

10^{èmes} JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

Nantes, 7, 8 et 9 mars 2005

ETUDES DES SOLLICITATIONS MECANQUES ET
HYDRODYNAMIQUES SUR UN VOILIER COLLE ET INSTRUMENTE

***HYDRODYNAMIC AND MECHANICAL LOADING ON A SAILING
YACHT EQUIPPED WITH A MEASUREMENT DEVICE***

**ANNETTE ROY¹, YVES NADOT², PASCAL CASARI³, MALICK BA⁴, MICHEL
GUILBAUD⁴ ET SERGE HUBERSON⁴**

¹ CRITT Matériaux Poitou- Charentes, Avenue Marcel Dassault, BP 115, 17303 Rochefort Cedex,
a.roy@critt-materiaux.com

² LMPM-ENSMA, site du Futuroscope, BP 40 109, 86961 Futuroscope Cedex,
yves.nadot@lmpm.ensma.fr

³ GeM - Faculté des Sciences de Nantes - 2, rue de la Houssinière - BP 92208 - 44322 NANTES Cedex 3

⁴ : LEA, Téléport 2, Boulevard Marie et Pierre Curie, BP 30179, 86962 Futuroscope Cedex et ENSMA

Résumé

Dans le cadre d'une action collective (financement DRIRE, Région Poitou Charentes et FEDER) menée avec des industriels du nautisme sur l'étude du collage structural, un voilier prototype entièrement collé et instrumenté a été réalisé. Ce voilier de 5m50 permet de réaliser des mesures de déformation de la structure en cours de navigation. Une partie de l'instrumentation est dédié à l'acquisition des efforts extérieurs au voilier : compression du mât, traction du gréement et des voiles, efforts sur la quille et mesure indirecte de pression sur le bordé. Ces mesures peuvent servir de validation expérimentale à des simulations numériques hydrodynamique réalisées en utilisant le code de calcul Poséidon [1] développé au LEA. La partie calcul de structure étant réalisée au moyen du code Catia.

Summary

In order to validate the in situ mechanical loading conditions of adhesive bonded joint, a special sailing yacht has been designed and built using only adhesive. The originality of this boat is the measurement device using strain gages. This device measures external loading such as : the compression of the mast, tension on shrouds and sails, loading between shell and quill and indirect pressure on the shell. These experimental measurements represent a data bank very useful for the validation of hydrodynamics simulations realised using a home made design code called Poseidon [1], developed at LEA. From the knowledge of the pressure map on the shell, the mechanical behaviour of the structure can be determined using Catia FEM code.

I PRESENTATION DU PROJET

On présente ici les résultats d'une étude couplée entre des calculs de structure et des calculs d'efforts hydrodynamiques sur une coque de voilier. Celle-ci a pour but de compléter un programme d'étude visant à améliorer les connaissances des efforts subis par la structure du bateau lui-même et mis en place il y a deux ans à l'initiative d'un regroupement de cinq partenaires techniques et trois chantiers nautiques, un formulateur d'adhésif, un architecte naval et la FINSA, avec le soutien du ministère de l'industrie et de la région Poitou-Charentes et de l'Europe.

Dans le domaine de la construction nautique de plaisance, les divers éléments de la structure (coque, pont, cloisons) sont souvent des matériaux de nature différente. L'assemblage de ces constituants est réalisé soit mécaniquement (vis, rivets) ce qui fragilise les matériaux, soit par un joint de résine chargée (pour le positionnement) recouvert d'une stratification (pour la tenue mécanique). Ce dernier procédé est très long à mettre en œuvre et donc coûteux en main d'œuvre. Le collage structural pourrait donc être, à plusieurs titres, une alternative judicieuse pour assembler ces composites entre eux ou avec des éléments de nature différente (bois, métal, verre). Le remplacement de la technique d'assemblage traditionnelle de re-stratification par le collage structural peut générer des gains en temps de main d'œuvre allant jusqu'à 50 %.

On entend par collage structural, une liaison collée susceptible de transmettre suffisamment d'efforts pour participer à la rigidité d'ensemble de la structure. Cette technologie est maintenant bien maîtrisée dans l'industrie aéronautique, notamment pour les composites carbone-époxyde. Le collage structural est également en plein essor dans de nombreux autres secteurs industriels tels que l'automobile, le ferroviaire, etc.. Cependant, l'industrialisation du collage structural développée dans ces secteurs n'est pas directement transférable au nautisme du fait de conditions de sollicitations spécifiques au milieu marin et de la nature des matériaux et surtout des procédés mis en œuvre très différents des matériaux aéronautiques.

Si le dimensionnement de la structure d'un bateau est aujourd'hui un problème relativement bien maîtrisé, l'introduction de techniques nouvelles entraîne en retour la nécessité de mieux connaître les efforts s'exerçant sur les liaisons et par suite ceux qu'exercent le vent et la mer sur le bateau. Cela définit le problème d'interaction fluide/structure que l'on se propose d'étudier. Pour cela, le programme d'étude mentionné plus haut a permis la mise en œuvre d'un voilier laboratoire collé spécialement construit et instrumenté (voir démarche figure 1). Une première campagne d'essais en mer a été réalisée. Elle a permis de recueillir des données sur les efforts exercés sur le bateau dans différentes conditions de navigation.

Pour mieux comprendre et interpréter celle-ci, une modélisation numérique du bateau a été entreprise. Le modèle actuellement mis en œuvre utilise un calcul éléments finis par le logiciel Catia pour les calculs de structure. Pour les calculs hydrodynamiques, le code Poséidon développé au LEA de Poitiers [1] est utilisé. Celui-ci utilise une méthode de singularités du premier ordre avec les fonctions de Green de résistance de vagues et de diffraction-radiation avec vitesse d'avance (domaine fréquentiel) qui satisfont une condition linéarisée de surface libre. On peut calculer ainsi la distribution de pression stationnaire et instationnaire ainsi que les efforts sur la coque ou sur une partie de celle-ci. Ces résultats constituent les entrées nécessaires au calcul de structures. Les champs de pression obtenus seront appliqués au bordé de la coque comme chargement extérieur

II UN PROTOTYPE ENTIEREMENT COLLE ET INSTRUMENTE

II.1 Une technique d'assemblage performante : le collage structural

Comme exposé dans la section 1, la technique de collage est une alternative très intéressante aux procédés classiques (restratification ou fixation mécanique). Dans le cadre de cette étude, l'adhésif testé est un adhésif vinylester faiblement chargé (8 % de silice et 9 % de tri hydrate d'alumine) de la société Reichhold : FI-184 [2]. Cet adhésif cumule des propriétés de mise en œuvre adaptées aux contraintes du nautisme et des propriétés mécaniques intéressantes surtout en vieillissement en milieu humide. Il est par ailleurs compatible avec les produits utilisés aujourd'hui en terme de coût de revient. Afin de valider expérimentalement le procédé et sa tenue dans le temps, un voilier prototype a été entièrement collé avec cette colle vinylester. Seule la quille, le safran et le gréement sont boulonnés sur la structure. Par ailleurs, aucune stratification ne vient renforcer la structure des joints collés. Que ce soit au niveau des liaisons coque pont (collage simple recouvrement) qu'au niveau des liaisons cloison coque (collage en T). Le voilier a déjà subi une première campagne d'essais en mer dont des talonnages sévères et aucun endommagement n'a été observé à ce jour. En parallèle à ces essais en mer un grand nombre de tests sont réalisés sur éprouvette en laboratoire sur la préparation des surfaces à coller et la résistance mécanique sous différentes sollicitations.

II.2 Conception d'un voilier instrumenté

L'objectif premier de ce projet est de valider la technique de collage structural en utilisant des éprouvettes représentatives de la structure et des conditions de sollicitation. Pour arriver à définir l'état de sollicitation des liaisons collées dans le bateau, une partie de l'instrumentation a été dédiée à la mesure des efforts extérieurs appliqués au voilier. C'est cette partie de l'instrumentation qui sera utilisable pour la validation expérimentale en condition réelle des calculs hydrodynamiques réalisés sur le voilier complet.

Pour la définition de l'instrumentation, notre démarche a consisté à concevoir le voilier dans le but de mesurer les efforts et non pas d'instrumenter un bateau existant. Cela permet de définir et calculer les liaisons de façon optimum vis à vis des mesures et des calculs à réaliser par la suite. La section II.2.1 illustre les choix de conception effectués pour le prototype.

II.2.1 Démarche et choix de l'instrumentation

Afin d'illustrer la démarche de conception de ce voilier prototype, nous avons choisi de décrire l'instrumentation pour deux liaisons : les efforts extérieurs de la quille vers la coque et les efforts internes au niveau de la liaison varangue-coque.

La figure 2 présente une vue du bateau dans son dispositif d'étalonnage au chantier. On peut constater que la quille est fixée sur le bateau par le moyen d'un unique boulon creux dans lequel on trouve l'instrumentation à l'abri du milieu marin. Ce boulon de quille original génère une fixation de la quille sur la coque purement isostatique, ce qui permet d'obtenir des mesures indépendantes de précontraintes inévitables dans un assemblage hyperstatique. Ce boulon de mesure permet de mesurer directement 4 des composantes du torseur des efforts (L, M, N et Z), les deux autres ne peuvent être obtenues qu'au moyen d'un étalonnage dans certaines conditions de navigation.

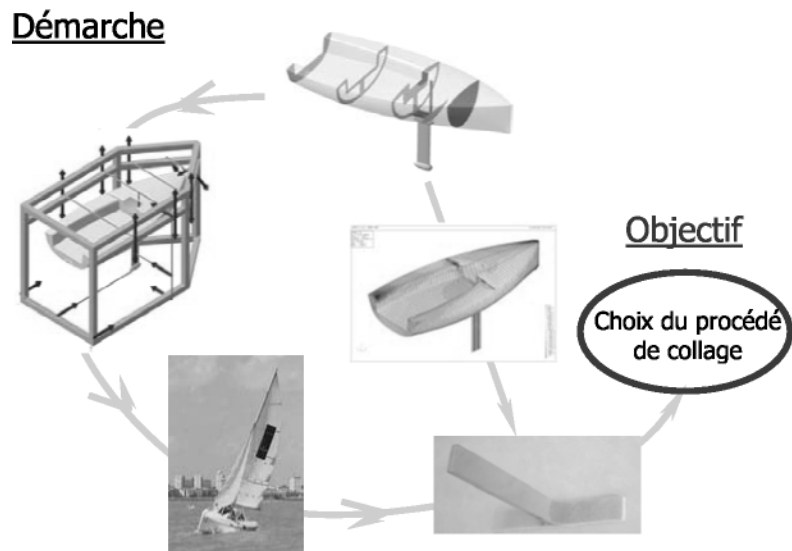


Figure 1 : Démarche de l'ensemble du projet



Figure 2 : Vue du bateau en position de mesure sur le chantier et détail du capteur de quille (jonction entre la quille et la coque)

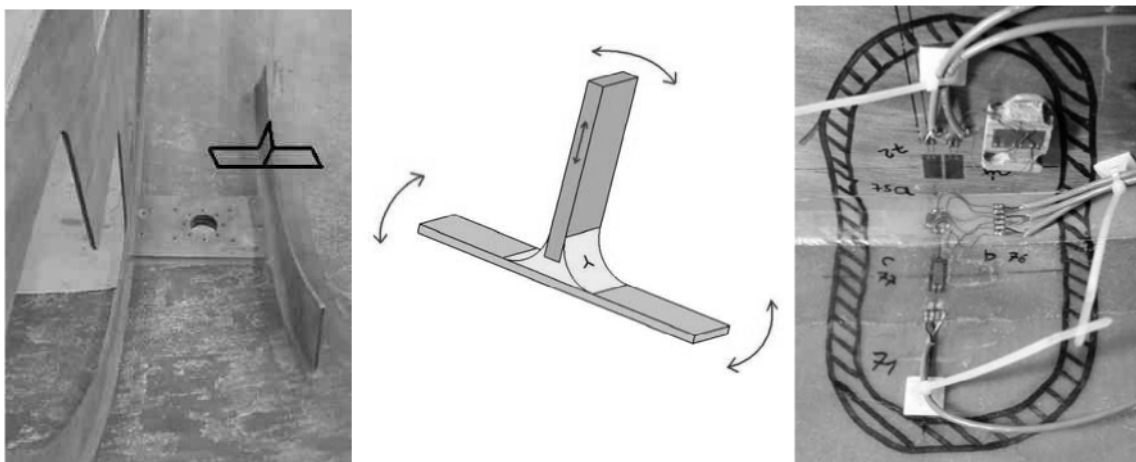


Figure 3 : détail de l'instrumentation de la varangue et dessin de l'éprouvette de laboratoire

$$\tau_s(\text{quille/coque}) \equiv \left. \begin{array}{c} X \\ Y \\ Z \end{array} \right\} \left. \begin{array}{c} L \\ M \\ N \end{array} \right\} R$$

La figure 3 présente la liaison collée en T varangue-coque ainsi que l'instrumentation associée. Le choix a été fait sur cette liaison de faire deux types de mesures : une mesure ponctuelle par rosette sur le joint de colle et une mesure d'effort extérieur plus globale à la liaison en utilisant un montage en demi-pont qui permet de mesurer la flexion du bordé de chaque côté de la cloison ainsi que la traction et la flexion de la cloison. Ces mesures nous permettront de définir le chargement représentatif de la structure à appliquer à une éprouvette de laboratoire.

II.2.2 Etalonnage de l'instrumentation en laboratoire

La première étape de mesure a consisté à torturer le voilier dans une 'cage aux folles' en chantier afin de réaliser l'étalonnage du système de mesure mais aussi de réaliser des cas de chargement parfaitement maîtrisés du point de vue des conditions aux limites. Ceci dans le but de valider expérimentalement les calculs effectués. Cette étape de validation est essentielle pour faire une validation correcte du modèle numérique pour les calculs mécanique.

Nous avons comparé expérience et simulation numérique dans le cas d'un effort de traction de la quille vers l'arrière. La mesure de la déformation dans le plot de quille obtenue numériquement s'éloigne de 10 % de l'expérience réalisée au chantier (figure 4).

Malheureusement, ces confrontations sont les seules réellement quantitatives obtenues à ce jour car notre modèle numérique n'est pas encore assez avancé pour comparer les expériences au chantier avec les simulations autour des joints de colle.

II.2.3 Mesures en navigation des efforts externes (quille, grément, vagues)

Des problèmes techniques n'ont pas permis pour cette première campagne d'essais de retirer des informations quantitatives sur le grément. A ce jour, quelques résultats quantitatifs ont été obtenus sur la quille dans des cas de talonnage et choc dans une vague.

La figure 5 présente le cas du talonnage sur une cale de mise à l'eau inclinée à la vitesse de 3 nœuds sachant que le poids bateau en charge est de 700 kg. Cette expérience permet de mesurer l'effort équivalent en pied de quille : au maximum lors du choc, le bateau voit un effort équivalent à une force de 3500 N en pied de quille vers l'arrière.

Dans le cas de navigation au près tribord amure à 4 nœuds par 12 nœuds de vent réel et un clapot de 50 cm, un choc volontaire face à la vague génère un effort équivalent en pied de quille de 3000 N vers l'arrière au maximum du choc.

II.2.4 Mesures en navigation des efforts internes (liaisons collées)

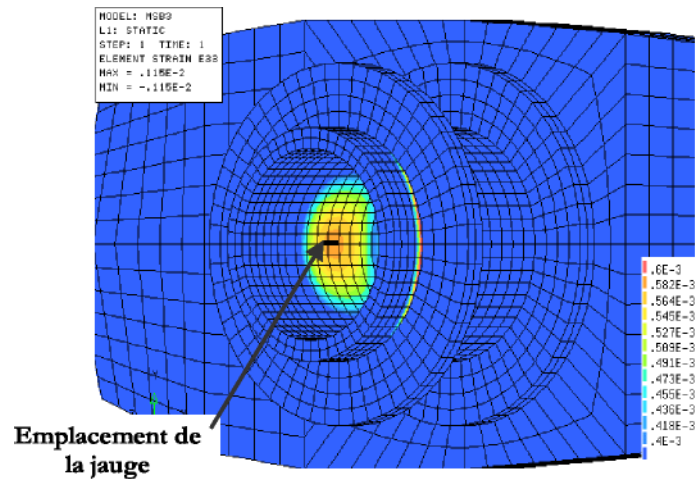


Figure 4 : Calcul de la déformation dans le boulon de quille à l'endroit de la jauge de déformation.

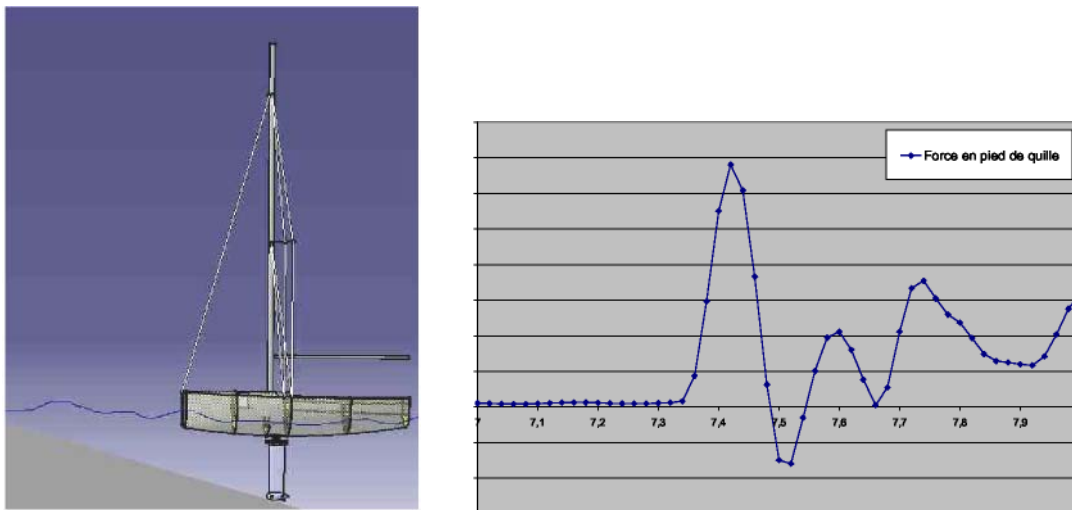


Figure 5 : Choc sur une cale à 3 nœuds

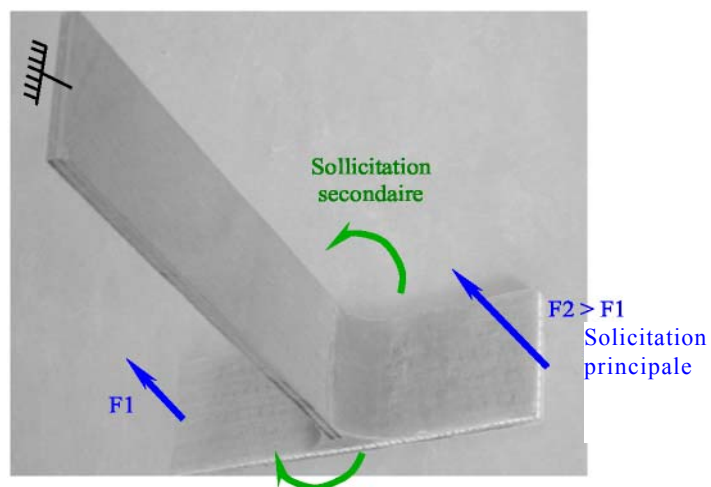


Figure 6 : Chargement représentatif des sollicitations en mer à appliquer aux éprouvettes

La mesure des efforts internes aux liaisons est l'objectif principal de cette première campagne de mesures. En effet, notre objectif est de déterminer le chargement représentatif des conditions de navigation à appliquer aux éprouvettes de laboratoire afin de pouvoir tester et optimiser les procédés de collage. La figure 6 présente le résultat de l'étude sur les éprouvettes en T. En combinant l'ensemble des cas de chargement traités (talonnage, choc dans une vague au près, virements de bord), nous avons pu établir un cahier des charges de l'éprouvette type de la liaison en T. Cette éprouvette va subir un effort de compression non symétrique sur le bordé qui vient de la variation de pression sur le bordé lors du choc dans une vague au près. A cette sollicitation, s'ajoute un chargement latéral qui représente la variation de pression autour d'un couple.

III MODELISATION NUMERIQUE

III.1 Objectifs et démarche

Le problème que nous voulons résoudre est celui de l'évaluation des contraintes dans la structure d'un voilier dans des conditions de navigation supposées parfaitement déterminées. Il s'agit là d'une approximation et nous ne tenons pas compte des variations de l'état de la mer et du vent que rencontre ordinairement un bateau. Les efforts sur la structure sont dus à l'action combinée des efforts aérodynamiques sur les voiles et des efforts hydrodynamiques sur la carène. Le couplage entre ces deux derniers éléments a déjà été étudié et nous nous intéressons ici au couplage entre les efforts hydrodynamiques et les efforts dans la structure.

La réalisation d'un modèle numérique de bateau complet simultanément à l'exploitation d'un voilier laboratoire repose sur deux motivations importantes. La première est de disposer d'un modèle prédictif applicable à d'autres voiliers sans qu'il soit nécessaire de recourir à de coûteux essais sur un bateau réel. Il s'agit d'un objectif à long terme qui suppose que la modélisation de l'ensemble des phénomènes, en particulier la modélisation des collages, soit suffisamment maîtrisée. A plus court terme, un modèle numérique complet peut également être utilisé comme un outil d'aide à l'exploitation des données recueillies lors des essais en mer. Il est en effet difficile, voir impossible de maîtriser la totalité des conditions de navigation et donc de comparer des résultats de mesure avec les résultats de calcul. La simulation numérique des différentes conditions compatibles avec un ensemble de mesure donnée apporte une réponse à ce problème.

III.2 Chargement hydrodynamique calculé par simulations numériques

Pour déterminer les efforts hydrodynamiques sur la partie immergée de la coque, on a utilisée une résolution par méthode intégrale de frontière du problème de tenue à la mer avec vitesse d'avance linéarisée. La méthode de calcul et le code de calcul Poséidon ont été déjà présentés, et en particulier son utilisation sur des coques de voiliers, lors de précédentes Journées Hydrodynamiques, cf. Roux et al. [3]. Le code utilise la fonction de Green de résistance de vagues. Pour modéliser les effets portants pour un bateau en dérapage, on utilise une distribution de doublets sur le plan de symétrie de la carène et sur des bandes semi infinies s'étendant depuis la partie arrière de la coque et de la quille jusqu'à l'infini aval. On a alors besoin d'intégrer non seulement cette fonction de Green et ses dérivées premières et secondes sur des panneaux ou des segments élémentaires mais encore les dérivées secondes, dont on a montré que la difficulté augmentait avec l'ordre de

dérivation, Boin et al. [4]. Ces intégrations ont été faites en adaptant ce qui a été faite pour la fonction de Green de diffraction-radiation avec vitesse d'avance.

III.2.1 La fonction de Green de résistance de vagues et son intégration

Cette fonction est facilement dérivée de celle de diffraction-radiation avec vitesse d'avance pour $\tau = \omega U / g \rightarrow 0$ (ω pulsation de rencontre et U vitesse d'avance). Le seul pôle restant est donné par $K_s = 1/(F^2 \cos^2 \theta)$ ($F = U / \sqrt{gL}$), (Boin [1]) et la fonction de Green peut s'écrire:

$$G_s(M, M') = \Re \{G_0(M, M') + Gw(M, M')\} \text{ avec } Gw(M, M') = \Re \left\{ \frac{-2}{\pi L o} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} K_s g_1(K_s \xi) \right\}.$$

L'intégration sur une facette donne:

$$\iint_S Gw ds' = \frac{-2}{\pi} \Re \left\{ \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \sum_{k=1}^m C_k D_k d\theta \right\} \text{ avec } D_k = \frac{\left[\int d\xi \int g_1(\xi) d\xi \right]_{\chi_k}^{\chi_{k+1}}}{\chi_{k+1} - \chi_k} \text{ et}$$

$C_k = (q - ir \sin \theta) \cdot (x'_{k+1} - x'_k) - (p - ir \cos \theta) \cdot (y'_{k+1} - y'_k)$. g_l est la fonction exponentielle intégrale complexe modifiée, $g_1(\xi) = e^\xi \varepsilon_1(\xi)$, E_1 est la fonction exponentielle intégrale complexe d'ordre 1, définie par:

$$E_1(\xi) = \int_{\xi}^{\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt \text{ si } -\pi < \arg(\xi) < \pi; \text{ et } E_1(\xi) = \int_1^{\infty} \frac{e^{-\xi t}}{t} dt \text{ if } \Re(\xi) > 0. \text{ De plus, on a:}$$

$$\chi_k = \frac{K_s}{L o} \left[z + z'_k + i \left[(x - x'_k) \cos \theta + (y - y'_k) \sin \theta \right] \right]. \text{ On a contrôlé que les résultats obtenus étaient identiques à ceux obtenus dans le cas instationnaire avec } \omega \rightarrow 0 \text{ (} \varpi = \omega \sqrt{L o / g} = 0,01 \text{), cf. [1].}$$

La difficulté principale vient de l'intégration dans les bandes semi infinies du sillage. Les méthodes numériques de type Gauss sont à proscrire, le domaine d'intégration n'étant pas borné, il est difficile de positionner les points de calcul et de vérifier une quelconque convergence. Le problème stationnaire est plus facile à traiter. Le terme dépendant du nombre de Froude peut être traité en utilisant la forme intégrée sur une facette et en faisant tendre un des segments vers l'infini aval, figure 7. Par exemple, pour la dérivée seconde par rapport à z , on obtient:

$$\iint_{\Sigma_1} \frac{\partial^2 Gw_2(M, M')}{\partial z^2} ds' = \frac{-2}{\pi L o^2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \left\{ \sum_{k=1}^4 K_s^2 C_k \frac{g_1(\chi_{k+1}) - \frac{1}{\chi_{k+1}} - g_1(\chi_k) + \frac{1}{\chi_k}}{\chi_{k+1} - \chi_k} \right\} d\theta$$

Cette méthode n'est plus applicable en instationnaire. Un terme multiplicatif supplémentaire représentant les oscillations du sillage vient s'ajouter dans le calcul de l'intégrale. Ce terme complique énormément l'évaluation de celle-ci. Les intégrales à traiter sont de deux types. Elles interviennent dans le calcul du potentiel et de la vitesse instationnaires. Le terme multiplicatif $e^{(x_0 - x_{BF})}$ où $x_0 - x_{BF}$ est la distance au bord de fuite, complique l'évaluation par rapport au cas stationnaire. Les intégrales sont calculées de manière discrète sur un nombre fini de longueurs d'onde.

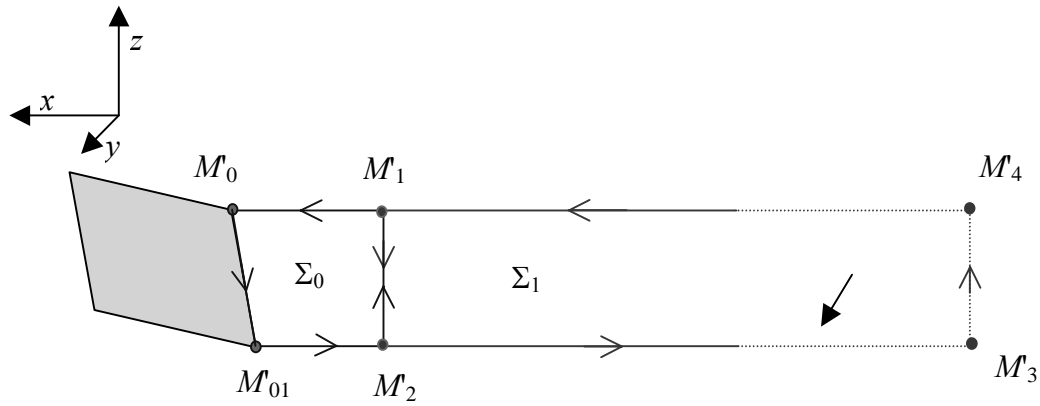


Figure 7 Intégration sur une bande semi-infinie

Pour valider la méthode, des résultats sur l'intégrale de la dérivée seconde par rapport à z^2 sont présentés sur la figure 8. La bande semi-infinie s'appuie sur le segment porteur $[(0;0;-0,01),(0;0;-1,01)]$, le point champ parcourt un axe parallèle à (Ox) passant par $(0,0,-0,51)$. Le nombre de Froude est pris égal à 0,6, la longueur de référence est $L_0=1\text{m}$, les erreurs relative et absolue sont $\varepsilon_{rel} = \varepsilon_{abs} = 10^{-4}$. L'intégrale sur la bande semi-infinie est comparée à l'intégrale sur une facette finie de longueur très importante. La facette est définie par les points $(0;0;-0,01)$, $(0;0;-1,01)$, $(-1000;0;-1,01)$ et $(-1000;0;-0,01)$. Cette figure présente la valeur de l'intégrale ainsi que l'écart entre les deux calculs. Les résultats concordent parfaitement, l'écart maximal n'est que de $5 \cdot 10^{-4}$. Il aurait été possible de se contenter de l'intégration sur une facette très longue, cependant le passage à la limite permet d'avoir un temps de calcul plus court. L'intégration se fait sur un seul segment contre quatre pour une facette.

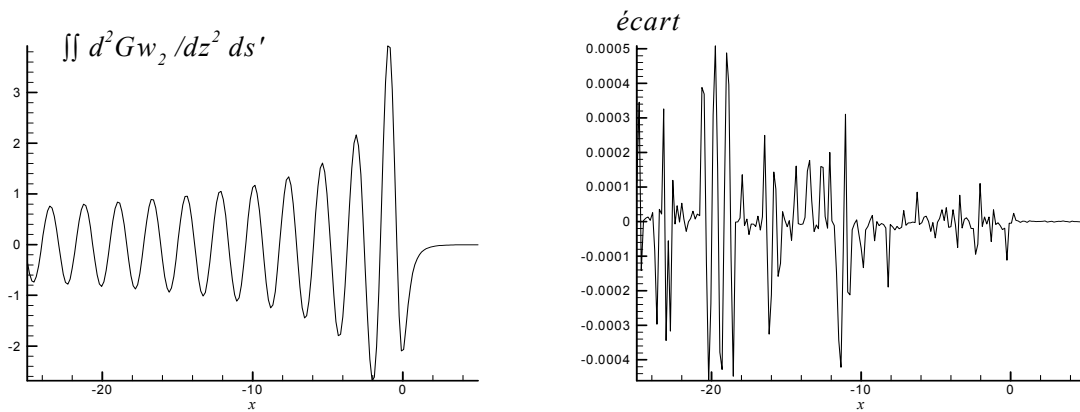


Figure 8 : Intégration de d^2Gw_2/dz^2 sur une bande semi-infinie, balayage en x

III.2.2 Maillage utilisé

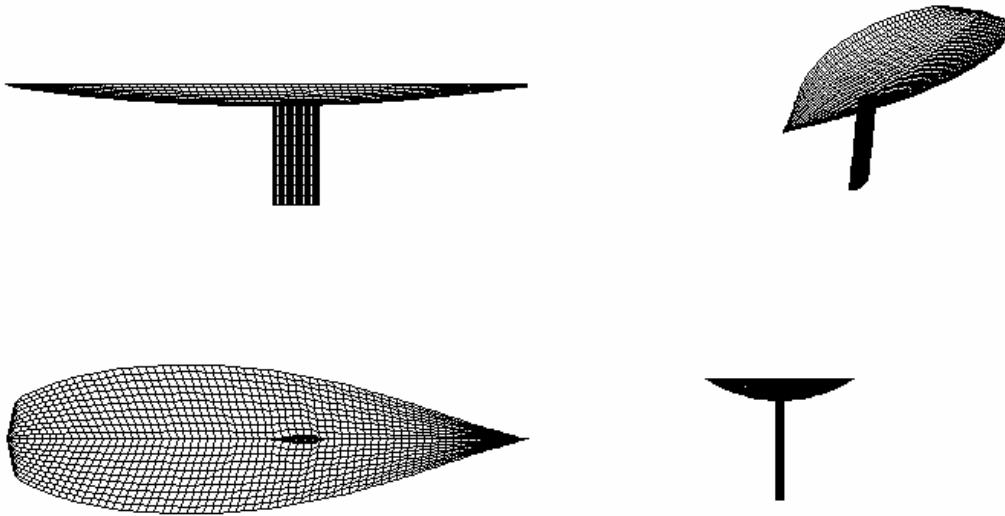


Figure 9 Maillage utilisé pour la coque et la quille

Les dimensions principales de la coque sont longueur $L=5,5\text{m}$, largeur $B=2,49\text{m}$ et tirant d'eau de la coque $T=0,235\text{m}$. Le poids à vide est de 450Kg et les surfaces mouillées de la coque et de la quille sont respectivement de $S=3,27\text{m}^2$ et $0,92\text{m}^2$. En ce qui concerne la quille, il s'agit d'une forme rectangulaire basée sur un profil NACA0010 de 40cm de corde et de $1,4\text{m}$ de haut. Le tirant d'eau total, bateau plus quille est de $1,8\text{m}$, le boulon séparant la coque de la quille ayant une hauteur de $16,5\text{cm}$.

Pour le maillage pour le calcul hydrodynamique, la coque a été divisée en 10 bandes de 70 facettes sur la moitié de la coque alors que la quille a été découpée en 10 bandes de 25 facettes. Le boulon n'a pas été modélisé dans un premier temps. Le maillage de l'ensemble est présenté sur la figure 9.

III.2.3 Résultats hydrodynamiques

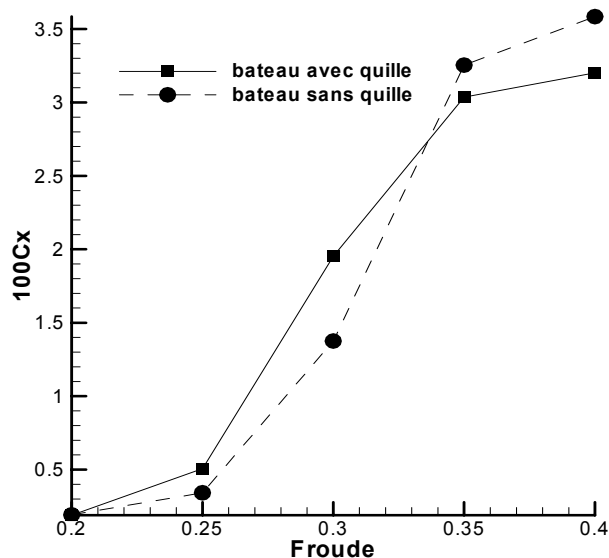


Figure 10 Evolution de la résistance de vagues avec le nombre de Froude

Les calculs ont été effectués dans le cas stationnaire correspondant à une navigation sans incidence sur une mer plate. La figure 10 présente le coefficient de résistance de vagues C_x en fonction du nombre de Froude, pour la coque seule et la coque avec la quille à dérapage nul pour des nombres de Froude variant de 0,2 à 0,4 (soit 1,47 à 2,94 m/s). On peut observer que l'effet de la quille se fait surtout sentir pour des nombres de Froude compris entre $F=0,25$ et $0,35$, avec une augmentation importante en particulier à partir de $F=0,30$. En dehors de cette gamme de vitesses, l'augmentation de résistance de vagues due à la quille reste modérée.

Les figures 11 présentent les distributions de pression dynamiques calculées sur la coque et la quille à incidence nulle pour deux nombres de Froude $F=0,3$ et $F=0,4$. La figure 12 compare les distributions de pression dynamique pour le cas sans quille (à gauche) et avec quille (à droite) à nombre de Froude $F=0,3$. C'est ce dernier cas qui a été choisi pour le calcul de structures (pression sur résultats sur la coque seulement présentant un intérêt pour ce calcul) dont les résultats seront présentés dans le paragraphe suivant. On peut observer que les variations de pression sont faibles, limités à une augmentation de pression sur l'avant de la coque et une dépression juste en aval de la quille;

III.3 Simulations numériques de la structure en mécanique

Dans le cadre de la validation du modèle numérique de la structure complète du voilier, nous allons réaliser deux calculs. Les premiers calculs sont réalisés avec des conditions aux limites identiques à celles réalisées expérimentalement au chantier : encastrement du voilier aux deux extrémités et effort ponctuel sur la quille ou sur la coque. Cette simulation permet de valider le modèle numérique dans des cas où les conditions aux limites sont contrôlées. Ces cas de chargement sont très importants avant de se lancer dans des simulations où des paramètres tels que la répartition de pression en dynamique sera appliquée. Les premiers résultats donnent une erreur inférieure à 10 % dans le capteur de quille mais les mesures sur le bordé ne sont pas terminées. La deuxième campagne de simulations est en cours et les résultats présentés sur la figure 13 montrent seulement la faisabilité de la démarche complète. Le but final est de partir de la géométrie initiale complète du voilier (coque et gréement), de fixer des conditions de navigation, de sortir les répartitions de pression sur la coque et d'appliquer ensuite cette répartition comme condition aux limites pour le calcul de la structure. La Figure 13 (a) illustre le champ de pression appliqué à la partie immergée de la coque et obtenu à partir du calcul hydrodynamique. La figure 13 (b) présente la répartition de la contrainte principale dans l'axe du voilier sous l'effet de cette sollicitation. Ce calcul n'est bien entendu pas encore quantitatif car il n'est pas fidèle en terme de structure du voilier et de conditions aux limites mais il permet de montrer la faisabilité de l'ensemble de la démarche.

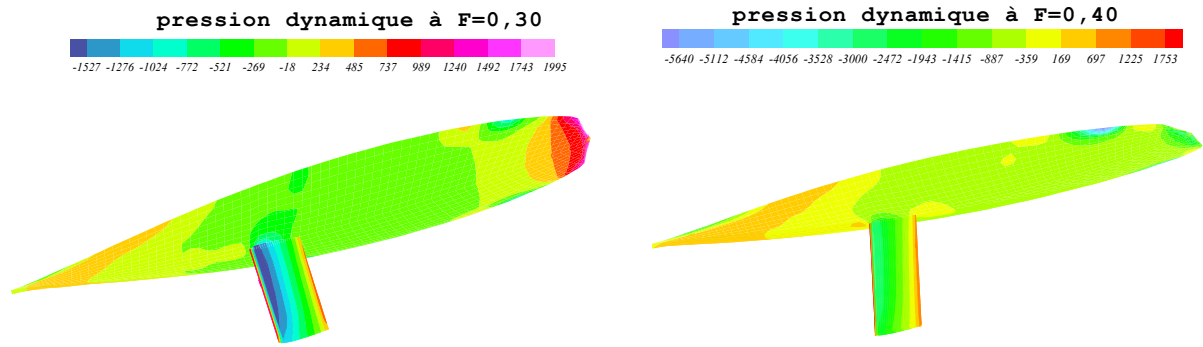


Figure 11 Distribution de pression dynamique sur le voilier (dérage nul)

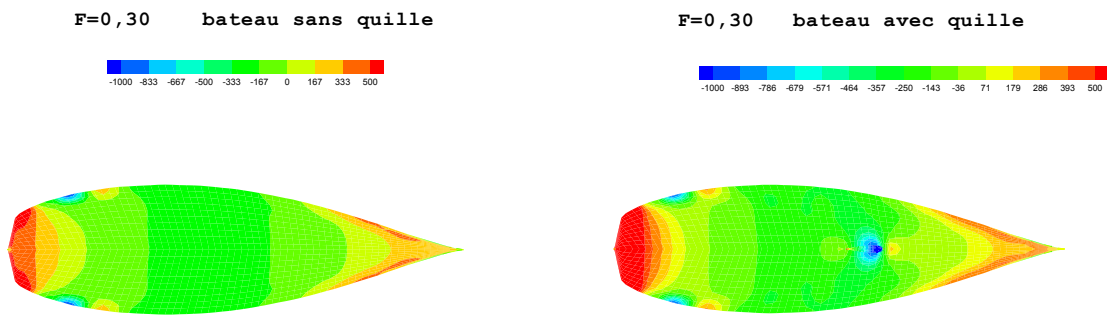


Figure 12 Comparaison des répartitions de pression dynamique sur la coque sans ou avec quille

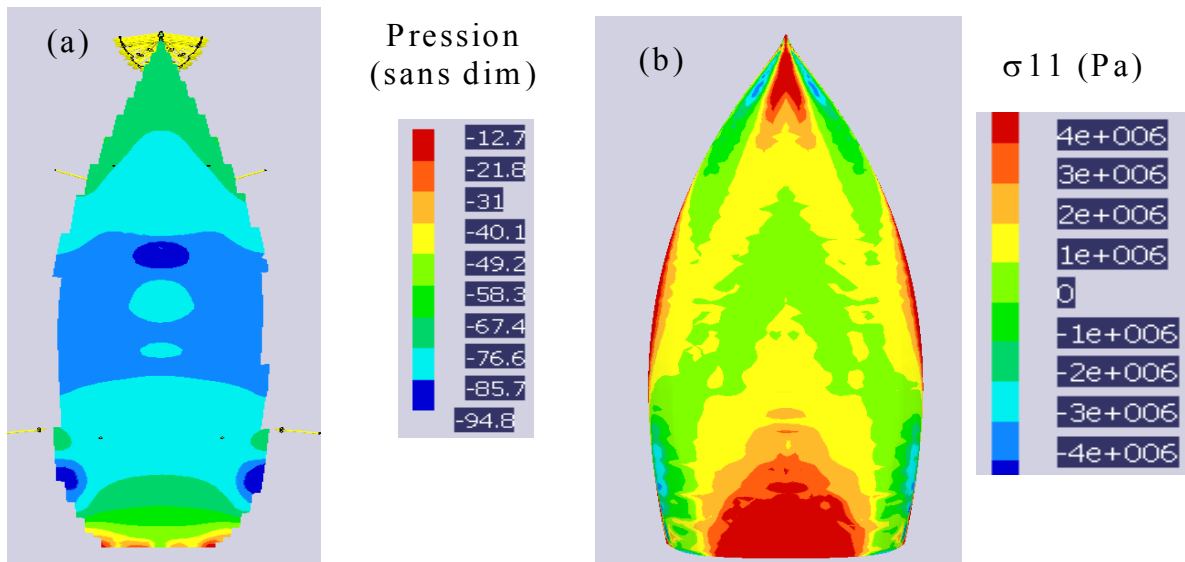


Figure 13 (a) répartition de pression sur la coque dans le cas de chargement sans dérapage à nombre de Froude $F=0,3$ pour la coque en présence de quille (b) : répartition de la contrainte principale dans l'axe de la carène, (coque seule sans renforts) pour le cas de pression obtenu en (a)

IV SYNTHÈSE ET TRAVAUX EN COURS

On a présenté les premiers résultats obtenus par couplage d'un code de structures avec un code de calcul hydrodynamique par une méthode de singularité utilisant la fonction de Green de résistance de vagues. Le but du travail est de montrer la faisabilité du couplage entre ces deux méthodes dans un cas simple. Les résultats obtenus ne doivent pas être considérés comme ayant une bonne précision quantitative mais seulement pour leur côté qualitatif. La collaboration doit être poursuivie entre les deux laboratoires afin de rendre ce couplage réaliste et de l'étendre à d'autres conditions de navigation (voilier en dérapage, cas d'une houle régulière). On a simplement cherché ici à montrer la possibilité de réaliser un couplage entre les diverses méthodes de calcul. Les résultats de la deuxième campagne de navigation devrait permettre de valider ou non les résultats obtenus par couplage. Coté structure, la connaissance du champ de pression sur la coque est une condition aux limites qui permet de remonter de façon réaliste à l'état de sollicitation des liaisons collées dans le voiler. Cette première campagne de mesures reste qualitative mais elle a permis de valider la faisabilité d'un voilier entièrement collé. Il reste quelques tests de validation sur échantillonnages mais cette technique pourrait déboucher sur une industrialisation du procédé.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la Région Poitou-Charentes, le FEDER et la DRIRE pour le soutien financier au projet structures.

Les auteurs remercient également Manh-Hung Nguyen qui a effectué le maillage et les calculs hydrodynamiques sur la coque du navire étudié.

REFERENCES

- [1] J.-P. Boin, *"Calcul des efforts hydrodynamiques sur un navire soumis à une houle régulière; applications d'une méthode de singularité de Kelvin"*, Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, Décembre 2001.
- [2] P. Baur P., A. Roy, P. Casari, D. Choqueuse and P. Davies, *"Structural mechanical testing of full-size adhesively motorboat"*, in press Journal of Engineering for the Maritime Environment.
- [3] Y. Roux, S. Huberson, F. Hauville, M. Guilbaud, J-P. Boin et M. Ba, *"Vers une méthode de prédiction des performance des voiliers complètement numérique"*, Proc. des 9^{èmes} Journées de l'Hydrodynamique, pp.51-72, Poitiers, Mars 2003.
- [4] J.-P. Boin, M. Ba and M. Guilbaud, *"On the integration of the diffraction-radiation with forward speed Green function"*, Ship Technology Research, vol. 50, pp.106-124, 2003.