

8^{èmes} JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

5, 6, 7 MARS 2001 - NANTES

VALIDATION D'UN CODE DE CALCUL 3D PAR METHODE DE VOLUME OF FLUID (VOF) POUR LA SIMULATION DE NAVIRES APRES AVARIE

VALIDATION OF A 3D VOLUME OF FLUID PROGRAM FOR THE SEAKEEPING SIMULATION OF DAMAGED SHIP

L.Palazzi *, E.F.G. van Daalen *

Maritime Research Institute Netherlands (MARIN), P.O. Box 28, 6700 AA Wageningen, Pays Bas
tel: +31 317 49 34 34, Fax: +31 317 49 32 45, email: L.palazzi@marin.nl

Résumé

Un modèle numérique de calcul par Volume of Fluid (VOF) a été établi pour permettre le calcul du comportement tri-dimensionnel d'un fluide contenu dans une cuve de forme arbitraire soumise à un mouvement quelconque. L'objet de la présentation réside dans la comparaison des résultats numériques avec une série de données expérimentales. La qualité des résultats permettant d'envisager d'utiliser le programme pour l'étude du comportement de navires avec avarie et soumis à l'action de la houle, ses applications futures sont discutées.

Summary

A Volume Of Fluid (VOF) numerical program has been established to calculate the 3D behaviour of a fluid contained in an arbitrary tank under arbitrary motions. The proceeding compare the numerical results with a set of model test experiments. The good agreement observed allows to use the program for seakeeping calculation of damaged ships, further developpement will be discussed.

1. INTRODUCTION

Issu d'un projet de recherche pour la simulation de cuves anti-roulis, COMFLO (computational flow) a été conjointement développé par MARIN et l'Université de Groningen (Pays Bas). Il s'agit d'un programme de résolution des équations de Navier Stokes par méthode de Volume Of Fluid (VOF) pour des cas à géométries complexes. Il fut tout d'abord intensivement validé pour les cas en 2 dimensions: Etude d'une cuve soumise au roulis, combinaison roulis et embardée, couplage 2D avec "navire" à un degré de liberté (ref [1], [2], [3]). Parce que dans le cas d'un navire avec avarie (envahissement de compartiments), les mouvements dans les compartiments ont lieu dans toutes les directions, et parce qu'en général, ces compartiments ne sont pas vides mais occupés par diverses géométries internes, il est devenu nécessaire d'utiliser et de tester le programme pour des cas à trois dimensions.

L'objet de cette publication est de présenter brièvement la méthode de résolution du programme et de faire part des principaux résultats numériques et expérimentaux obtenus lors de la phase de validation. Pour finir, nous discuterons des possibilités de ses applications futures.

2. COMFLO – Model mathématique et numérique :

Le programme COMFLO résout les équations de Navier Stokes pour un fluide incompressible et instationnaire pour un domaine à géométrie complexe. La méthode utilisée est une méthode de calcul par Volume of Fluid (VOF), décrite par Hirt et Nichols (ref. [4]). COMFLO fut développé à l'université de Groningen [Veldman 1994] et a trouvé de nombreuses applications pour un certain nombre de problème de mécanique des fluides [Bos 1999, Fekken et al 1999]. Le programme a prouvé être robuste et d'utilisation simple, avec des options de post-processing permettant de visualiser le fluide et diverses variables de sorties telles que hauteurs de fluide, intensité des flux, pressions, forces et moments.

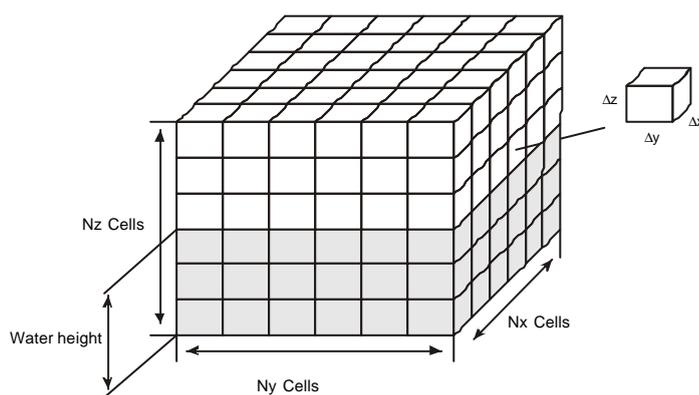


Figure 1. Domaine de fluide rectangulaire avec grille de calcul

Une grille cartésienne en 3D est définie sur le domaine d'étude. La nature de chaque cellule du domaine d'étude est initialement définie. On distingue 3 types de cellules, celles où le fluide ne peut pas se propager, celles qui sont libres de le contenir et les cellules intermédiaires désignées par la portion de leur volume pouvant contenir du fluide. Cette distinction permet de travailler avec des domaines d'étude de forme arbitraire. Les équations

de Navier-Stokes sont ensuite discrétisées sur cette grille et résolues pour les inconnues (vitesses et pressions du fluide) en prenant en compte les conditions initiales et conditions aux limites adéquates. L'intérêt de la méthode VOF consiste à différencier au cours du calcul les cellules de fluide ou d'air ainsi que les cellules intermédiaires (cellules contenant la surface libre) en considérant le rapport (volume de fluide)/(volume d'air) qu'elles contiennent. Pour une description mathématique détaillée de COMFLO, nous nous référons aux publications de Gerrits (1996) et Loots (1997) (ref. [5], [6], [7]).

3. EXPERIMENTATIONS

Afin de valider le problème tri-dimensionnel, une série d'expérimentations portant sur 2 types de caissons (réalisés à l'échelle 1/15), effectuées dans le Shallow Water Bassin de MARIN, furent utilisées pour comparaison.

En configuration No 1, le caisson était vide, tandis qu'en configuration No 2, il comprenait une géométrie interne du type salle des machines visible sur la photo ci dessous. Les caissons, partiellement remplis d'eau, furent soumis à des oscillations sinusoïdales autour d'un axe fixe (roulis) tandis que les forces agissant sur le container et les hauteurs d'eau en divers points du container furent mesurées. Des variations systématiques du volume d'eau, du centre de rotation, de l'amplitude d'oscillation et de sa fréquence ont été effectuées afin de couvrir au maximum les situations observables à bord des navires.

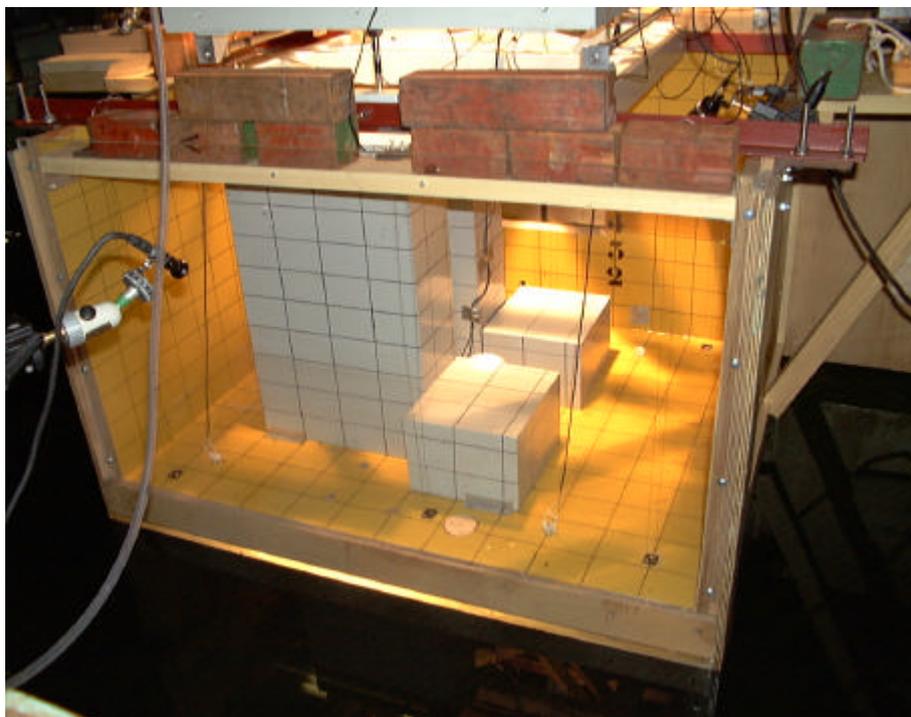


Figure 2: Configuration No2.
Model du caisson avec obstructions type salle des machines

4. VALIDATION DU PROGRAMME

Les expériences sur modèle réduit furent reproduites par COMFLO à l'échelle prototype. Tout d'abord, une grille de taille minimale fut déterminée, grille permettant un temps de calcul et une précision raisonnable. Le modèle retenu consistait en une grille d'environ 30000 cellules correspondant à un temps de calcul variant entre 10 et 40 minutes pour la simulation de 10 oscillations du caisson.

Le tableau No1 donne le détail des simulations réalisées et les figures 3 et 4 définissent les paramètres de test et les grandeurs mesurées:

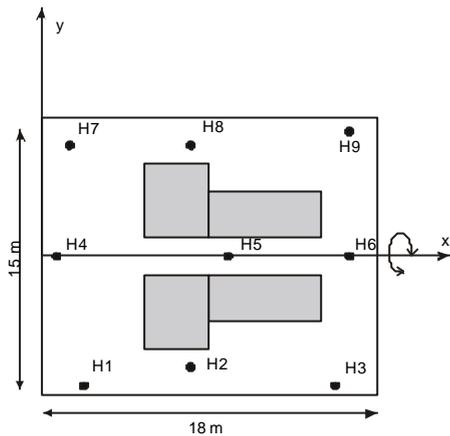


Figure 3 : Configuration No 2, vue de dessus : grandeurs principales et mesure des hauteurs d'eau (H1, H2, ... H9)

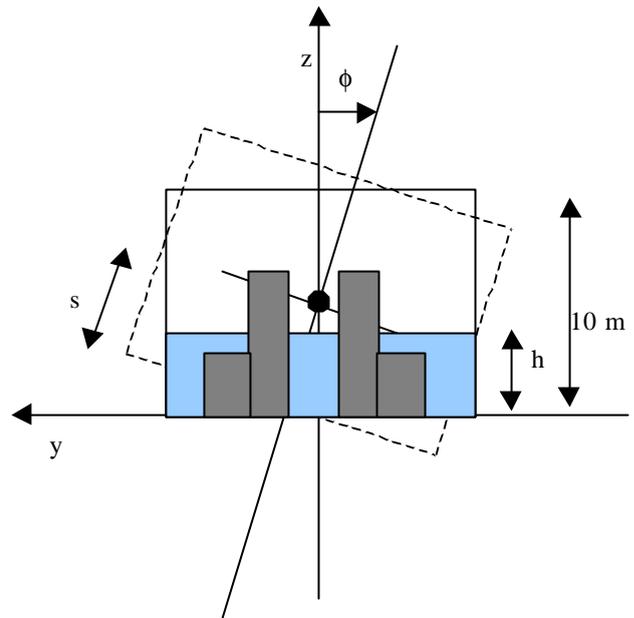


Figure 4 : Définition des paramètres de test

Amplitude (autour de l'axe x)	Période	Hauteur d'eau	Centre de rotation au dessus de la base du container
ϕ_a (deg)	$T\phi$ (s)	h (m)	s (m)
Configuration No1 : Container vide			
4, 10	8, 10, 11, 12, 14	1.5, 3.0, 6.0	3.0
Configuration No2: Container avec obstruction type salle des machines			
4, 10, 15	8, 10, 11, 12, 14	1.5, 3.0, 6.0	3.0, 6.0

Table 1: Conditions de test et de calcul

5. DISCUSSION DES RESULTATS

Les résultats, tout d'abord obtenus sous forme de données temporelles ont ensuite été transformés dans le domaine fréquentiel à l'aide d'une analyse harmonique pour une comparaison globale. Les amplitudes et les phases du moment de roulis calculées et mesurées sont fournies au travers des figures 5 et 6. Une première observation de celles ci indique que les résultats numériques sont très satisfaisants, les différences observées n'excèdent pas 15%. Par ailleurs le phénomène de résonance, visible lorsque la phase du moment de roulis est en quadrature (270 deg) par rapport au mouvement de roulis, est lui aussi correctement prédit. La résonance apparait donc à la bonne fréquence avec des amplitudes de forces et de hauteurs d'eau relativement précises.

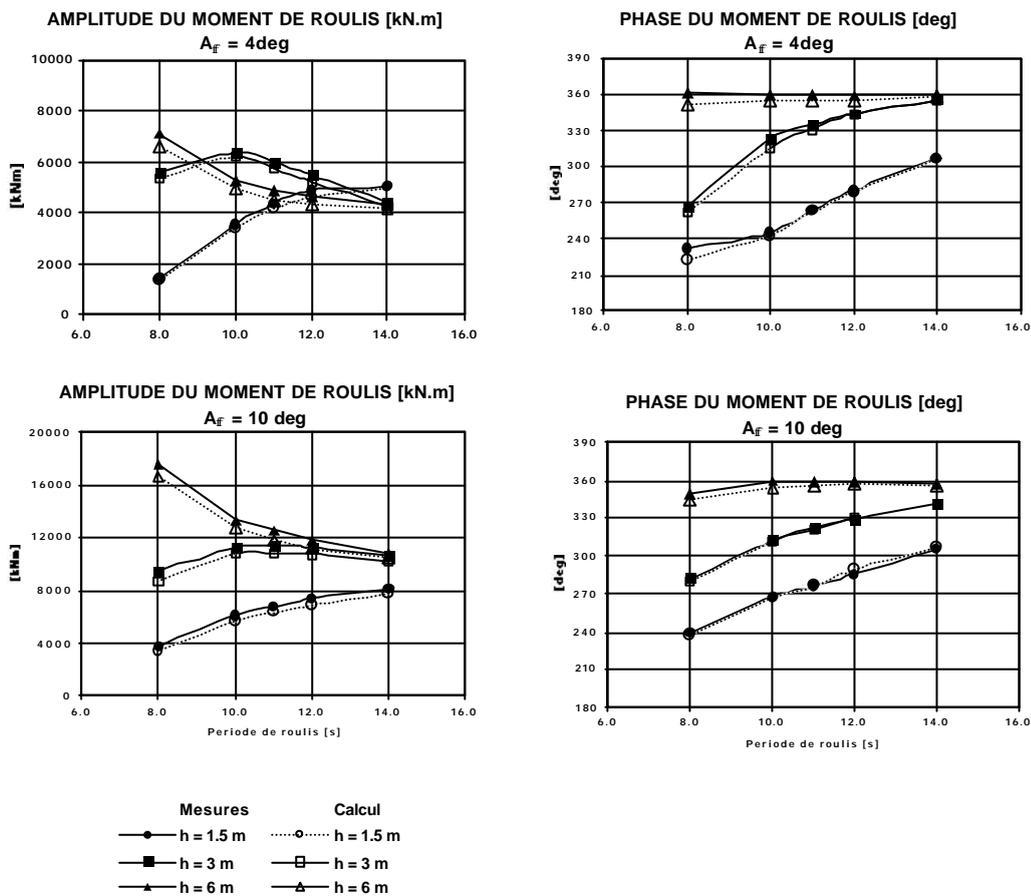


Figure 5: Analyse Harmonique
Configuration No 1
Amplitudes et phases du moment de roulis mesurées et calculées
s = 3m

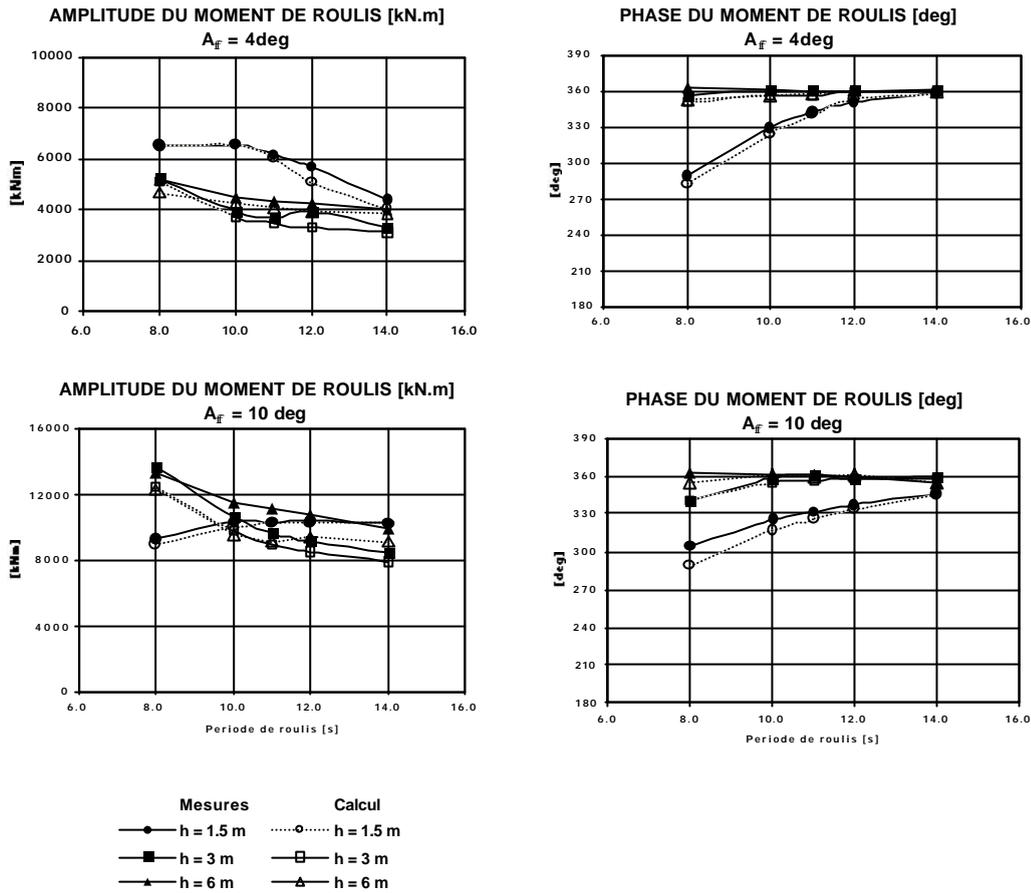


Figure 6: Analyse Harmonique
 Configuration No 2
 Amplitudes et phases du moment de roulis mesurées et calculées
 $s = 3\text{m}$

La comparaison des expériences réalisées en configuration 1 et en configuration 2 permet d'observer les effets tri-dimensionnels dus à la présence des géométries internes dans le container. La figure 7 fournit les amplitudes et les phases du moment de roulis pour une amplitude de 4 deg, une hauteur d'eau de 1.5m et un centre de rotation à 3m pour différentes fréquences. En configuration No 1, on constate que le fluide entre en résonance pour $T = 8 \text{ s}$. Pour cette même condition de test, en configuration No 2, l'amplitude du moment de roulis se trouve fortement réduite, seuls les tests réalisés avec les périodes les plus longues donnent des résultats similaires. Cette différence, uniquement due à la présence des éléments d'obstruction qui empêchent le fluide d'entrer en résonance, illustre le phénomène tri-dimensionnel. Ces observations peuvent être faites aussi bien à partir des résultats expérimentaux qu'à partir des résultats de COMFLO.

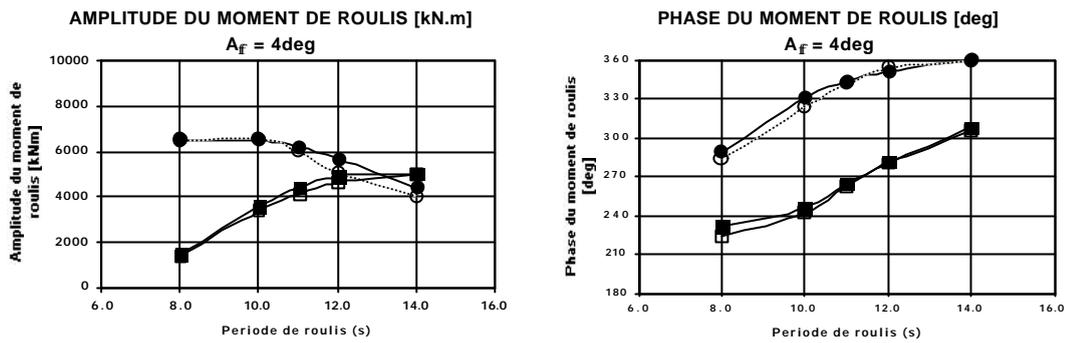


Figure 7: Effet 3D
 Analyse harmonique, amplitudes et phases
 $h = 1.5 \text{ m}$, $s = 3 \text{ m}$, $A\phi = 4 \text{ deg}$
 cercle: caisson vide, carrés: caisson avec géométrie interne

Il est aussi intéressant de comparer les signaux temporels de hauteur d'eau obtenus au cours de ces tests. On voit clairement, sur H1, H2, H3 (figures 8 et 9) que la variation de la hauteur d'eau est nettement réduite lors du test en configuration No 2. Une fois encore, le phénomène est observable et correctement reproduit à l'aide de COMFLO.

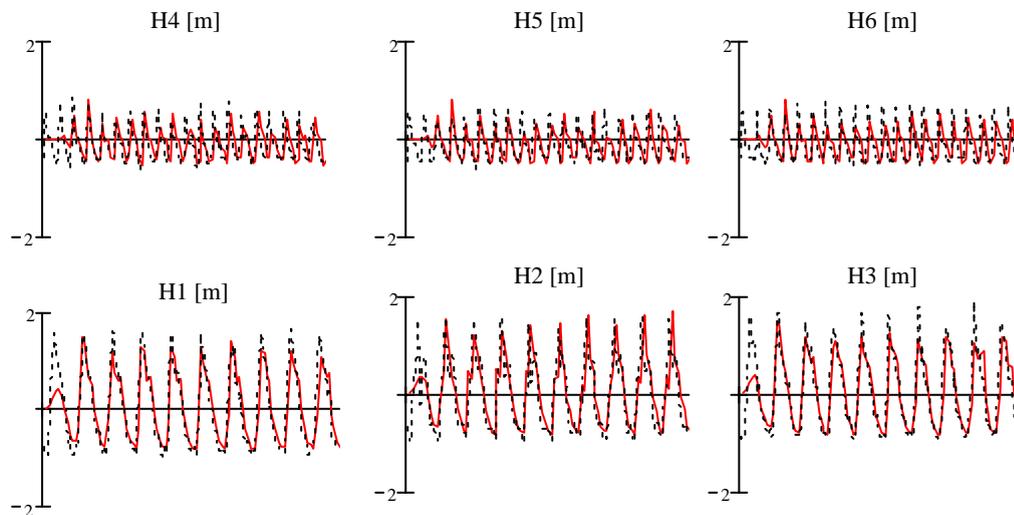


Figure 8: Signaux mesurés et calculés des hauteurs d'eau en différents points du caisson
 Caisson vide, $h = 1.5 \text{ m}$, $s = 3 \text{ m}$, $A\phi = 4 \text{ deg}$, $T = 8 \text{ s}$
 pointillés: mesures, pleine ligne: COMFLO

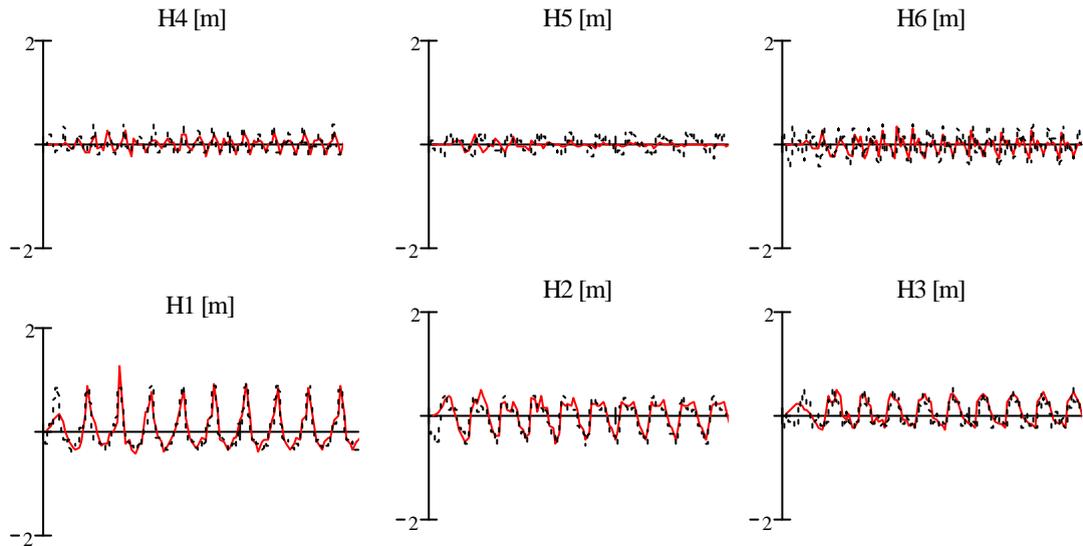


Figure 9: Signaux mesurés et calculés des hauteurs d'eau en différents points du caisson
 Caisson avec géométrie interne, $h=1.5$ m, $s = 3$ m, $A\phi = 4$ deg, $T= 8$ s
 pointillés: mesures, pleine ligne: COMFLO

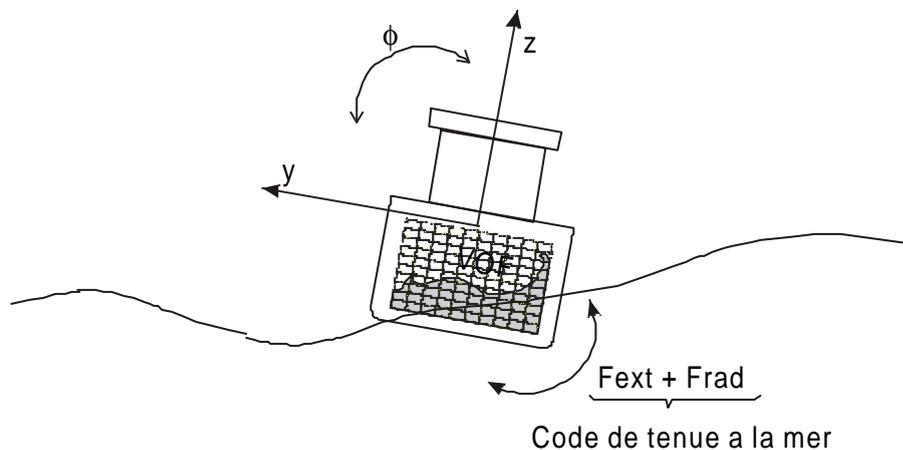
6. APPLICATIONS

La motivation pour la réalisation de COMFLO, est le couplage complet de celui ci avec un code temporel de tenue à la mer.

Un navire contenant du liquide dans ses compartiments réagit à l'action des vagues et à celle du liquide en mouvement dans ses cuves. Le mouvement du fluide est à son tour directement gouverné par les mouvements du navire. Cette interaction est principalement non linéaire et ne peut être résolue que dans le domaine temporel.

Les équations d'un navire contenant du liquide dans ses cuves s'expriment par:

$$M\ddot{\vec{x}} = \vec{F}^{exc} + \vec{F}^{rad} + \vec{F}^{tank}$$



où \vec{x} est le torseur des mouvements du navire (cavalement, embardée, pilonnement, roulis, tangage, lacet) et M est la matrice (6×6) d'inertie. \vec{F}^{exc} est le torseur des forces dues à l'action des vagues, qui se calcule par intégration des pressions sur la forme de carène instantanée pour les programmes non-linéaires ou, pour les programmes linéaires, par $\vec{F}^{exc} = -C\vec{x} + \vec{F}^{wave}$ où C est une matrice (6×6) contenant les coefficients de raideur hydrostatique et \vec{F}^{wave} étant obtenu par intégration des pressions sur la carène immobile. \vec{F}^{rad} représente le phénomène de radiation dû aux mouvements du navire. On calcul ces efforts de manière générale par une approche dite de « strip theory » et on les décompose en $\vec{F}^{rad} = -B\dot{\vec{x}} - A\ddot{\vec{x}}$ où A et B sont les matrices (6×6) dépendantes de la fréquence et représentant les coefficients de masse ajoutée et d'amortissement. \vec{F}^{tank} est le torseur des forces du liquide contenu par le navire.

En pratique, la partie radiative doit être exprimée à l'aide d'intégrales de convolution impliquant une fonction de retard et l'historique des vitesses (6 composantes) du navire:

$$\vec{F}^{rad}(t) = -A^\infty \ddot{\vec{x}}(t) - B^\infty \dot{\vec{x}}(t) - \int_0^t K(t-\tau) \dot{\vec{x}}(\tau) d\tau$$

Les fonctions de retard $K(t)$ sont calculées à partir des coefficient d'amortissement $B(\omega)$:

$$K(t) = \int_0^\infty [B(\omega) - B^\infty] \cos \omega t d\omega$$

où B^∞ est une matrice (6×6) avec les valeurs limites des coefficients d'amortissement pour une fréquence d'oscillation infinie.

Les équations de mouvement temporelles sont alors organisées de la manière suivante:

$$(M + A^\infty) \ddot{\vec{x}}(t) = -B^\infty \dot{\vec{x}}(t) - \int_0^t K(t-\mathbf{t}) \dot{\vec{x}}(\mathbf{t}) d\mathbf{t} - C\vec{x}(t) + \vec{F}^{wave}(t) + \vec{F}^{tank}(t) \quad (12)$$

Les forces et moments du liquide interne peuvent alors être calculées à l'aide de COMFLO.

Il convient néanmoins d'en soustraire la partie inertielle pour l'inclure du côté gauche de l'équation (12), en ne conservant du côté droit que les contributions dynamiques. Ceci permet d'obtenir un système numérique stable lorsque par exemple une méthode de Runge-Kutta est appliquée (Gerrits & Veldman 2000).

MARIN dispose déjà d'un code de calcul temporel FREDYN, permettant la prédiction du comportement des navires après avarie. Néanmoins le module de calcul du mouvement du liquide à l'intérieur des différentes configurations de compartiments souffre de son approche quasi statique (surface du liquide toujours horizontale) qui ne permet pas de prendre en compte les effets de résonance. L'intégration de COMFLO au sein de ce code permettrait donc d'actualiser avec exactitude, pour chaque pas de temps, la valeur du torseur des forces induites par la présence de liquide à l'intérieur du navire. Par ailleurs, les mouvements calculés par le programme de tenue à la mer serviront d'input pour COMFLO. Les premiers essais de couplage dans le cas 2D simplifiés à un degré de liberté ont déjà été réalisés avec succès (ref [9]). Le couplage 3D, à 6 degrés de liberté est en cours de développement.

Néanmoins, COMFLO peut déjà prétendre à des applications immédiates. Le programme peut être utilisé lors de l'étude de cuves anti-roulis. Il est alors possible de prendre en compte l'impact des géométries internes sur l'efficacité de la cuve. De plus toute forme de cuve peut être aussi étudiée. L'analyse harmonique permet alors d'obtenir les coefficients fréquentiels de raideur et d'amortissement dus à la cuve. Ces résultats sont alors directement utilisables pour réaliser des études d'opérabilité des navires équipés de telle cuve. La précision s'en trouvant nettement améliorée par rapport à la pratique courante.

7. CONCLUSION

Une série d'expériences, concernant le comportement tri-dimensionnel d'un fluide contenu dans un caisson oscillant, furent réalisées et reproduites à l'aide d'un code de calcul VOF afin de valider celui ci. L'ensemble des résultats observés est très satisfaisant tant au niveau des résultats de l'analyse fréquentielle que de l'observation détaillée des signaux mesurés.

Cette étude, nous permet d'acquérir une grande confiance dans les résultats de calcul VOF et nous permet d'envisager l'intégration d'un tel module dans un code temporel de tenue à la mer afin d'obtenir un programme pouvant prédire avec précision le comportement de navires après avarie.

Références:

- [1] Bosch, J.J. van den and Vugts, J.H., “Roll damping by free surface tanks”, Shipbuilding Laboratory of the Technical University of Delft, Report No. 83S, 1966.
- [2] Daalen, E.F.G. van, Doeveren, A.G. van, Driessen, P.C.M., Visser, C.: Two-dimensional free surface anti-roll tank simulations with a Volume Of Fluid based Navier-Stokes solver. Maritime Research Institute Netherlands, Report. No. 15306-1-OE, October 1999.
- [3] Daalen, E.F.G. van, Gerrits, J., Loots, G.E. and Veldman, A.E.P., “Free surface anti-roll tank simulations with a Volume Of Fluid based Navier-Stokes solver”, Proceedings of the 15th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, Caesarea, Israel, 2000, pp. 32-35.
- [4] Hirt, C.W. and Nichols, B.D.: Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. Journal of Computational Physics, Vol. 39, pp. 201-225, 1981.
- [5] Gerrits, J.: Three-dimensional liquid sloshing in complex geometries. Master’s thesis, University of Groningen, Department of Mathematics, August 1996.
- [6] Loots, G.E.: Free surface flow in three-dimensional complex geometries. Master’s thesis, University of Groningen, Department of Mathematics, August 1997.
- [7] Loots, G.E.: Free surface flow in three-dimensional complex geometries using enhanced boundary treatment. Master’s thesis, University of Groningen, Department of Mathematics, June 1998.
- [8] Daalen, E.F.G. van and Palazzi, L., “3D fluid sloshing in rectangular containers – Validation of a Volume Of Fluid based Navier-Stokes solver”, Maritime Research Institute Netherlands, Report No. 16131-2-RD, May 2000.
- [9] Daalen, E.F.G., Kleefsman, K.M.T., Gerrits, J., Luth, H.R., Veldman, A.E.P., "Anti-roll tank simulation with a volume of fluid (vof) based Navier-Stokes solver", Proceedings of the 23rd Symposium on Naval Hydrodynamics, Val de Reuil, France, September 2000