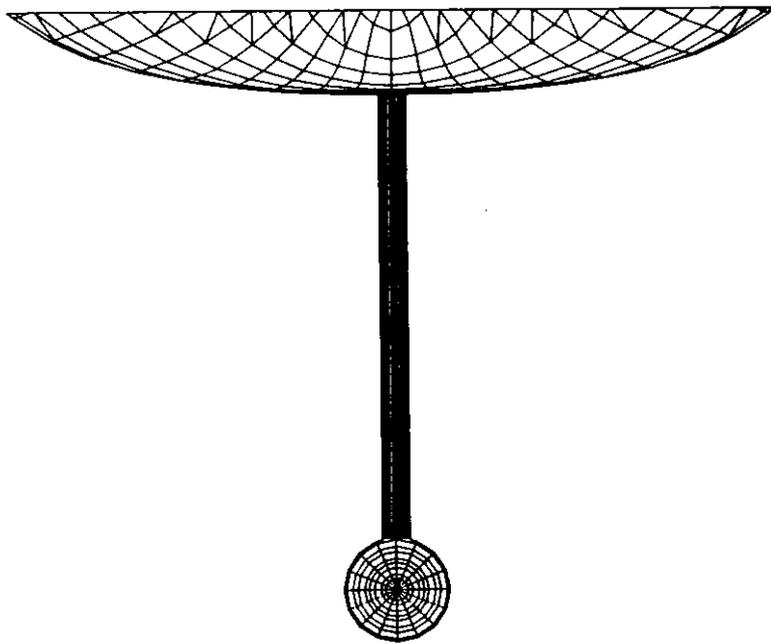


Figure 9

III-TRACTION EN GÎTE ET DERIVE

III.1-Démarche expérimentale

Dans le premier montage, la balance de mesure utilisée est celle présentée pour les essais en traction droite. Une structure en nomex-carbone choisie pour sa légèreté et sa rigidité relie la maquette aux colonnes de guidage. Des rotules à la base des colonnes permettent une rotation autour de Ox (gîte) et autour de Oy (assiette). Ces angles sont mesurés avec des potentiomètres rotatifs; le pilonnement est également libre.

Le procédé d'essais est la suivante: on place la maquette en incidence par rapport à la vitesse d'avance en effectuant une rotation de la balance autour de Oz (le lacet est fixe). La maquette est munie de sa quille à l'échelle sur laquelle s'exerce une portance du fait de l'incidence de l'écoulement. Le décalage vertical du point de traction entraîne la création d'un moment autour de Ox, la maquette prend alors une position d'équilibre enfoncement-assiette-gîte. Les incidences (ou dérives) choisies sont 2, 4 et 6 degrés. Les essais sont réalisés dans un premier temps pour des incidences positives puis négatives afin de s'assurer de la symétrie du montage. Les résultats expérimentaux présentés sont des moyennes sur ces incidences + et -. L'origine du repère (O,x,y,z) est le point de traction.

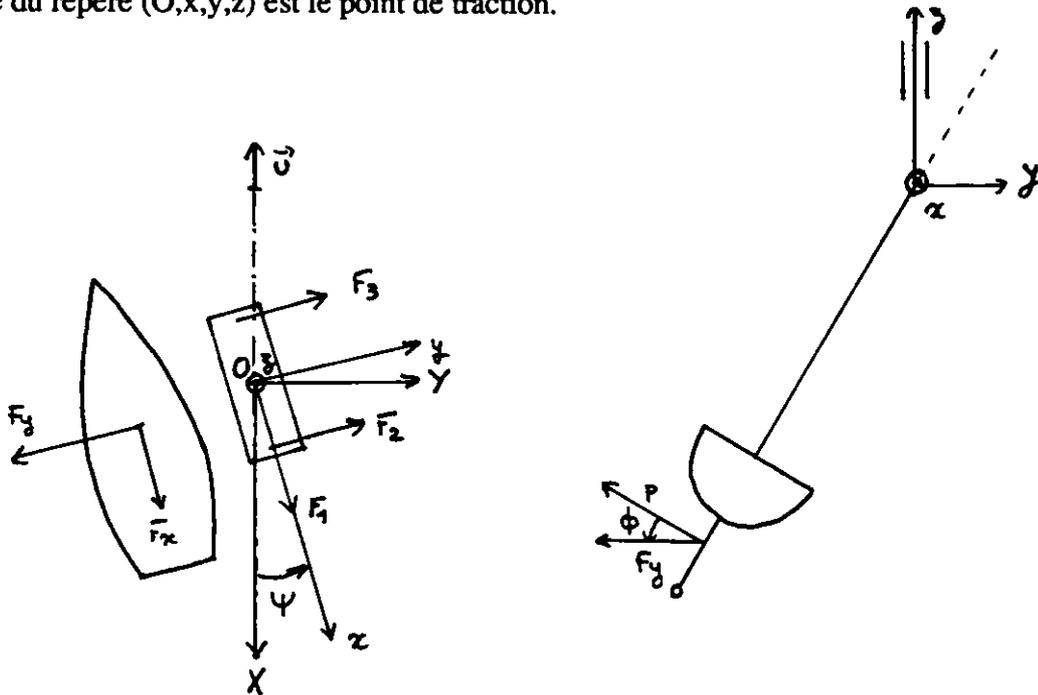


Figure 10.

On mesure dans le repère lié à la balance: $F_x = F_1$ et $F_y = F_2 + F_3$. Dans le repère parallèle à l'axe du bassin, on aura donc la traînée et la force transversale (composante horizontale de la portance P):

$$F_X = F_x \cos(\psi) - F_y \sin(\psi)$$

$$F_Y = F_x \sin(\psi) + F_y \cos(\psi) = P \cos(\phi)$$

Afin de s'approcher de points de fonctionnement réalistes, on introduit un autre degré de liberté: on déplace latéralement une masse d'équilibrage qui va imposer une gîte à la maquette tout en conservant le déplacement total. Pour un même doublet vitesse-dérive, trois essais sont réalisés correspondant à trois positions de la masse: centrée puis décalée de chaque côté. L'évolution de la gîte en fonction de cette position est linéaire quel que soit (V, ψ) . Les cas testés ne correspondent pas nécessairement à des points de fonctionnement réalistes mais ils pourront être obtenus par interpolation linéaire sur ce déplacement de masse, tout au moins pour la gîte; l'assiette et l'enfoncement n'étant pas affectés par ce paramètre.

III.2-Résultats expérimentaux.

III.2.1-Résistance de vagues.

$$RW = FX - 1.2 R_{FITTC} \text{ avec } FX = F_x \cos(\psi) - F_y \sin(\psi)$$

On représente RW en fonction du nombre de Froude, pour les trois incidences considérées. Jusqu'à $Fr = 0,25$, on note peu d'écart entre les trois courbes. Pour trois incidences différentes au même Froude, la position du bateau en gîte et assiette n'est pas du tout la même. On remarque ici la difficulté d'isoler les différents paramètres intervenant dans le calcul des efforts. De plus la résistance de vagues présentée ici est extrapolée avec une résistance de frottement et un coefficient de forme calculés pour la carène en traction droite au même Froude sans tenir compte de la dérive, de l'assiette et de la gîte, ni des modifications de longueur à la flottaison et de surface mouillée.

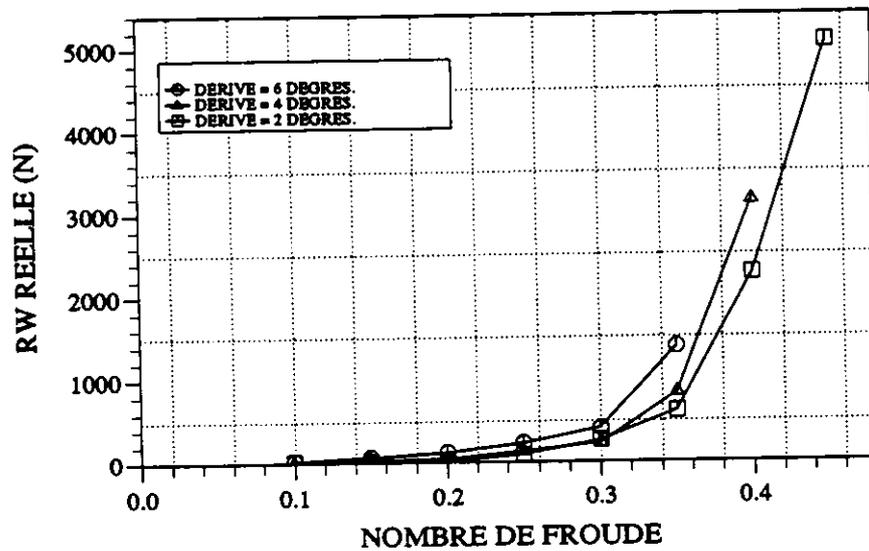


Figure11. Résistance de vagues expérimentale en gîte et dérive

III.2.2-Composante horizontale de la portance.

$$F_Y = F_x \sin(\psi) + F_y \cos(\psi)$$

Son évolution en fonction de la dérive est linéaire aux faibles vitesses. A gîte constante, malgré les conditions différentes d'écoulement (vitesse et incidence), F_Y est le même quelle que soit la dérive imposée. Si on trace maintenant F_Y en fonction de la vitesse, plus la dérive est élevée et plus F_Y est importante; il faut noter une différence d'évolution entre les trois courbes: pour 4 et 6 degrés les courbes ont la même évolution, par contre pour 2 degrés elle est pratiquement linéaire.

III.2.3-Essais avec safran.

Quelques essais ont été réalisés en fixant le safran dans l'axe. Pour les trois dérivés, la portance et la gîte augmentent dans les mêmes proportions par rapport aux essais sans safran.

III.3-Calculs REVA et comparaison avec les essais.

Les calculs REVA sont réalisés en modèle fixe, dans les configurations expérimentales: le point de calcul (origine des rotations) choisi est l'intersection des deux axes de mesure d'assiette et de gîte, point dont on connaît l'enfoncement expérimental puisqu'il est situé à la verticale de la colonne avant. Pour chaque Froude, le bateau est mis dans une position initiale correspondant aux essais: ψ , θ , ϕ , enfoncement.

Les effets portants sont essentiellement dus à des effets visqueux; dans un calcul fluide parfait on définit une distribution de doublets normaux sur le profil et son sillage qui va engendrer une circulation représentant ces effets portants. On satisfait de plus une condition de Joukowski en imposant que les pressions sont égales sur les deux côtés du bord de fuite.

Deux méthodes de calcul sont utilisées pour le calcul des efforts:

- Intégration des pressions sur le bateau complet.
- Méthode du plan de Trefftz [6] sur le profil et méthode de Lagally sur la carène.

On a une bonne adéquation entre les essais et les calculs pour une dérive de 2 degrés, tant pour la résistance de vagues que la force transversale. Lorsque la dérive augmente le calcul sous-estime la résistance de vagues et surestime la portance. La figure 14 représente la déformée de surface libre pour une dérive de 2 degrés et un nombre de Froude de 0,45.

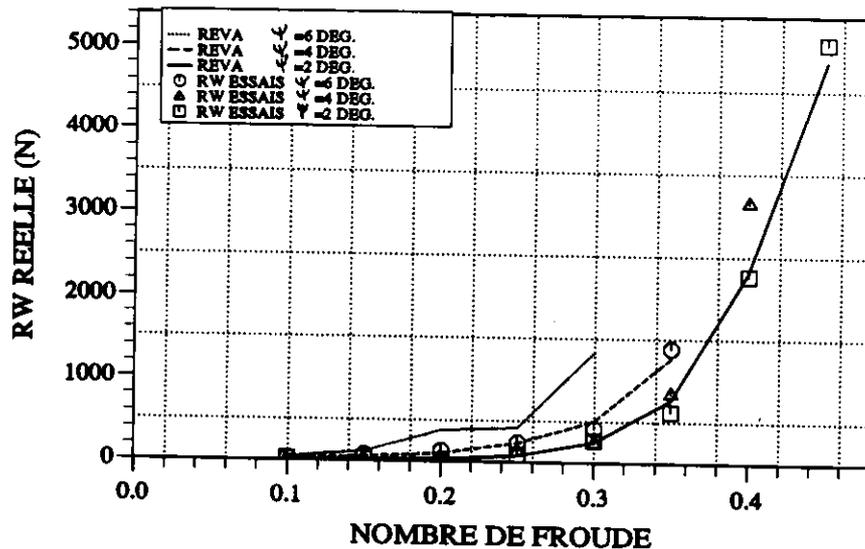


Figure 12. Résistance de vagues en gîte et dérive.

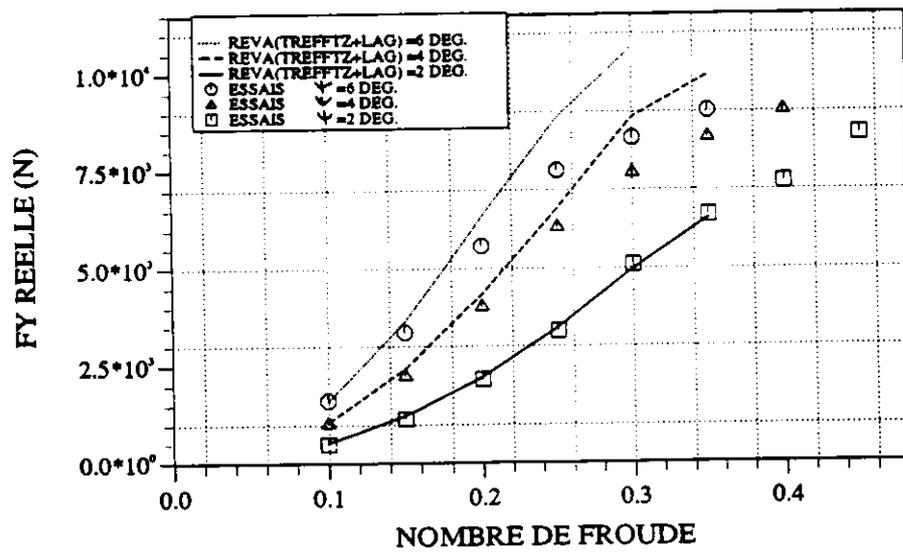


Figure 13. Force transversale.

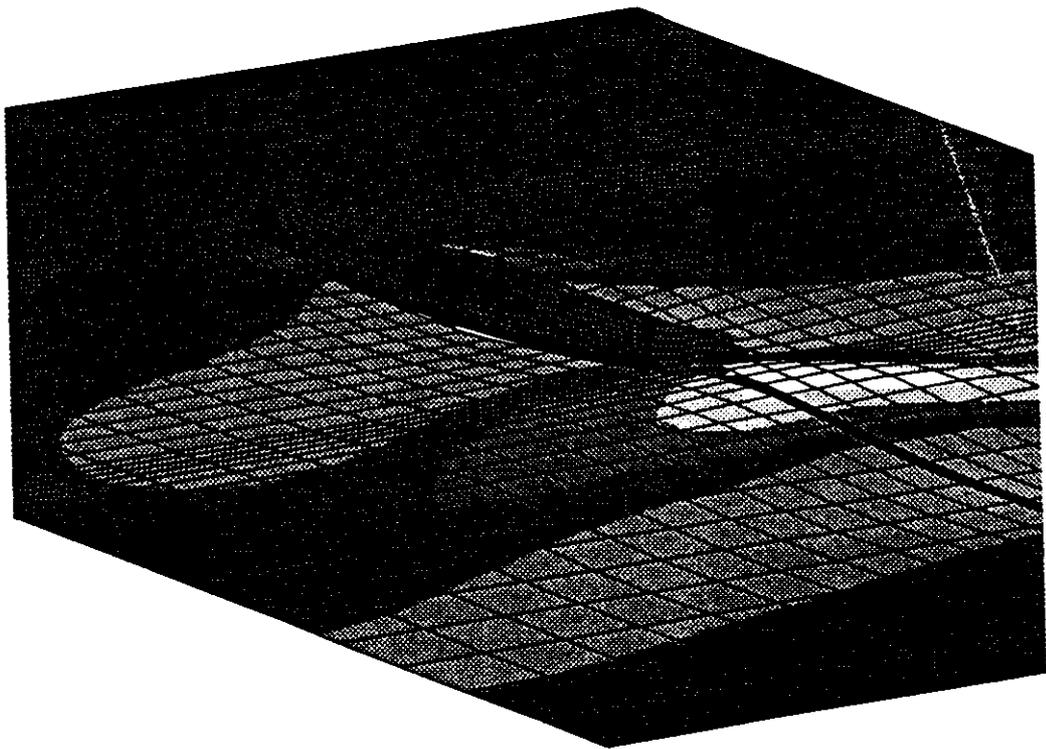


Figure 14. Déformée de surface libre.

III.4-Présentation du nouveau montage expérimental pour les essais en gîte et dérive.

Une nouvelle balance de mesures est actuellement en construction, elle est composée de 6 capteurs à jauges plus stables que les capteurs à quartz précédemment utilisés et qui vont permettre d'obtenir les 6 composantes forces et moments.

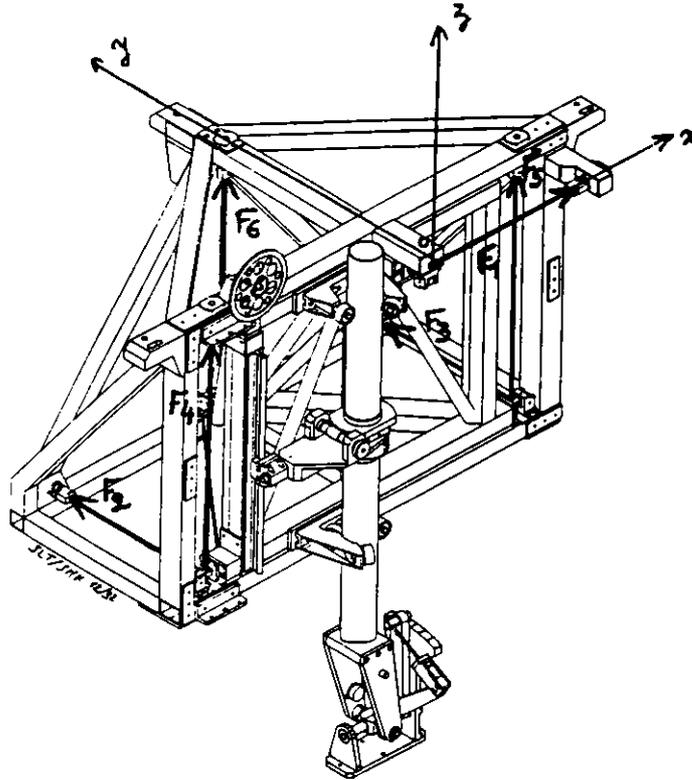


Figure 15. Schéma d'ensemble de la balance 6 composantes.

Soient $F_1...F_6$ les mesures obtenues sur les 6 capteurs on a:

$$F_x = F_1$$

$$F_y = F_2 + F_3$$

$$F_z = F_4 + F_5 + F_6$$

$$M_x = (F_2 + F_3) z_1 + F_6 y_2 + (F_4 + F_5) y_1$$

$$M_y = (F_4 - F_5) x_1$$

$$M_z = (F_3 - F_2) x_2$$

Le bateau n'est plus guidé que par une seule colonne, la gîte est fixée et la maquette est libre en assiette et pilonnement. L'avantage de cette méthode est d'une part d'obtenir tous les efforts mais également de ne pas être contraint par le temps de mise en équilibre du bateau. La position de la maquette est en partie imposée (dérive, gîte) on peut donc supposer qu'elle sera plus éloignée des conditions réelles que dans le montage précédent, mais le fait de fixer les degrés de liberté de manière indépendante permet d'étudier séparément l'influence de chaque paramètre sur les efforts.

Des essais avec la maquette du WOR déjà testée seront réalisés afin de comparer les deux montages et de définir la procédure la plus efficace pour réaliser des essais systématiques.

IV-CONCLUSION

Les résultats expérimentaux obtenus avec le premier montage ont montré les limites de celui-ci; il ne permet pas de mener des essais à grandes vitesses car l'état d'équilibre est difficile à atteindre sur la longueur du bassin.

De plus, ce montage ne permet pas l'étude de l'influence de chaque paramètre sur les efforts car seule la dérive est fixée, les autres grandeurs (assiette, enfoncement, gîte) évoluant simultanément pour chaque essai.

Les résultats obtenus avec le code REVA ont mis en évidence la nécessité de prendre en compte les non-linéarités pour le calcul sur des carènes plates.

Nous nous sommes limités pour l'instant à l'étude du voilier sur eau calme, il conviendra, dans le futur, de s'intéresser à son comportement sur houle.

V-BIBLIOGRAPHIE

- [1]: PROHASKA C.W "A Simple Method for the Evaluation of the Form Factor and Low Speed Wave Resistance". Proceedings 11th ITTC. 1966.
- [2]: GERRITSMAN J, KEUNING J.A, ONNINK R. "Geometry, Resistance and Stability of the Delft Systematic Yacht Hull Series". 5th HISWA Symposium Amsterdam. 1977
 "Serie II" 10th Chesapeake Sailing Yacht Symposium. Annapolis 1991.
 "Serie III" Technical University Delft. 1992
- [3]: DELHOMMEAU G. "Problème de Diffraction Radiation et de Résistance de Vagues: étude théorique et résolution numérique par la méthode des Singularités". Thèse de Doctorat ès Sciences. LHN, ENSM Nantes. 1987
- [4]: MAISONNEUVE J.J "Résolution du problème de Résistance de Vagues par la méthode des Singularités de Rankine". Thèse de Doctorat. LHN, ENSM Nantes. 1989
- [5]: LARSSON L "Scientific Methods in Yacht Design". Annual Review of Fluid Mechanics. 1990.
- [6]: GREELEY D.S, CROSS-WHITE J.H "Design and Hydrodynamic Performance of Sailboat Keels". Marine Technology. 1989