

20 ANS DE RECHERCHES EN HYDRODYNAMIQUE ET STRUCTURE AU BUREAU VERITAS

**Quentin DERBANNE, Sime MALENICA, Xiao-Bo CHEN,
Louis DIEBOLD**

BUREAU VERITAS – Division Marine & Offshore – Neuilly-sur-Seine

RESUME

Les travaux du Département Recherche du Bureau Veritas ont été récompensés par le prix 2013 du CEMT (Confederation of European Maritime Technology Societies). A cette occasion, ce mémoire revient sur les innovations principales de ces 20 dernières années dans les domaines de l'hydrodynamique et de l'hydro-structure. Les logiciels HydroStar et Homer, développés par Bureau Veritas, ont bénéficié de nombreuses innovations et sont maintenant des références dans leur domaine largement utilisés de par le monde. Dans le domaine du sloshing, Bureau Veritas a su développer une expertise de haut niveau grâce à des essais sur maquette indépendants, à l'emploi de la CFD et à des travaux sur les statistiques des pressions de sloshing. Enfin des travaux importants ont été menés sur les méthodologies de design, permettant de faire le lien entre l'approche calcul direct et l'approche réglementaire.

SUMMARY

The Confederation of European Maritime Technology Societies (CEMT) 2013 Award in recognition of a significant contribution to the European Maritime Industry was made to the Research Department of the Marine Division of Bureau Veritas for their outstanding research in the field of hydrodynamics and hydro-structure. This paper gives a quick overview of the past 20 years of innovations in these fields. HydroStar and Homer software, developed by Bureau Veritas, are based on many innovations, and are now at the state of the art level and widely used worldwide. Bureau Veritas has developed a very high level expertise in sloshing, based on independent sloshing model tests, the use of CFD and research on statistical laws to extrapolate the sloshing pressures. Finally important work has been done on design methodologies that enables to treat the direct computation approach and the rule approach in a consistent manner.

1. INTRODUCTION

Tous les ans, la CEMT (Confederation of European Maritime Technology Societies), dont fait partie l'ATMA, décerne un prix qui récompense des personnes physiques ou des organismes pour leur contribution éminente au succès de l'industrie maritime européenne. Le

prix 2013 ayant été attribué à 4 ingénieurs du Département Recherche du Bureau Veritas, il a paru souhaitable de rappeler, dans leurs grandes lignes, les travaux qui ont été effectués, au sein de cette structure et depuis une vingtaine d'années, dans les domaines de compétence de ces lauréats : l'hydrodynamique et l'hydro-structure.

Il ne s'agit donc pas ici d'examiner en détail tous les travaux de recherche effectués pendant cette période au Bureau Veritas. On rappellera seulement que les compétences du département responsable de cette activité s'étendent en fait sur une large gamme de disciplines : hydrodynamique, ancrage, hydro-structure, mesures et essais, sloshing, glace, intégrité structurelle et risque, sûreté, énergie et environnement, méthodologies de design, ...

2. HYDRODYNAMIQUE

En matière d'hydrodynamique, l'apport le plus important du Bureau Veritas est sans nul doute le développement d'HydroStar, logiciel de tenue à la mer qui résout les équations potentielles de la mécanique des fluides autour de structures flottantes ou fixes. Il est l'aboutissement de travaux de recherche qui ont commencé dès 1984 à l'Ecole Centrale de Nantes pendant la thèse de Xiao-Bo Chen, qui se sont ensuite poursuivis à l'Institut Français du Pétrole, puis au Bureau Veritas à partir de 1991. HydroStar est maintenant utilisé par toutes les équipes techniques du Bureau Veritas, et par des clients externes (une cinquantaine de licences vendues de par le monde).

Plutôt que de décrire dans le détail le fonctionnement de ce logiciel, nous allons donner ici un aperçu rapide de quelques fonctionnalités innovantes qui ont été développées par le Dr Chen et son équipe, et qui font désormais d'HydroStar un des meilleurs codes de calcul du genre au niveau mondial.

2.1. Des algorithmes efficaces

Dès sa conception HydroStar a été pensé pour être rapide et robuste.

La fonction de Green est une fonction mathématique très complexe, qui est la brique de base utilisée pour la résolution des écoulements potentiels. Si son expression est connue de tous depuis bien longtemps, les méthodes pour la calculer peuvent varier. Le calcul de la fonction de Green dans HydroStar repose sur une partition entre une partie singulière (Rankine) et une partie régulière. Afin de gagner en temps de calcul, la partie

régulière a été approchée par une série de polynômes, dont les coefficients ont été pré-calculés et intégrés dans le code de calcul.

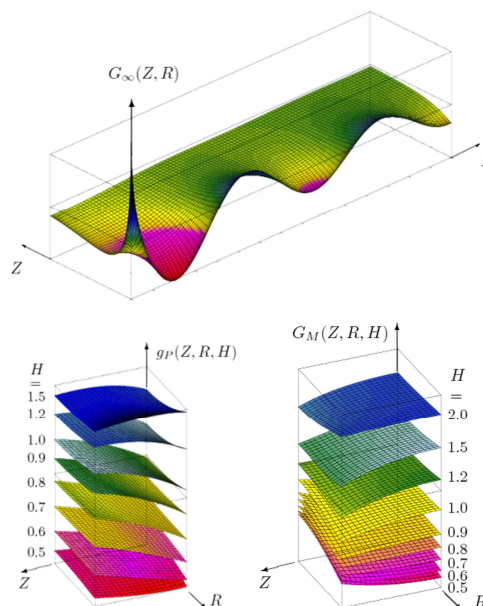


Figure 1 : Parties régulières de la fonction de Green : profondeur infinie (haut) et compléments pour profondeur finie (bas)

Toujours dans le but d'améliorer le temps de calcul, les solveurs utilisés pour résoudre les équations intégrales ont été optimisés, et le code a été pensé de façon modulaire.

2.2. Validations et comparaisons

Dès sa conception, les résultats du code HydroStar ont été comparés soit à des résultats analytiques qui existent pour des géométries simples (demi-sphère, cylindre, ...), soit à des résultats d'essais en bassin pour des géométries plus réalistes. Aujourd'hui une procédure de test a été mise en place, qui compare automatiquement les résultats de chaque nouvelle version avec des résultats de référence, afin de s'assurer de la non-régression du code.

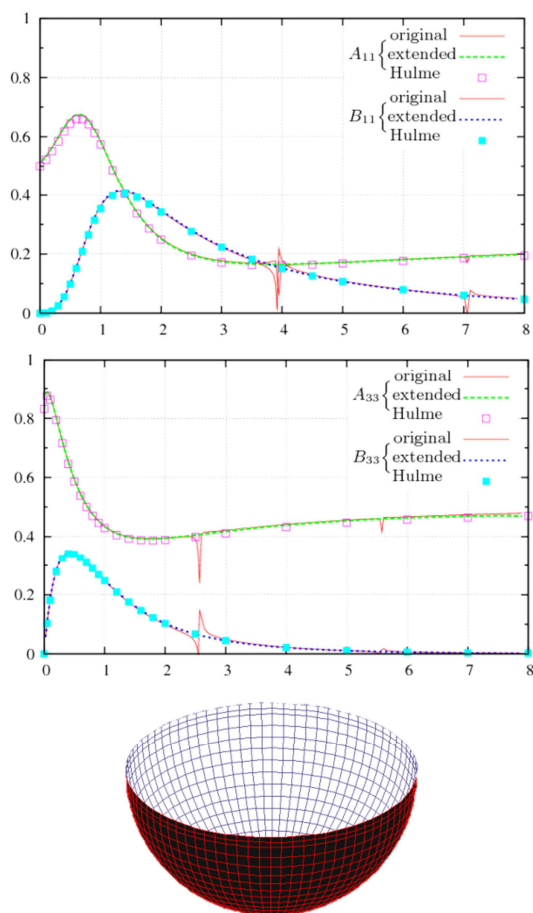


Figure 2 : Comparaison des masses ajoutées et amortissements ajoutés d'une demi-sphère avec des résultats analytiques

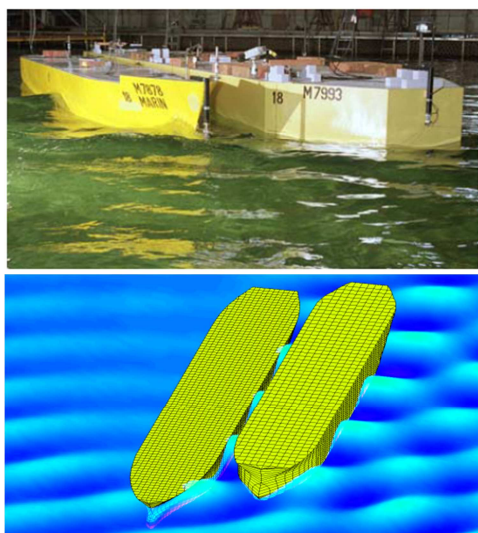


Figure 3 : Comparaison essais-calculs d'un pétrolier à couple d'un FPSO

Les résultats du code HydroStar sont aussi régulièrement comparés aux résultats des codes concurrents. Il en ressort qu'HydroStar est un code très robuste, tant en terme de convergence en maillage que de traitement des fréquences irrégulières, le tout avec une vitesse de calcul plutôt plus élevée que la moyenne. Les différences sont d'autant plus visibles pour les efforts du second ordre, comme illustré ci-dessous.

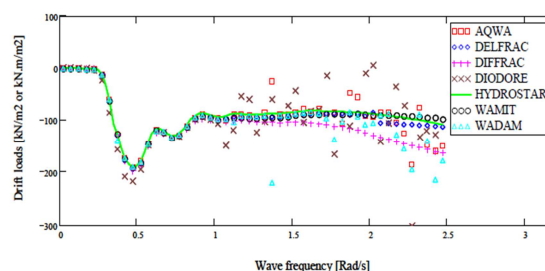


Figure 4 : Comparaison des efforts de dérive prédits par différents codes de calcul

2.3. Efforts du second ordre

HydroStar se démarque significativement de ses concurrents par les innovations effectuées dans le calcul des efforts du deuxième ordre. La théorie classique prévoit deux méthodes de calcul pour ces efforts.

La méthode de champ proche est basée sur une intégration directe des pressions sur le navire. Cette méthode souffre d'une convergence très lente en maillage : un maillage très fin est nécessaire pour obtenir les bons résultats.

La méthode de champ lointain permet de s'affranchir de cette dépendance au maillage, mais son application est limitée aux efforts de dérive du plan horizontal, et pour un seul corps.

Une méthode intermédiaire, appelée de champ moyen, a été introduite dans HydroStar. Elle utilise une surface de contrôle qui entoure le corps, et permet de combiner les avantages des deux méthodes précédentes : obtention de toutes les composantes des efforts, applicable à une simulation multi-corps, efforts de dérive et efforts basse fréquence ($\Delta\omega$), très bonne convergence en maillage.

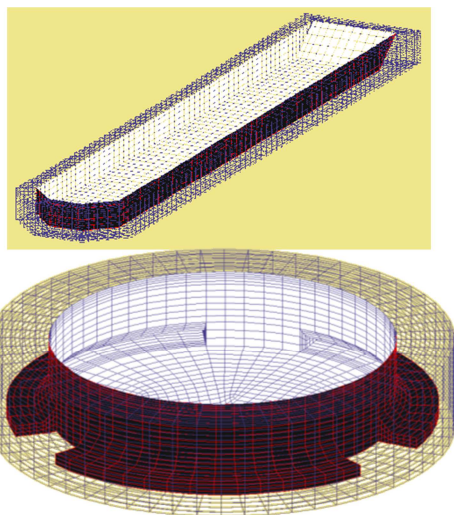


Figure 5 : Surface de contrôle utilisée dans la méthode champs moyen

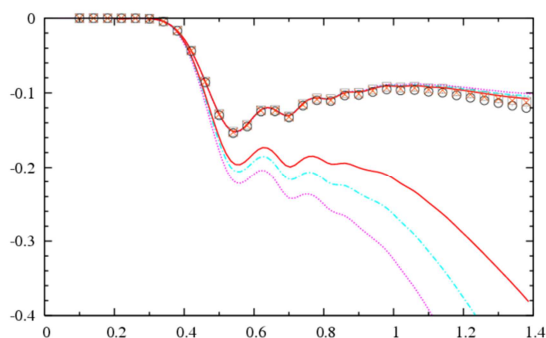


Figure 6 : Efforts de dérive : influence du maillage pour la méthode de champs proche et de champs moyen

Le calcul des efforts du second ordre basse fréquence, résultant de l'interaction de deux composantes de houle de fréquences légèrement différentes, est très coûteux en temps. Une méthode approchée, proposée par Newman, permet de calculer ces efforts basse fréquence simplement à partir des efforts de dérive (efforts moyens). Cette approche n'est cependant valide que pour de très basses fréquences. Une approche intermédiaire a été introduite dans HydroStar, basée sur une formulation innovante, et elle donne des résultats bien meilleurs que l'approximation de Newman, pour un temps de calcul à peine supérieur.

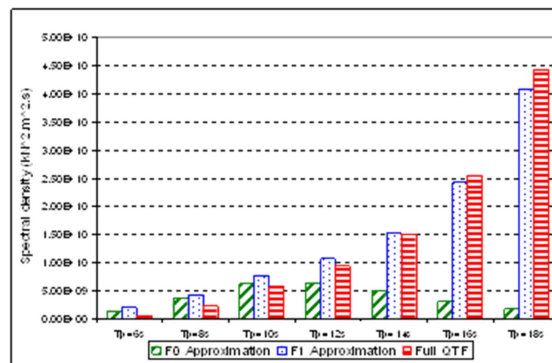


Figure 7 : Comparaison des efforts du second ordre obtenus avec la QTF complète, l'approximation de Newman, et l'approximation $O(\Delta\omega)$

2.4. Introduction de la dissipation dans les écoulements potentiels

La théorie potentielle a l'énorme avantage de pouvoir résoudre les équations de la mécanique des fluides de manière très efficace, tout en rendant compte de manière précise des effets d'inertie (vagues, tenue à la mer, ...). Mais, localement, elle revient à négliger la dissipation d'origine visqueuse ou turbulente, et peut donc amener à des prévisions très mauvaises dans certains cas pathologiques.

Une possibilité offerte par HydroStar est d'introduire dans les équations potentielles une source d'amortissement, non pas pour simuler précisément l'écoulement visqueux, mais pour rendre compte de manière globale de la dissipation d'énergie qui en résulte.

Une zone d'amortissement peut être créée sur la surface libre. C'est le cas par exemple lorsqu'on veut simuler deux navires côte à côte. Dans ce cas, la théorie potentielle a tendance à surestimer la hauteur des vagues entre les deux navires. L'introduction d'un amortissement, qui est introduit par HydroStar directement au niveau de l'équation intégrale incluant la zone dissipative, permet de simuler le cas de façon réaliste.

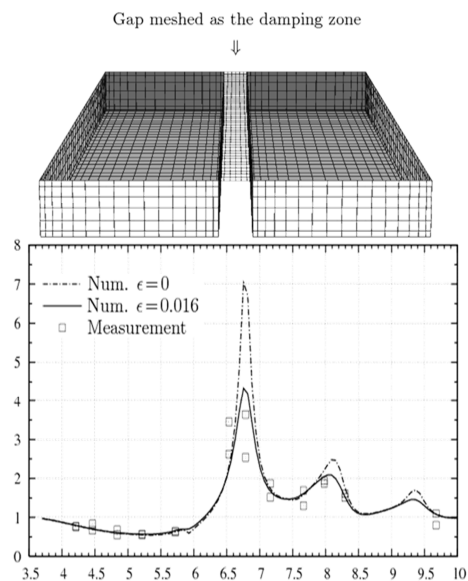


Figure 8 : Comparaison essais-calculs de l'agitation entre deux barges

L'autre cas d'application est la simulation du ballotement dans une cuve. La théorie potentielle prévoit, lorsque la fréquence d'excitation est égale à la fréquence propre de la cuve, un mouvement infini du liquide associé à des efforts infinis. En effet, il n'y a pas de dissipation d'origine potentielle. L'introduction d'une dissipation numérique sur les parois de la cuve permet là aussi de limiter le ballotement à des valeurs réalistes, et ainsi de pouvoir calculer la dynamique couplée du navire et de ses cuves (pétrolier, LNG, FPSO).

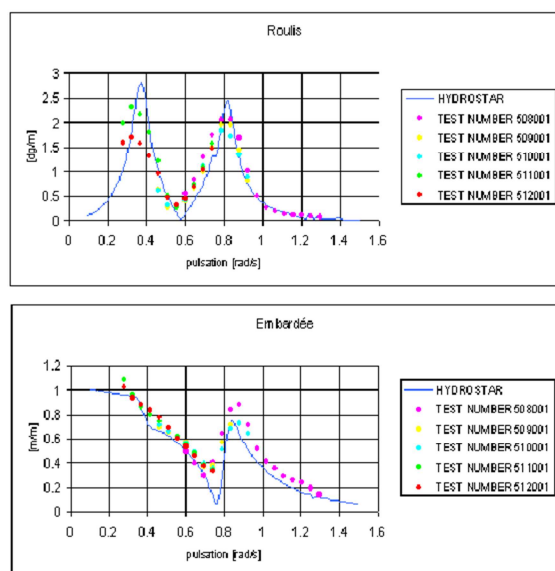


Figure 9 : Mouvements couplés d'un navire et de ses cuves

3. HYDRO-STRUCTURE

Les développements dans le domaine de l'hydro-structure datent du début des années 2000. Il est en effet apparu nécessaire à cette époque de pouvoir coupler les calculs de tenue à la mer effectués avec HydroStar avec les calculs de structure effectués par un logiciel éléments finis (Nastran, Abaqus, ...). Les travaux exploratoires, initiés par Sime Malenica, ont débouché en 2012 sur le logiciel Homer. Ce logiciel ne fait rien d'autre que de transférer les pressions calculées par HydroStar sur le maillage structure du navire, puis de récupérer les contraintes et les déformations calculées par le code de calcul de structure. Mais cette simplicité apparente cache en fait de nombreux détails plus complexes, qui sont nécessaires pour assurer un couplage robuste et efficace.

3.1. Une solution originale pour transférer les pressions

Le couplage nécessite un transfert des pressions calculées par le code hydrodynamique sur le maillage de structure. Or, la plupart du temps, le maillage utilisé pour résoudre le problème hydrodynamique diffère de celui utilisé pour résoudre le problème structurel. La méthode la plus intuitive consiste donc à interpoler les pressions du maillage hydrodynamique vers le maillage structure. Mais cette méthode n'est pas robuste, car l'interpolation introduit des erreurs, et les efforts obtenus en intégrant les pressions sur le maillage structure sont alors différents des efforts considérés dans le code de tenue à la mer ! Il en résulte un modèle mal équilibré lors du calcul éléments finis.

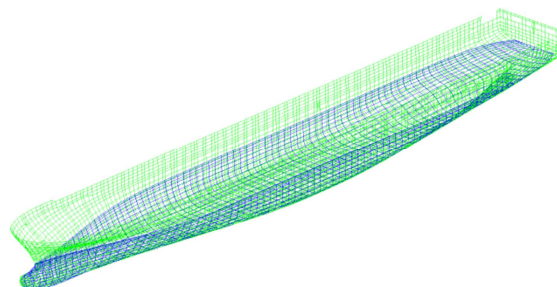


Figure 10 : Maillage structure et maillage hydrodynamique d'un porte-conteneurs

Homer utilise une méthode originale, qui prend ses racines au cœur du code HydroStar, en utilisant les propriétés de la fonction de Green : HydroStar n'est utilisé que pour résoudre l'écoulement autour du navire. Il recalcule ensuite les pressions directement à l'emplacement des points de Gauss du maillage structurel (pas d'interpolation). Les efforts globaux sont ensuite obtenus en intégrant les pressions sur le maillage structure, et les mouvements du navire sont résolus par Homer. Cette méthode assure un équilibrage parfait du modèle éléments finis, quelle que soit la différence entre le maillage hydrodynamique et le maillage structure. Homer est, à notre connaissance, le seul logiciel hydro-structure au monde à utiliser cette méthode.

3.2. Calculs hydro-élastiques

Pour les navires de grande taille, il est devenu nécessaire de prendre en compte de manière dynamique les déformations principales de la poutre navire. La méthode utilisée par Homer repose sur une approche modale. La méthode n'est pas nouvelle, mais est utilisée ici avec une approche 3D pour la structure. Les modes propres secs du navire sont d'abord obtenus par analyse modale du modèle éléments finis. Les déformations sont ensuite transférées au modèle hydrodynamique, et les équations de la tenue à la mer sont résolues de la même manière que pour un corps rigide, la seule différence étant qu'il y a maintenant N modes de déformation au lieu de 6.

La résolution du comportement hydro-élastique couplé du navire fait donc apparaître des pics de résonance aux fréquences propres de la structure, ce qui peut entraîner un accroissement significatif du dommage en fatigue des détails structurels.

L'approche modale a l'avantage de pouvoir rendre compte de la résonance de certains modes propres de la poutre navire, mais repose sur une troncature de la base de déformation du navire. L'approche directe (aussi appelée quasi-statique), ne tient pas compte de la dynamique de la structure, mais tient compte de tous les degrés de liberté du modèle structurel. L'approche utilisée dans Homer est une approche hybride qui combine les deux approches précédentes : la réponse est divisée

entre une réponse quasi-statique et une réponse dynamique. La réponse quasi-statique est calculée par l'approche directe, et la réponse dynamique par l'approche modale. La réponse totale ainsi obtenue combine les avantages des deux méthodes précédentes.

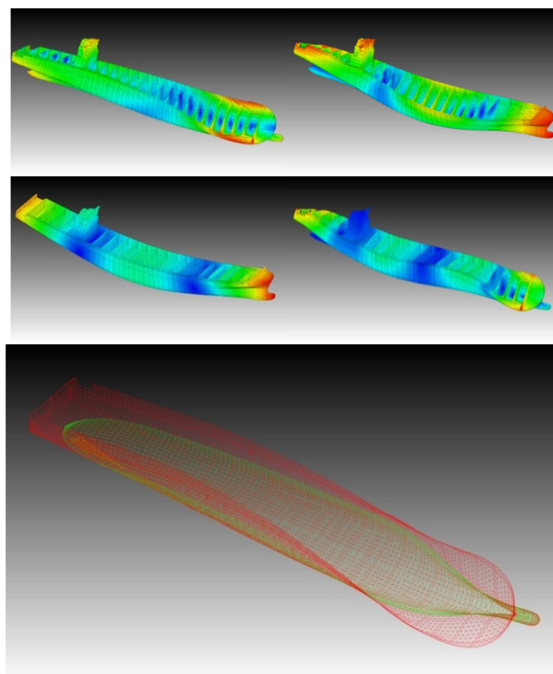


Figure 11 : Modes propres d'un porte-conteneurs et application de la déformation sur le maillage hydrodynamique

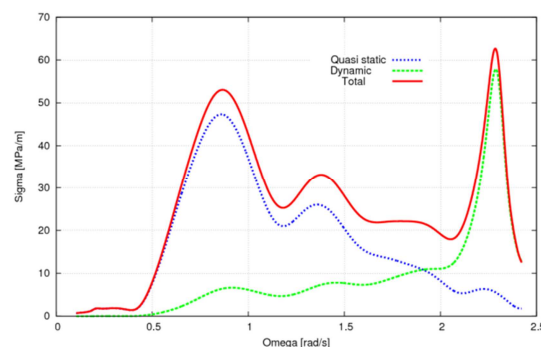


Figure 12 : Fonction de transfert de la contrainte dans un coin d'écotille

3.3. Simulation du whipping

Les grands porte-conteneurs sont sujets au whipping, vibrations transitoires provoquées par les impacts des vagues sur la proue du navire, et pouvant engendrer un accroissement significatif des contraintes dans tout le navire.

Le modèle hydro-élastique décrit précédemment peut être utilisé pour simuler ce phénomène. Il faut pour cela introduire un modèle simplifié pour les efforts d'impacts, et résoudre les mouvements du navire dans le domaine temporel en tenant compte des efforts non linéaires hydrostatiques et de houle incidente. Des travaux sont toujours en cours pour améliorer la prédiction des efforts d'impacts.

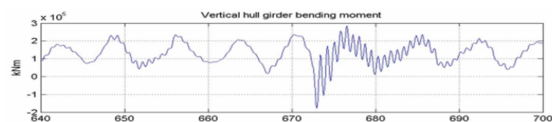


Figure 13 : Moment fléchissant au maître couple avec un épisode de whipping

3.4. Un logiciel très généraliste

Homer, même s'il a été développé pour répondre à la demande urgente de simulations hydro-élastiques des porte-conteneurs, peut être utilisé pour n'importe quel type de structure, navale ou offshore, et pour tous types de simulations (quasi-statique, springing, whipping, multi-corps).

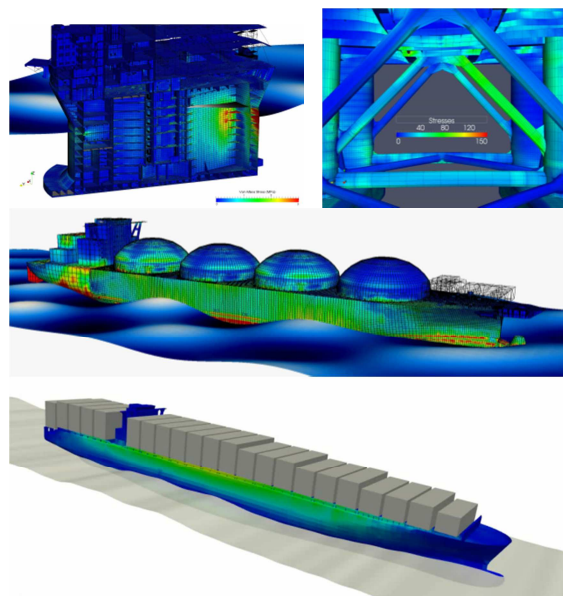


Figure 14 : Simulations Homer pour différentes unités

4. SLOSHING

Le phénomène de sloshing dans les méthaniers correspond au ballonnement du GNL dans les cuves de méthanier engendré par les mouvements du navire en navigation ou au point fixe. Le sloshing est un phénomène multi échelles, fortement non linéaire et peut être violent c'est-à-dire engendrer des dommages aux cuves des méthaniers, FLNG ou FSRU. Depuis le début des années 2000, des travaux de recherche ont été effectués au Bureau Veritas par Mirela Zalar et Louis Diebold, en s'appuyant sur l'approche expérimentale et sur l'approche numérique

4.1. Calculs CFD

L'objectif des calculs CFD (Computational Fluid Dynamics) est d'évaluer la cinématique de l'écoulement et les efforts à appliquer à la structure qui se trouve derrière le système d'isolation. Le code Flow3D, utilisé au début, a été ensuite abandonné au profit du code OpenFOAM, qui est un code CFD parallèle et « open source » qui peut simuler des écoulements complexes (simulations grandes échelles, modèles RANSE, écoulements compressibles...). Cet outil de calcul a été validé par de nombreuses comparaisons avec des essais.

Dans le cadre du projet européen Marstruct, une série d'essais a été menée sur une cuve quasi-2D. L'accord entre l'expérience et OpenFOAM (calculs CFD) est excellent pour l'élévation de surface libre, le moment exercé par le fluide sur les parois de la cuve et pour la pression comme illustré sur la figure 15.

Dans le cadre d'une coopération avec l'Ecole Centrale de Nantes, le BV mène ses propres campagnes d'essais sloshing. De nombreuses configurations de remplissage, amplitude et fréquence des mouvements ont été testées. Des comparaisons entre les forces globales mesurées et celles calculées par Flow3D et OpenFOAM sont présentées dans la figure 16.

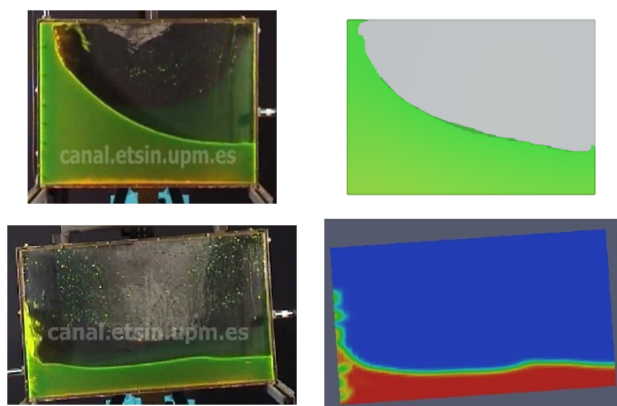


Figure 15 : Comparaison entre expériences et calculs CFD pour l'élévation de surface, la pression et le moment global exercé par le fluide sur la cuve

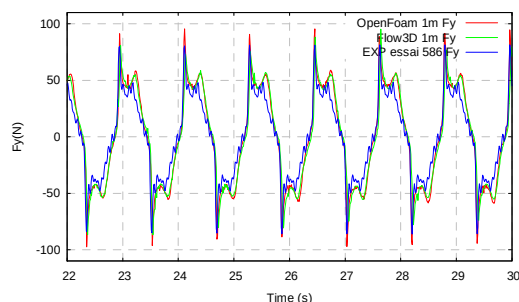


Figure 16 : Comparaison des forces globales entre expérience et calculs CFD (Flow3D & OpenFOAM) – 20%H – 1m – $f=0.854\text{Hz}$.

Les ordinateurs actuels permettent maintenant de faire des longues simulations de plusieurs heures sur un état de mer irrégulier, d'en déduire des statistiques d'efforts et de les comparer aux efforts mesurés en essais. Là encore la comparaison statistique est très bonne.

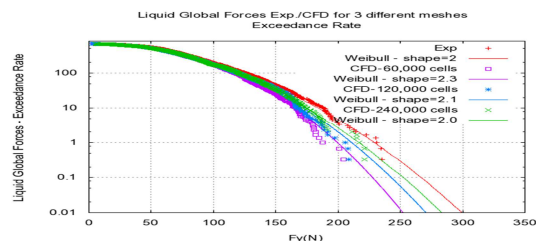


Figure 17 : Comparaison des efforts globaux sur houle irrégulière, et convergence en maillage (3h de simulation)

4.2. Capteurs dynamiques

Une innovation du Bureau Veritas dans les calculs CFD a été la mise au point d'un module de capteurs dynamiques.

En principe, les calculs CFD, en enregistrant toutes les données à chaque pas de temps et dans toutes les cellules, pourraient fournir une représentation complète des impacts sloshing sur toutes les parois de la cuve. Malheureusement, les études CFD classiques se concentrent uniquement sur des zones prédéfinies (comme les essais sloshing sur maquette) car le stockage de toutes les données à chaque pas de temps prend trop de place sur les disques de stockage.

Pour remédier à ce problème, un post-traitement spécifique appelé « Capteur Dynamique » a été développé en interne au Bureau Veritas. A chaque pas de temps, l'écoulement est analysé et les éventuels impacts sloshing sont détectés et enregistrés si la pression ou la vitesse normale du fluide par rapport à la paroi dépassent un seuil fixé par l'utilisateur. Dans le cas où un impact est détecté (dépassement du seuil pour la pression ou la vitesse normale), des « capteurs dynamiques » sont alors créés à la volée à l'endroit de l'impact. Chaque impact est alors enregistré dans une fenêtre de temps aussi fixée par l'utilisateur pour une vérification ultérieure. Finalement, cet outil spécifique de post-traitement permet d'obtenir une connaissance complète de tous les impacts de sloshing sur toute la paroi de la cuve et ce pendant toute la durée de la simulation.

La figure ci-dessous représente tous les impacts de sloshing détectés au plafond lors d'une simulation d'un état de mer réel (i.e. mouvements irréguliers et durée de la simulation correspondant à 5 heures).

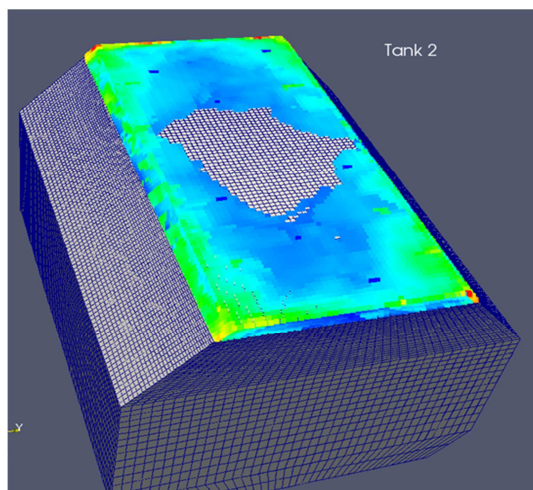


Figure 18 : Cartographie des impacts au plafond pour un état de mer simulé pendant 5 heures au réel avec OpenFOAM

4.3. Des moyens d'essais indépendants

Grace à un partenariat avec l'Ecole Centrale de Nantes, et à GTT qui a prêté une maquette de cuve, le Bureau Veritas a pu se doter de ses propres essais afin de se forger sa propre expertise, qui a mené à la rédaction de la note d'information NI554 qui décrit la méthodologie d'évaluation de ces chargements de sloshing et le dimensionnement des parois de la cuve. Sont notamment mentionnés dans cette note le type d'essais à effectuer, les types de capteurs de pression et leur fréquence d'acquisition, l'identification des pics de pression, le type de post-traitement statistique...

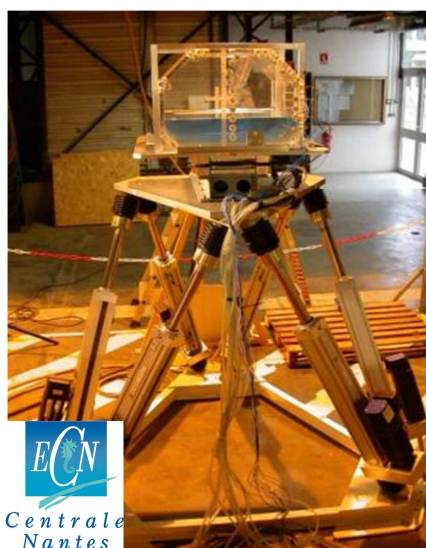


Figure 19 : Essais de sloshing sur hexapode

4.4. Statistiques de sloshing

L'approche utilisée pour la conception des cuves de méthanier était basée au début des années 2000 sur une approche dite court-terme, utilisant uniquement les pressions 3h obtenues sur quelques états de mer de design. La méthode actuelle est maintenant une méthode long-terme, prenant en compte tous les états de mer rencontrés par le navire. Cette méthode nécessite l'extrapolation des résultats d'essais sur des durées bien plus grandes que celles des essais.

La distribution de Weibull est généralement employée par l'industrie comme loi d'ajustement statistique des échantillons de pression. Afin de déterminer si cette loi de Weibull est la plus adaptée à l'ajustement des distributions de pics de sloshing, Bureau Veritas a mené une campagne d'essais spécifique afin d'obtenir un échantillon de 480 heures (96 essais de 5 heures) au lieu des 30 heures maximum considérées en général, et a ajusté les échantillons de pression en utilisant différentes techniques : loi de Weibull, de Pareto ou GEV, méthode POT, méthode Block Maxima. Les études ont montré que la loi de Weibull conduit systématiquement à une sous-estimation des pressions extrêmes. En revanche la loi de Pareto, ou la technique des Block Maxima, permettent une meilleure évaluation statistique des pressions extrêmes.

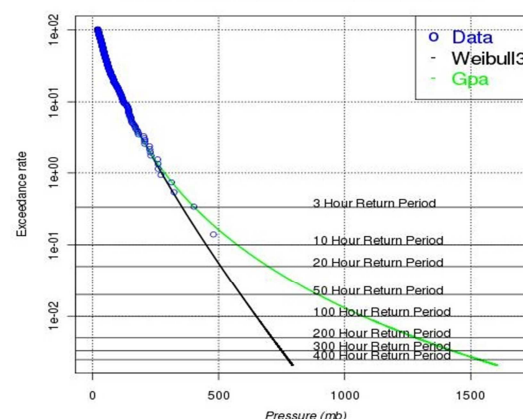


Figure 20 : Extrapolation d'un essai de 5h avec une loi de Weibull ou de Pareto

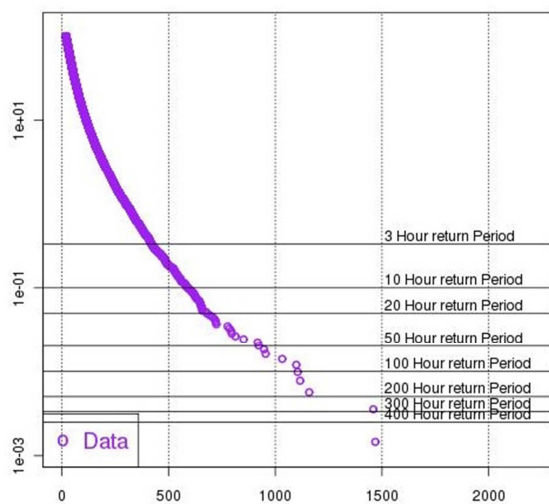


Figure 21 : Essais de sloshing de 480h

5. MEHODOLOGIES DE DESIGN

Tous ces logiciels de calcul direct, qui permettent de simuler finement la réponse hydrodynamique et structurelle d'un navire sur un état de mer donné, ne servent à rien s'ils ne sont pas associés à une méthodologie de design. L'objectif d'une procédure de calculs directs, come d'une approche réglementaire, est de dimensionner le navire ou la structure offshore en fonction des conditions environnementales et opérationnelles qu'ils vont rencontrer. Il faut pouvoir évaluer, sur l'ensemble de la durée de vie de l'unité, les réponses extrêmes en termes de contrainte, de déformation ou de mouvements, et le dommage en fatigue.

Les procédures réglementaires sont de plus en plus remplacées, ou complétées, par des approches directes, basées sur le calcul déterministe (calcul de whipping par exemple) ou sur des essais (essais de sloshing). Pour assurer une cohérence entre ces deux approches, il est nécessaire qu'elles soient toutes les deux basées sur les mêmes hypothèses en termes de conditions environnementales et opérationnelles. On pourra alors même utiliser le calcul direct pour valider ou modifier un règlement.

5.1. Méthodologies de calcul direct

Il existe une grande variété de modèles de simulation déterministe (HydroStar, Homer, CFD...), allant des modèles les plus simples et

les moins coûteux en temps de calcul, jusqu'aux modèles les plus précis et les plus coûteux. Tous ne sont malheureusement pas capables de simuler la vie entière de la structure (25 ans pour un navire, plus de 50 ans pour une structure offshore). Il est donc nécessaire de pouvoir simplifier la description statistique des états de mer rencontrés, pour pouvoir faire des simulations plus courtes.

La description la plus complète est sous forme de statistiques d'états de mer classés selon leur hauteur significative et leur période pic. Ces tables sont utilisées dans une approche long-terme, qui consiste à simuler l'ensemble de la durée de vie de l'unité. L'utilisation de cette approche est limitée à l'emploi de simulations déterministes très simplifiées (approche linéaire par exemple).

Significant wave height (m)	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	Total
> 16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15-16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14-15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13-14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12-13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11-12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10-11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8-9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7-8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6-7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
< 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figure 22 : Table d'états de mer IACS

Sous certaines hypothèses, on peut réduire cette table d'états de mer à seulement quelques états de mer de design sur lesquels on cherchera les réponses extrêmes. On parle alors d'approche court-terme.

Parfois il est nécessaire de simplifier encore la description de l'état de mer, pour ne plus retenir qu'une vague, ou un groupe de vagues : c'est l'approche vague de design.

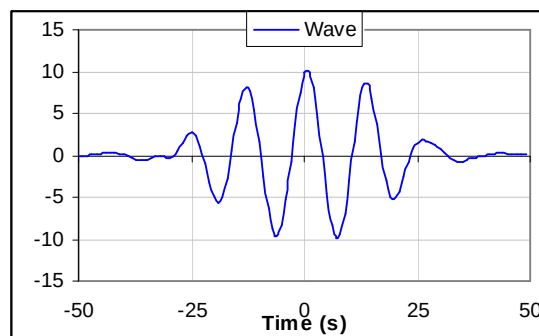


Figure 23 : Vague de design irrégulière

Bien évidemment, à chaque fois que l'on simplifie la description des conditions

environnementales, on perd en précision sur la représentation des états de mer, mais on gagne en précision sur la simulation de la réponse du navire en employant un logiciel de simulation plus précis.

L'approche de design optimale est celle qui va combiner ces différentes approches pour petit à petit réduire les conditions de simulations et augmenter la complexité des simulations.

La simplification extrême des conditions de mer consiste simplement à supprimer les calculs hydrodynamiques et à les remplacer par des formules donnant directement les efforts à appliquer à la structure. C'est l'approche choisie pour les règlements des sociétés de classification. Ceux-ci demandent de vérifier la structure sur un nombre restreint de cas de charges, en précisant à chaque fois les efforts à appliquer. Ces cas de charges sont en fait une simplification réglementaire des vagues de design, qui sont elles mêmes une simplification des quelques 70000 états de mer que le navire verra pendant sa vie.

5.2. Calcul direct et développement réglementaire

Une fois la cohérence retrouvée entre procédure de calcul direct et approche réglementaire, il est possible d'utiliser les calculs pour faire évoluer le règlement.

Un premier exemple a été l'harmonisation des règlements pétroliers et vraquiers effectuée dans le cadre de l'IACS. Le Bureau Veritas était en charge du groupe de travail qui traitait des efforts de dimensionnement. A cette occasion l'emploi de vagues de design a été généralisé, et tous les coefficients de combinaison de charges ainsi que les pressions de mer ont été calibrés en utilisant cette approche. L'utilisation de l'approche vague de design a aussi été utilisée pour justifier du choix d'un nombre restreint de cas de charge réglementaires, tant pour la fatigue que pour la réponse extrême.

De plus, une analyse fine de la contribution de l'ensemble des cycles de contrainte à la fatigue a montré qu'il était préférable, car plus robuste, de définir les charges réglementaires de fatigue à un niveau de probabilité de 10^{-2} (elles étaient auparavant définies à 10^{-4}). Cette approche, dument justifiée par les calculs, est

un changement majeur dans l'approche réglementaire de la fatigue, et beaucoup de pédagogie et de patience ont été nécessaires pour convaincre nos partenaires de l'IACS.

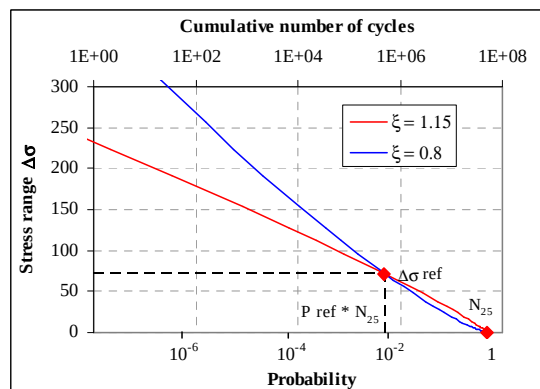


Figure 24 : Influence du paramètre de forme de la distribution de Weibull sur la durée de vie en fatigue

D'autres travaux en cours au sein de l'IACS, qui devraient se terminer fin 2014, ont pour but de redéfinir la formule réglementaire du moment fléchissant vertical, en se basant sur les résultats de calculs directs. Les calculs permettent en effet d'identifier les différents composants des formules réglementaires : paramètre de vague, partie adimensionnelle, coefficient de non-linéarité. Les résultats montrent que la différence entre les formules actuelles et le calcul sont plus marquées pour les porte-conteneur que pour les pétroliers ou les vraquiers. Les nouvelles formules, qui sont encore en cours de discussion, ont pour but de diminuer cette différence.

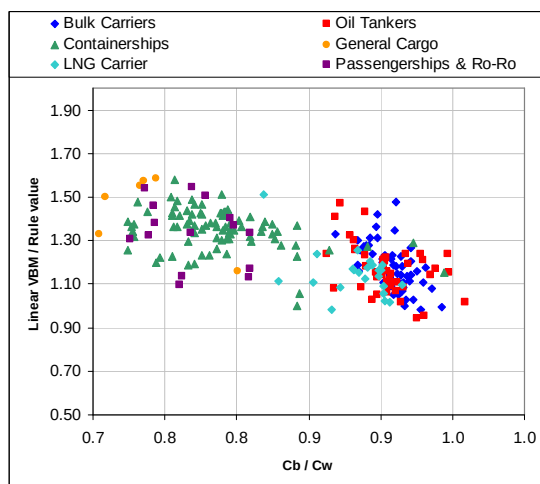


Figure 25 : Comparaison entre le moment fléchissant vertical réglementaire et le moment calculé par une approche directe

6. CONCLUSION

Les travaux de recherche ont permis au Bureau Veritas de développer ses propres outils et méthodologies à la pointe de l'état de l'art, afin de pouvoir se doter d'une expertise indépendante pour développer ses règlements, répondre aux questions de ses clients, et peser au sein de l'IACS et de la communauté scientifique du domaine maritime et offshore. La recherche repose sur une perpétuelle remise en question afin de garder un œil le plus neuf possible sur toutes les problématiques qui nous sont posées.

Parmi les futurs axes de recherche du Bureau Veritas, la CFD est appelée à se renforcer. La CFD, qui est utilisée depuis déjà une dizaine d'années pour résoudre les problématiques de résistance à l'avancement et d'optimisation de forme, a maintenant atteint une maturité suffisante pour commencer à être utilisée dans les problèmes de tenue à la mer, nécessitant de pouvoir propager sur une longue durée des états de mer irréguliers. Elle permettra donc de répondre de manière plus précise aux problématiques de slamming, de mouille de pont, de tenue à la mer sur les états de mer extrêmes, de résistance ajoutée sur houle, d'écoulements locaux violents. L'enjeu des prochaines années sera donc de développer ces outils CFD en les incluant dans l'approche méthodologique globale qui devra utiliser à bon escient les codes potentiels linéaires, non-linéaires, et la CFD afin d'arriver au processus de design le plus complet et le plus précis.

Un autre axe de recherche important est celui portant sur la simulation dynamique couplée d'une ou plusieurs structures offshore, de leurs lignes d'ancrage, des risers, en incluant les effets de courant, de vent, d'efforts du deuxième ordre, les non-linéarités de houle, les grands mouvements.

Enfin le développement réglementaire est toujours à l'ordre du jour, pour pouvoir proposer des règlements toujours plus précis, mais aussi plus compréhensibles, et plus cohérents avec les approches directes.

7. REFERENCES

7.1. Hydrodynamique

- [1] Evaluation de la fonction de Green du problème de diffraction/radiation en profondeur d'eau finie, 4èmes Journées de l'Hydrodynamique, 1993
- [2] On the Irregular Frequencies Appearing in Wave Diffraction-Radiation Solutions, S. Malenica and X.B. Chen, Int. J. of Offshore and Polar Eng., 1998, vol.8, no.2
- [3] Hydrodynamics in Offshore and Naval Applications, Chen X-B., 6th International Conference on Hydrodynamics, Perth, Australia, 2004
- [4] Middle-field formulation for the computation of wave-drift loads, J. Eng. Math., 2007, vol.59
- [5] Second-Order Wave Loads on a LNG Carrier in Multi-Directional Waves, M. Renaud, F. Rezende, O. Waals, X.B. Chen and R. van Dijk, OMAE, 2008
- [6] First and Second Order Wave-Current Interactions for Floating Bodies, C. Monroy, Y. Giorgiutti and X.B. Chen, OMAE, 2012
- [7] Hydrodynamic issues of FLNG systems, X.B. Chen, L. Diebold and G. de Hauteclocque, OMAE, 2013
- [8] A Practical $O(\Delta\omega)$ Approximation of Low Frequency Wave Loads, C. Monroy, G. de Hauteclocque and X.B. Chen, OMAE, 2013

7.2. Hydro-structure

- [9] Hydroelastic response of a barge to impulsive and non-impulsive wave loads, Malenica S., Molin B., Remy F. & Senjanovic I., 3rd Int. Conf. On Hydroelasticity, 2003
- [10] Hydro structure interactions in seakeeping, Malenica S., International Workshop on Coupled Methods in Numerical Dynamics, 2007
- [11] Consistent hydro-structure interface for evaluation of global structural responses in linear seakeeping, Malenica S., Stumpf E., Sireta F.X. & Chen X.B, OMAE 2008

- [12] 3DFEM – 3DBEM model for springing and whipping analyses of ships, Malenica S. & Tuitman J., RINA Conf. on Design and Operation of Container Vessels, 2008
- [13] Fully coupled seakeeping, slamming and whipping calculations, Tuitman J.T. & Malenica S, Journal of Engineering for Maritime Environment Vol. 223, No M3, 2009
- [14] Consistent hydro structure interface for partial structural model, Sireta F.X., Malenica S., Chen X.B. & Marchal N, Deep water Offshore Specialty Symposium, 2009
- [15] Transfer of non-linear seakeeping loads to FEM model using quasi static approach, Tuitman J.T., Sireta F.X., Malenica S. & Bosman T.N, ISOPE 2009
- [16] Local hydro-structure interactions due to slamming, Malenica S., Sireta F.X., Tomasevic S., Tuitman J.T. & Schipperen I., MARSTRUCT 2009
- [17] Validation of the global hydroelastic model for springing & whipping of ships, Derbanne Q., Malenica S., Tuitman J.T., Bigot F. & Chen X.B, PRADS 2010
- [18] Discussion on hydroelastic contribution to fatigue damage of containerships, Q. Derbanne, F.X. Sireta, F. Bigot and G. de Hauteclocque, 6th Int. Conf. On Hydroelasticity, 2012
- [19] Global Hydroelastic Ship Response: Comparison of numerical model and WILS model tests, F. Bigot, Q. Derbanne, F.X. Sireta, S. Malenica, ISOPE 2011
- [20] Hydroelastic response of a ship structural detail to seakeeping loads using a top-down scheme, FX Sireta, Q. Derbanne, F. Bigot, S. Malenica and E. Baudin, OMAE 2012

7.3. Sloshing

- [21] Dynamic coupling of seakeeping and sloshing, S. Malenica, M. Zalar & X.B. Chen, ISOPE 2003
- [22] Sloshing effects accounting for dynamic coupling between vessel and tank liquid motion, M. Zalar, L. Diebold, E. Baudin, J. Henry and X.B. Chen, OMAE 2007
- [23] Design Sloshing Loads for LNG Membrane Tanks, NI554 DT R00 E, Guidance Note, May 2011
- [24] Statistical Post-Processing of a Long Duration Test, B. Fillon, L. Diebold, J. Henry, Q. Derbanne, E. Baudin and G. Parmentier, ISOPE 2011
- [25] Experimental and Numerical Investigations of Internal Global Forces for Violent Irregular Excitations in LNGC Prismatic Tanks, L. Diebold, N. Moirod, E. Baudin and T. Gazzola, ISOPE 2011
- [26] Détermination des Chargements dus au Sloshing. Application aux unités flottantes d'opération et de liquéfaction de gaz (FLNG, FSRU), L. Diebold, N. Moirod, T. Gazzola and E. Baudin, ATMA 2012
- [27] Dynamic Probes: an on-the-fly CFD Plug-in for Sloshing Impact Assessment, T. Gazzola and L. Diebold, ISOPE 2013
- [28] Bureau Veritas Sloshing Model Tests & CFD Calculations within ISOPE Benchmark, E. Baudin, L. Diebold, B. Pettinotti, J.M. Rousset and M. Weber, ISOPE 2013
- [29] Extreme Values Theory Applied to Sloshing Pressure Peaks, B. Fillon, J. Henry, L. Diebold and Q. Derbanne, ISOPE 2013
- [30] Statistical Behaviour of Global and Local Sloshing Key Parameters, L. Diebold, Q. Derbanne and T. Gazzola, ISOPE 2013

ATMA 2014

7.4. Méthodologies long-terme

- [31] Long-term non-linear bending moment prediction, Q. Derbanne, J.F. Leguen, T. Dupau, E. Hamel, OMAE 2008
- [32] Evaluation of Rule-Based Fatigue Design Loads Associated at a New Probability Level, Q. Derbanne, F. Rezende, G. de Hauteclorque and X.B. Chen, ISOPE 2011
- [33] Comparison of Design Wave Approach and Short Term Approach with Increased Wave Height in the Evaluation of Whipping Induced Bending Moment, Derbanne Q., Bigot F. and de Hauteclorque G, OMAE 2012
- [34] Comparison of different equivalent design waves with spectral analysis, G. de Hauteclorque, Q. Derbanne and A. El-Gharbaoui, OMAE 2012
- [35] Non Linearity of Extreme Vertical Bending Moment: Comparison of Design Wave Approaches and Short Term Approaches, Q. Derbanne; G. de Hauteclorque and T. Mienhaou, OMAE 2013
- [36] Non Linearity of Extreme Vertical Bending Moment: Discussion on the Existing Rule Formulation, Q. Derbanne, G. de Hauteclorque and T. Mienhaou, OMAE 2013
- [37] Design Wave Selection for Strength Assessment of Floating Structures, Q. Derbanne, G. de Hauteclorque, A. El-Gharbaoui, P. de Belizal, PRADS 2013