

5^e JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

22, 23, 24 mars 1995 – ROUEN

Etude de l'écoulement hydrodynamique instationnaire autour d'un navire série 60

M.Guilbaud, F.Guyot (CEAT-LEA, URA CNRS 191)

M.Ba (ENSMA-LEA, URA CNRS 191)

43 rue de l'Aérodrome, 86036 POITIERS Cedex

et G.Delhommeau (Ecole Centrale de Nantes, URA CNRS 1217)

1 rue de la Noé, 44072 NANTES Cedex

Résumé

Les calculs de tenue à la mer effectués à l'aide de méthodes de singularités utilisant la fonction de Green de diffraction-radiation avec vitesse d'avance n'ont pu être développés à cause des temps de calcul que demandaient ces fonctions et leurs dérivées. Elles ont souvent été remplacées par des fonctions de Green satisfaisant une condition de surface libre simplifiée ne donnant des résultats corrects qu'à faibles valeurs de la fréquence et de la vitesse d'avance. On présente ici les résultats obtenus avec une fonction de Green complète, introduit dans le code de diffraction-radiation avec vitesse d'avance AQUAPLUS; grâce à une méthode de calcul rapide, ces fonctions sont obtenues avec des temps de calcul raisonnables quoique encore élevés. Les résultats obtenus pour une coque de navire série 60 en mouvements forcés de tangage et de pilonnement, purs ou couplés (efforts et déformées de surface libre), sont comparés à ceux d'une étude expérimentale effectuée en canal hydraulique et en bassin des carènes.

Summary

Seakeeping codes using the diffraction-radiation Green function with forward speed in panel codes require very high computational time for this function and its derivatives and so, cannot be practically used. Simplified form of the free-surface boundary condition have been often used but the range of validity of results are limited to low values of Froude number and frequency. A fast method of computation of the complete Green function has been developed and this function has been introduced in the seakeeping code AQUA+, giving a lower CPU time but still important. Numerical results obtained for a serie 60 hull in forced oscillations of pure or combined heave and pitch (forces and free-surface elevation) are compared with an experimental study led in recirculating water channel and in a small towing tank.

1. Introduction

Les calculs de tenue à la mer des navires utilisant la fonction de Green de diffraction radiation dans des méthodes de singularités avec vitesse d'avance sont singuliers pour la valeur du paramètre adimensionnel $\tau = \omega U/g = 1/4$ (ω pulsation et U vitesse d'avance). Ces écoulements sont mal connus d'autant plus que les études expérimentales correspondantes sont assez rares. Si l'utilisation de la fonction de Green de diffraction-radiation avec vitesse d'avance permet de faire des calculs pour des valeurs de τ très proche de $1/4$, ce type de méthode a trouvé une utilisation très limitée à cause des difficultés numériques et des temps de calculs trop longs qui lui sont attachés. Pour y remédier, on a cherché à simplifier la condition linéarisée de surface libre de Neumann-Kelvin pour travailler avec des fonctions de Green moins complexes, correspondant à des simplifications de cette condition, pour supprimer les difficultés numériques et donc réduire les temps de calculs; toutefois, les résultats deviennent erronés pour les grandes valeurs de τ , Guevel et Grekas[1], Grekas[2], Huijsmans and Hermans[3], Delhommeau et al.[4]. D'autres études ont cherché à utiliser les singularités de Rankine, mais les résultats obtenus sont dépendants de la condition de radiation choisie. Par exemple, les résultats sont corrects à faible valeur de τ (Maisonneuve et al.[5]) ou à grande valeur (Nakos et Sclavounos[6]), en fonction de la condition d'absorption choisie.

Au début des années 80 la fonction de Green de diffraction radiation avec vitesse d'avance a été beaucoup étudiée, Bougis[7], Inglis and Price[8], Guével and Bougis[9], mais les capacités des ordinateurs n'ont pas pu permettre de les utiliser dans des codes réalistes. Récemment leurs progrès a permis de calculer plus rapidement la fonction de Green exacte, Wu and Eatock Taylor[10], Chan[11], Bougis and Coudray[12], Squires and Wilson[13]. Une méthode de calcul rapide et efficace pour calculer cette fonction ainsi que ses dérivées, premières ou secondes, a été mise au point au CEAT, Ba et Guilbaud[14], adaptant un processus d'intégration des équations différentielles de Runge-Kutta d'ordre 4, avec pas variable, au calcul des intégrales de Fourier, tout en conservant un temps de calcul raisonnable. Cette méthode a été intégrée au code de calcul de tenue à la mer AQUA+ développée à l'Ecole Centrale de Nantes. Pour valider ces calculs, le CEAT a mis au point un montage expérimental permettant d'étudier l'écoulement autour d'un modèle de cargo série 60 en mouvements forcés de pilonnement-tangage purs ou couplés pour des valeurs de τ voisines de $1/4$ ou plus grandes. Les résultats de calculs obtenus avec la fonction de Green de diffraction-radiation avec vitesse d'avance complète sont comparés à ceux obtenus avec la version initiale de AQUA+ et avec les résultats des mesures, tant pour ce qui concerne les forces que les déformées de surface libre.

2. Etude expérimentale

Un montage expérimental pour mesurer les efforts instationnaires et les déformées de surface libre sur un modèle de navire en oscillations forcées a été mis au point au CEAT, Guyot et Guilbaud[15]. Les mouvements possibles sont le pilonnement et la rotation de tangage, purs ou couplés. Le mouvement est produit par un moteur électrique à vitesse variable et la transmission au modèle se fait par l'intermédiaire d'un réducteur de vitesse, de renvois d'angle et de courroies crantées (figure 1). Le montage se compose d'une plaque en déplacement vertical sur quatre colonnes, guidée par des cages à rouleaux et entraînée par un système bielle-manivelle permettant de faire varier la position moyenne et l'amplitude mouvement (de 0 à 20mm). Un second système bielle manivelle permet de créer à partir de la plaque précédente un mouvement de rotation de tangage (amplitude maximale 6°), autour d'un axe situé dans le plan de flottaison du modèle, le mouvement étant transmis par un joint coulissant. La maquette étudiée est celle d'un navire de la série 60, avec un coefficient de bloc $C_b = 0,6$, longueur $L = 0,6m$. Afin de réduire au minimum les efforts d'inertie, le modèle est

construit en matériaux composites et raidi par un nid d'abeille situé à l'intérieur; sa masse totale est $m=0,14\text{kg}$.

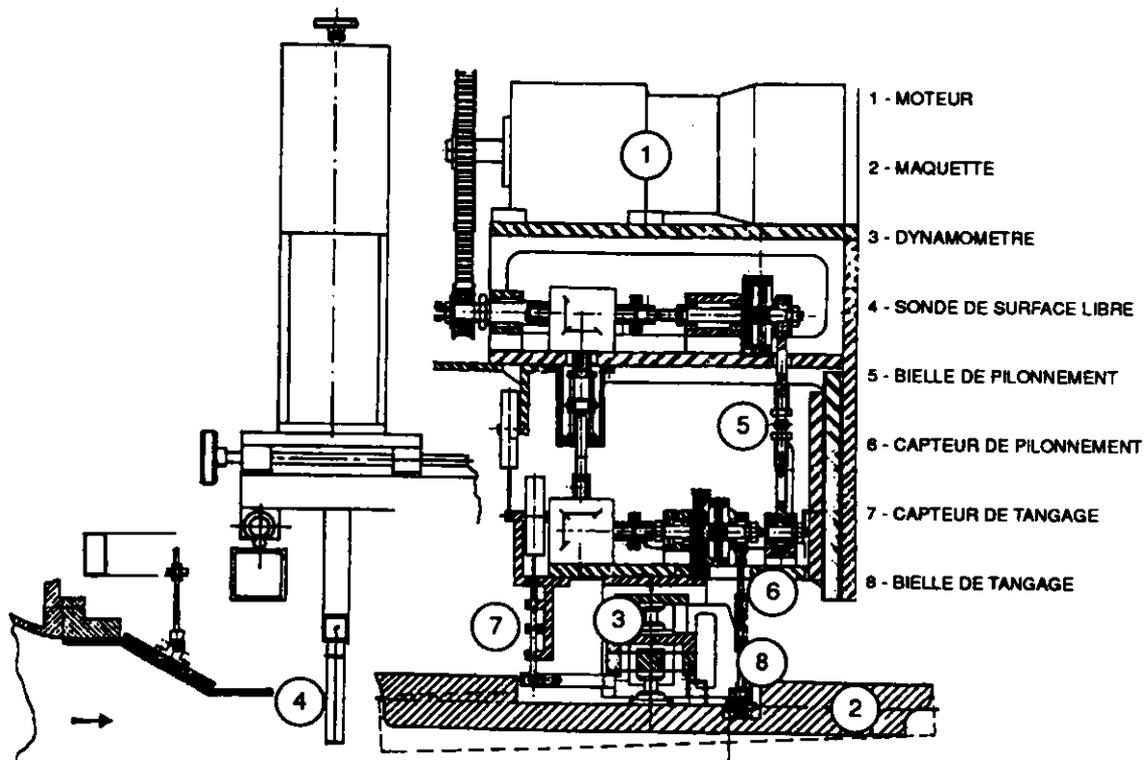


Figure 1 Montage expérimental

Le dynamomètre à 3 composantes a été étudié au CEAT; il est constitué de trois modules interchangeable pour la mesure des efforts ce qui permet une utilisation avec des maquettes de taille différentes dans diverses installations expérimentales. La portance est mesurée par deux lames formant un parallélogramme et la traînée et le moment de tangage par deux modules identiques, mesurant des combinaisons linéaires de ces efforts. Les éléments sensibles sont des jauges de contrainte semi-conducteur montées en pont de Wheastone avec compensation de température. La vitesse de rotation est mesurée par un système optique, avec cellule photo-électrique et les mouvements sont contrôlés par deux capteurs de déplacement. Le montage est complété par un dispositif permettant de faire un sondage longitudinal de la surface libre à l'aide d'un sondeur de houle résistif, constitué par deux fils de chrome $\phi=0,2\text{mm}$ de 150mm de longueur. Ces fils sont maintenus à un écartement de 10mm à l'aide d'un cadre en plexiglas pour limiter les perturbations électriques. Ces deux fils forment une branche d'un pont de Wheastone alimenté en courant alternatif à 3khz pour éviter l'électrolyse. Après démodulation, on obtient un signal permettant de mesurer la longueur immergée des fils. La courbe d'étalonnage peut être représenté par un polynôme de degré 3 dont les coefficients sont à peu près indépendants de la vitesse de l'écoulement pour $0,48 \leq U(\text{m/s}) \leq 0,72$. La sonde est fixée à un chariot de déplacement entraîné par un moteur pas à pas et sa position est contrôlée par une réglette numérique donnant sa position.

Les diverses mesures sont pilotées par un micro-ordinateur relié à un système d'acquisition de données comportant un convertisseur analogique/numérique. Après amplification, les divers signaux sont filtrés à l'aide de filtres analogiques passe-bas de fréquence de coupure 10hz; les filtres sont identiques sur toutes les voies de mesure. Les mesures (100 points par périodes pendant 22 périodes pour les mesures d'efforts ou 6 périodes

pour les mesures de surface libre) sont ensuite stockées pour un dépouillement ultérieur. L'acquisition est effectuée à l'aide du logiciel Labtech Notebook, piloté par des programmes écrits en Quick Basic.

Après mise au point du montage avec une maquette de longueur $L=0,3\text{m}$ dans le tunnel à recirculation du CEAT, les essais ont été effectués à l'aide d'une maquette de longueur $L=0,6\text{m}$ dans le bassin des carènes de l'IUT de La Rochelle de section $1 \times 1\text{m}^2$ et de 22m de long (mesures des efforts seuls) et dans le canal à recirculation de l'Ecole Centrale de Nantes, de section de veine $2 \times 1\text{m}^2$ (mesures des efforts et des déformées de surface libre). Les mouvements étudiés sont le pilonnement pur, le tangage pur et un mouvement couplé (avec retard de phase de 90° du tangage sur le pilonnement) avec des fréquences $1 \leq f(\text{hz}) \leq 5$ et des nombres de Froude $F = U / \sqrt{gL}$ (g accélération de la pesanteur) $F=0$ et $0,2 \leq F \leq 0,3$. Une attention particulière a été portée aux essais au voisinage de $\tau=1/4$; des mesures ont été effectuées pour $2,5 \leq f(\text{hz}) \leq 3$ à $U=0,13\text{m/s}$, correspondant au nombre de Froude $F=0,054$. Les amplitudes des mouvements étaient $a=6,4$ et $9,6\text{mm}$ (correspondant à $a/T=0,2$ et $0,3$, où $T=32\text{mm}$ est l'immersion moyenne du modèle) en pilonnement pur, et 1° et 2° en tangage pur; seules les amplitudes maximales ont été utilisées en mouvement mixte. Les mesures de déformées de surface libre ont été effectuées avec une grille de 158 points sur une demie surface libre réparties en 7 lignes de 27 points sauf pour $y=0$ (10 points seulement) et $y=40\text{mm}$ (13 points) à cause de la présence du modèle. Ces mesures ont été faites à $f=1-3$ et 5 hz en mouvements purs et $f=3\text{hz}$ en mouvement mixte à $U=0,72\text{m/s}$ ($F=0,3$). Au voisinage de $\tau=0,25$, des mesures ont été effectuées à $U=0,13\text{m/s}$ et $f=2,9$ et $3,3\text{hz}$ seulement en mouvements purs; seules les amplitudes maximales ont été retenues.

Pour déterminer les efforts hydrodynamiques, on doit faire osciller dans l'air et dans l'eau la maquette à même fréquence afin d'éliminer les efforts d'inertie, présents dans les deux cas, par différence. Le dépouillement est effectué en appliquant la matrice d'étalonnage aux signaux instantanés, corrigés des écarts de temps entre les mesures sur les différentes voies afin d'obtenir les efforts d'inertie (air) et totaux (eau) instantanés; les efforts hydrodynamiques sont obtenus par différence. On détermine ensuite les fonctions de transfert de chacun des efforts et des déformées de surface libre par une technique de transformée de Fourier rapide. Outre les divers spectres, on obtient en particulier les amplitudes et les retards de phase de la composante de même fréquence que l'excitation.

Une fois les amplitudes de portance, F_z , de traînée F_x et de moment de tangage M_t calculés, on obtient les coefficients d'efforts par:

$$C_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho U^2 L^2 \Psi}, C_z = \frac{F_z}{\frac{1}{2}\rho U^2 L^2 \Psi} \text{ et } C_M = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho U^2 L^3 \Psi} \quad (1)$$

où ρ est la masse volumique et Ψ l'amplitude relative du mouvement a/T en pilonnement pur et en mouvement mixte, et l'amplitude de tangage (en radians) pour le tangage pur. Les fréquences sont adimensionnalisées par $\bar{f} = f/U$.

L'analyse des erreurs, difficile à faire pour des montages complexes, montre une influence importante de la position moyenne du modèle lors des essais en canal dont la hauteur d'eau varie avec la fréquence. D'autre part, les spectres des efforts montrent une forte influence de la fréquence d'excitation et de ses harmoniques mais aussi des fréquences parasites (vers 20 à 30 hz) en bassin dues à des mouvements parasites du chariot muni de trois roues.

3. Etude numérique

3.1 Calcul de la fonction de Green

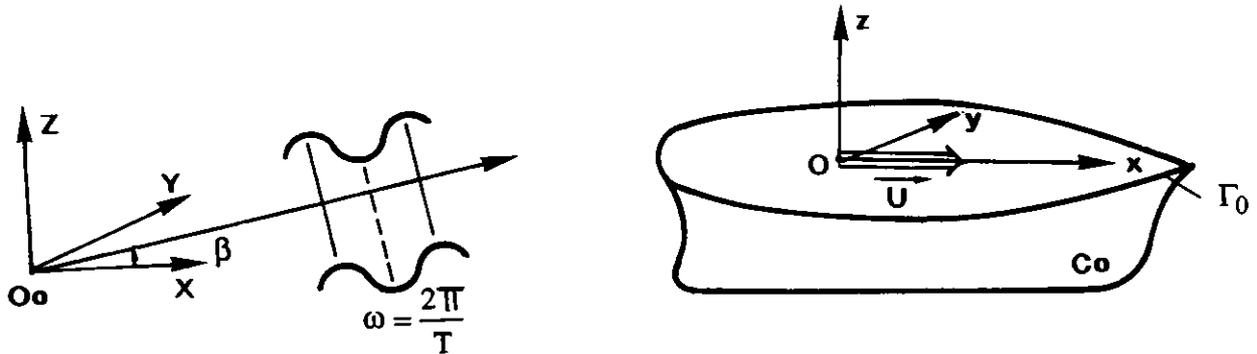


Figure 2 Schéma de l'écoulement

On utilise un système de coordonnées Oxyz en déplacement à vitesse constante U , l'axe x étant dirigé dans la direction de la vitesse d'avance. Le plan $z=0$ correspond à la position non perturbée de la surface libre et l'axe z est dirigé vers le haut. On considère des mouvements d'un fluide parfait incompressible à pulsation ω . Pour des amplitudes et des cambrures faibles de la surface libre, on peut utiliser une fonction de Green G satisfaisant la condition linéarisée de Neumann-Kelvin. Cette fonction est étudiée sous la forme définie par [9]. Si Φ est le potentiel instationnaire des vitesses de perturbation, ce potentiel est recherché dans le repère Oxyz sous la forme: $\Phi = \Phi^* \cos \omega t + \Phi^{**} \sin \omega t$. Avec ces hypothèses, 2 fonctions de Green apparaissent, G_c et G_s , reliées par $G_s = -\frac{1}{\omega} \frac{\partial G_c}{\partial t}$. On ne calculera donc que $G = G_c$, donnée par $G = G_0 + G_1 + G_2$. Les expressions pour G_0 et G_1 sont données dans [9] et ne présentent aucune difficulté. La fonction G_2 est plus complexe et peut être mise sous la forme:

$$\pi L G_2 = \Re \left(e^{-i\tilde{\omega} \tilde{t}} \left\{ \int_0^{\theta'_c} F_1 d\theta + \int_{\theta'_c}^{\theta_c - \alpha_c} F_2 d\theta + F_3 + \int_{\theta_c + \alpha_c}^{\pi/2} F_4 d\theta \right\} \right)$$

où $\tilde{\omega} = \omega \sqrt{L/g}$ et $\tilde{t} = t \sqrt{g/L}$ sont la fréquence et le temps adimensionnels; L est une longueur caractéristique. Les limites d'intégration sont $\theta_c = \theta'_c = \alpha_c = 0$ si $\tau < 0,25$; $\theta_c = \arccos(1/4\tau)$ et $\theta'_c = 0$, avec α_c infiniment petit, si $0,25 < \tau < 0,5$; enfin, $\theta_c = \arccos(1/4\tau)$ et $\theta'_c = \arccos(1/2\tau)$, avec α_c infiniment petit, si $\tau > 0,5$. F_1 , F_2 et F_4 sont des fonctions complexes faisant intervenir l'intégrale exponentielle complexe E_1 , définie par:

$$E_1(\xi) = \int_{\xi}^{\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt \quad \text{pour } -\pi < \arg(\xi) < \pi \quad \text{et} \quad E_1(\xi) = \int_1^{\infty} \frac{e^{-\xi t}}{t} dt \quad \text{pour } \operatorname{Re}(\xi) > 0,$$

Les dérivées spatiales de G_2 sont facilement obtenues.

Les temps de calcul élevés des fonctions de Green et de ses dérivées sont dus aux intégrales portant sur l'intégrale exponentielle complexe. Soit $Y = \int_{\theta_1}^{\theta_2} F(\theta) d\theta$, l'intégrale à calculer; on remplace

ce calcul par celui de la fonction $H(\theta)$ définie par sa dérivée: $\frac{dH(\theta)}{d\theta} = F(\theta)$ avec $H(\theta_1) = 0$.

L'intégrale cherchée est donnée par $Y=H(\theta_2)$. La solution d'une équation différentielle intégrale est généralement obtenue par un procédé itératif. On utilise un schéma élaboré de Runge-Kutta du quatrième ordre, avec une précision choisie a priori en utilisant un contrôle adaptatif du pas et un pas minimum pour limiter les erreurs d'arrondi. De plus, la fonction à intégrer est interpolée par des polynômes du quatrième degré. Ainsi, pour une précision donnée, le temps nécessaire augmente quand la source s'approche de la surface libre. A cause des erreurs de troncature, le noyau de l'intégrale de G_2 donne des valeurs erronées au voisinage de θ_c et de $\pi/2$. La valeur correcte est obtenue en utilisant un équivalent du noyau au voisinage de ces valeurs. Sur un ordinateur de type PC486-33Mhz, le temps de calcul est d'environ 0,5s au lieu de 45s en utilisant une méthode des trapèzes classiques (0,03s pour la fonction de Green stationnaire).

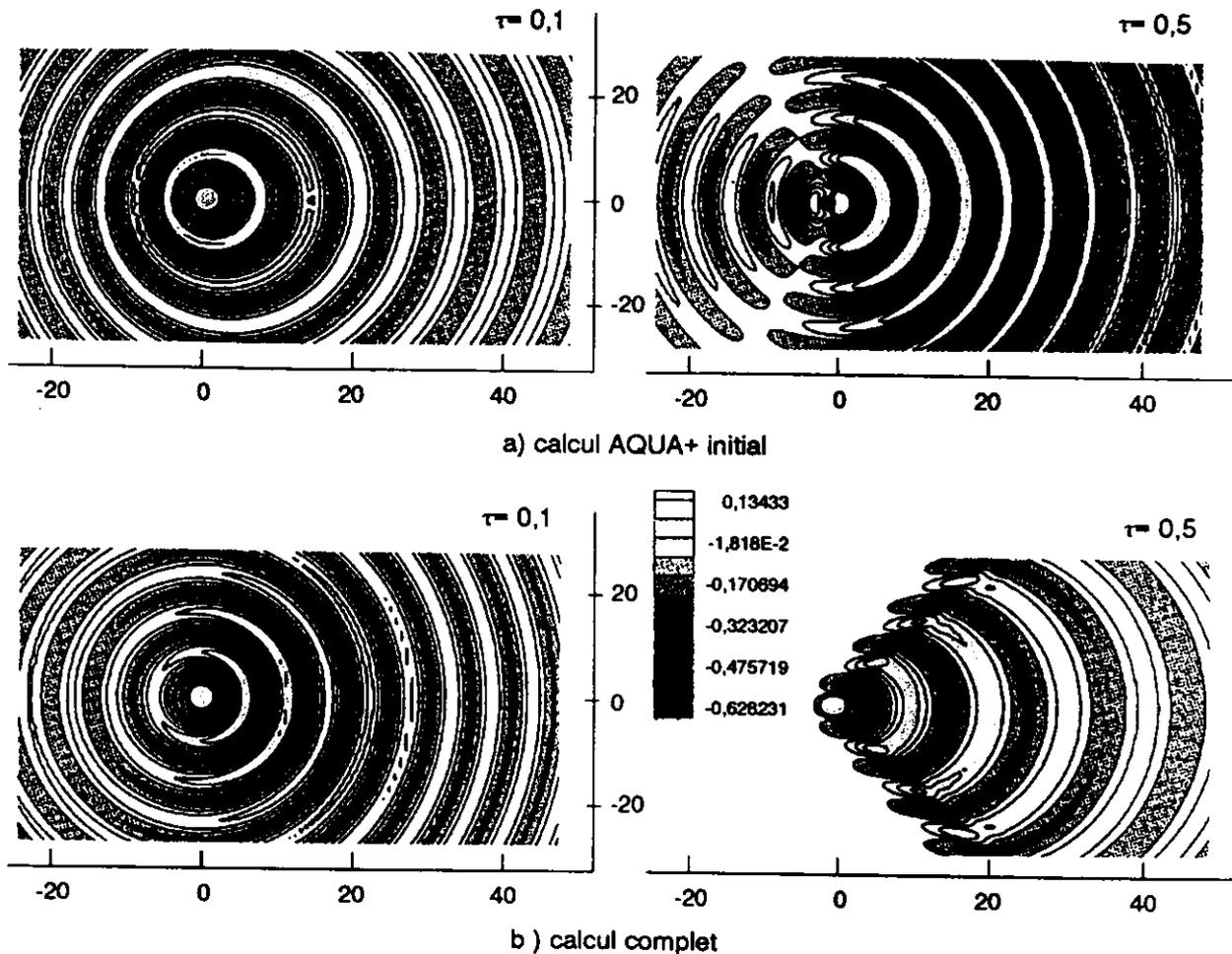


Figure 3 Comparaison des surfaces libres calculées avec les 2 fonctions de Green

La figure 3 montre la comparaison entre les déformées de surface libre obtenues pour la fonction de Green exacte et sa forme simplifiée pour une source pulsante ($\omega=3\text{rad/s}$) à immersion $z=-1\text{m}$ en translation à $t=0$. Pour de faibles valeurs de τ , les deux fonctions donnent des résultats voisins mais les écarts augmentent avec τ . Pour $\tau=0,5$ les formes sont très différentes et en particulier la forme simplifiée prévoit des ondes en amont.

3.2 Utilisation de AQUA+

2.2.1 Le problème de la tenue à la mer avec vitesse d'avance:

α. Position du problème dans un repère mobile:

Nous considérons d'abord un repère fixe (O_0, X, Y, Z) et un second repère qui est un repère mobile moyen (O, x, y, z) , parallèle au premier et animé d'une vitesse d'avance U ($X=x+Ut$), sans oscillations, comme indiqué sur la figure 2. Dans le repère mobile, le potentiel de la houle incidente est :

$$\Phi_I = -\frac{ag}{\omega} \frac{\text{ch } m_0(z+h)}{\text{ch } m_0 h} \cos[m_0(x \cos\beta + y \sin\beta) - \omega_e t]$$

avec : $\omega = gm_0 h$, et $\omega_e = \omega - Um_0 \cos\beta$; ω_e est la fréquence de rencontre et β l'angle de la houle avec l'axe Ox .

β. Le problème linéarisé :

Dans le repère mobile parallèle au repère absolu avançant à la vitesse moyenne U de la carène, le problème linéarisé de la tenue à la mer avec vitesse d'avance s'écrit, si l'on néglige les termes de couplage avec le problème de la résistance de vagues supposés d'ordre supérieur [2] [7] [16] et [17] :

$$\begin{cases} \Delta\phi = 0 \\ \frac{\partial\phi}{\partial n}\Big|_{c_0} = \vec{V}_E \cdot \vec{n} \Big|_{c_0} \\ \frac{\partial^2\phi}{\partial t^2} + 2\varepsilon' \frac{\partial\phi}{\partial t} + g \frac{\partial\phi}{\partial z} - 2U \frac{\partial^2\phi}{\partial t \partial x} - 2U\varepsilon' \frac{\partial\phi}{\partial x} + U^2 \frac{\partial^2\phi}{\partial x^2}\Big|_{z=0} = E\phi\Big|_{z=0} = 0 \\ \phi \rightarrow \phi_I \text{ à l'infini,} \end{cases}$$

ϕ_I étant le potentiel de la houle incidente du premier ordre. La condition de glissement sur la carène fait intervenir au premier ordre un couplage avec la vitesse d'avance:

$$\frac{\partial\Phi}{\partial n}\Big|_{c_0} = \vec{V}_E \cdot \vec{n}\Big|_{c_0} = \left[U \cdot \vec{i}_x + \left(\vec{\tau} + \vec{\theta} \wedge \overrightarrow{OP_0} \right) + U \left(\vec{i}_x \wedge \vec{\theta} \right) \right] \cdot \vec{n}_0$$

$\vec{\tau}$ et $\vec{\theta}$ représentant les mouvements de translations et de rotations au premier ordre. Ce couplage introduit une modification des termes de masses d'eau ajoutées et d'amortissement due au potentiel de radiation qui s'écrit maintenant :

$$\tilde{\Phi}_R = -i\omega_e \sum_{q=1}^6 \tilde{A}_p \tilde{\Phi}_R^q - C\tilde{A}_6 \tilde{\Phi}_R^2 + C\tilde{A}_5 \tilde{\Phi}_R^3$$

Les masses d'eau ajoutées qui étaient définies à vitesse nulle par :

$$\tilde{M}^{pq} = M^{pq} + \frac{i}{\omega_e} B^{pq}, \quad M^{pq} = -\rho \int \int_{c_0} \phi_R^{q*} \frac{\partial\phi_R^{p*}}{\partial n} dS, \quad B^{pq} = -\rho\omega \int \int_{c_0} \phi_R^{q*} \frac{\partial\phi_R^{p*}}{\partial n} dS$$

deviennent [7] [16] [17] :

$$\bar{M}'^{p5} = \bar{M}^{p5} + \frac{iU}{\omega_*} \bar{M}^{p3} \quad ; \quad \bar{M}'^{p6} = \bar{M}^{p6} - \frac{iU}{\omega_*} \bar{M}^{p2}$$

Les efforts de diffraction ne sont pas modifiés, on doit seulement tenir compte du fait que les pressions sont exprimées dans le repère relatif, la dérivée partielle par rapport au temps s'écrit dans ce repère :

$$p = -\rho \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} - U \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)$$

Nous avons donc :

$$\bar{M}^{pq} = -\rho \iint_{C_0} \left(\bar{\Phi}_R^q - \frac{iU}{\omega_*} \frac{\partial \bar{\Phi}_R^q}{\partial x} \right) \sigma_p dS \text{ avec } \sigma_p = \begin{cases} \bar{e}_p \cdot \bar{n} & p = 1, 2, 3 \\ \left(\bar{e}_{p-3} \wedge \overrightarrow{OP_0} \right) \cdot \bar{n} & p = 4, 5, 6 \end{cases}$$

Pour le problème de diffraction, les efforts sont donnés par:

$$\bar{F}_{ax}^p = -\rho \iint_{C_0} \left[-i\omega_* (\bar{\Phi}_D + \bar{\Phi}_I) - U \left(\frac{\partial \bar{\Phi}_D}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\Phi}_I}{\partial x} \right) \right] \sigma_p dS,$$

ce qui conduit à l'équation du mouvement :

$$\sum_{q=1}^6 \left[-\omega_*^2 (\bar{M}'_{pq} + \bar{M}_{pq}) + \bar{S}_{pq} \right] \bar{A}_q = \bar{F}_{ax}^p.$$

Une fois connus les mouvements à la fréquence de rencontre, les efforts du second ordre s'obtiennent par intégration des pressions au second ordre dans le repère relatif [18]. Dans le repère absolu, on a :

$$\bar{F}_{hd_2} = \langle \bar{F}_{hs_2} + \bar{\theta} \wedge \bar{F}_{hd_1} + \rho \iint_{C_0} \left[\frac{1}{2} \left(\overrightarrow{\text{grad} \phi} \right)^2 + \overrightarrow{P_0 P} \cdot \overrightarrow{\text{grad} \Lambda} \right] \bar{n}_g dS - \frac{\rho g}{2} \int_{\Gamma_0} (\zeta - Z)^2 \bar{n}_g dS \rangle$$

$$\Lambda = \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} - U \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)$$

F_{hs_2} étant la force hydrostatique au second ordre, F_{hd_1} la force hydrodynamique au premier ordre, C_0 la carène et Γ_0 le contour de la flottaison au repos. La seule approximation effectuée consiste à négliger les dérivées secondes par rapport aux variables d'espace en facteur de U intervenant lorsqu'on dérive le gradient par rapport au temps dans le repère relatif (on n'utilise que le premier terme de Ψ).

3.2.2 Organisation du code AQUAPLUS

AQUAPLUS est composé d'une série de programmes principaux, communiquant par des fichiers séquentiels ou à accès direct. Dans ce code, les calculs sont réalisés par séries qui sont composées de configurations identiques (vitesse, profondeur) ne différant que par la période de la houle et éventuellement l'incidence dans le cas de vitesse d'avance non nulle. Un seul système linéaire complexe est résolu dans le programme PREK (toutes les directions de la houle sont entrées ensemble dans le programme de calcul des coefficients d'influence pour une vitesse d'avance nulle). Les résultats de chaque série sont conservés dans des fichiers à accès direct pour des calculs ultérieurs, qui peuvent être des calculs complémentaires avec AQUAPLUS, une exploitation statistique sur état de mer irrégulière par le post-processeur ALEA ou une exploitation sur houle bichromatique. Les noms des programmes et leurs fonctions sont donnés dans la table 1. Le module MOUK a été modifié pour imposer les mouvements au lieu de les calculer à partir du système des équations du mouvement. Les modules COSK et VSPK ont été respectivement remplacés par les modules DEBK et VEPK contenant les calculs de la fonction de Green du paragraphe 3.1.

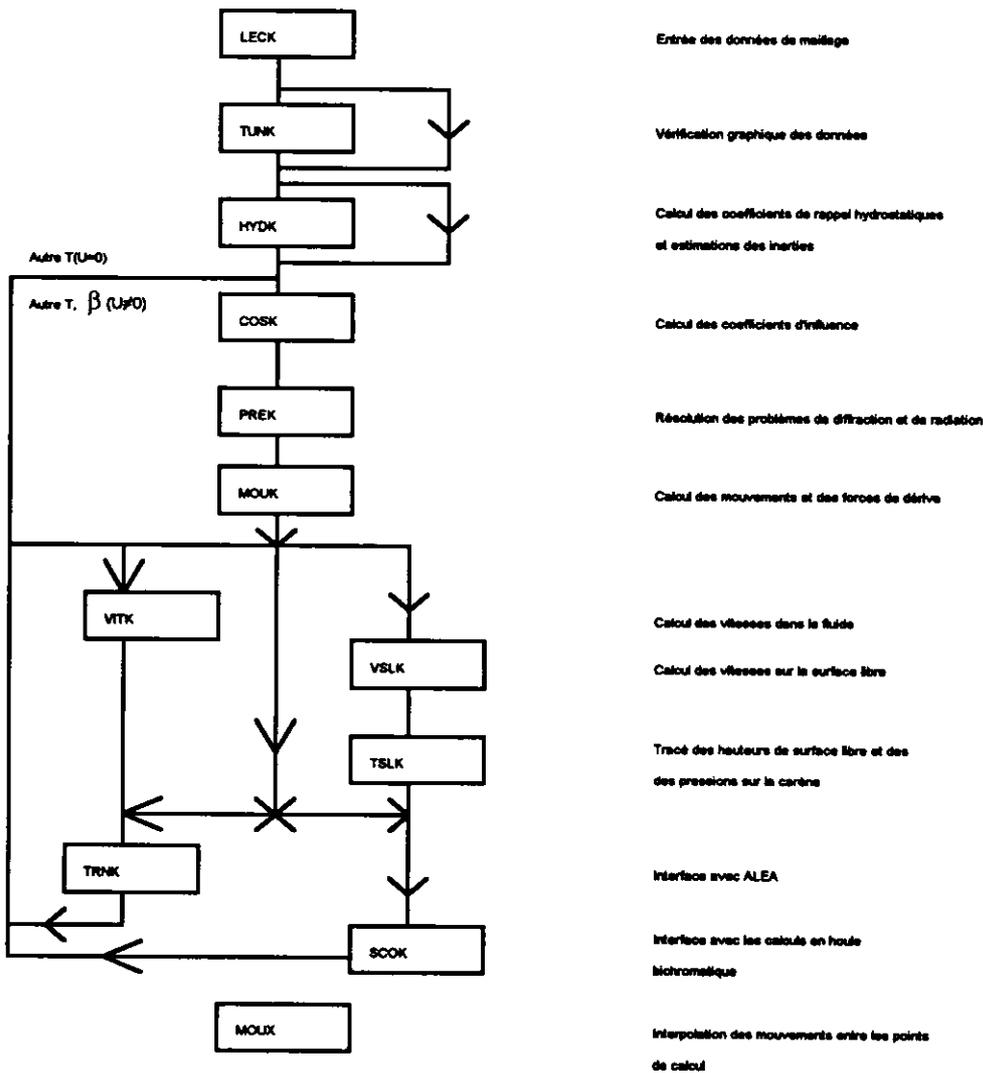
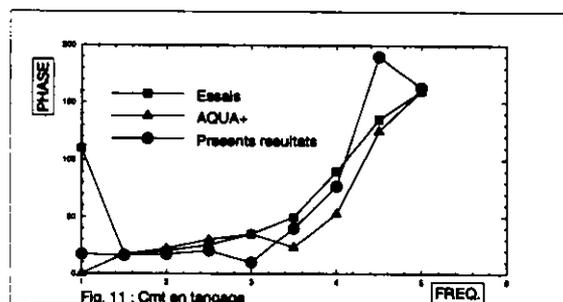
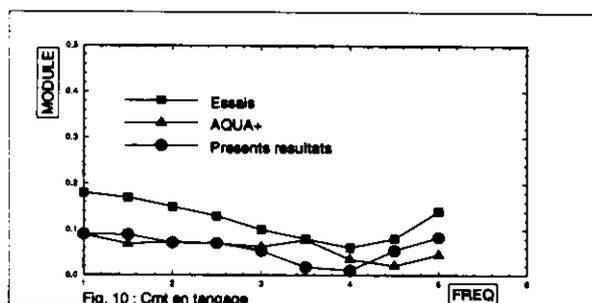
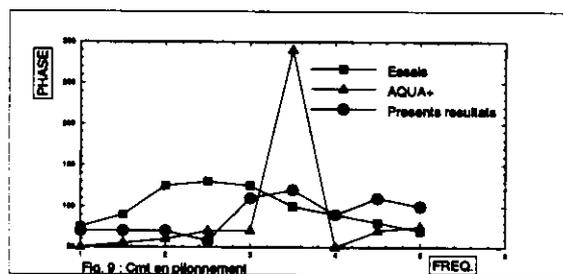
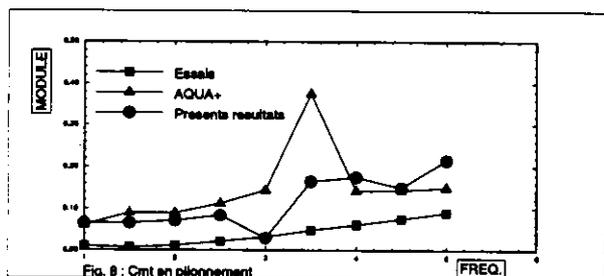
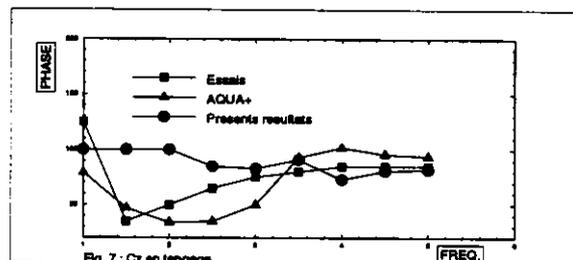
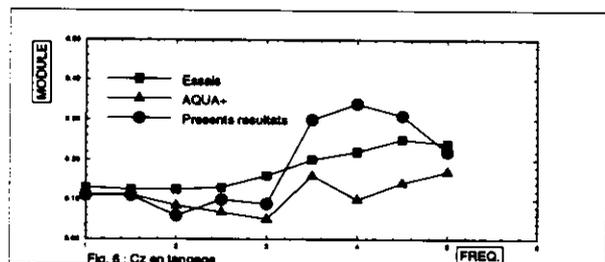
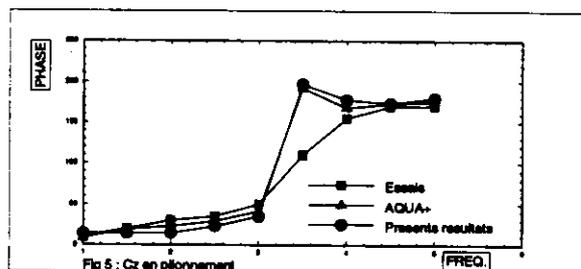
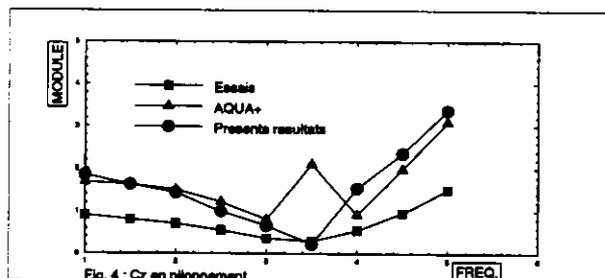


Table 1 Organisation du programme AQUAPLUS

4. Résultats numériques

4.1 Efforts hydrodynamiques



Les calculs ont été effectués avec la version originale et la version modifiée du code AQUAPLUS pour comparer avec les résultats des mesures. Les figures 4 à 7 montrent respectivement les évolutions de l'amplitude (figures paires, $C_z = 2|F_z|/\rho U^2 L z_0$, U vitesse d'avance et z_0 , amplitude du mouvement) et du retard de phase (figures impaires) sur le mouvement, en fonction de la fréquence f . Les figures 8 à 11 correspondent au moment de tangage ($C_M = 2|M|/\rho U^2 L^2 z_0$). Les figures 4 et 5, 8 et 9 correspondent au mouvement de pilonnement pur et les autres au mouvement de tangage. Les résultats des calculs avec les deux approximations sont très voisins et donnent bien l'allure obtenue avec les mesures, tant pour les amplitudes que pour les retards de phase. Pour ces dernières, l'augmentation de la phase de 0 à 180° est plus brutale dans les calculs en pilonnement puisque l'amortissement visqueux n'est

pas pris en compte, comme on l'a déjà observé dans Delhommeau, Ferrant et Guilbaud[19]. On doit remarquer que les calculs avec la fonction de Green complète ont une forme plus lisse, supprimant les oscillations que l'on observe avec la version originale de AQUAPLUS. On n'a pas observé de comportement singulier des mesures au voisinage de $\tau=0,25$ (figure 12 et 13 respectivement pour la portance en pilonnement pur et le moment de tangage en tangage pur) où les résultats sont comparés en bassin des carènes de l'ITUT La Rochelle (noté LR sur les figures) et en canal à recirculation de l'Ecole Centrale de Nantes (noté Nantes); les coefficients d'efforts et les retards de phase sont tracés en fonction de la fréquence réduite fL/u .

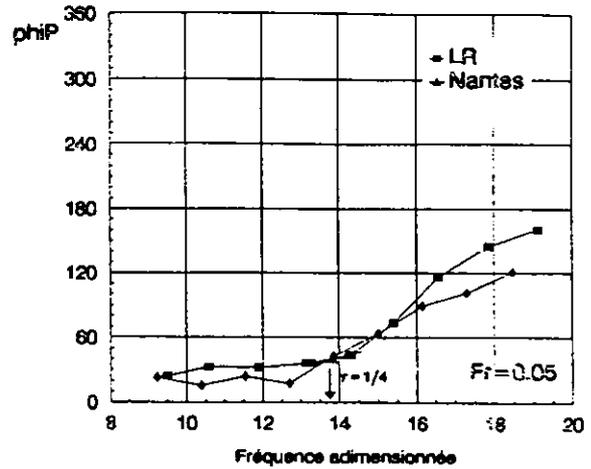
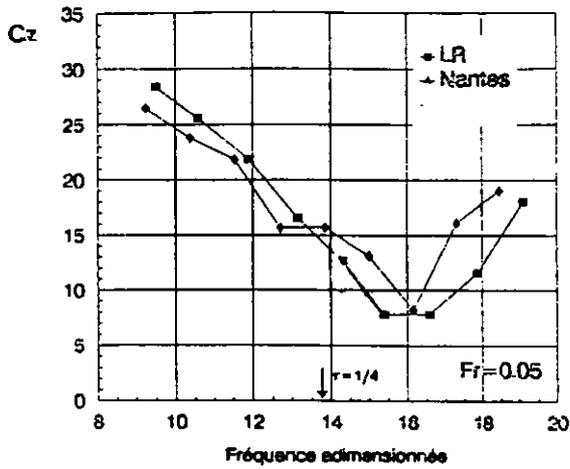


Figure 12 Coefficient de portance au voisinage de $\tau=0,25$ en pilonnement pur

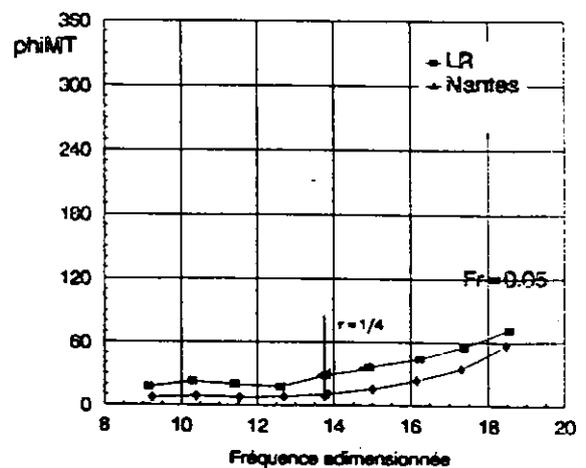
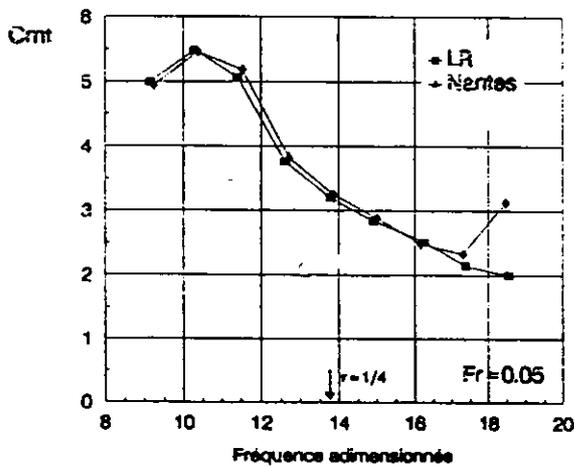


Figure 13 Coefficient de moment de tangage au voisinage de $\tau=0,25$ en tangage pur

4.2 Déformées de surface libre

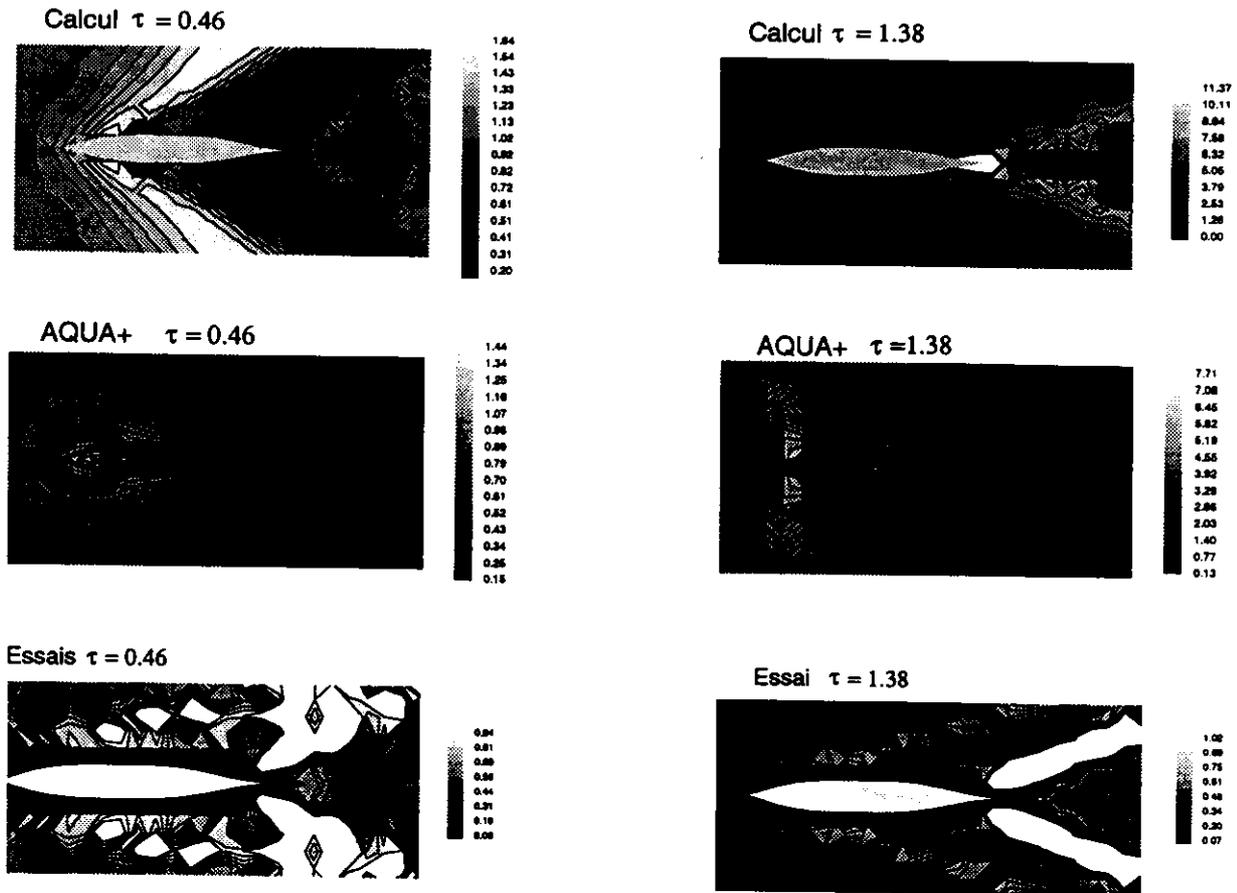


Figure 14 Déformées de surface libre en pilonnement pur

La figure 14 présente les évolutions des amplitudes ramenées à un navire de longueur $L=124\text{m}$ des ondes pour le mouvement de pilonnement pur à $F=0,3$ et $f=1$ et 3 hz (soient $\tau=0,46$ et $1,38$). La partie supérieure correspond aux calculs avec la version modifiée du code, la partie centrale à la version initiale et la partie inférieure aux mesures. Les évolutions avec τ , en particulier la forme du dièdre, semblent identiques aux mesures avec la version modifiée du code AQUA+ mais le calcul surestime les amplitudes, particulièrement aux valeurs élevées de τ .

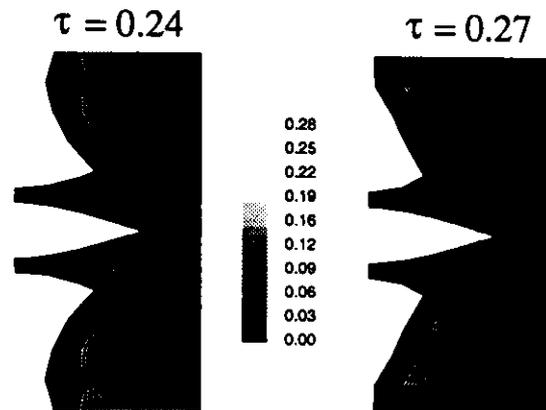


Figure 15 Déformées de surface libre mesurées au voisinage de $\tau=0,25$

En outre des problèmes numériques apparaissent à la poupe du navire, à τ élevé. Le calcul utilisant la fonction de Green avec vitesse d'avance donne un comportement convenable, alors que la version initiale de AQUA+ donne des résultats tout à fait erronés, sans signification physique. La figure 15 présente un agrandissement des tracés expérimentaux, autour de l'étrave, au voisinage de $\tau=0,25$, en pilonnement pur. Avec une échelle plus fine pour les hauteurs, on voit qu'il existe des ondes en amont du navire seulement pour $\tau=0,24$ mais qu'elles disparaissent pour $\tau=0,27$.

5. Conclusion

Nous avons présenté les premiers résultats numériques obtenus en introduisant le calcul exact de la fonction de Green de diffraction-radiation avec vitesse d'avance et de ses dérivées dans un code de calcul de tenue à la mer, AQUAPLUS, développée à l'Ecole Centrale de Nantes. Une méthode de calcul rapide de la fonction de Green permet de conserver un temps de calcul raisonnable dans ce code, quoique nettement plus élevé que dans la version initiale. Toutefois, il reste à faire encore un effort pour réduire le temps de calcul de ces fonctions de Green. Les résultats obtenus par les deux méthodes de calcul sont très voisins pour les efforts et en assez bon accord avec les mesures effectuées en bassin des carènes et en canal de recirculation pour une maquette de navire série 60 placée en mouvements imposés de pilonnement ou de tangage pur; toutefois les résultats sont plus lisses pour la version modifiée. En ce qui concerne les déformées de surface libre, la version initiale utilisant la fonction de Green de diffraction-radiation sans vitesse d'avance mais pour avec la fréquence de rencontre n'est plus capable de prévoir convenablement les amplitudes des ondes autour du navire. Par contre, la version modifiée donne des comportements convenables, en particulier en ce qui concerne l'ouverture du dièdre autour du navire. Par contre, les amplitudes des ondes sont surestimées, particulièrement pour les grandes valeurs du paramètre adimensionnel τ . Ce problème devra être élucidé.

Références

1. Guevel P. et Grékas A., "Le théorème de Lagally généralisé et ses applications à l'hydrodynamique navale", Bulletin de l'ATMA, n°81, PARIS, 1981.
2. Grékas A., "Contribution à l'étude théorique et expérimentale des efforts du second ordre et du comportement dynamique d'une structure marine sollicitée par une houle régulière et un courant", Thèse de Docteur-Ingénieur, E.N.S.M. Nantes, 1982.
3. Huijmans R.H.M. and Hermans A.J., "A fast algorithm for computation of 3-D ship motions at moderate forward speed", 4th Int. Conf. on Numerical Ship Hydrodynamics, Washington, 1985.
4. Delhommeau G., Alessandrini B. et Villéger F., "Comparaison de différentes approches du problème de diffraction-radiation avec vitesse d'avance", Comptes-rendus des 3^{èmes} Jour. Hydro., pp.3-16, 1991.
5. Maisonneuve J.J., Ferrant P. et Delhommeau G., "Diffraction-radiation avec vitesse d'avance par une méthode de singularités de Rankine", Comptes-rendus des 4^{èmes} Jour. Hydro., pp.343-56, 1993.
6. Nakos D. and Sclavounos P., "On steady and unsteady ship wave patterns", J. of Fluid Mechanics, vol. 217, pp.263-88, 1990.
7. Bougis J., "Etude de la diffraction-radiation dans le cas d'un flotteur indéformable animé d'une vitesse moyenne constante et sollicité par une houle sinusoïdale de faible amplitude", Thèse de Docteur-Ingénieur, E.N.S.M. Nantes, 1980.
8. Inglis R.B. and Price W.G., "Calculations of the velocity potential of a translating pulsating source", R.I.N.A., pp163-175, 1980.

9. Guevel P. and Bougis J., "Ship motions with forward speed in infinite depth", Int. Ship. Progress, vol. 29, pp.103-117, 1982.
10. Wu G.X. and Eatock Taylor R., "A Green's function form for ship motions at forward speed", Int. Ship. Progress, vol. 34, pp189-196, 1987.
11. Chan C.S. , " Green function in the theory of unsteady forward motion", Report NAOE-89-22, University of Glasgow, 1989.
12. Bougis J. et Coudray T., "Méthodes rapides de calcul des fonctions de Green des problèmes de Neumann-Kelvin et de diffraction-radiation avec vitesse d'avance", Comptes-rendus des 3èmes Jour. Hydro., pp.17-30, 1991.
13. Squires M.A. and Wilson P.A., "An investigation into the translating, pulsating Green's function for ship motions prediction", Proc. of the IV CADMO, pp.305-322, 1992.
14. Ba M. and Guilbaud M., "The translating pulsating Green's function for free-surface flow computations", 9th Worskhop on Water Waves and Floating Bodies, pp.9-13, Kyushu, Japan, 1994.
15. Guyot F. et Guilbaud M., "Etude expérimentale de la résistance ajoutée d'une maquette de navire soumis à des oscillations forcées harmoniques", Rapport DRET n°91-1177, 1993.
16. J.N.Newman, "The theory of ship motions", -Advances in Applied Mechanics, Vol. 18, 1978.
17. Delhommeau G. et Kobus J.M., "Méthode approchée de calcul du comportement sur houle avec vitesse d'avance", Bulletin de l'ATMA, n°87, PARIS, 1987.
18. Delhommeau G., "Les problèmes de diffraction-radiation et de résistance de vagues: étude théorique et résolution numérique par une méthode de singularités", Thèse de Docteur-ès Sciences, E.N.S.M. Nantes, 1987.
19. Delhommeau G., Ferrant P. and Guilbaud M., "*Calculation and measurement of forces on a high speed vehicle in forced pitch and wave*", Applied Ocean Research, 14, pp119-126,1992.

Remerciements: La partie expérimentale de ce travail a été soutenue par le contrat n°91/1177 passée par la Direction des Recherches et Etudes Techniques que les auteurs remercient vivement.