



15^{ÈMES} JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

22 - 24 novembre 2016 - Brest

Titre

*DÉVELOPPEMENTS ET VALIDATION DE L'OUTIL CFD
OPENFOAM POUR LE CALCUL DE TENUE À LA MER*

Charles Monroy, Sopheak Seng, Šime Malenica

Bureau Veritas

Résumé

Des développements ont été réalisés dans le logiciel CFD OpenFOAM pour traiter du problème de tenue à la mer. Trois cas de validation sont étudiés dans ce papier : un cas de propagation de houle seule, un cas de diffraction sur un cylindre fixe et le cas d'un corps libre pilonnant sur eau calme. Les résultats sont comparés à des valeurs expérimentales et analytiques de référence.

Summary

Developments have been made in OpenFOAM to deal with seakeeping problems. Three validation cases are investigated in this paper : a pure wave propagation case, a diffraction case on a fixed cylinder and the case of a freely heaving body in calm water. Numerical results are compared against experimental and analytical reference results.

1 Introduction

OpenFOAM est un logiciel Open-Source permettant de résoudre les systèmes d'équations aux dérivées partielles et en particulier les équations de Navier-Stokes par la méthode des volumes finis. Bureau Veritas se sert d'OpenFOAM depuis plusieurs années pour estimer le phénomène de ballotement à l'intérieur des cuves de méthaniers et le code a été validé avec soin pour cette application. Plus récemment, nous avons aussi décidé d'axer sur OpenFOAM notre développement CFD pour la tenue à la mer. Les motivations pour ce choix sont plurielles. Au vu de la nature spécifique de notre cœur de métier où nos outils servent à certifier la fiabilité structurelle des navires, nous estimons préférable d'avoir un accès total au code source. De plus, forts de l'expérience accumulée ces trente dernières années dans le développement et l'utilisation de nos propres codes basés sur la théorie potentielle, nous sommes certains que le contrôle total des sources nous sera nécessaire pour permettre de réaliser des développements ponctuels pour le besoin de telle ou telle étude. Enfin, dans la perspective où la CFD jouera un rôle accru dans l'approbation des navires, le fait qu'OpenFOAM soit gratuit n'est pas sans intérêt économique. Néanmoins, l'utilisation d'OpenFOAM pour l'application tenue à la mer a un certain coût. D'une part, l'outil est relativement plus difficile à prendre en main que ses équivalents commerciaux. D'autre part, un certain nombre de développements par rapport à la version officielle sont nécessaires pour assurer une précision et une stabilité des calculs compatibles avec notre objectif. Enfin, il est nécessaire de réaliser un grand nombre de validations avant d'utiliser le code industriellement. Dans ce papier, nous nous intéresserons d'abord à la façon d'introduire les vagues dans le domaine CFD. Dans la version actuelle du code, nous privilégions une approche basée sur les zones de relaxation permettant à la fois de générer la houle incidente et d'absorber le champ perturbé par la structure. Plusieurs modèles de houle peuvent être utilisés : houle de Stokes du 1er ordre, 2ème ordre, ..., jusqu'à un modèle non-linéaire complet basé sur la fonction de courant. L'implémentation des zones de relaxation sera expliquée et un exemple de propagation de houle 2D sera montré pour s'assurer de la qualité de la propagation de la houle dans le domaine CFD. La qualité de l'absorption liée aux zones de relaxation sera analysée dans le cas d'un cylindre fixe dans la houle. Un autre aspect important du calcul de tenue à la mer concerne la fiabilité du solveur mécanique et son interaction avec la résolution de l'écoulement fluide. Le schéma de résolutions successives des équations du mouvement et des équations de Navier-Stokes sera expliqué, et l'on insistera sur l'intérêt de l'introduction d'un critère de convergence sur l'accélération du corps. Le cas du cylindre en pilonnement sur l'eau calme sera considéré.

2 Théorie

Nous présentons dans cette partie le fonctionnement du solveur *foamStar* dédié au problème de tenue à la mer. Il dérive en grande partie du solveur natif d'OpenFOAM intitulé *interDyMFoam* servant à la résolution des écoulements biphasiques incompressibles. La modélisation par volumes finis d'OpenFOAM est expliquée dans [7] et sa conception orientée objet est couverte dans [8]. Seules les modifications apportées à *interDyMFoam* sont détaillées dans ce papier.

2.1 Zone de relaxation

Introduire les vagues par une condition aux limites à la frontière du domaine pose généralement des problèmes en terme de gestion du champ radié et diffracté par la structure lorsqu'il atteint les

frontières du domaine. Il nous semble préférable d'utiliser le concept de zone de relaxation pour à la fois introduire le champ incident et absorber le champ radié et diffracté par la structure. Comme prouvé par la suite dans le cas du cylindre soumis à une houle régulière, le bénéfice d'une telle approche est de permettre de longues simulations sans dérive des résultats au cours du temps (i.e. en minimisant les phénomènes de réflexion). Cette approche n'est pas en soi originale et a déjà été décrite notamment dans [5] et une première implémentation dans OpenFOAM détaillée dans [6].

A chaque itération non-linéaire, le champ VOF α est mis à jour via l'équation 1 ainsi que le champ vectoriel de vitesse \mathbf{u} via l'équation 2.

$$\alpha = w\alpha_e + (1 - w)\alpha_p \quad (1)$$

$$\mathbf{u} = w\mathbf{u}_e + (1 - w)\mathbf{u}_p \quad (2)$$

où \mathbf{u}_e est le champ de vitesses cible et \mathbf{u}_p est le champ de vitesses calculé à l'issue de la boucle PISO et non-modifié. Dans ces deux équations, w représente la fonction de poids. Afin de minimiser le plus possible d'éventuelles réflexions, cette fonction de poids n'est pas constante en temps et dépend de la vitesse instantanée. Ainsi, dans l'équation 3, $\Delta\mathbf{u} = \mathbf{u}_e - \mathbf{u}_p$ représente la différence entre le champ de vitesses calculé et le champ cible incident. Plus l'écart entre le champ calculé et le champ cible est élevé, plus la relaxation sera importante. Ce coefficient est pondéré par le pas de temps Δt et la taille caractéristique de la maille Δs .

$$w = 1 - (1 - w_{tar})^{|\Delta\mathbf{u}|\Delta t/\Delta s} \quad (3)$$

w_{tar} représente la fonction de poids spatiale constante en temps qui se doit d'être suffisamment lisse. Pour ce papier, nous avons choisi une forme cubique pour la fonction de poids constante w_{tar} (eq. 4) figurée en bleu sur la figure 1.

$$w_{tar} = -2 * d^3 + 3 * d^2 \quad (4)$$

où d représente la distance entre le début de la zone de relaxation et la position de la maille (adimensionnée par la taille de la zone de relaxation), cette distance est figurée en rouge sur la figure 1.

2.2 Modèles de houle

Plusieurs modèles de houle consistant à fournir un champ cible (\mathbf{u}_e, α_e) dans la zone de relaxation sont implémentés. En ce qui concerne la houle régulière, cela va de la simple houle d'Airy jusqu'à un modèle de Fenton & Rienecker basé sur la fonction de Courant [10] en passant par des houles de Stokes du 3ème et 5ème ordre. Pour la houle irrégulière, le seul modèle implémenté consiste en la superposition de trains de houle d'Airy, mais il est envisageable dans l'avenir de coupler OpenFOAM avec un modèle HOS [1] pour fournir une description réaliste d'un état de mer irrégulier. Par ailleurs, il est possible d'inclure une vitesse d'avance ou une profondeur finie.

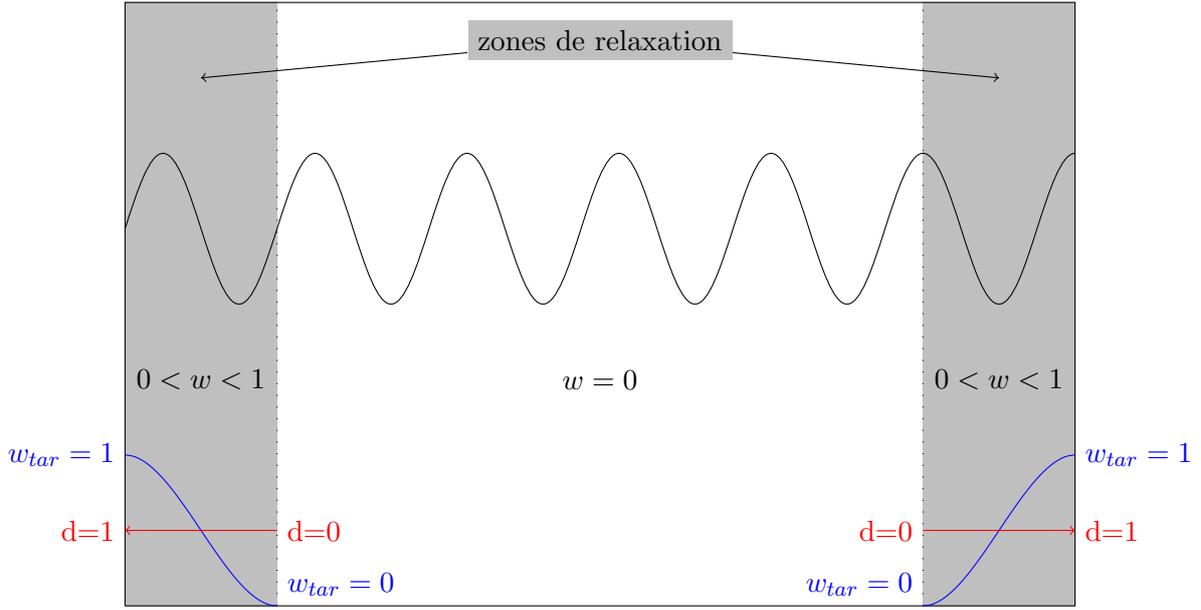


FIGURE 1: Zones de relaxation.

2.3 Interaction fluide-structure

Dans le solveur natif d'OpenFoam *interDyMFoam*, l'utilisateur spécifie un nombre fixe d'itérations non-linéaires. Dans le cas spécifique de la tenue à la mer, cette stratégie ne semble pas optimale. En effet, nous ne savons pas à l'avance combien d'itérations non-linéaires seront nécessaires pour assurer une bonne interaction entre le solveur fluide et la résolution de la mécanique. C'est pourquoi comme critère de convergence de la boucle PIMPLE, nous imposons la convergence de chacune des six composantes de l'accélération du corps flottant. Ainsi, l'équation 5 renvoie le résidu relatif de l'accélération à l'itération non-linéaire k .

$$res_{rel}^k = \max_{i \in [1,6]} \left| \frac{acc^k(i) - acc^{k-1}(i)}{acc^{k-1}(i)} \right| \quad (5)$$

La convergence de la boucle PIMPLE est assurée lorsque $res_{rel}^k < fsiTol$, avec la tolérance $fsiTol$ fixée en entrée du calcul.

2.4 Logigrammes

Le logigramme de *foamStar* est présenté par la figure 2. Les changements par rapport à la version standard d'*interDyMFoam* dans OpenFOAM v.3.0. sont colorés en vert.

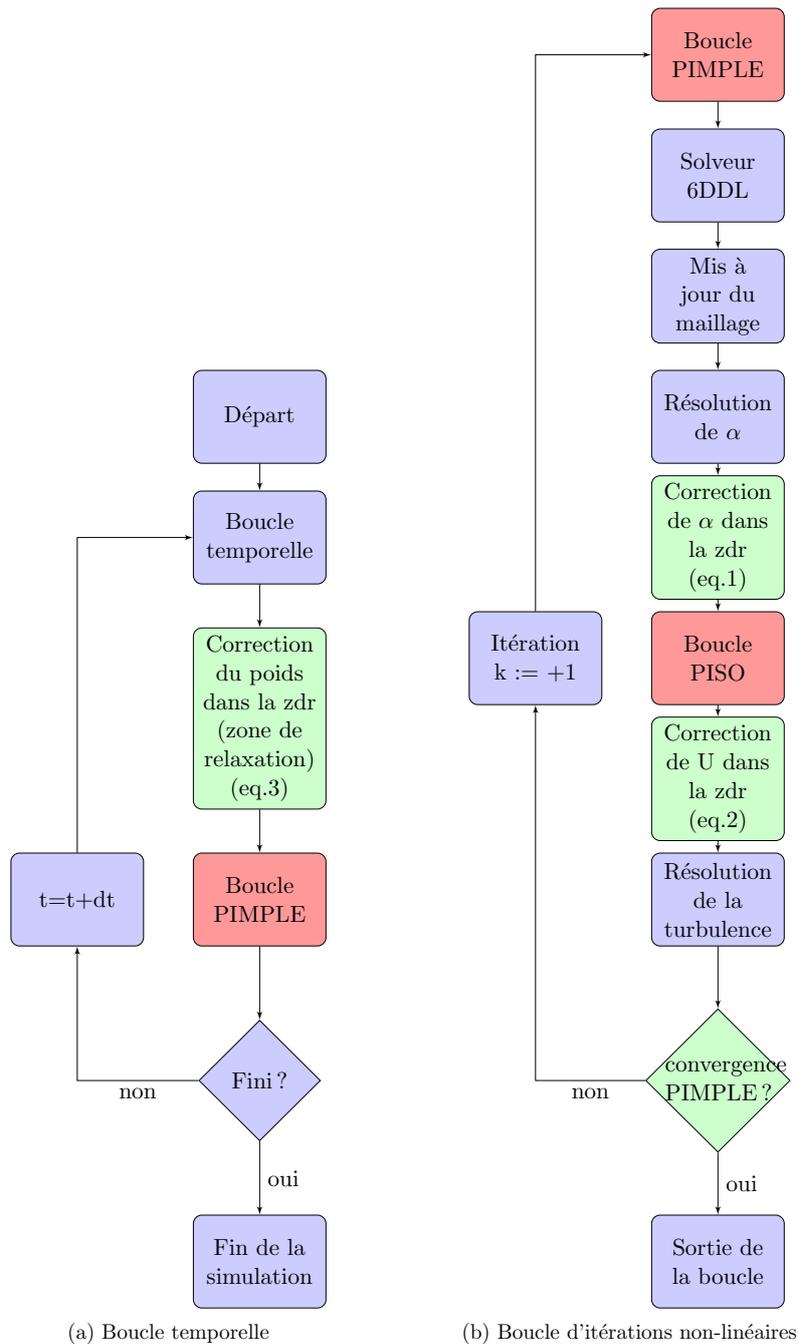


FIGURE 2: Logigramme de *foamStar*. En vert, les parties ajoutées ou modifiées par rapport au solveur natif *interDyMFoam*.

3 Propagation des vagues

La qualité de la propagation des vagues est analysée dans le cas d'une houle modérément cambrée dont les caractéristiques sont détaillées dans le tableau 1. Le modèle utilisé ici pour le champ cible dans les zones de relaxation est une théorie de Stokes du 5ème ordre.

Trois maillages 2D ont été utilisés dans cette étude. Leur dimension est la même, seule change leur densité en maillage dans la direction de propagation. Le maillage 1 possède 39000 mailles avec

profondeur	2 m
longueur d'onde	10.07 m
période	2.75 s
amplitude	0.1 m
cambrure	1.87 %

TABLE 1: Caractéristiques de la houle régulière propagée

une discrétisation de 50 mailles par longueur d'onde. Le maillage 2 a 100 mailles par longueur d'onde et le maillage 3 a 200 mailles par longueur d'onde. Les trois maillages possèdent la même discrétisation en z avec 15 mailles pour mailler la zone crête à creux.

	N_{tot}	N/L	N/H
Maillage 1	39000	50	15
Maillage 2	78000	100	15
Maillage 3	156000	200	15

TABLE 2: Caractéristiques des trois maillages utilisés pour la propagation de houle

Une vue du domaine est proposée sur la figure 3. Il y a deux zones de relaxation situées en entrée (*inlet zone*) et en sortie (*outlet zone*) du domaine. La position des sondes d'élévation y est figurée par des chiffres. Pour chacun des trois maillages, nous avons choisi un pas de temps fixe de 0.01 s, ce qui fait 275 pas de temps par période de houle. Pour le maillage le plus fin, la simulation d'une période de houle prend 45 minutes sur un processeur.

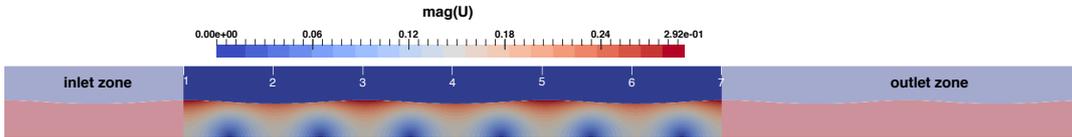


FIGURE 3: Propagation de la houle 2D.

La figure 4 propose une analyse de Fourier par fenêtre glissée de l'élévation au niveau de la sonde 5 située à 3 longueurs d'onde de la frontière d'entrée du domaine (et à deux longueurs d'onde de la zone de relaxation *inlet*). On peut d'ores et déjà constater qualitativement qu'à partir de quelques périodes de houle, les coefficients sont stables et la périodicité assurée. Lorsque nous nous référons par la suite aux harmoniques du signal d'élévation, nous faisons référence à sa valeur en fin de simulation.

Pour permettre de quantifier l'évolution de la propagation le long du domaine, nous nous intéressons à l'erreur relative sur l'amplitude de la première harmonique en un point du domaine par rapport à l'amplitude de la première harmonique au niveau de la sonde 1 (à la fin de la zone de relaxation), tel qu'indiqué par l'équation 6.

$$\%_{err} = \frac{\eta_x^{(1)} - \eta_1^{(1)}}{\eta_1^{(1)}} * 100 \quad (6)$$

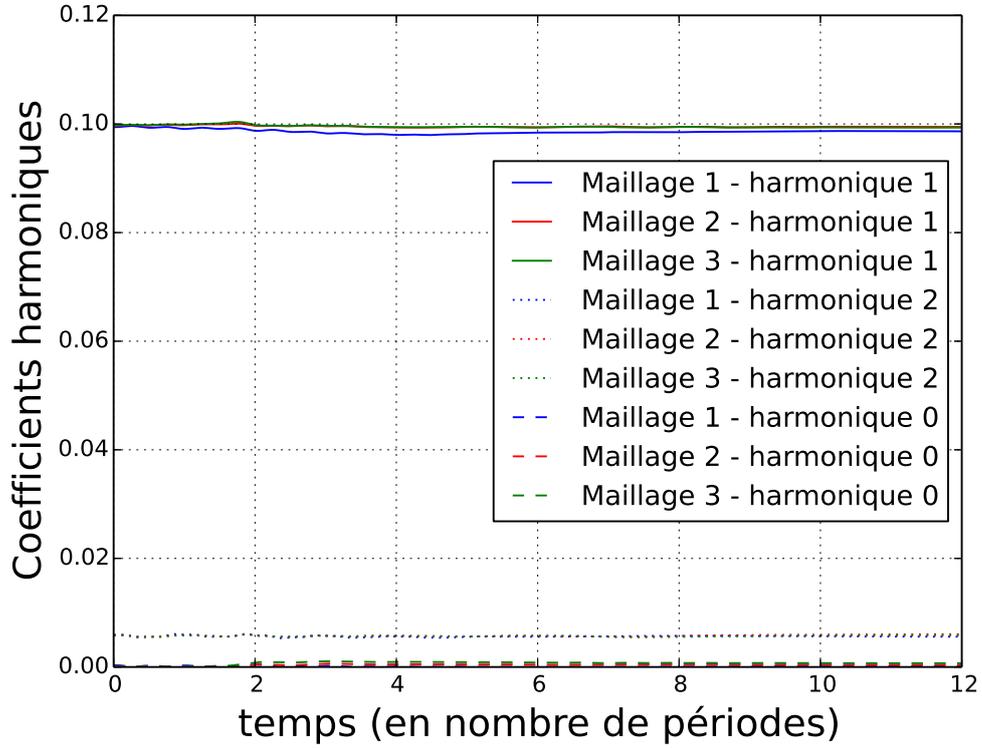
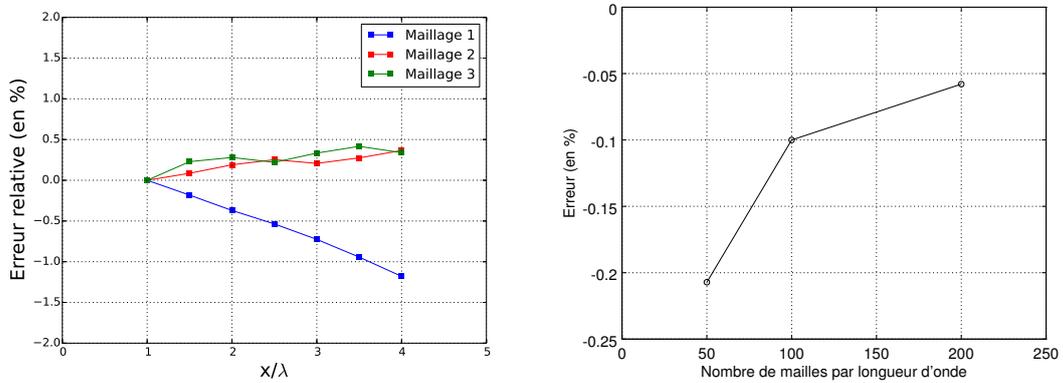


FIGURE 4: Analyse harmonique par fenêtre glissée de l'élévation au niveau de la sonde 5.



(a) Erreur relative sur l'amplitude de l'élévation le long du domaine. (b) Erreur sur la vitesse de phase pour les trois maillages.

FIGURE 5: Erreur sur la propagation.

Le résultat est représenté sur la figure 5(a). On constate une atténuation de l'élévation le long du domaine pour le maillage le plus grossier (le maillage 1), ce qui est un résultat attendu. Les deux maillages plus fins n'observent pas d'atténuation et présentent une élévation quasi-stable le long du domaine, avec même une légère augmentation (qui est expliquée par une très légère dérive de la conservation de la masse au cours du temps).

Aux dernières Journées de l’Hydrodynamique, des résultats de calculs de propagation de houle 2D avec plusieurs codes ont été présentés dans [11]. Il est à noter que pour obtenir un degré de précision similaire à celui exposé ici, un équivalent de 400 heures de temps CPU avec Star-CCM+ est nécessaire (soit 500 fois plus que cette version d’OpenFOAM) pour une houle seulement légèrement plus cambrée (4% contre 1.8% ici). C’est probablement dû au fait que Star-CCM+ emploie sans doute un schéma d’Euler pour la discrétisation des dérivées temporelles (Star-CCM+ ne donne pas de détails sur les schémas numériques utilisés), alors que nous employons ici un schéma de Crank-Nicholson. L’emploi d’un schéma d’Euler dans *foamStar* conduit au même type d’atténuation que celle observée dans Star-CCM+.

Il est aussi important de vérifier s’il n’y a pas de dérive sur la phase du signal d’élévation. C’est ce qui a été fait en notant la position des maxima d’élévation et en comparant la vitesse de phase avec la valeur théorique. Le résultat de cette analyse est donné dans la figure 5(b). On peut voir que l’erreur sur la vitesse de propagation est très faible et bien convergée.

4 Diffraction : cas du cylindre fixe dans la houle

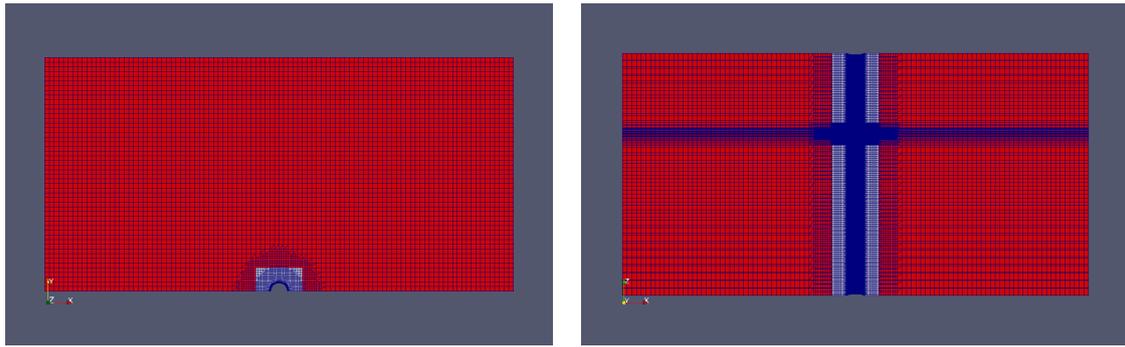
Pour tester la capacité de la zone de relaxation à correctement absorber le champ perturbé induit par un corps au milieu du domaine de calcul, le cas académique d’un cylindre complet (posé au fond) et fixe soumis à une houle régulière a été choisi. Les caractéristiques du cas traité sont résumées dans le tableau 3. Cette configuration fait partie de la série d’expérience menée par Huseby et Grue [3] sur des cylindres fixes dans la houle.

rayon	0.03 m
profondeur	0.6 m
longueur d’onde	0.76888 m
période	0.70175 s
amplitude	0.02876 m
cambrure	7.48 %

TABLE 3: Grandeurs dimensionnelles du cas du cylindre fixe dans la houle

Trois maillages différents ont été utilisés pour ce problème. Le maillage 1 comprend 300.000 mailles, le maillage 2, 600.000 mailles et le maillage 3, 1.200.000 mailles, ce qui correspond à chaque fois à un facteur de raffinement $r \sim 1.26$ dans chacune des trois directions. Chacun des trois maillages a la même taille de zone de relaxation (avec une densité de points différente) correspondant à une longueur d’onde. La figure 6 offre deux vues du maillage 2.

Un modèle de houle de Rienecker & Fenton [10] (basé sur la fonction de Courant) est utilisé comme champ cible dans la zone de relaxation. La houle se propage dans le sens (Ox). Un pas de temps fixe a été utilisé dans les calculs. Pour le maillage 2, nous avons utilisé 200 pas de temps par période de houle. Le raffinement en maillage a été fait à nombre de Courant ($Co = \frac{U \Delta x}{\Delta t}$) constant, et par conséquent nous avons utilisé 154 pas temps par période houle pour le maillage 1 et 260 pour le maillage 3. La figure 7 montre l’évolution de l’effort horizontal sur le cylindre sur quelques périodes prises au hasard au milieu du calcul. Plus de trente périodes de houle ont été simulées avec chaque maillage, et dans le cas du maillage 3, la simulation a duré 2 jours sur 16 processeurs.



(a) Vue nz.

(b) Vue ny.

FIGURE 6: Maillage 2. Zone de relaxation figurée en rouge.

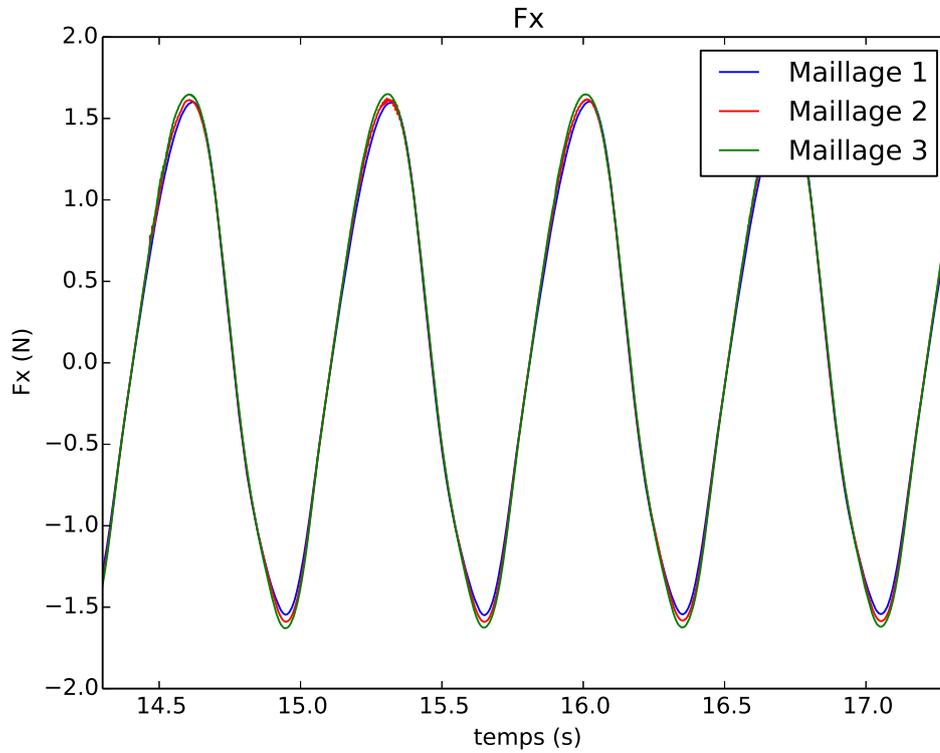


FIGURE 7: Effort horizontal. Zoom sur quelques périodes de houle.

Une analyse de Fourier par fenêtre glissée de l'effort horizontal a été réalisée et les résultats sont présentés dans la figure 8. Le fonctionnement adéquat de la zone de relaxation est mise en lumière par le fait que les harmoniques de chaque calcul sont très stables au cours du temps et aucune réflexion n'est observée. Le tableau 4 expose les valeurs moyennées des coefficients harmoniques sur les dernières périodes. L'incertitude de maillage est calculée par la méthode décrite dans [2]. Les résultats sont quasi-convergés en terme de maillage et proches des valeurs expérimentales pour toutes les harmoniques (sauf la troisième) avec un écart de 1% avec l'expérience pour la première harmonique. Si l'on se réfère aux graphiques de [3] (avec de fortes variations des valeurs

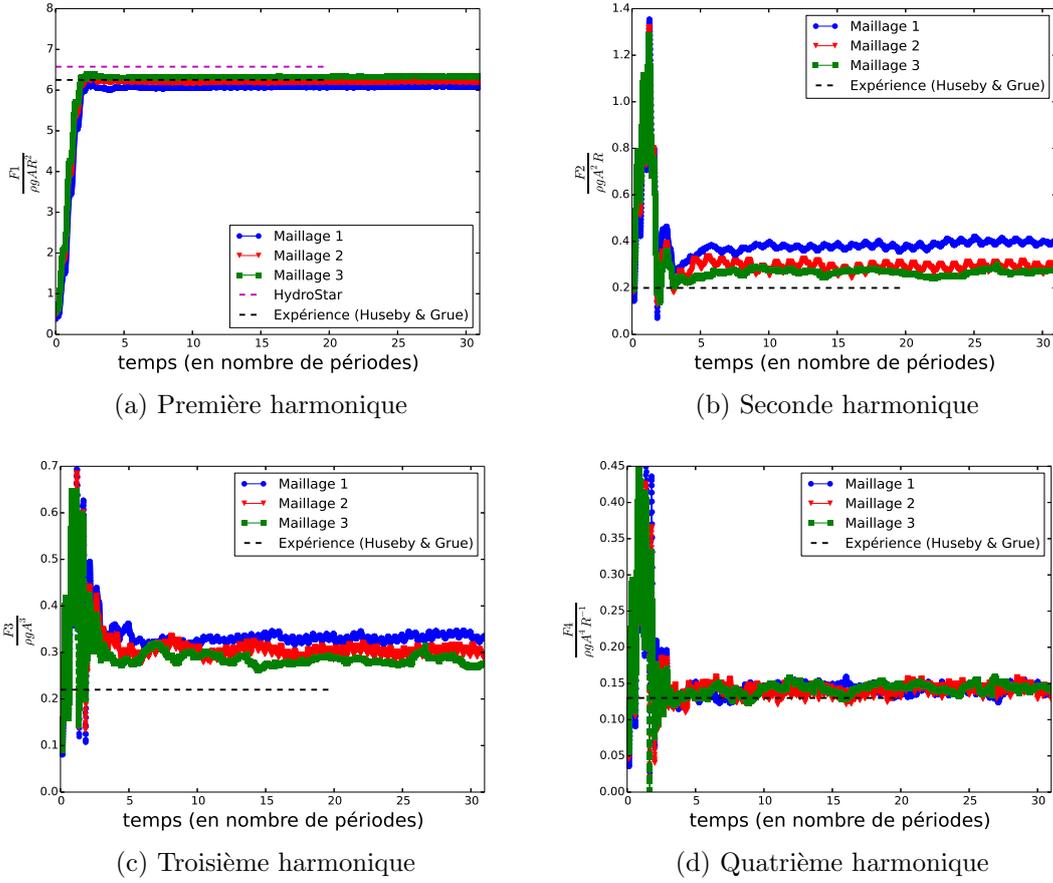


FIGURE 8: Analyse de Fourier par fenêtre glissante de l'effort horizontal adimensionnel

expérimentales pour des fréquences de houle proches), on peut raisonnablement estimer que les résultats numériques sont dans l'incertitude expérimentale pour toutes les harmoniques.

	Maillage 1	Maillage 2	Maillage 3	Incertitude de maillage	Expérience
$\frac{F1}{\rho g A R^2}$	6.09	6.2	6.34	8%	6.25
$\frac{F2}{\rho g A^2 R}$	0.39	0.29	0.27	1%	0.20
$\frac{F3}{\rho g A^3}$	0.34	0.3	0.28	8%	0.22
$\frac{F4}{\rho g A^4 R^{-1}}$	0.14	0.14	0.14	-	0.13

TABLE 4: Analyse harmonique et incertitude liée au maillage

5 Modèle libre : cylindre pilonnant dans l'eau calme

Le cas du cylindre 2D lâché avec un déplacement initial z_0 et pilonnant dans l'eau calme est un cas-test intéressant pour valider le fonctionnement du solveur mécanique ainsi que le couplage fluide-structure. Nous disposons d'une solution analytique pour ce problème [9] et des résultats expérimentaux [4]. Le résultat analytique [9] est basé sur une approche potentielle. Il est par

conséquent adimensionnel et dépend seulement du rapport entre le déplacement initial et le rayon du cylindre. Afin de modéliser correctement les effets visqueux, nous avons utilisé les mêmes valeurs dimensionnelles que dans [4], à savoir un cylindre de rayon $R = 0.0762 \text{ m}$ et un déplacement initial $z_0 = R/3 = 0.0254 \text{ m}$.

Trois maillages ont été utilisés dans cette étude, avec dans la zone proche du corps des tailles de maille de 0.004 m pour le maillage 1, 0.002 m pour le maillage 2 et 0.001 m pour le maillage 3, soit un facteur de raffinement $r = 2$. La figure 9 montre le maillage 2 proche du corps à l’instant initial. Pour le maillage 2, nous avons utilisé un pas de temps de 0.0005 s. Le raffinement en maillage a été fait à nombre de Courant constant, et par conséquent nous avons utilisé un pas de temps de 0.001 s pour le maillage 1 et 0.00025 s pour le maillage 3. La valeur f_{siTol} servant de critère à la boucle PIMPLE (voir figure 2) a été fixée à 10^{-7} .

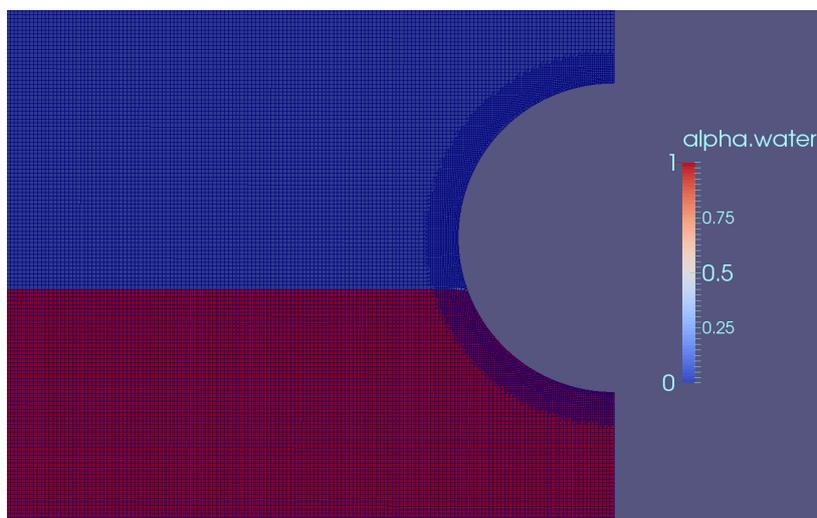


FIGURE 9: Zoom sur le maillage près du corps à l’instant initial. Cas-test du cylindre pilonnant, maillage 2.

La figure 10 montre l’évolution temporelle de l’élévation du cylindre. Pour les trois maillages, le résultat CFD est compris entre le résultat analytique et le résultat expérimental. Les résultats quantitatifs de la valeur de l’élévation au niveau du premier pic sont exposés dans le tableau 5. Pour le maillage 3, l’écart avec la valeur expérimentale est de 5%. Comme précédemment, l’incertitude de maillage est calculée par la méthode décrite dans [2].

	Maillage 1	Maillage 2	Maillage 3	Incertitude de maillage	Expérience	Analytique
$\frac{z}{z_0}$ pic 1	-0.632	-0.6346	-0.6366	1.5%	-0.602	-0.657

TABLE 5: Valeurs quantitatives au niveau du premier pic d’oscillation

Ces résultats constituent un élément probant de validation du solveur mécanique et de l’interaction fluide-structure. Néanmoins, il est à noter qu’un schéma temporel de type Euler explicite a été utilisé ici pour la résolution de l’écoulement. En effet, le schéma Crank-Nicholson (préférable dans le cas de la propagation de vagues) conduit à un problème de stabilité dans le couplage et semble supporter assez mal les mailles avec une mauvaise topologie, comme c’est le cas pour les mailles déformées près du corps au cours de la simulation.

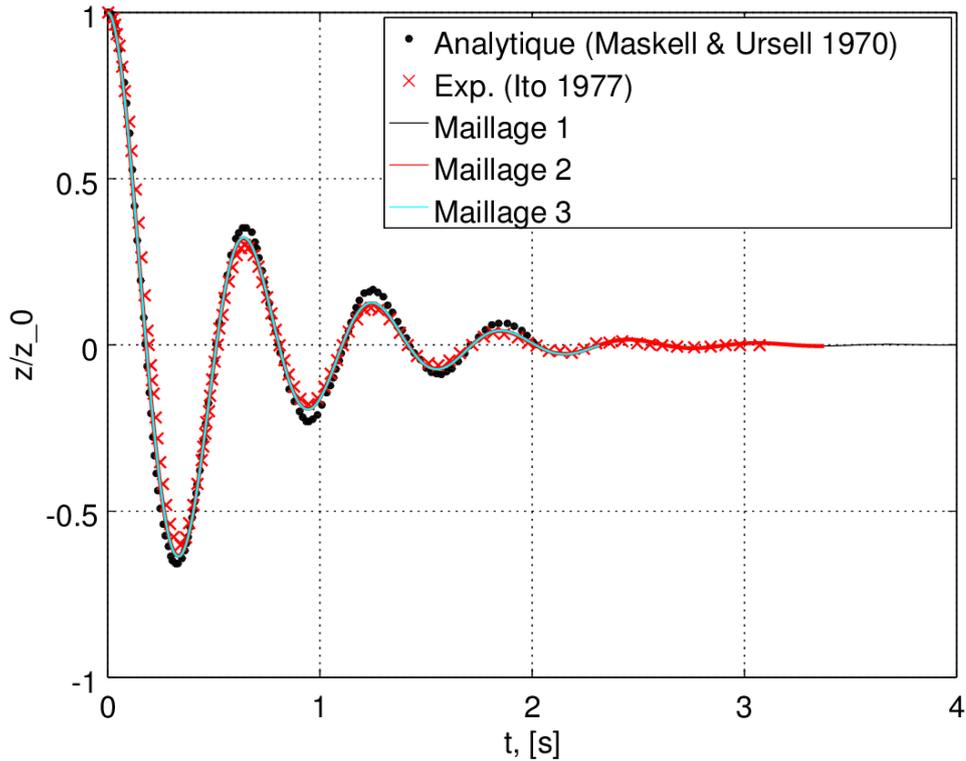


FIGURE 10: Signaux de pilonnement.

6 Conclusions

Des développements dans le logiciel OpenFOAM ont été réalisés dans la perspective de traiter du problème de tenue à la mer. Ils ont été validés dans le cas de la propagation de vagues, de la diffraction sur un corps fixe et du lâcher en pilonnement d'un corps en eau calme. Chacun de ses trois cas de validation ont montré des résultats très satisfaisants. Ces éléments initiaux de validation permettent d'aborder sereinement le cas complet de la tenue à la mer. Un léger écueil subsiste néanmoins : pour assurer une propagation de la houle sans atténuation significative, il a été prouvé qu'il fallait utiliser un schéma temporel implicite de type Crank-Nicholson dans la résolution de l'écoulement. Or dans le cas d'un corps en mouvement, un schéma de type Euler explicite est plus fiable en terme de stabilité, en particulier lorsque le maillage comporte des mailles avec une topologie non optimale. Des solutions sont à l'étude pour surmonter cette difficulté. Par exemple, la possibilité d'utiliser une décomposition spatiale du schéma de discrétisation temporelle (Euler près du corps, Crank-Nicholson) a été implémentée et apporte des premiers résultats prometteurs.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Hrvoje Jasak et Vuko Vukčević de la faculté d'ingénierie mécanique de Zagreb pour l'aide qu'ils ont apportée à ce projet.

Références

- [1] G. Ducrozet. *Modélisation des processus non-linéaires de génération et de propagation d'états de mer par une approche spectrale*. PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes, 2007.
- [2] H.W. Coleman E.G. Paterson F. Stern, R.V. Wilson. Comprehensive approach to verification and validation of cfd simulations-part i : Methodology and procedures. *J. Fluids Eng.*, 123(4) :793–802, 2001.
- [3] Morten Huseby and John Grue. An experimental investigation of high-harmonic wave forces on a vertical cylinder. *J. Fluid Mech.*, 414 :75–103, 2000.
- [4] Soichi Ito. Study of the transient heave oscillation of a floating cylinder. Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1977.
- [5] N.G. Jacobsen. *A full hydro- and morphodynamic description of breaker bar development*. PhD thesis, Technical University of Denmark, 2011.
- [6] N.G. Jacobsen, D. R. Furman, and J. Fredsoe. A wave generation toolbox for the open-source cfd library : Openfoam. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 70(9) :1073–1088, 2012.
- [7] H. Jasak. *Error analysis and estimation for the Finite Volume method with applications to fluid Flow*. PhD thesis, Imperial College, University of London, 1996.
- [8] H. Jasak, H.G. Weller, and N. Nordin. In-cylinder cfd simulation using a c++ object-oriented toolkit. *Int. J. Num. Meth. Engineering*, 2004.
- [9] S.J. Maskell and F. Ursell. The transient motion of a floating body. *J.*, 44(2) :303–313, 1970.
- [10] M.M. Rienecker and J.D. Fenton. A fourier approximation method for steady water waves. *J.*, 104 :119–137, 1981.
- [11] O. Thilleul, C. Berhault, J. Bossard, F. Cany, J.-C. Poirier, and F. Surmont. Prediction des reponses extremes pour les structures emr, apport de la cfd avec surface libre. 2014.