



15^{ÈMES} JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

22 - 24 novembre 2016 - Brest

MODÉLISATION D'IMPACTS DE *SLAMMING* SUR DES SECTIONS DE NAVIRE PAR UN MODÈLE DE WAGNER GÉNÉRALISÉ

MODELLING SHIP SECTIONS SLAMMING IMPACTS WITH GENERALIZED WAGNER MODEL

A. BENHAMOU^{*1}, J. DE LAUZON¹, C. MONROY¹, Q. DERBANNE¹ and Š.
MALENICA¹

¹Bureau Veritas, 67/71 Bd du Château, 92571 Neuilly-sur-Seine Cedex, France

Résumé

Cet article présente une approche basée sur le modèle de Wagner généralisé pour modéliser les impacts de sections de navire 2D de forme quelconque. Le modèle met en œuvre la fonction de Green du problème de Neumann-Kelvin pour résoudre le potentiel de vitesse hydrodynamique et le flux autour de la section bidimensionnelle. Afin d'éviter des problèmes numériques, le potentiel est séparé entre une partie régulière et une partie singulière ; la partie singulière est résolue analytiquement tandis que la partie régulière est résolue par la méthode des éléments frontière.

Cette modélisation permet de simuler des impacts de sections quelconques avec un champ de vitesse complexe (vitesses verticales, transverses et rotation). Les résultats obtenus sont comparés à des résultats expérimentaux issus d'une campagne de test de chute libre réalisés par le KRISO dans le cadre du projet WILS III ainsi qu'à des résultats CFD VOF avec OpenFoam.

Abstract

This paper presents an approach based on Generalized Wagner theory to model ship section water impacts. Kelvin's Green function is used to solve the hydrodynamic velocity potential and the flow around the two-dimensional shape. In order to avoid numerical issues, the potential is splitted into a regular and a singular part, allowing to treat the singular part analytically and to solve the regular part using boundary elements.

This model makes it possible to deal with arbitrary ship section shapes in any kind of impact velocity profile (including vertical, transverse and roll velocities). Results are compared with experimental data from a drop test campaign from KRISO performed within WILS III JIP and CFD VOF results with OpenFoam.

*alexis.benhamou@bureauveritas.com

1 Introduction

Les efforts générés par le tossage (aussi communément désigné par le terme anglais *slamming*) constituent une importante source de chargements structurels. De très fortes pressions locales apparaissent durant les impacts et les efforts globaux résultants sont également très élevés. Ainsi, le tossage affecte la structure locale du navire mais aussi la structure globale à travers le phénomène de *whipping*, c'est-à-dire les vibrations transitoires de la poutre-navire engendrée par les impacts.

La modélisation 3D du tossage dans une simulation numérique de tenue à la mer est extrêmement complexe. L'approche la plus communément utilisée aujourd'hui consiste à découper le navire en tranches 2D sur lesquelles seront calculées les pressions d'impact, avant de les ré-appliquer sur le modèle 3D (figure 1). Ce couplage nécessite un modèle robuste et des temps de calculs très limités afin de pouvoir simuler des états de mers de 3h ou plus (où apparaissent plus de 500 impacts) dans des temps raisonnables. L'approche potentielle semble donc adaptée puisque les méthodes CFD ou SPH nécessitent encore des durées de calculs trop longues pour cette application.

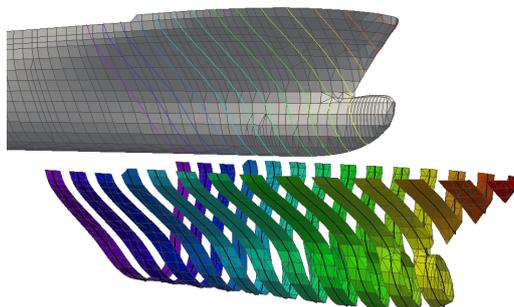


FIGURE 1 – Calcul du tossage par la méthode 2D par tranches

Plusieurs modèles potentiels ont été développés par le passé, des plus simples modèles de Von Karman [6] ou Wagner [7] aux plus sophistiqués tels que le modèle développé par Zhao et Faltinsen [8]. Entre deux, le modèle de Wagner Généralisé développé par Zhao, Faltinsen et Aarsnes [9] donne des résultats satisfaisants avec des temps de calculs raisonnables. Basé sur cette théorie, le module de tossage BV-slam développé par Bureau Veritas permet de modéliser des impacts hydrodynamiques sur des sections quelconques avec un profil de vitesse complexe incluant les mouvements transverses et de roulis (qui apparaissent notamment en mer oblique).

Ce papier développe différents cas de validation sur des sections simplifiées de type coin ou plus réalistes avec et sans bulbe. Les résultats sont comparés à des signaux expérimentaux lorsqu'ils existent et à des résultats CFD qui sont jugés fiables pour ce type de calculs.

2 Description des simulations

2.1 Sections

Trois sections différentes ont été définies pour cette étude, deux de ces profils sont issus du projet WILS III [3] dans lequel ont été effectués une série d'essais de chute libre. La section III est une coupe de navire réel comprenant une partie de bulbe, la section II est une simplification de cette dernière où les parties concaves ont été lissées, enfin la section I correspond à une version très simplifiée s'approchant du cas académique du coin.

Les modèles utilisés pour les essais sont équipés de plusieurs capteurs dont un capteur d'effort situé sur la partie centrale du modèle (figure 3). Le signal brut F_0 mesuré par ce capteur est post-traité pour tenir compte des effets inertiels. L'effort hydrodynamique F_{hydro} sur la section s'écrit :

$$F_{hydro} = -F_0 + m_{inf} \cdot (a + g) \quad (1)$$

où m_{inf} , a et g sont respectivement la masse de la partie inférieure désignée sur la figure 3b, l'accélération du système et l'accélération de la pesanteur.

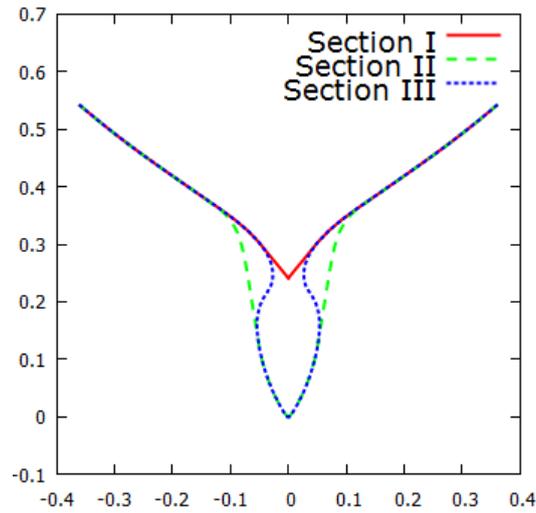


FIGURE 2 – Profil des sections

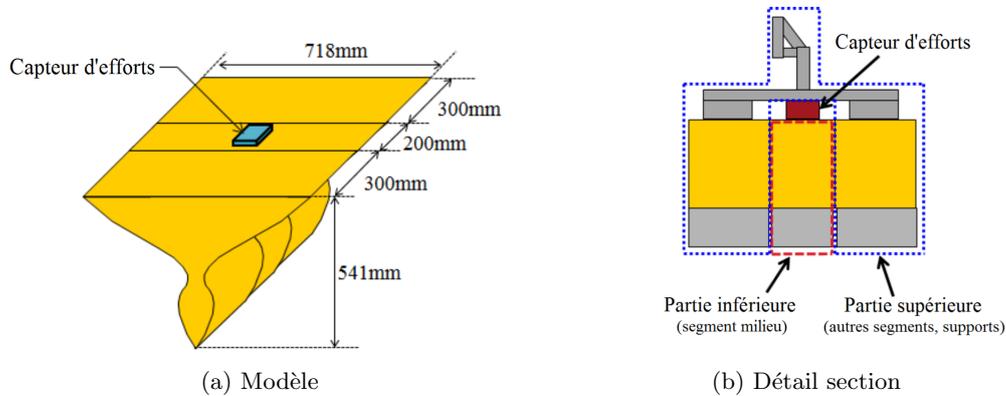


FIGURE 3 – Sections et équipement expérimentaux

2.2 Essais de chute libre

Trois types de simulations sont réalisées : des cas dits "symétriques" où la section est verticale et la vitesse purement verticale, des cas dits "avec rotation" où la section est tournée et la vitesse purement verticale, et des cas dits "avec roulis" où la section est soumise à des mouvements complexes verticaux, horizontaux et de rotation. Selon les cas, les signaux de vitesse sont soit fictifs (vitesse constante), soit issus des essais de chute libre expérimentaux du projet WILS III, soit issus d'une simulation de tenue à la mer avec le logiciel Homer 2 développé par Bureau Veritas. Dans ce dernier cas, on réalise une simulation temporelle non-linéaire [5] afin de déterminer les vitesses relatives au niveau des sections considérées. Deux vagues régulières obliques sont utilisées : $\beta = 135^\circ$, $T = 13.6$ s, $H = 12$ m et 18 m. Les différents tests sont récapitulés dans le tableau 1 ci-dessous :

Nom	Vitesse			Origine
	Profil	Sens	Valeur	
<i>sym1</i>	variable	Z	-	WILS III
<i>sym2</i>	constant	Z	2.0 m/s	-
<i>sym3</i>	constant	Z	1.5 m/s	-
<i>sym4</i>	constant	Z	1.0 m/s	-
<i>sym5</i>	constant	Z	0.5 m/s	-
<i>rot1</i>	variable	Z	-	WILS III
<i>roll1</i>	variable	Y, Z, R_X	-	Homer 2
<i>roll2</i>	variable	Y, Z, R_X	-	Homer 2

TABLE 1 – Description des simulations

3 Modèle de Wagner généralisé amélioré

BV-slam est un module de simulation d'impacts hydrodynamiques développé par Bureau Veritas et basé sur le Modèle de Wagner Généralisé (GWM). Ce dernier est un modèle 2D potentiel proposé par Zhao, Faltinsen et Aarnes [9] qui présente un bon compromis entre précision, robustesse et temps de calculs.

On rappelle ici les principales caractéristiques qui sont décrites de façon plus détaillées dans de Lauzon et al. [2]. Une forme bidimensionnelle est forcée dans un domaine fluide infini sur une surface libre initialement au repos. Le fluide est considéré incompressible et irrotationnel de sorte que l'on puisse exprimer le potentiel de vitesse. Les effets de gravité sont négligés et la condition de surface libre est linéarisée. De plus, aucune poche d'air n'est générée dans la simulation. Le problème aux conditions limites du potentiel de vitesses Φ s'écrit donc comme suit :

$$\begin{aligned}
 \Delta\Phi &= 0 && \text{in } \Omega \\
 \Phi &= 0 && \text{on } \Gamma_{FS} \\
 \frac{\partial\eta}{\partial t} &= \frac{\partial\Phi}{\partial y} && \text{on } \Gamma_{FS} \\
 \frac{\partial\Phi}{\partial n} &= \vec{v} \cdot \vec{n} && \text{on } \Gamma_B \\
 \Phi &\rightarrow 0 && \|\vec{p}\|^2 \rightarrow \infty
 \end{aligned} \tag{2}$$

Les principales améliorations apportées au Modèle de Wagner Généralisé proposé par Zhao et al. [9] sont appliquées à :

- La surface libre, généralement asymétrique, est rendue symétrique à l'aide d'une transformation de Schwarz-Christoffel (figure 4). Cette transformation conforme permet d'utiliser la fonction de Green satisfaisant la condition de surface libre et réduit le nombre d'inconnues.
- Le potentiel de vitesses, qui est singulier au niveau du point de contact et conduit à des problèmes numériques est traité spécifiquement. Le potentiel est séparé entre sa partie singulière qui est traitée analytiquement et sa partie régulière traitée numériquement.

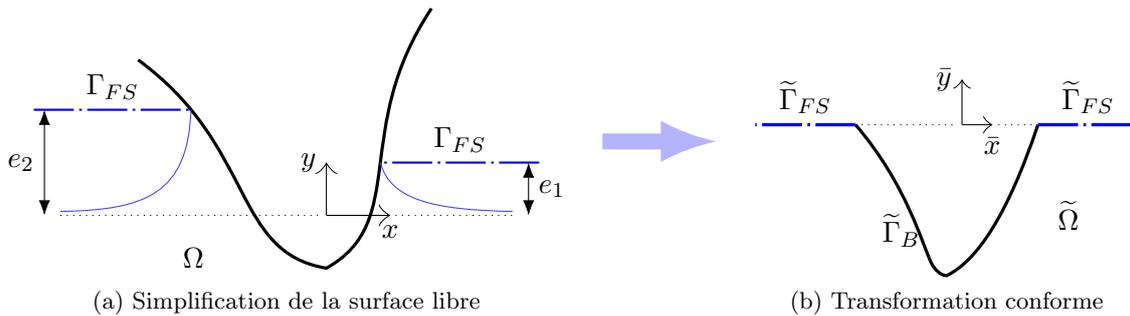


FIGURE 4 – Description du problème aux conditions limites

Ces deux améliorations permettent d'avoir un modèle robuste et efficace qui permet de traiter la plupart des impacts sur des sections quelconques, avec des profils de vitesse complexes (translations et rotations). Cependant, la principale limitation de ce modèle est l'absence de séparation qui complique le traitement efficace des sections dont le profil n'est pas strictement convexe (comme c'est le cas en présence de bulbe). Dans ces cas de figure, le problème est résolu sur une section équivalente dont les parties concaves ont été lissées (figure 5).

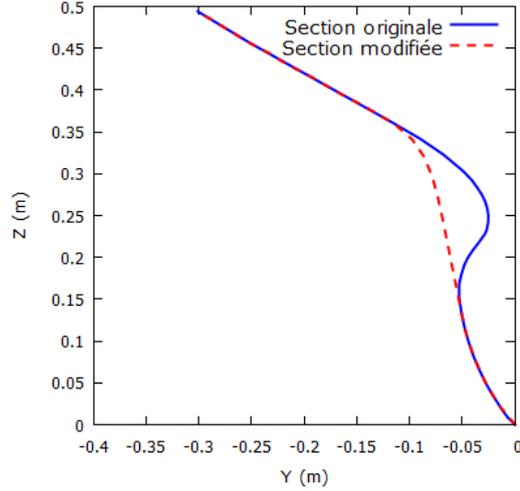


FIGURE 5 – Modification des sections concaves

4 CFD avec OpenFOAM

4.1 Théorie

Les simulations CFD (Computational Fluid Dynamics) sont réalisées avec le logiciel libre OpenFOAM et plus particulièrement avec le solveur diphasique *interDyMFoam*. Les deux fluides (eau et air) sont considérés incompressibles, isothermes et non-miscibles, le problème est résolu à l'aide d'une méthode de type VOF (volume of fluid). Les équations de Navier-Stokes sont recombinaées pour un maillage dynamique et peuvent être réécrites avec un formalisme Arbitraire Lagrangien Eulérien (ALE) comme suit :

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0 \\ \frac{\partial(\rho\mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{u}\mathbf{u}^T) - \nabla \cdot [\mu(\nabla\mathbf{u} + \nabla\mathbf{u}^T)] &= -\nabla p_d - (\mathbf{g} \cdot \mathbf{x})\nabla p \end{aligned} \quad (3)$$

où \mathbf{u} , α , p_d , \mathbf{g} et \mathbf{x} sont respectivement le champ de vitesse, la fraction volumique, le champ de pression dynamique, l'accélération de la gravité et le vecteur position. Les effets de tension de surface sont négligés. Une description plus détaillée des méthodes CFD utilisées peut être trouvée dans l'article de C. Monroy et al. [4].

4.2 Maillages

Les maillages 2D sont réalisés avec les outils natifs d'OpenFOAM *blockMesh* et *snappyHexMesh*. Un maillage initial est défini, puis sept zones de raffinement sont réalisées autour de la section (figure 6a) et cinq zones permettent de raffiner le maillage autour de la surface libre (figure 6b). Le maillage est automatiquement raffiné au niveau des contours de la section et une couche limite de 3 mailles est ajoutée (figure 6d). Pour chaque cas-test, trois maillages sont réalisés avec différents niveaux de raffinement. Pour cela, la taille du maillage initiale est modifiée avec les coefficients de raffinements $r_{ij} = \frac{\Delta y_i}{\Delta y_j} = \frac{\Delta z_i}{\Delta z_j}$ suivants : $r_{12} = 1.43$ et $r_{23} = 1.30$. Pour les cas symétriques seule une moitié du maillage est modélisée et une condition de symétrie est appliquée.

4.3 Mise en œuvre

Le signal de déplacement est imposé à l'ensemble du maillage sans déformation. Un pré-traitement est appliqué aux signaux de vitesses utilisés dans BV-slam, le déplacement est obtenu après intégration par la méthode des trapèzes, puis le signal généré aux pas de temps de la simulation par une interpolation de type *spline*. Les simulations sont réalisées à pas de temps constant pour éviter l'interpolation dans le signal de déplacement. Trois pas de temps ont été utilisés pour s'assurer de la convergence en

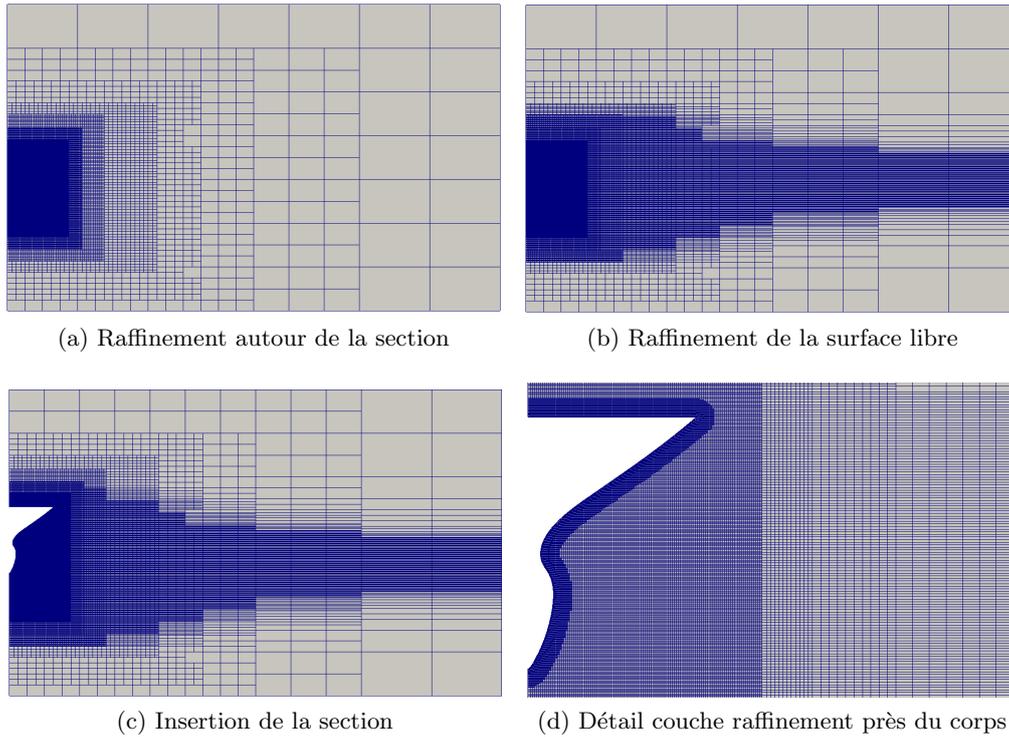


FIGURE 6 – Construction du maillage CFD (cas symétrique, section III)

pas de temps, les valeurs pour les maillages 2 et 3 ont été sélectionnées afin de conserver un nombre de Courant constant :

	Maillage 1	Maillage 2	Maillage 3
dt1 (s)	5.0e-4	3.5e-4	2.7e-4
dt2 (s)	1.0e-4	7.0e-5	5.4e-5
dt3 (s)	5.0e-5	3.5e-5	2.7e-5

TABLE 2 – Pas de temps utilisés pour les simulations CFD

5 Résultats des cas de validation

On s'intéresse particulièrement aux efforts globaux exercés sur la section qui constituent la grandeur la plus importante pour la réponse globale de la structure. Pour chaque simulation, on a pris soin de s'assurer de la convergence des résultats CFD et BV-slam (figure 7). Dans les graphiques ci-dessous, on ne présente que la première solution convergée.

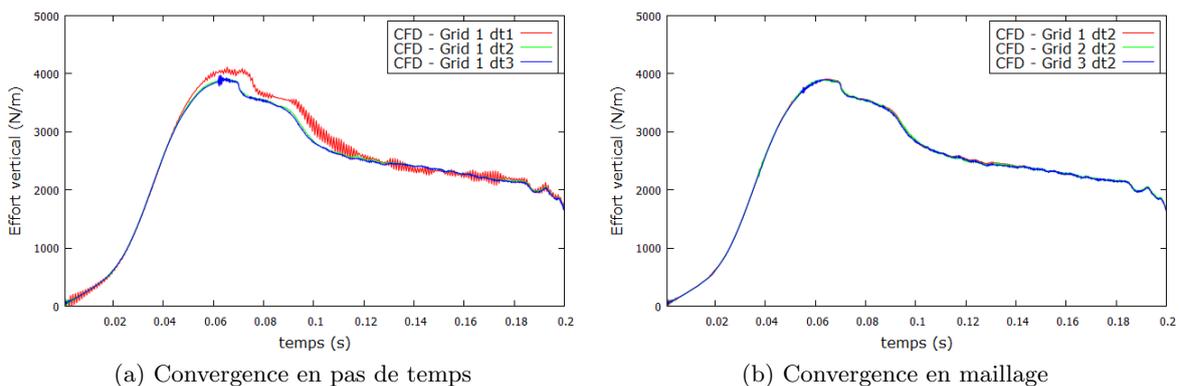


FIGURE 7 – Convergence des résultats CFD (section I, *sym1*)

5.1 Cas symétrique

Les impacts dit "symétriques" sont rencontrés en mer de face. Ces cas sont très souvent rencontrés car l'importance du tossage est maximale en mer de face et la plupart des simulations avec Homer 2 sont réalisées dans cette direction, notamment dans le cadre de la notation WhiSp 2 [1].

5.1.1 Chute libre

Les tests de chute libre *sym1* sont réalisés en imposant les signaux de vitesse expérimentaux. Ces derniers sont présentés en figure 8, l'instant $t = 0$ correspond à l'impact de chaque section avec la surface libre, il est à noter que le profil de vitesse n'est pas le même pour chaque section.

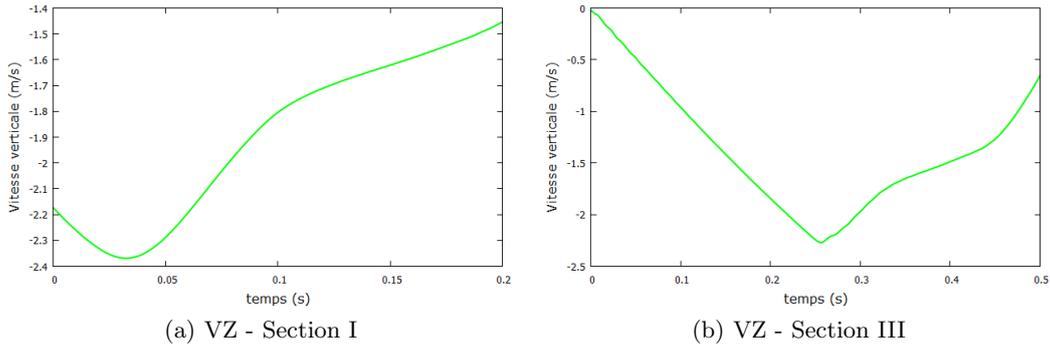


FIGURE 8 – Vitesses d'impact du test *sym1*

Les comparaisons sur les sections I et III montrent une très bonne correspondance avec la CFD et les résultats expérimentaux comme le montrent les signaux des tests *sym1* présentés en figure 9. Le pic d'effort observé en CFD sur la section III correspond à l'impact du jet généré au niveau du bulbe sur le reste de la section, non représenté par BV-slam en raison du lissage de la section (cf. paragraphe 6.1).

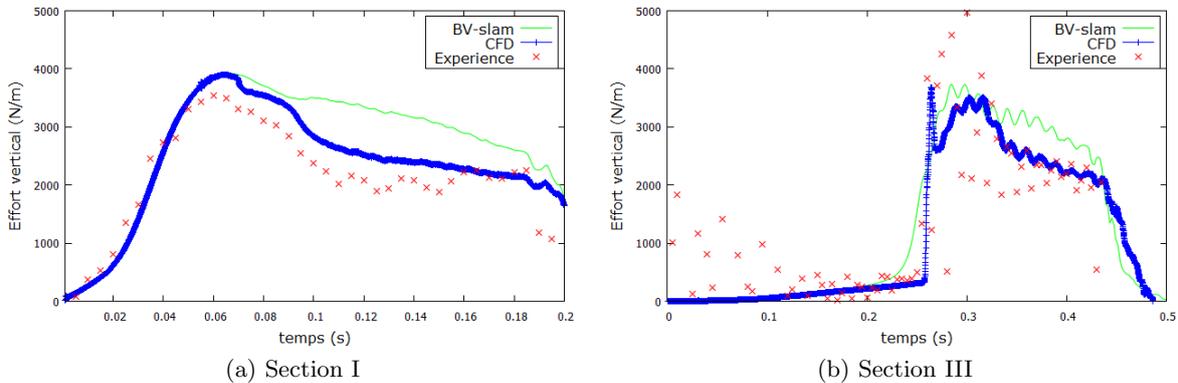


FIGURE 9 – Résultats des essais de chute libre *sym1*

5.1.2 Vitesse constante

Les tests *sym2* à *sym5* sont réalisés pour différentes vitesses constantes afin d'évaluer l'influence de la vitesse d'impact sur la réponse. Pour cela, on adimensionnalise l'échelle de temps (par H/V avec H la hauteur de la section III) afin de faire correspondre les hauteurs d'immersion de la section (figure 10). On remarque que les signaux d'effort présentent la même forme, leur amplitude étant plus élevée avec la vitesse d'impact. De plus, on note que la composante hydrostatique représente une part non négligeable de l'effort total, surtout à faible vitesse. Pour plus de lisibilité, on retranche les efforts hydrostatiques et on adimensionnalise les efforts dynamiques par $\frac{1}{2}\rho V^2$ (figure 11). Comme attendu, les quatre signaux BV-slam sont superposés car les efforts de la théorie que Wagner sont similaires en

échelle de Froude. Les résultats CFD montrent la limite de cette théorie pour les petites vitesses où l'hypothèse selon laquelle la gravité peut être négligée n'est plus vérifiée. La figure 12, qui représente la forme de la surface libre à différents pas de temps adimensionnels pour les cas *sym2* et *sym5*, montre qu'à faible vitesse le jet hydrodynamique n'a pas le temps de se développer. On note également que l'élévation de surface libre est très bien représentée par BV-slam.

Enfin, on remarque que les signaux BV-slam et CFD correspondent parfaitement jusqu'au pic d'effort et diffèrent ensuite. Cette différence apparaît au moment où la section est complètement immergée, situation non représentée par BV-slam dans lequel la section est prolongée pour la poursuite du calcul (figure 12). Cependant, ce cas reste très théorique, car en pratique la surface libre n'atteint pas le pont dans la grande majorité des cas.

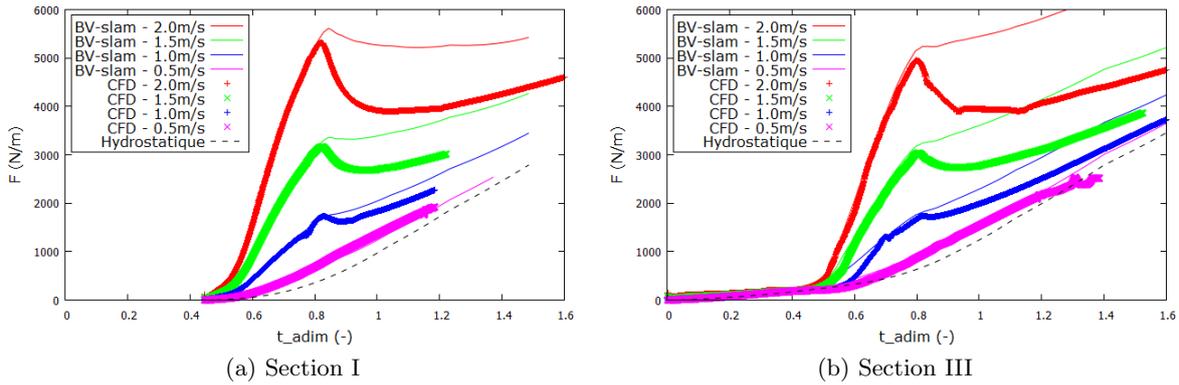


FIGURE 10 – Comparaison des cas *sym2* à *sym5* après adimensionalisation en temps

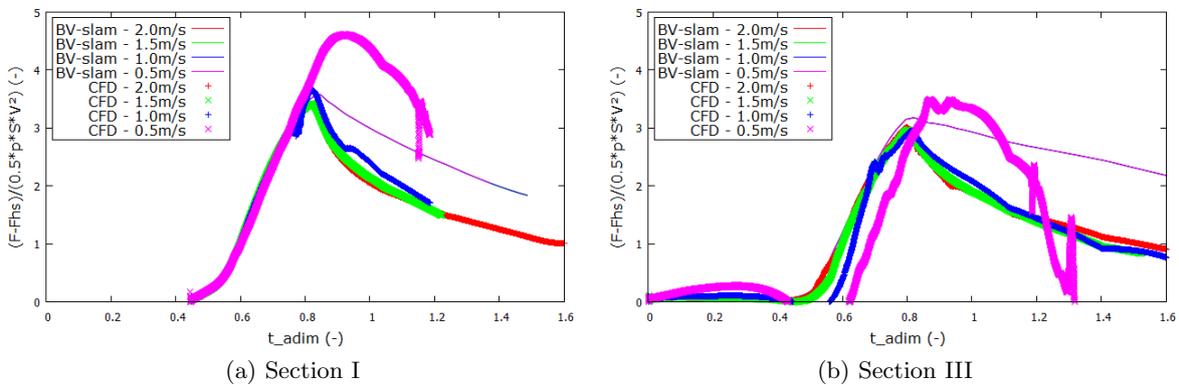


FIGURE 11 – Comparaison des cas *sym2* à *sym5* après adimensionalisation en effort et en temps

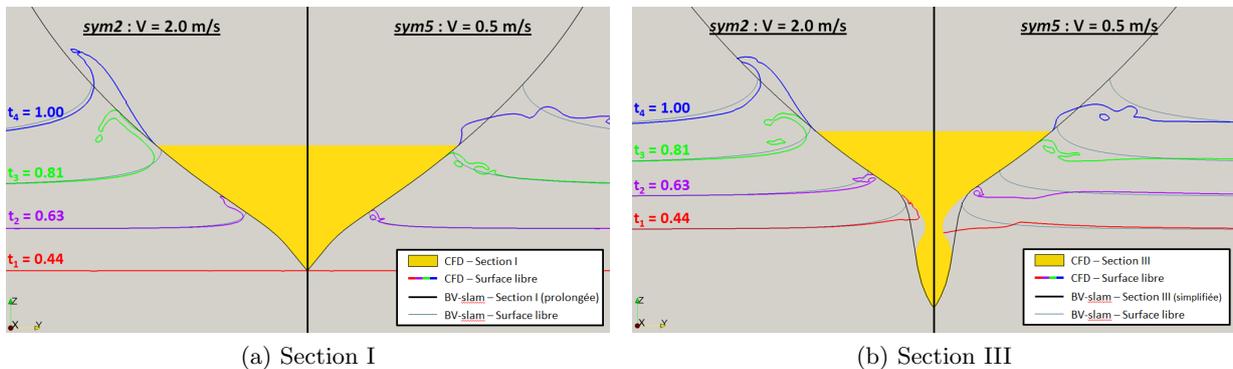


FIGURE 12 – Position de la surface libre à différents pas de temps adimensionnels (*sym2* et *sym5*)

5.2 Cas non-symétriques

5.2.1 Sans vitesse de roulis

Les impacts non-symétriques sans mouvement de roulis correspondent aux essais avec des sections inclinées (à 10°). Ces cas ont pour seul objet la validation car ils ne sont pas rencontrés dans des cas réels de tenue à la mer. On compare les efforts globaux dans les directions Y et Z du repère global (repère terrestre) pour les sections I et II. Aucun signal expérimental n'étant disponible pour ces simulations, la CFD sert de référence.

Les résultats des tests *rot1* (figure 13) montrent une bonne correspondance des efforts, on retrouve une divergence des signaux BV-slam et CFD un peu moins marquée que dans le cas symétrique car les deux cotés de la section ne sont pas submergés en même temps ($t_1 = 0.07$ et $t_2 = 0.11$).

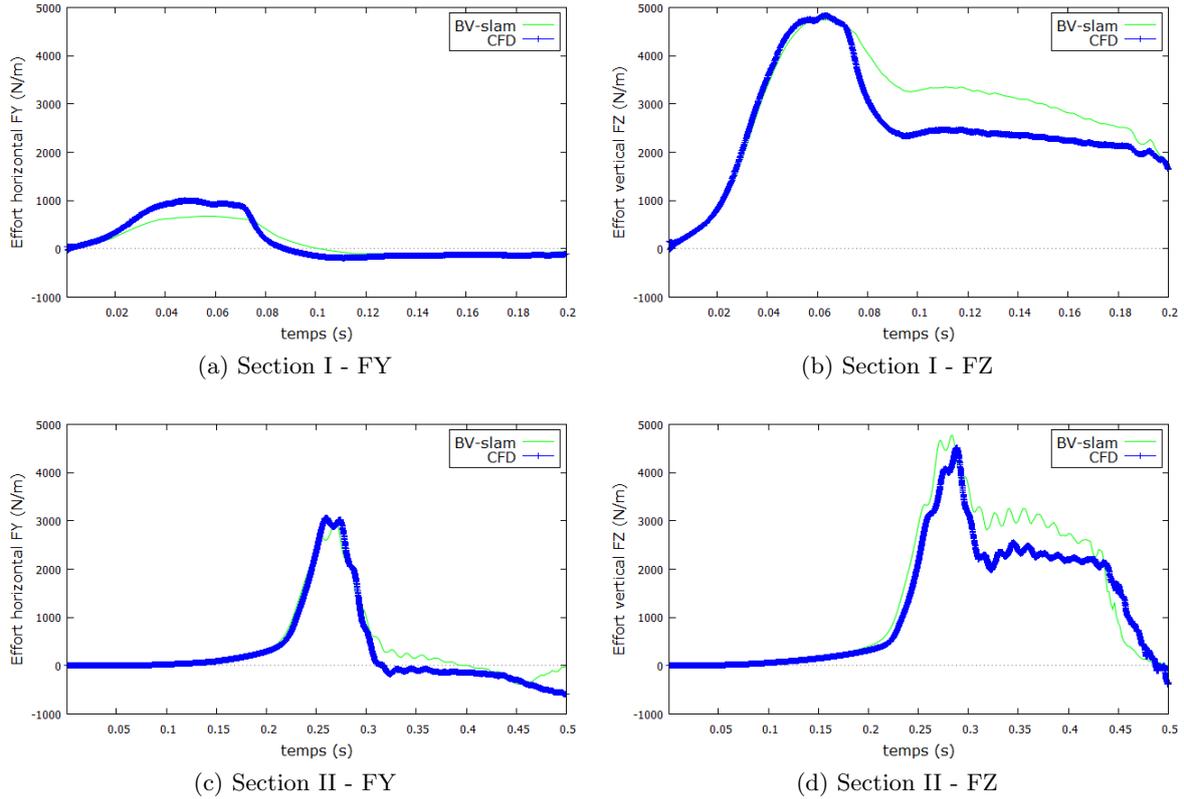


FIGURE 13 – Résultats des tests *rot1* sur les sections I et II

5.2.2 Avec vitesse de roulis

Les impacts avec vitesse de roulis sont les plus représentatifs du tossage en mer oblique. Les signaux de vitesse d'impact correspondant sont obtenus à partir de simulations de tenue à la mer avec Homer 2 tels que décrits dans le paragraphe 2.2. Ces vitesses sont présentées en figure 14 ci-dessous pour les sections II et III, la vitesse de rotation est exprimée par rapport au point le plus bas de la section. Les vitesses sont corrigées pour la section I afin d'avoir le même mouvement solide.

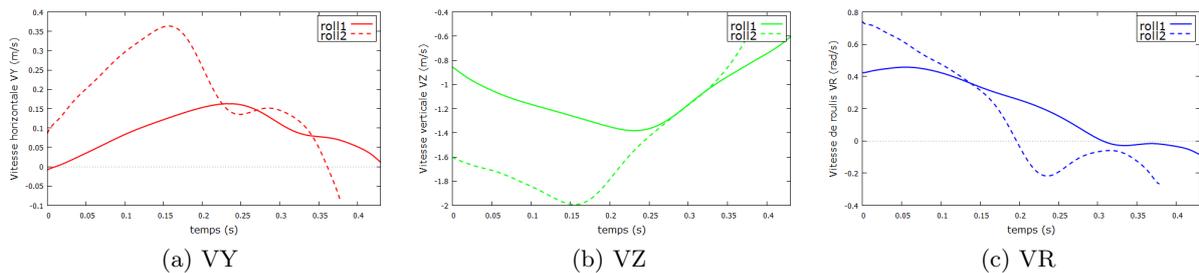


FIGURE 14 – Vitesses d'impact des tests *roll1* et *roll2*

La figure 15 présente les résultats du test *roll2* pour les sections I et II. Le signal BV-slam est pleinement satisfaisant, notamment sur l'effort vertical qui nous intéresse principalement pour les modes de vibration verticaux.

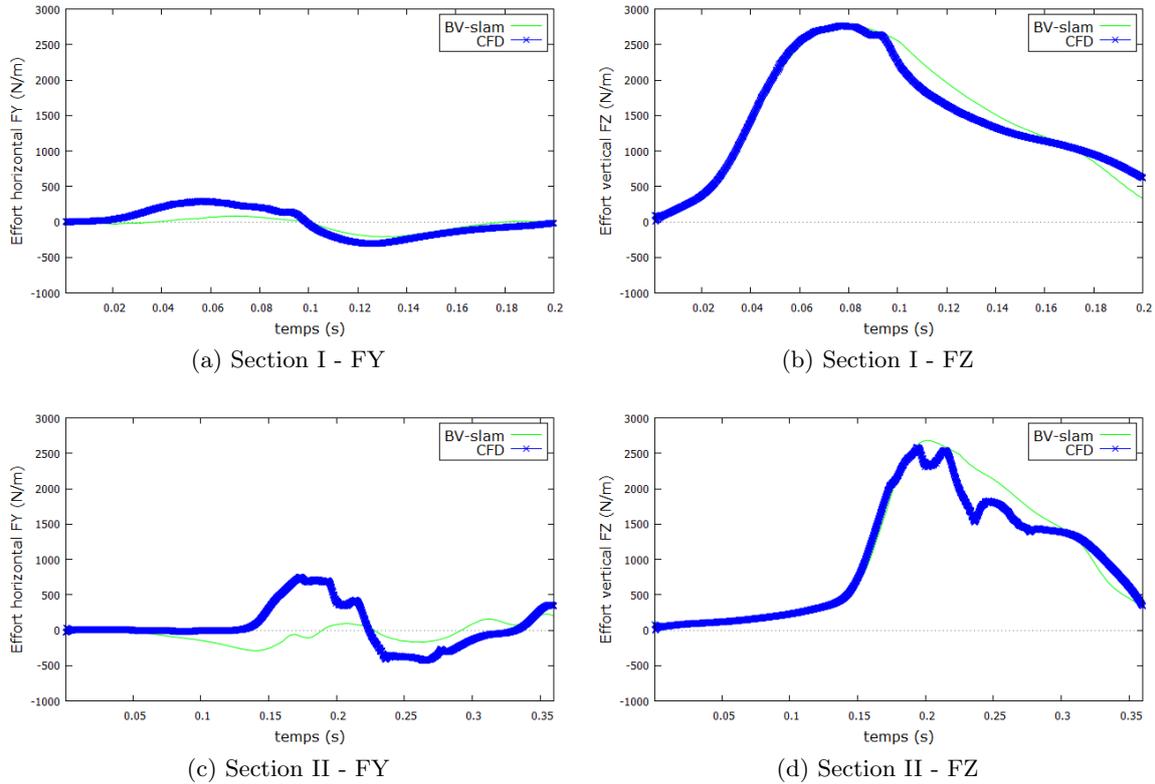


FIGURE 15 – Résultats des tests *roll2* sur les sections I et II

6 Mise en œuvre pratique dans les calculs de tenue à la mer

L'avantage principal du modèle GWM par rapport à la CFD réside dans la rapidité des calculs (inférieurs à 1 seconde hors lecture/écriture de fichiers) et ainsi la possibilité de réaliser des simulations de tenue à la mer comprenant de nombreux impacts. Il faut donc que les résultats du modèle utilisé soient fiables mais également que le module soit robuste afin de ne pas "manquer" d'impacts. On se propose donc notamment d'évaluer la sensibilité de la simplification des sections avec bulbe.

6.1 Lissage des sections avec bulbe

Comme détaillé dans le paragraphe 3, le modèle potentiel GWM impose que le fluide reste attaché à la section. Cette contrainte pose notamment problème pour les sections avec bulbe où l'on observe un détachement au niveau de la partie convexe de la section et la formation d'un jet. Ce problème est résolu en lissant les sections afin de retirer les parties convexes comme montré en figure 5. L'utilisation de la CFD nous permet de quantifier l'erreur induite par cette simplification. Pour cela, on compare les résultats obtenus en CFD pour les sections II et III, la section II correspondant exactement, pour les cas symétriques, au calcul réalisé par BV-slam pour la section III.

Pour le cas *sym1* (figure 16), on peut remarquer dans un premier temps que les signaux BV-slam sont bien identiques pour les sections II et III. De plus, les résultats CFD sont très proches pour ces deux sections, on note juste l'apparition d'un pic d'effort sur la section III correspondant à l'impact du jet issu de la séparation au niveau du bulbe, comme le montre la figure 16b au moment de l'impact à $t = 0.265$ s.

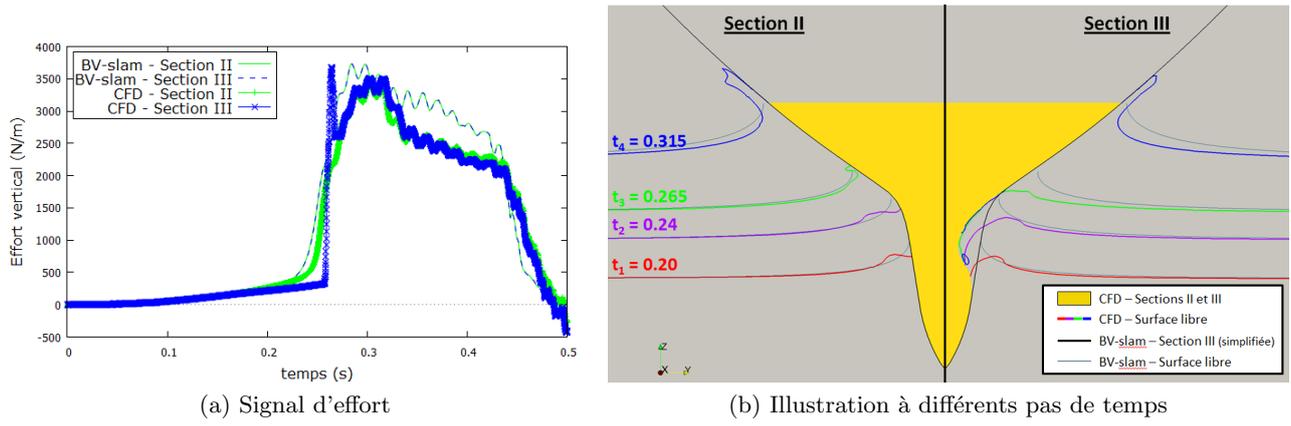


FIGURE 16 – Comparatifs des résultats *sym1* sur sections II & III

Les résultats pour le cas *roll1* (figure 17) sont similaires pour l'effort vertical (où l'on retrouve le pic d'effort sur la section III), la différence est plus flagrante sur l'effort transversal, principalement car les différences de géométrie entre les deux sections se trouvent sur une partie majoritairement verticale.

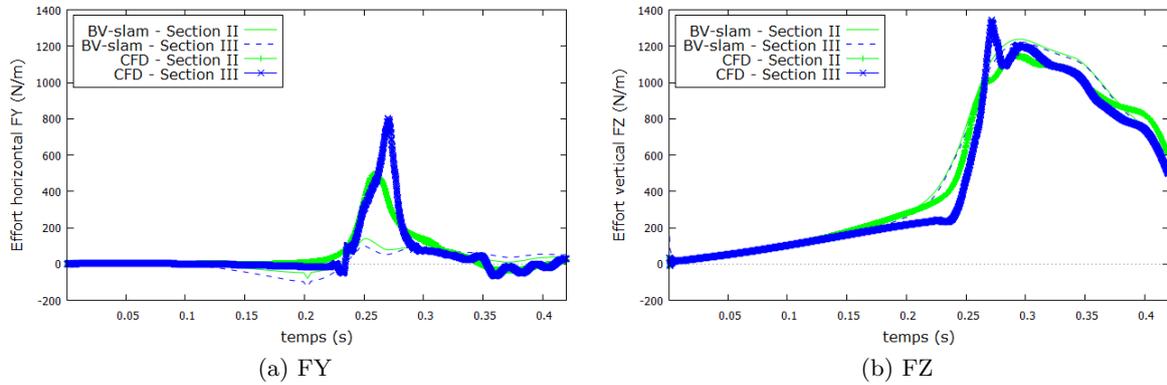


FIGURE 17 – Comparaison des résultats *roll1* sur sections II & III

6.2 Fiabilisation des calculs avec roulis

Les premières simulations de tenue la mer (Homer 2) en incidence oblique ont montré des problèmes de robustesse, surtout pour les sections avec bulbe pour lesquelles le processus itératif du calcul d'impact en conditions asymétriques [2] ne converge pas toujours avec de fortes vitesses de roulis. De plus, on remarque que la phase d'entrée du bulbe génère un effort très faible comparé au reste de la section (figure 16a). Une des solutions pour pallier ce problème consiste à ne plus prendre en compte le bulbe et à remplacer ces sections par une section de type coin équivalente. Dans le cas des sections présentées dans ce papier, cela revient à remplacer la section III par la section I. Afin de vérifier la validité de cette solution, on compare les efforts globaux obtenus sur ces deux sections pour un profil de vitesse identique. On prend soin de démarrer l'impact de la section I à l'instant où cette dernière serait virtuellement entrée en contact avec la surface libre s'il n'y avait pas de bulbe, les résultats sont ensuite recalés en temps afin de comparer directement les profils d'efforts. De plus, la composante hydrostatique des efforts est retranchée à tous les signaux pour une comparaison efficace.

Comparons d'abord les résultats sur le cas symétrique *sym3* (figure 18a) dont la vitesse verticale (1.5 m/s) est du même ordre de grandeur que les cas avec roulis. On note que l'effort appliqué à la section I est plus important, ceci est en accord avec le fait que la vitesse de déplacement du point de contact entre la section et la surface libre est plus élevée sur la section I (figure 18b), entraînant ainsi des pressions plus fortes.

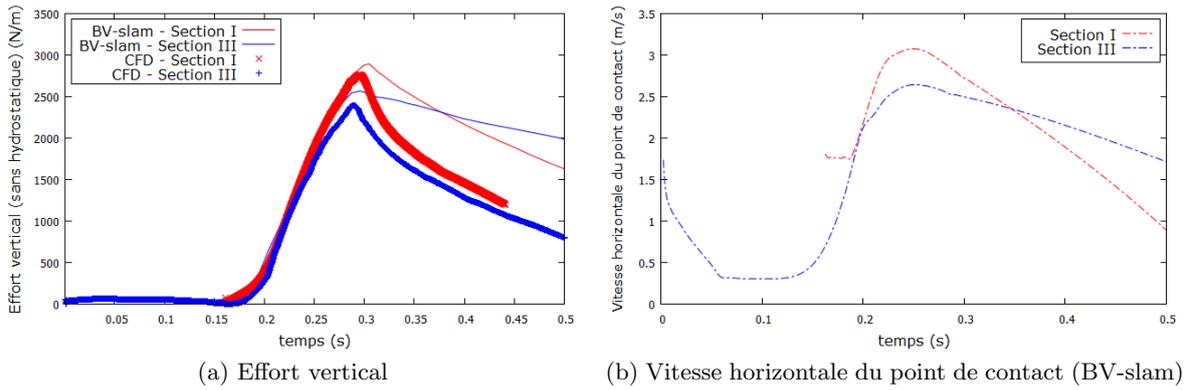


FIGURE 18 – Comparaison des résultats *sym3* sur les sections I & III

Pour les cas avec vitesse de roulis (figure 19), on remarque que les efforts verticaux sont également assez similaires pour les sections I et III. Selon les cas, on observe un décalage plus ou moins prononcé du pic d'effort et de son amplitude. De même que pour le cas symétrique, cette différence s'explique par les vitesses de déplacement des points de contacts sur les parties droites et gauches (figure 20). Cependant, ces différences sont à relativiser du fait que l'on s'intéresse ici à l'effort calculé sur une ou deux sections quand l'effort total de tissage en comprend généralement une dizaine (figure 1). De plus, il reste préférable d'appliquer un effort (même approximatif) plutôt que ne pas en appliquer, cette solution peut donc être envisagée pour améliorer la robustesse des simulations.

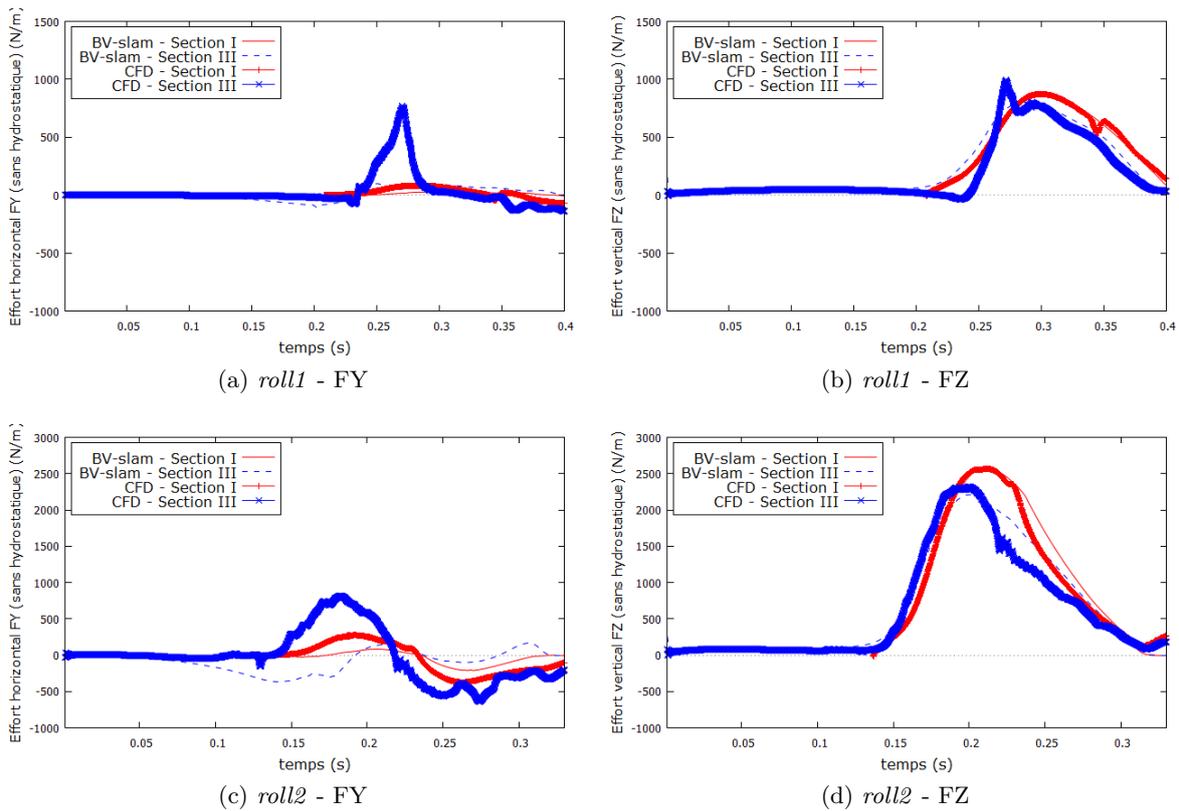


FIGURE 19 – Comparaison des résultats *roll1* et *roll2* sur les sections I & III

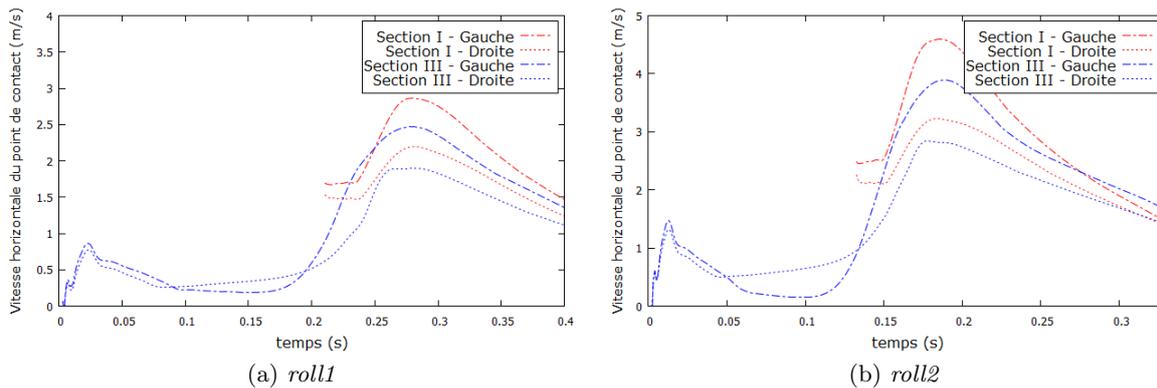


FIGURE 20 – Vitesses horizontales du point de contact sur les sections I & III (BV-slam)

7 Conclusion

L’outil de simulation d’impacts hydrodynamiques potentiel basé sur le modèle de Wagner Généralisé présenté ici présente de bons résultats au regard des nombreuses simplifications, de sa facilité de mise en œuvre et des faibles temps de calculs. En effet, le temps d’un calcul BV-slam est de l’ordre de quelques secondes (avec écriture de fichiers de résultats) contre plusieurs heures pour un calcul CFD : par exemple pour le cas *sym1* sur la section III, BV-slam tourne en 4 secondes sur 1 cœur et OpenFOAM en 7 heures 52 minutes sur 10 cœurs. De plus, la mise en œuvre des calculs CFD doit être faite avec précaution (génération du maillage, pré-traitement du signal de déplacement, choix des paramètres, ...) et peut difficilement être automatisée dans le cadre d’un couplage avec un logiciel de tenue à la mer.

D’autre part, les comparaisons d’efforts entre les sections nous permettent de valider les simplifications opérées par BV-slam et ainsi d’améliorer la fiabilité et la robustesse du couplage de tenue à la mer et de tossage avec Homer 2 en toute confiance.

Enfin, dans ces études d’impacts seule la phase d’entrée a été étudiée mais la phase de sortie est aussi génératrice d’efforts importants à prendre en compte. Les mécanismes mis en jeu dans la phase de sortie étant différents de l’entrée, un nouveau modèle devra être défini, intégré et validé par rapport à des essais ou des calculs CFD.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l’ensemble des partenaires du projet WILS-III duquel sont tirés les résultats expérimentaux de cette étude.

Références

- [1] Bureau Veritas. *Whipping and Springing Assessment*, juillet 2015. NR 583.
- [2] J. de LAUZON, M. GRGIĆ, Q. DERBANNE et Š. MALENICA : Improved generalized wagner model for slamming. *7th International Conference on Hydroelasticity in Marine Technology*, 2015.
- [3] S.-Y. HONG *et al.* : Wave Induced Loads on Ships Joint Industry Project-III. Rapport technique, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, 2014.
- [4] C. MONROY, S. SENG, L. DIEBOLD, A. BENHAMOU, Š. MALENICA, Y. JUS, D. Le TOUZÉ et G. OGER : Comparative study of different methods for water impact computation. *26th International Ocean and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece*, 2016.
- [5] J.T. TUITMAN et Š. MALENICA : Fully coupled seakeeping, slamming and whipping calculations. *Journal of Engineering for Maritime Environment*, 223(3), 2009.

- [6] T. von KÁRMÁN : The impact on seaplane floats during landing. Rapport technique, NACA, 1929.
- [7] H. WAGNER : Über stoß- und gleitvorgänge and der oberfläche von flüssigkeiten. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 1932.
- [8] R. ZHAO et O.M. FALTINSEN : Water entry of two-dimension bodies. *Journal of Fluid Mechanics*, 1993.
- [9] R. ZHAO, O.M. FALTINSEN et J. AARSNES : Water entry of arbitrary two-dimensional sections with and without flow separation. *21st Symposium on Naval Hydrodynamics*, 1996.