



**12<sup>èmes</sup> Journées de l'Hydrodynamique**  
**Nantes , 17-19 novembre 2010**

**SIMULATION NUMERIQUE D'UN NAVIRE AMARRE**

***NUMERICAL SIMULATION OF A MOORED SHIP***

**E. GUILMINEAU\*, A. LEROYER\*, M. VISONNEAU\*, M. NACIRI\*\*, E. ORY\*\***

\* Equipe Modéliation Numérique, Laboratoire de Mécanique des Fluides, CNRS UMR 6598  
Ecole Centrale de Nantes, BP 92101, 44321 NANTES CEDEX 3

\*\* SBM Offshore, 24 avenue de Fontvieille  
P.O Box 199, MC98007 MONACO CEDEX  
*Emmanuel.Guilmineau@ec-nantes.fr*

**Résumé**

Ce papier présente les résultats numériques obtenus par le code de calcul ISIS-CFD pour un bateau amarré dans des vagues. Le cas choisi est celui d'un transporteur de gaz naturel liquéfié (LNG Carrier) en faible profondeur. Les amarres sont modélisées par quatre ressorts. En tenant compte des amarres, les forces exercées sur le bateau sont plus faibles que si le bateau était libre et sans amarres. Le mouvement de cavalement présente une double période alors que les mouvements de pilonnement et de tangage sont réguliers.

**Summary**

This paper deals with the numerical results obtained with the ISIS-CFD solver for a moored ship in waves. The test-case chosen is the one of LNG Carrier in shallow water. The mooring is modeled by four springs. With the mooring, the forces acting on the ship are weaker than if the ship is free without the mooring. The surge motion shows a double period while the heave and pitch motions are regular.

## I – Introduction

Avec les progrès réalisés dans les outils de simulations numériques et les ordinateurs, la mécanique des fluides numérique pour des applications en hydrodynamique où le bateau est fixe peut être maintenant utilisée avec un temps de simulation raisonnable et une précision suffisante même pour des modèles à échelle réelle. L'étude d'écoulements instationnaires autour de corps en mouvement devient aussi abordable dans le domaine de l'hydrodynamique où la position d'équilibre d'un bateau ou son comportement dynamique peuvent être déterminés [1]. Le comportement d'un bateau dans des vagues peut être également déterminé à l'aide de code de simulation des équations de Navier-Stokes en moyenne de Reynolds [2]. Avec ces évolutions du code de calcul, la prise en compte des amarres d'un bateau peut maintenant être simulée. Les applications d'un bateau amarré sont nombreuses. En effet, on peut s'intéresser aux mouvements d'un bateau amarré dans un port ou un chenal avec un courant existant [3, 4] ou lorsqu'un autre bateau passe à proximité du bateau amarré [5]. Dans ces études numériques, le comportement du bateau est déduit par des modèles simplifiés qui calculent la force des vagues, les mouvement du bateau et les forces des amarres. Nous nous proposons ici d'étudier le comportement d'un bateau amarré à l'aide du code de calcul ISIS-CFD qui est un code de simulation des équations de Navier-Stokes en moyenne de Reynolds. Nous supposerons le bateau libre en cavement, pilonnement et tangage dans des vagues.

## II – Description du cas-test

La géométrie choisie pour cette étude est d'un transporteur de gaz naturel liquéfié ou LNG Carrier en anglais qui a fait l'objet d'une campagne de tests dans le bassin offshore de chez MARIN aux Pays Bas. Une maquette a été construite à une échelle 1/35<sup>e</sup> pour faciliter les observations. La carène est représentée sur la figure 1. Les dimensions du bateau et de la maquette sont indiquées dans le tableau 1.

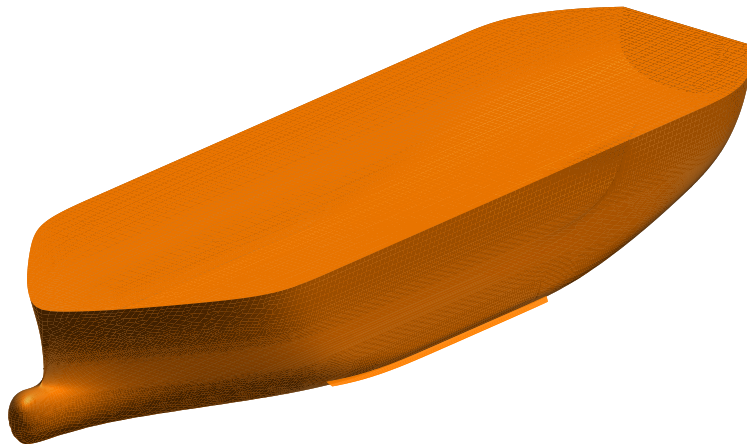


Figure 1 – Carène de LNG Carrier

Les mesures expérimentales ont été réalisées dans un bassin de faible profondeur où la hauteur d'eau est de 0.857 m. A échelle réelle, cela correspond à une hauteur d'eau de 30 m.

Dans les expériences, le modèle est retenu dans ses déplacements par un système de 4 amarres horizontales, cf Fig. 2. Les amarres, montrées dans la figure 3, restreignent les

Paramètre	Echelle réelle	Modèle
Longueur $L_{pp}$ [m]	274.0	7.82857
Hauteur [m]	25.0	0.71428
Tirant d'eau [m]	11.0	0.44000
Déplacement [t]	99 210	2.25750

TAB. 1 – Caractéristiques principales du LNG Carrier



Figure 2 – Vue expérimentale

mouvements de cavement, de pilonnement et de tangage du LNGC. Les autres degrés

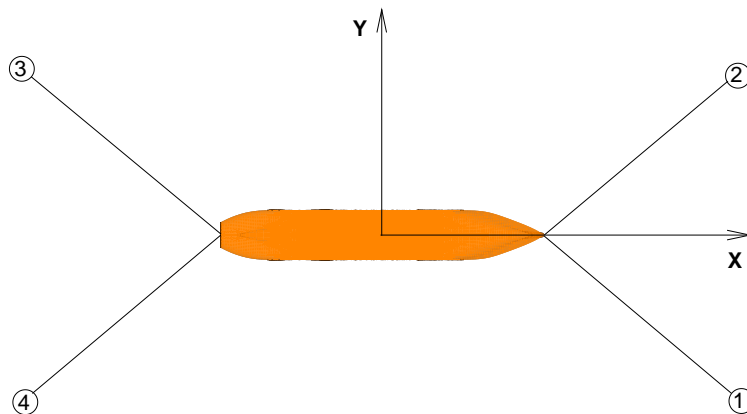


Figure 3 – Schéma des lignes d'amarre

de liberté (embarquée, lacet et roulis) sont bloqués.. Ces quatre lignes sont identiques et peuvent être considérées sans masse, c'est-à-dire comme des ressorts élastiques. Les coordonnées des points d'ancrage et des points d'attachement sur le bateau, à l'échelle réelle, sont données dans le tableau 2 ainsi que les caractéristiques de chaque amarre.

Les caractéristiques des vagues à échelle réelle sont les suivantes : une hauteur de crête à creux  $H = 2$  m et une période  $T = 17.95$  s.

Ligne	Point d'attache			Point d'ancrage			Caractéristiques	
	X [m]	Y [m]	Z [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]	Raideur [kN/m]	Prétension [N]
1	283,23	0,0	25,0	356,2	-210,0	14,0	128.0	296.7
2	283,23	0,0	25,0	356,2	210,0	14,0	128.0	296.7
3	-9.93	0,0	25,0	-356,2	210,0	14,0	128.0	296.7
4	-9.93	0,0	25,0	-356,2	-210,0	14,0	128.0	296.7

TAB. 2 – Positions des points d'ancrage et caractéristiques des lignes d'amarre

### III – Description du solveur fluide

Le code ISIS-CFD est basé sur la résolution des équations de Navier-Stokes en moyenne de Reynolds (RANSE) sous une forme fortement conservative. Il repose sur une méthode de volumes finis généralisée à des maillages non-structurés composés de volumes polyédriques arbitraires.

Le champ de vitesse  $\vec{U}$  est obtenu à partir des équations de conservation de quantité de mouvement et la pression  $P$  est déterminée selon la contrainte d'incompressibilité transformée en équation de pression. Le couplage vitesse-pression est assuré par un algorithme de type SIMPLE. L'ensemble des variables est stocké au centre des volumes de contrôle. Les intégrales de volume et de surface sont évaluées par des approximations précises au second ordre. Le mode de discrétisation temporelle utilisé nominalement pour les calculs instationnaires est une méthode du deuxième ordre décentrée à deux pas de temps. A chaque pas de temps, une boucle interne (appelée "boucle non-linéaire") associée à une linéarisation de Picard est effectuée pour résoudre les non-linéarités.

Dans le cas d'écoulements turbulents, des équations de transport additionnelles pour les variables modélisées sont résolues dans une forme similaire aux équations de quantité de mouvement. Elles peuvent donc être discrétisées et résolues en utilisant les mêmes principes. Plusieurs modèles de turbulence allant du modèle à une équation au modèle des contraintes de Reynolds sont mis en œuvre dans ISIS-CFD. La plupart des fermetures basées sur une viscosité linéaire comme le modèle K- $\omega$  SST de Menter [6] sont implémentées. Deux autres fermetures plus sophistiquées sont également mises en œuvre dans le solveur ISIS-CFD, un modèle des contraintes de Reynolds algébrique explicite (EARSM [7]) et un modèle de transport des contraintes de Reynolds (RSM) [8]. Le solveur est parallélisé à l'aide de la bibliothèque MPI ou Open MPI.

Les écoulements à surface libre sont gérés par une méthode de capture d'interface. L'ensemble des deux phases est vu comme un fluide unique dont les propriétés physiques varient avec un taux de présence,  $c_i$ . Celui-ci est traité comme un Lagrangien emporté par le fluide global. Sa discrétisation nécessite des schémas compressifs appropriés pour éviter une diffusion trop importante de l'interface. Une description détaillée est disponible dans l'article de Queutey & Visonneau [9].

Le solveur peut gérer les mouvements tridimensionnels d'un nombre quelconque de corps indéformables (solides) mais aussi déformables à déformation imposée (la forme du corps est alors imposée au cours du temps). Les degrés de liberté pour chaque corps peuvent être soit résolus soit imposés en donnant explicitement la loi d'évolution du paramètre dans le repère physique. Les maillages s'appuyant sur la surface des corps ("body-fitted grid"), il est nécessaire de gérer le déplacement au cours du temps des nœuds du maillage représentant chaque corps dans le repère physique. Pour conserver un maillage adéquat, différentes méthodologies (mouvement en bloc du maillage ou déformations) ont

été développées et peuvent être utilisées de manière hybride suivant les degrés de liberté [1].

## IV – Maillage et conditions aux limites

Comme les vagues qui arrivent sont perpendiculaires au bateau, on peut ne considérer qu'un demi-bateau. Par conséquent le plan  $Y = 0$  sera considéré comme un plan de symétrie. Le domaine de calcul commence à  $1 \times L_{pp}$  devant le bateau et s'étend à  $3 \times L_{pp}$  derrière la carène. La largeur du domaine est  $1.5 \times L_{pp}$ . Le fond du domaine de calcul est imposé par la profondeur du bassin d'essai, c'est à dire à 0.857 m de la surface libre. La hauteur au-dessus de la surface est de  $0.13 \times L_{pp}$ . Le maillage est généré en utilisant HEXPRESS™, un mailleur non-structuré automatique. Ce mailleur génère des maillages contenant uniquement des hexaèdres. Le maillage est composé de 3.7 millions de cellules et le bateau est décrit par environ 84 000 faces. La figure 4 présente une vue du maillage de surface du LNGC et d'une coupe perpendiculaire au bateau.

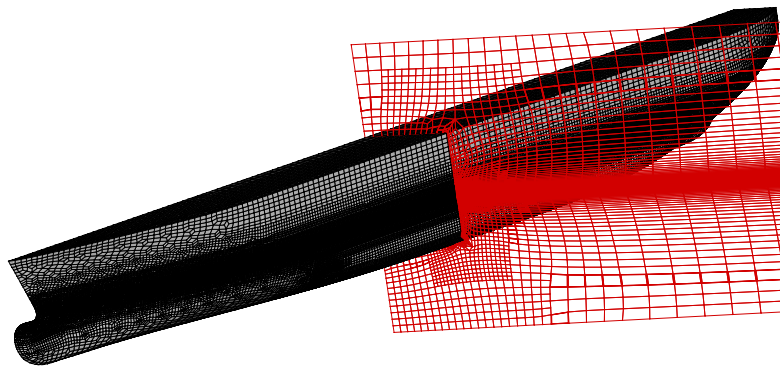


Figure 4 – Vue du maillage

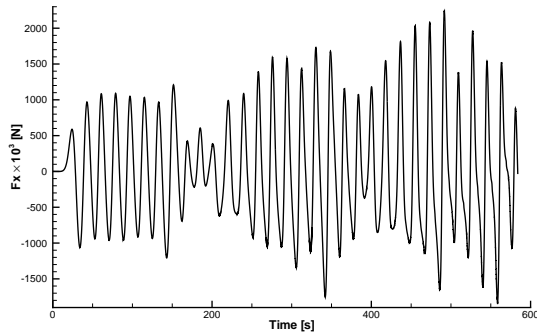
Pour la surface du bateau, on utilise une fonction de paroi alors que pour le pont, on utilise une condition de glissement. Pour les deux plans à  $Y$  constant, une condition de symétrie est utilisée. Le fond du bassin est simulé par une condition de glissement pour prendre en compte de l'effet d'une profondeur finie. Le plan  $Z_{max}$  a une condition de pression imposée. Dans le plan à la sortie du domaine, une condition de Dirichlet est imposée et dans le plan à l'entrée du domaine de calcul, un générateur de houle de Stokes est défini.

## V – Résultats

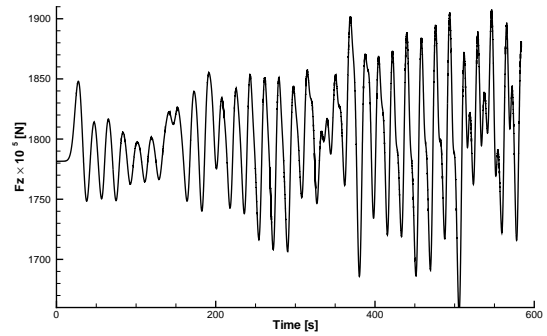
Avant de considérer la carène du LNG libre avec ses amarres, on va s'intéresser à cette carène soit fixe ou soit libre mais sans les amarres. Dans tous les cas, une houle avec une hauteur de crête à creux  $H = 2$  m et une période  $T = 17.95$  s à l'échelle réelle est générée.

### V – 1 Carène fixe

Dans un premier temps, on considère le bateau fixe. Les figures 5 présentent les forces  $F_x$  et  $F_z$  en fonction du temps pour un bateau à l'échelle réelle. On constate une variation de l'amplitude dans l'évolution des efforts en fonction du temps. De plus, l'amplitude d'oscillation augmente en fonction du temps. La période principale des oscillations correspond à celle des vagues.



(a) Force Fx

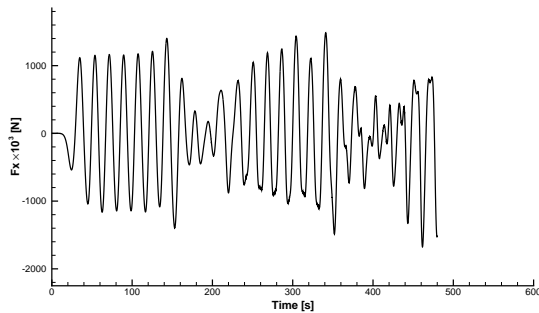


(b) Force Fz

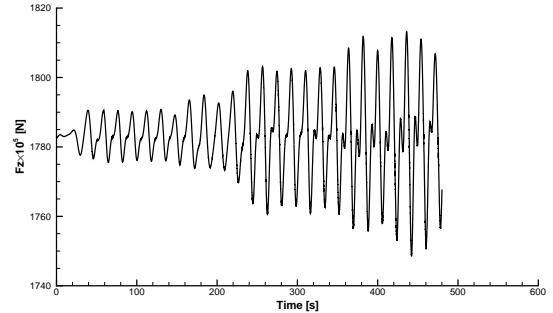
Figure 5 – Forces en fonction du temps pour un LNGC fixe

## V – 2 Carène libre mais sans prendre en compte les amarres

Dans un second temps, on considère le LNGC libre mais les amarres ne sont pas prises en compte. Les figures 6 représentent l'évolution des forces  $F_x$  et  $F_z$  en fonction du temps pour un bateau à l'échelle réelle. On observe que la force  $F_x$  est plus faible que dans le cas où le bateau est fixe. La force  $F_z$  est également plus faible. Comme dans le cas précédent, l'amplitude de la force  $F_z$  augmente en fonction du temps comme dans le cas du bateau fixe. On note également un battement dans l'évolution de la force  $F_x$ . La fréquence principale de ce signal est identique à celle de la houle.



(a) Force Fx



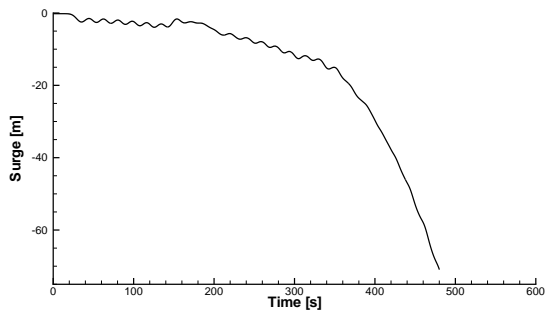
(b) Force Fz

Figure 6 – Forces en fonction du temps pour un LNGC sans les amarres

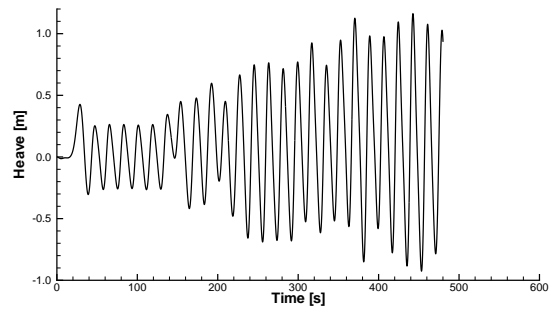
L'évolution des mouvements du LNGC en fonction du temps est représentée sur les figures 7. Les déplacements sont mis à l'échelle réelle du bateau. Si les amarres ne sont pas prises en compte, on constate qu'excepté le cavalement, les deux autres mouvements ont un mouvement oscillant avec une variation de l'amplitude d'oscillation. Le mouvement de cavalement augmente sans arrêt.

## V – 3 Carène libre en prenant en compte les amarres

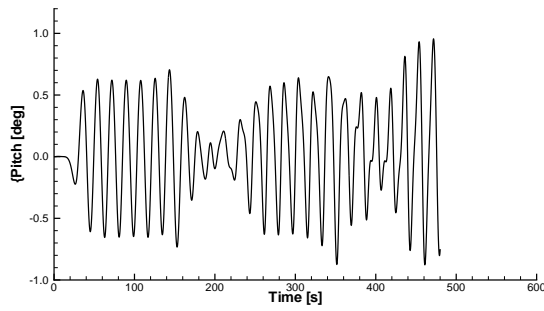
Les figures 8 présentent les forces  $F_x$  et  $F_z$  en fonction du temps pour un LNGC à échelle réelle. Contrairement au cas d'un LNGC fixe ou d'un LNGC sans prendre en compte les amarres, la force  $F_x$  varie de façon régulière. Contrairement aux deux cas précédents, il n'y a pas de battements dans l'évolution de la force  $F_x$  en fonction du temps. De plus l'amplitude de cette force est plus faible lorsque les amarres sont prises en compte.



(a) Cavalement

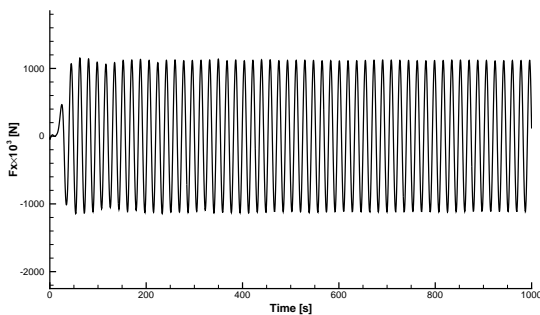


(b) Pilonnement

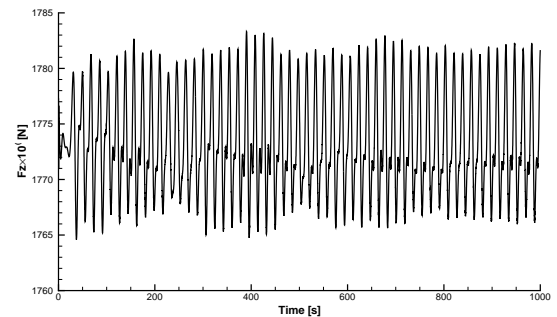


(c) Tangage

Figure 7 – Mouvements du LNGC sans les amarres en fonction du temps



(a) Force  $F_x$



(b) Force  $F_z$

Figure 8 – Forces en fonction du temps pour un LNGC avec les amarres

Les figures 9 présentent une comparaison calcul-expérience des déplacements du LNGC à échelle réelle, en fonction du temps. On note un phénomène de battement pour le mouvement de cavalement du LNGC, ce qui n'est pas le cas pour les deux autres mouvements. Ces phénomènes sont également observés lors des mesures expérimentales. On observe également que les amplitudes des mouvements obtenues par la simulation numérique surestiment les amplitudes mesurées expérimentalement. Bien que l'accord avec les expériences ne soit pas parfait, la qualité de cette simulation repose sur la prédiction de la deuxième fréquence pour le cavalement.

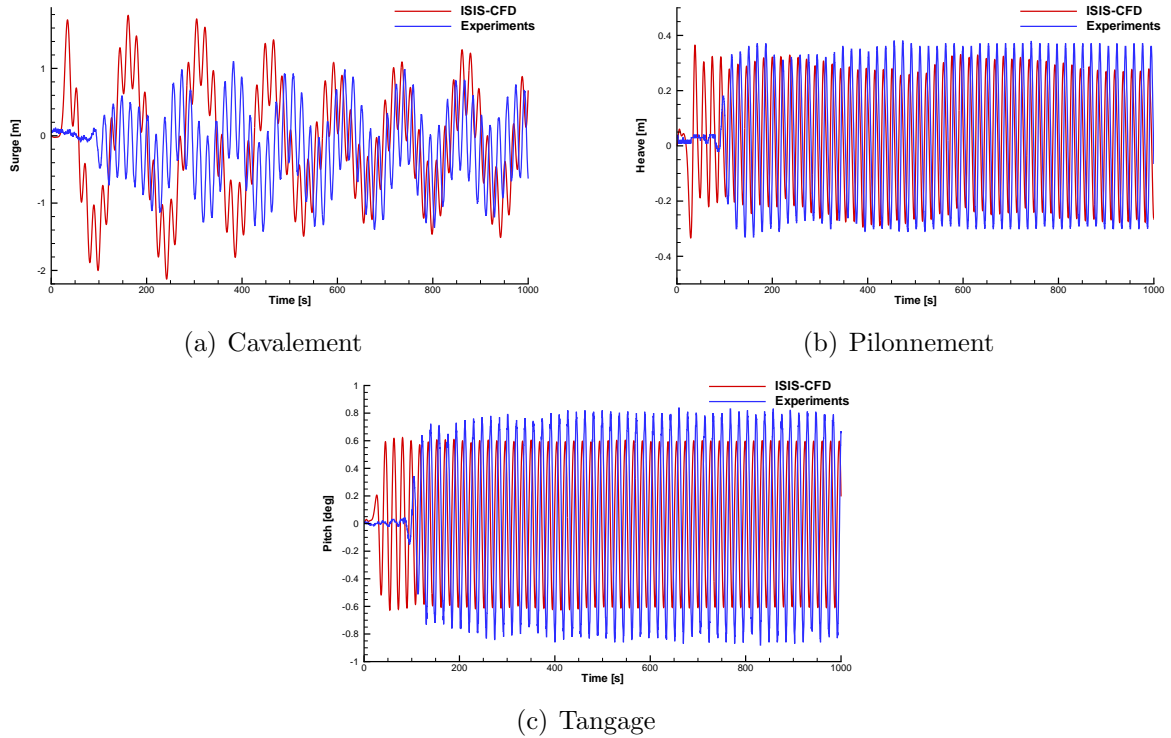


Figure 9 – Mouvements du LNGC avec les amarres en fonction du temps

Si on utilise une transformée de Fourier pour étudier les fréquences des signaux des déplacements du LNGC avec les amarres, on constate que tous les déplacements possèdent une fréquence qui est identique à celle de la houle ( $f_h = 0.055$  Hz). Pour le mouvement de cavalement, une deuxième fréquence, qui correspond à  $1/8^e$  de la fréquence de la houle est visible.

## VI – Conclusions

L'objectif de ce papier était de simuler les mouvements d'un bateau amarré à l'aide du code de calcul Navier-Stokes en moyenne de Reynolds ISIS-CFD.

La carène choisie était celle d'un transporteur de gaz naturel liquéfié (LNG Carrier) en faible profondeur. Une première simulation a été réalisée en considérant le bateau fixe. Dans ce cas, l'évolution des efforts en fonction du temps présente une variation de l'amplitude d'oscillation. Une autre simulation a été effectuée où les mouvements de cavalement, de pilonnement et de tangage sont résolus. Dans ce cas, le mouvement de cavalement augmente sans cesse alors que les deux autres mouvements oscillent mais avec une amplitude que varie en fonction du temps. Enfin, la dernière configuration est celle du LNGC où



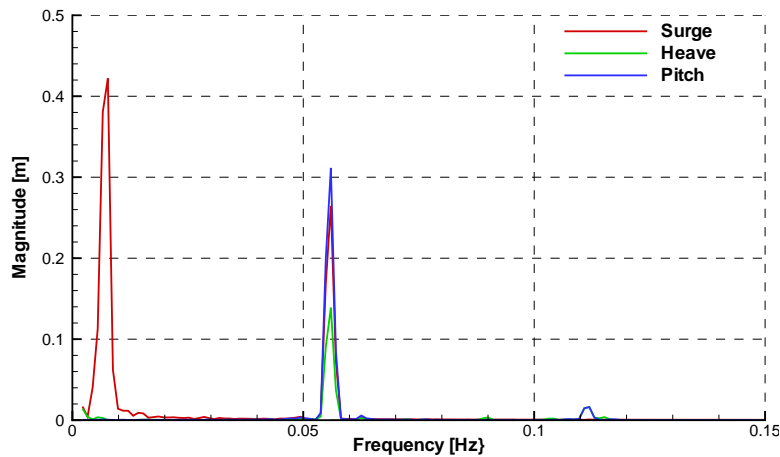


Figure 10 – Spectres des déplacements pour un LNGC avec les amarres

les amarres sont pris en compte. Dans ce cas, le mouvement de cavalement présente une variation de l’amplitude d’oscillation alors que les deux autres mouvements ont une oscillation régulière. Ces deux fréquences pour le mouvement de cavalement sont également observées dans les expériences. Pour les efforts, leur amplitude d’oscillation est plus faible si le bateau est amarré que s’il était libre ou fixe.

Le code de calcul ISIS-CFD a montré qu’il était capable de prendre en compte les amarres d’un bateau. Par conséquent, la suite possible de cette étude est de traiter deux bateaux amarrés qui sont cote à cote afin d’étudier le comportement de l’un par rapport à l’autre.

## **Remerciements**

Ces travaux ont bénéficié d’un accès aux moyens de calcul du CINES au travers de l’allocation de ressource 2010-20129 attribué par GENCI (Grand Equipement National de Calcul Intensif).

## **Références**

- [1] A. Leroyer, P. Queutey, and M. Visonneau, “Couplage écoulement/mouvement au sein d’un solveur RANSE : Application à l’hydrodynamie navale,” in *11<sup>e</sup> Journées de l’Hydrodynamie*, (Brest), pp. 61–74, 2007.
- [2] G. B. Deng, P. Queutey, and M. Visonneau, “RANSE prediction of the KVLCC2 tanker in head waves,” in *Proceedings of 9th International Conference on Hydrodynamics*, 2010.
- [3] S. K. Chakrabarti, A. Libby, and P. Palo, “Small-scale testing on current-induced forces on a moored tanker,” *Ocean Engineering*, vol. 22, no. 3, pp. 271–300, 1995.
- [4] W. van der Molen, H. Ligteringen, J. C. van der Lem, and J. C. M. de Waal, “Behavior of a moored LNG ship in swell waves,” *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, vol. 129, no. 1, pp. 15–21, 2003.
- [5] K. S. Varyani, P. Krishnankutty, and M. Vantorre, “Prediction of load on mooring ropes of a container ship due to the forces induced by a passing bulk carrier,” in *MARSIM’03*, (Kanazawa, Japan), pp. RC-33-1–RC-33-9, 2003.

- [6] F. R. Menter, “Zonal two-equation  $k - \omega$  turbulence models for aerodynamic flows,” in *AIAA 24th Fluid Dynamics Conference*, AIAA Paper 93-2906, (Orlando, FL), July 1993.
- [7] G. Deng, P. Queutey, and M. Visonneau, “Three-dimensional flow computation with reynolds stress and algebraic stress models,” in *Engineering Turbulence Modelling and Experiments 6* (W. Rodi and M. Mulas, eds.), (Sadraigna, Italy), pp. 389–398, Proceedings of the ERCOFTAC International Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements - ETMM6, Elsevier, May 2005.
- [8] R. Duvigneau, M. Visonneau, and G. Deng, “On the role played by turbulence closures in hull ship optimization at model and full scale,” *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 8, pp. 11–25, 2003.
- [9] P. Queutey and M. Visonneau, “An interface capturing method for free-surface hydrodynamic flows,” *Computers and Fluids*, vol. 36, pp. 1481–1510, 2007.