



15^{ÈMES} JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

22 - 24 novembre 2016 - Brest

METHODOLOGIE POUR L'EVALUATION DU NIVEAU DE VIBRATION BASSE FREQUENCE SUR HOULE

STX FRANCE METHODOLOGY FOR THE ASSESSMENT OF THE LOW FREQUENCY VIBRATION LEVEL ON A SEAWAY.

**AS.Dubois⁽¹⁾, C.Lucas⁽¹⁾, L.Morand⁽¹⁾, S.Branchereau⁽¹⁾,
S.Cordier⁽¹⁾**

(1) STX France, Avenue Bourdelle CS90180 ,St-Nazaire Cedex (France)

Résumé

L'objectif de cet article est de présenter la chaîne de calcul développée au sein de STX-France pour quantifier le niveau de confort vibratoire d'un navire à passager soumis à la houle. Cette problématique présente en effet un enjeu majeur pour les armateurs de navires de croisière. Les efforts d'excitation de tossage (slamming) sont calculés par le biais de calculs CFD pour un événement représentatif. Les résultats obtenus sur une forme de carène sont comparés avec des essais expérimentaux réalisés en bassin. Les chargements sont ensuite appliqués sur un modèle éléments finis pour effectuer le calcul transitoire de réponse du navire aux impacts de vagues, et celui du critère VdV (Vibration Dose Value).

Summary

The aim of this paper is to present the software suite under development in STX-France, to evaluate the vibration comfort level of a passenger cruise ship sailing in waves. This problem has indeed a major challenge for the cruise vessel owners. The slamming excitation loads are calculated via CFD simulations for a representative event. The results obtained for one hull form are compared with the experimental results carried out in towing tank. These pressures are then applied to a 3D finite element model to compute the the transient structural response of the vessel to wave impacts and calculate the VdV criteria (Vibration Dose Value).

I. Introduction :

Le confort à bord d'un navire à passager est de première importance pour un armateur à paquebot. Le niveau exigé est digne des grands hôtels et fait l'objet de l'obtention d'une marque de confort par la société de classification. Si les principales sources de vibrations proviennent des moteurs et fluctuations de pression liées aux hélices, il faut aussi prendre en compte les effets liés aux conditions environnementales. Dans des mers formées la carène peut subir des impacts de slamming entraînant une réponse de la poutre navire en whipping. L'effet induit est évalué à l'aide un paramètre « VdV » « Vibration dose Value » calculé à partir des accélérations. Or les formes avant et arrière d'un paquebot sont contraintes par des considérations d'arrangement et d'espace dédié aux passagers, ce qui va généralement à l'encontre de deux performances principales : celle de puissance vitesse, avec la résistance à l'avancement, et celle de confort, avec les efforts de slamming. Un challenge est de répondre à ces différentes contraintes, sans dégrader les performances du navire.

Une question soulevée dès les premiers stades d'étude est de savoir quantifier les efforts d'excitations et la réponse globale de la poutre navire pour déterminer localement les niveaux de vibrations. Actuellement, seuls des essais bassins sont mis en œuvre soit par le biais de modèles segmentés et mesure des accélérations, soit par le biais de modèles instrumentés de capteurs de pressions et extrapolation de l'effort d'excitation.

L'objectif de ce projet est de proposer et valider une méthodologie numérique complémentaire qui permette de caractériser les carènes en amont. Le premier enjeu est de montrer les capacités numériques d'un code CFD dans le cas d'un impact hydrodynamique. Le solveur utilisé est le code Naval Foam qui s'appuie sur une méthode VoF pour traiter l'interface air/eau. Ce papier présente les résultats de pressions d'impact de tassage sur des formes avant et arrière sous des conditions de gisement et de houle différentes. Ceci permet d'étudier la sensibilité des efforts d'excitations à différentes formes d'étraves. Les résultats font aussi ressortir l'intérêt d'utiliser cette approche pour préparer les essais modèles en orientant le choix des conditions environnementales et le choix de l'instrumentation. L'évaluation de l'intensité de l'excitation n'est pas suffisante car le confort final dépend aussi de la réaction de la structure. C'est pourquoi il est nécessaire de déterminer la réponse vibratoire avec un calcul par éléments finis. Le deuxième enjeu est d'établir un modèle numérique qui serait alimenté par des données CFD et permettrait de calculer la réponse du système. La démarche de calcul couplée est présentée et discutée dans ce papier.

II. Méthodologie CFD pour le calcul des pressions d'excitation :

a. Présentation du cas expérimental :

Des essais expérimentaux ont été réalisés en bassin sur un modèle rigide d'un navire avec vitesse d'avance sur une houle irrégulière. Le cas étudié avait pour objectif de mesurer les pressions d'impact de slamming avant et arrière sur houle irrégulière. Le modèle était instrumenté de 40 capteurs de pression répartis sur l'étrave et 20 capteurs de pression sur la voute arrière. Plusieurs maquettes de formes avant différentes ont été testées à l'échelle 1/45.61.

			échelle réelle	échelle modèle
longueur entre perpendiculaires	Lpp	(m)	292	6.40
largeur à la flottaison	BWL	(m)	38.3	0.84
tirant d'eau	T	(m)	8.1	0.18

Les essais ont été effectués pour les houles irrégulières suivantes :

- quart avant, 120°, spectre de Jonswap $H_s=4\text{m}$, $T_p=8.4$, $\gamma=3.3$
- houle arrière, 0°, $H_s=2\text{m}$ $T_p=7.1\text{s}$ $\gamma=3.3$

Le navire a une vitesse d'avance de 20nds pour les houles de face et une vitesse nulle pour les houles de l'arrière.

b. Méthode numérique :

Les calculs ont été réalisés avec le logiciel NavalFoam, s'appuyant sur le logiciel open source foam Extend 3.1, qui résout les équations RANSE (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations). Pour ces calculs, le modèle VOF (Volume Of Fluid) multiphasique a été employé pour simuler la coexistence des deux fluides (air et eau de mer). La fonction VOF est définie comme la fraction de volume en eau dans chaque cellule (l'interface étant décrite par l'isosurface 0.5). Un modèle du type kw-SST a été utilisé pour modéliser la turbulence.

L'objectif étant de simuler les impacts de slamming les plus sévères, la simulation s'est focalisée sur une houle régulière représentative de la vague la plus sévère rencontrée lors des essais de 1h sur un état de mer donné :

- Par une hauteur (crête à creux) H ,
- Par sa période T ,
- Par la profondeur d'eau D , considérée comme infinie dans ce cas.
- Par sa longueur d'onde λ , obtenue à partir de T par résolution de l'équation de dispersion.

			échelle réelle	échelle modèle
Hauteur	H	(m)	4	0.09
			8	0.18
période	T	(s)	7	1.04
longueur d'onde	λ	(m)	76.4	1.68

La vitesse d'avance est introduite par le biais d'un courant inverse. Le navire est fixe avec ses 6 degrés de libertés de mouvement bloqués, cette hypothèse permet de diminuer le temps de calcul et est justifiée par la plage de longueur d'onde étudiée qui reste faible devant la longueur du navire ($\lambda/L_{pp}=0.3$).

c. Domaine de calcul et maillage :

Un domaine de calcul parallélépipédique est utilisé avec des conditions de houles imposées en entrée. Le maillage est constitué de cellules tétraédriques. Le calcul a été fait à l'échelle modèle.

Dans un souci de réduction de temps de calcul et d'optimisation du maillage, le modèle est simplifié en ne prenant en compte qu'un tronçon comportant la zone étudiée. Deux sous-modèles sont créés comportant la zone avant et la zone arrière. Ils sont constitués respectivement de 2.7millions de cellules et 4.8 millions de cellules. Une comparaison préalable entre les résultats issus du modèle réduit et ceux du modèle complet a permis de valider cette approche. Le maillage de fond est réalisé avec blockMesh, il est raffiné localement autour de la surface libre et sur toute la longueur du domaine afin de propager correctement la houle. On utilise ensuite snappyHexMesh afin de mailler la structure.

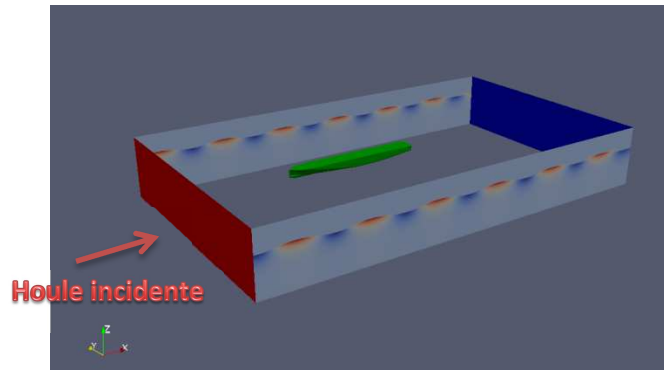


Figure 1 : domaine de calcul

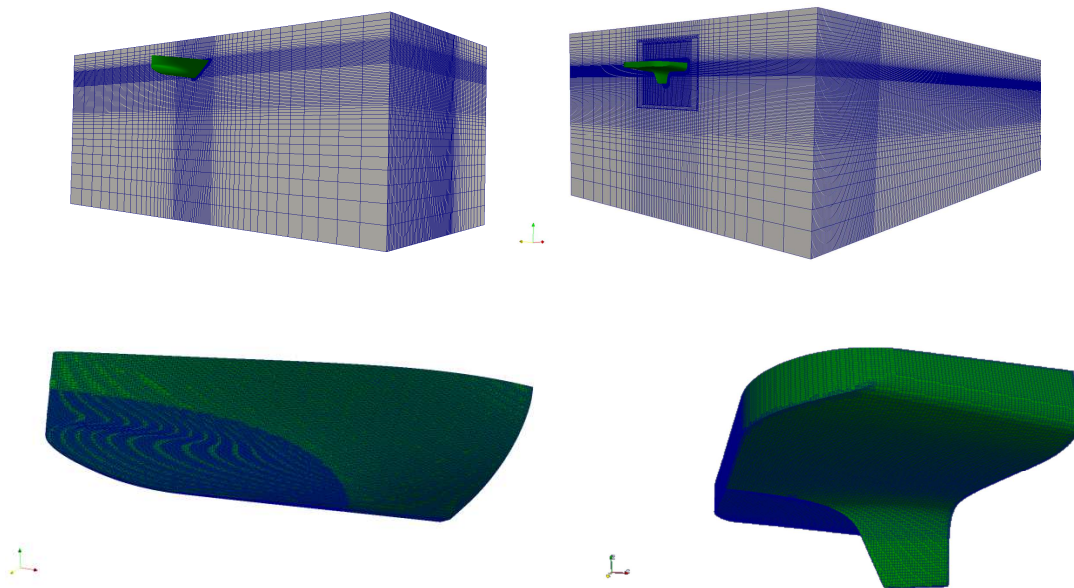


Figure 2 : Vues du maillage modèle partie avant

Vues du maillage modèle partie arrière

Le raffinement longitudinal est de 60-80 cellules par longueur d'onde, le raffinement vertical est de 10-20 cellules par hauteur de houle. Afin d'optimiser les tailles de mailles, un accroissement progressif longitudinal est réalisé dans la zone d'amortissement.

Le maillage proche de la structure dans la zone d'intérêt est assez fin avec une dimension de cellules inférieure à 2.5mm.

d. Génération de houle

Le domaine de calcul est construit en trois zones distinctes, comprenant une zone de génération de houle, une zone de propagation et une zone de relaxation. Les dimensions du modèle permettent de modéliser 5 à 10 longueurs d'ondes en longitudinal, la profondeur choisie est de $\lambda/2$ afin de rester dans le domaine des profondeurs infinies, la largeur minimale est de $10 \times$ la largeur du navire. Dans le cas houle de face, un demi-modèle est utilisé avec une frontière à $y=0m$ présentant des conditions de symétries. Pour des houles quart avant ou de côté les conditions imposées de génération et absorption de houle sont étendues sur les frontières latérales.

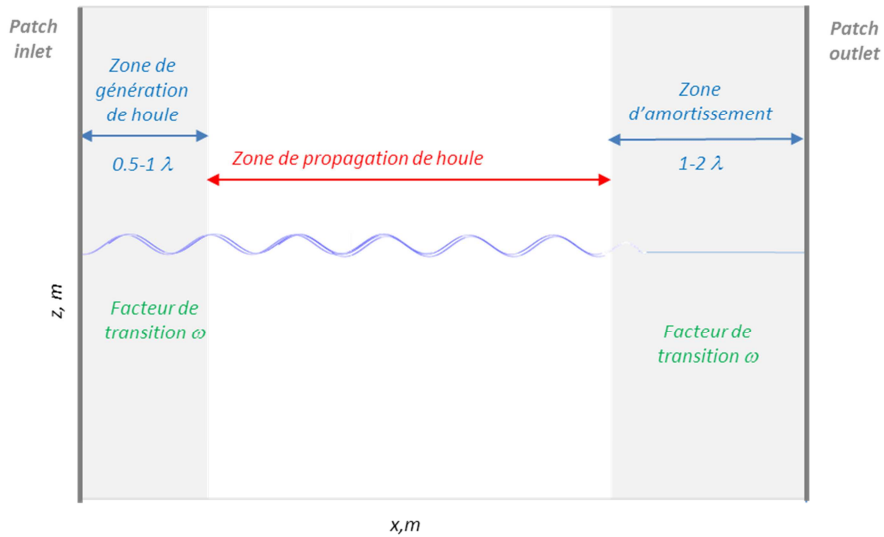


Figure 3 : principe de construction 2D du domaine de houle

Des premiers calculs ont été menés et suite à une convergence en maillage et discrétisation temporelle, le pas de temps de calcul a été fixé entre $T_e/100$ - $T_e/200$, T_e étant la période de rencontre.

Pour ces set-ups optimisés, le temps de calcul est réduit à 5h/période sur une machine 16 coeurs.

e. Résultats slamming avant

L'impact de la houle sur la carène crée une zone de surpression se déplaçant vers l'arrière du navire entrainant une augmentation de l'effort F_z .

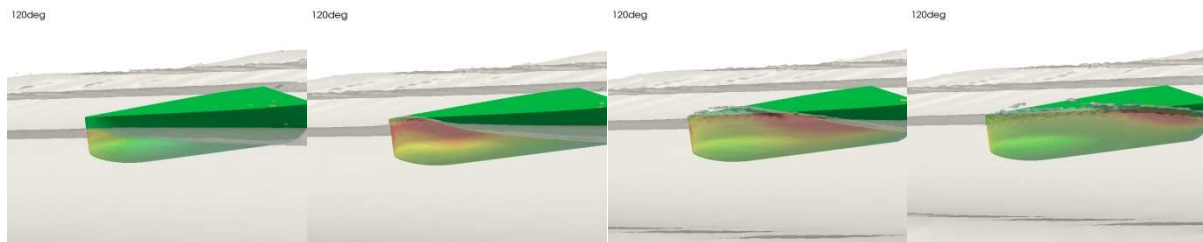


Figure 4 : vue 3D du champ de pression CFD – $H=8m$, $T=7s$, incidence houle 120° ($dt=0.05s$)

Bien que le temporel ne soit pas comparable directement, l'étude de l'instant correspondant au pic d'effort en essai et de la CFD fournit des informations intéressantes. La comparaison des pressions locales permet de cibler la zone d'impact et montre que la CFD capture une zone localisée dans la même région que les capteurs.



Figure 5 : Superposition pression EXP/CFD à un instant représentatif impact maximum

L'effort vertical global issu de l'intégration des pressions est aussi comparé et met en évidence un écart de 13% entre la CFD et l'EXP. Ces résultats sont encourageants pour valider la simulation tant d'un point de vue des phénomènes physiques mis en jeu que des ordres de grandeur des données d'entrées pour le calcul de vibration.

A partir de ce set-up, différentes analyses sont possibles pour appréhender dès l'avant-projet la sensibilité des navires au slamming et orienter les choix de modèles avant essai. La comparaison des cartographies de pression met en évidence les zones impactées et les augmentations de pressions locales. Ce qui permet de modifier et d'améliorer les formes pour répondre au besoin du client.

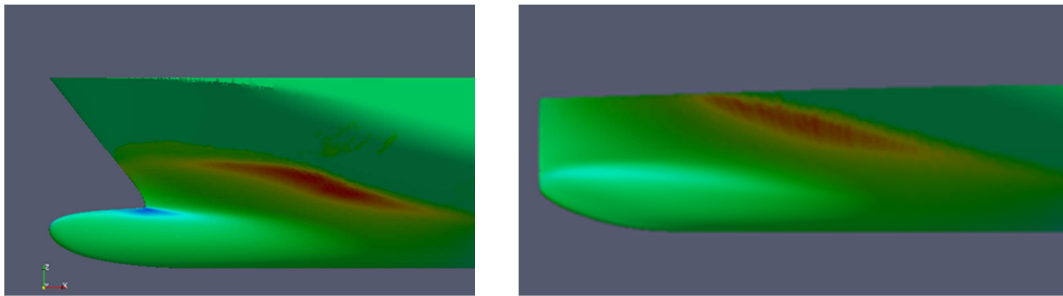
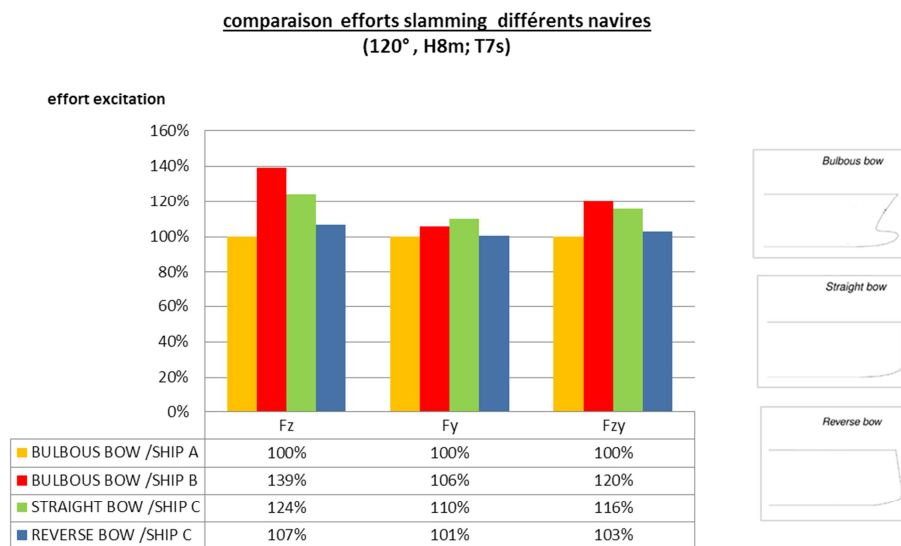


Figure 6 :cartographie pression carène lors d'un impact de slamming étrave conventionnelle / étrave droite

Les résultats présentés ci-dessous montrent les résultantes d'effort vertical pour trois types d'étraves différentes : conventionnelle à bulbe (2 formes), étrave droite, étrave inversée. Les valeurs absolues sont en lien direct avec les données d'entrée pour le calcul de vibration. Sur ces 4 formes la fourchette de variation est de 39% sur l'effort vertical résultant. L'intensité de l'excitation seule n'est pas suffisante et doit être complétée avec une étude de la réaction de la structure via FEM pour comparer les performances de confort.



La sensibilité à l'incidence de houle permet de conforter les choix des conditions environnementales les plus sévères, et d'en déduire une opérabilité du navire sur ce critère dans les conditions calculées. L'apport de la CFD est aussi de fournir des résultats plus détaillés qui ne sont plus limités par les contraintes d'instrumentation, le calcul permet de déterminer la contribution des zones des carènes protégées de la houle incidente qui ne sont pas équipées de capteur et qui doivent être considérées pour le calcul de la réponse vibratoire de la poutre navire.

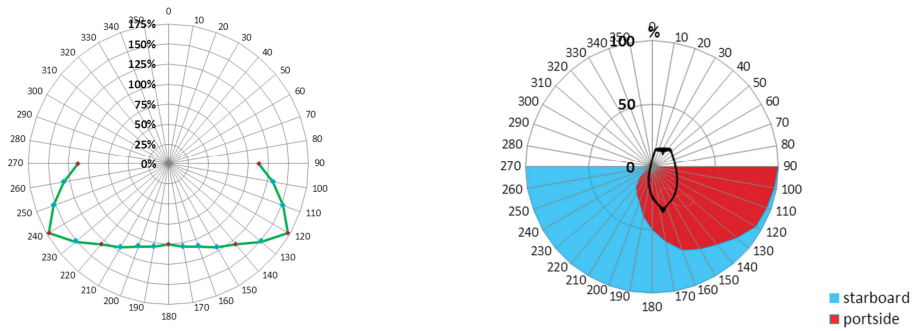


Figure 7 : Polaires des efforts de slamming selon incidence de houle et des contributions par abord

f. Résultats slamming arrière :

Des calculs ont été menés avec une houle arrière H4m T7s, sans vitesse d'avance sur 2 formes :

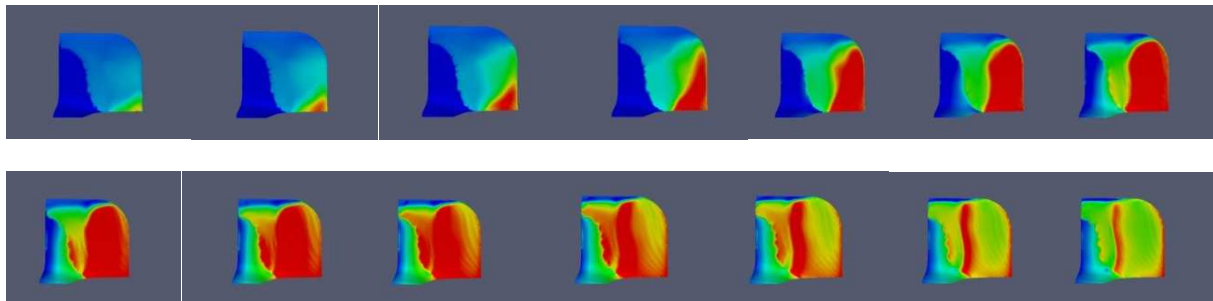


Figure 8 : Visualisation du champ de pression sur la carène avec pas de temps $dt=0.01s$

Les valeurs des résultantes verticales d'effort ont été comparées avec celles extrapolées des mesures de capteurs des essais bassins. Si les valeurs ne sont pas directement comparables de par les conditions environnementales, on note un ordre de grandeur semblable avec 17% d'écart. La simulation a ensuite permis de travailler sur les formes arrière, afin de diminuer les valeurs maximum de pressions, de diminuer les surfaces des zones impactées simultanément et ainsi de lisser l'impact de la houle sur la carène dans le temps.

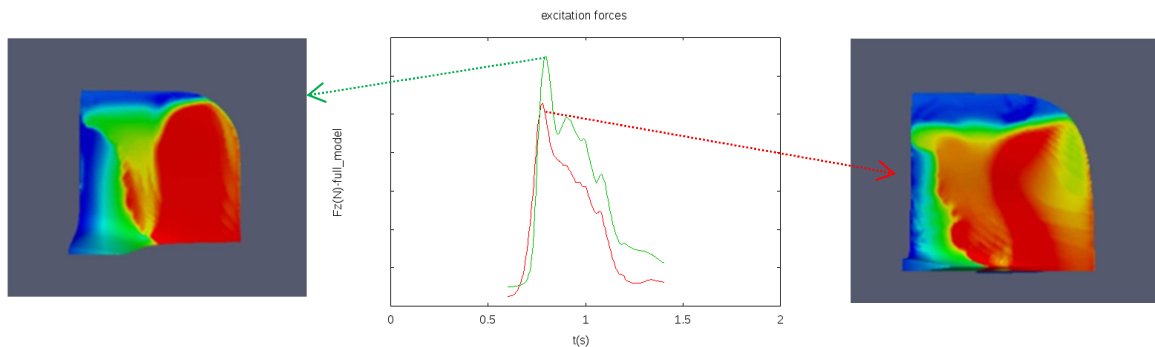


Figure 9 : Visualisation du champ de pression lors d'un impact entre deux formes arrière (verte =initiale, rouge=optimisée)

III. Calcul VdV :

Le confort des passagers est un facteur important pour les navires de croisières modernes. En plus des sources d'excitation internes au navire, comme les moteurs et les hélices, les impacts de vagues induisent des vibrations basses fréquences pouvant être une source potentielle d'inconfort pour les passagers et les membres d'équipage.

Même dans des conditions de mer relativement calme, la période et la hauteur de vagues peuvent exciter les premiers modes globaux du navire, aussi bien dans la direction verticale que transversale, engendrant une réponse vibratoire du navire pouvant devenir très gênante pour les personnes à bord.

a. Les critères de confort vibratoire

Le confort moyenne fréquence (5 Hz à 100 Hz) à bord des navires est généralement évalué grâce à des relevés de niveaux de vitesses vibratoires mesurés lors de conditions normales d'exploitation (vitesse de croisière, mer calme, pas de coup de barres de plus de 2°, ...). Les niveaux maximum admissibles sont alors définis dans le contrat entre le chantier et l'armateur et font souvent référence à des classes de confort. Ces documents, rédigés par des organismes de classification tels que le Bureau Veritas, DNV-GL, ou encore RINA, définissent des niveaux vitesses vibratoires à respecter sur le navire.

Concernant les basses fréquences (en dessous de 5 Hz), des niveaux d'accélération maximum admissibles sont également définis, mais ils ne tiennent pas compte des excitations pouvant venir des impacts de vagues car ils sont mesurés dans des conditions de mer calme.

Pour remédier à ce manque, la méthode retenue par les acteurs du secteur naval parmi plusieurs critères d'évaluation du confort vibration est celle du critère VDV (Vibration Dose Value) car elle est bien adaptée aux vibrations générées par le slamming, du fait qu'elle soit plus sensible aux pics d'accélération que les autres méthodes.

b. Le critère VDV – Eléments théoriques

Le critère VDV est une grandeur calculée à partir des accélérations. Il est défini dans la norme ISO 2631 - 1 [1] et s'exprime comme la racine quatrième de la dose vibratoire :

$$VDV = \left[\int_0^T a_w^4(t) dt \right]^{\frac{1}{4}}$$

Dans cette expression a_w désigne l'accélération pondérée en fréquence instantanée (w comme *weighted*). Cette pondération prend des valeurs différentes selon l'axe de l'accélération. On utilise la pondération de type w_d pour les directions X (axiale) et Y (transversale) du navire et la pondération de type w_k pour la direction verticale. T est la durée de mesurage en secondes.

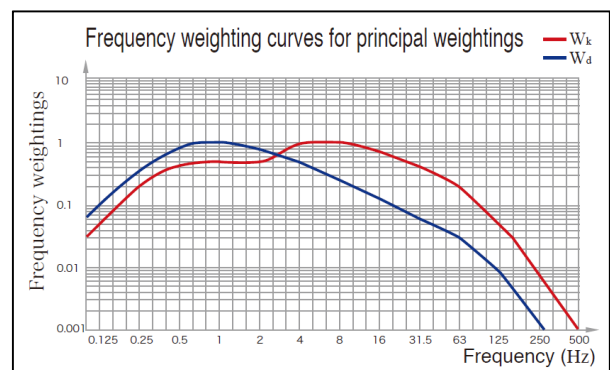


Figure 10 : Pondérations w_d et w_k de la norme ISO 2631_1 selon Mansour et Ertekin (Actes du 15ème congrès "Ship and Offshore Structures" ISSC 2003 – Volume 1)

Le critère VDV se mesure en $m.s^{-1.75}$ dans le système international d'unités (MKS).

Le critère VDV est calculé indépendamment pour chaque direction de translation du repère global du navire :

$$VDV_x = \left[\int_0^T a_{w,d,x}^4(t) dt \right]^{\frac{1}{4}} \quad VDV_y = \left[\int_0^T a_{w,d,y}^4(t) dt \right]^{\frac{1}{4}} \quad VDV_z = \left[\int_0^T a_{w,d,z}^4(t) dt \right]^{\frac{1}{4}}$$

puis un critère global de VDV combiné est obtenu en utilisant l'expression suivante :

$$VDV_{comb} = \left[VDV_x^4 + VDV_y^4 + VDV_z^4 \right]^{\frac{1}{4}}$$

Si l'exposition aux vibrations a lieu a cours de deux ou plusieurs périodes i de longueurs différentes, la norme ISO 2631-1 précise qu'il convient de calculer la valeur de la dose vibratoire pour l'exposition totale, comme étant la racine quatrième de la somme des puissances quatrièmes des valeurs des doses de vibration individuelles : $VDV_{total} = \left[\sum_i VDV_i^4 \right]^{\frac{1}{4}}$

Ainsi pour normaliser la valeur de VDV à une durée d'exposition de $t=60$ minutes à partir du VDV calculé pour une durée d'exposition de T secondes, on applique la formule suivante :

$$VDV_{60 \text{ minutes}} = VDV_T \left[\frac{3600}{T} \right]^{\frac{1}{4}}$$

c. Le critère VDV – Interprétation

L'interprétation du critère VDV est assez complexe car elle est soumise à plusieurs facteurs comme le temps d'exposition, l'emplacement de mesure et bien sur l'expérience personnelle et subjective de chaque personne. Cependant, quelques guides existent dans la littérature [2] nous fournissant une bonne base pour l'appréciation du confort à bord des navires. Le tableau suivant présente les valeurs seuils extrait de l'ouvrage de Griffin.

Localisation	Faible probabilité de commentaires négatifs	Probabilité moyenne de commentaires négatifs	Probabilité forte de commentaires négatifs
Espace de travail critique	0.1	0.2	0.4
Espace de vie de l'équipage	0.2 – 0.4	0.4 – 0.8	0.8 – 1.6
Bureau	0.4	0.8	1.6
Ateliers	0.8	1.6	3.2

Figure 11 : Interprétation des valeurs de VDV en différente localisation dans le navire [2]

La figure suivante, illustrant les résultats d'un sondage réalisé sur les membres d'équipage d'un navire de croisière [3], montre que leur ressenti coïncide bien avec les valeurs seuils de Griffin :

- $VDV = 0.4 \text{ ms}^{-1.75}$ peut être considérée comme la valeur de limite basse où des plaintes peuvent émergées

- $VDV = 0.8 \text{ ms}^{-1.75}$ peut donc être considérée comme la valeur limite au-dessus laquelle l'inconfort à bord du navire devient significatif.

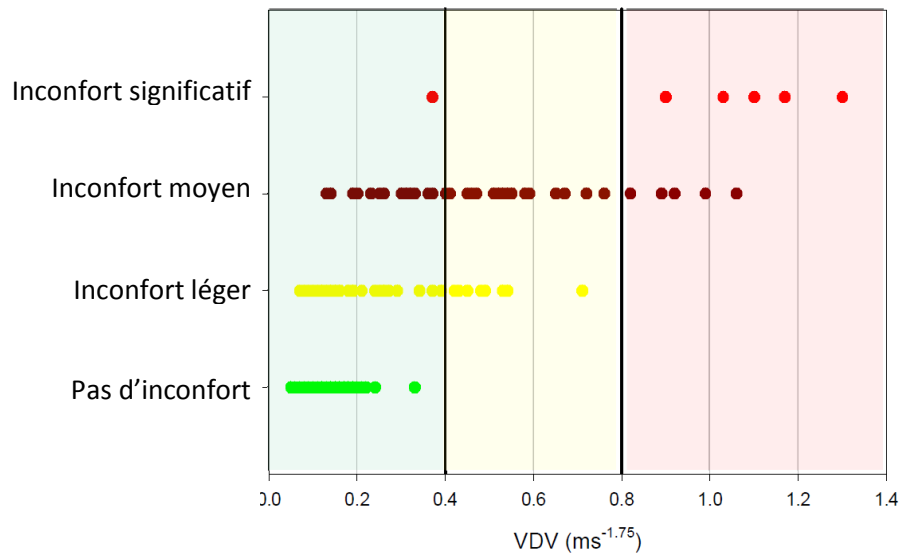


Figure 12 : Résultats d'un sondage réalisé sur les membres d'équipages d'un navire de croisière.

d. Le critère VDV – Calcul par FEM

La procédure de calcul du critère VDV de réponse aux impacts de slamming est présentée figure 13.

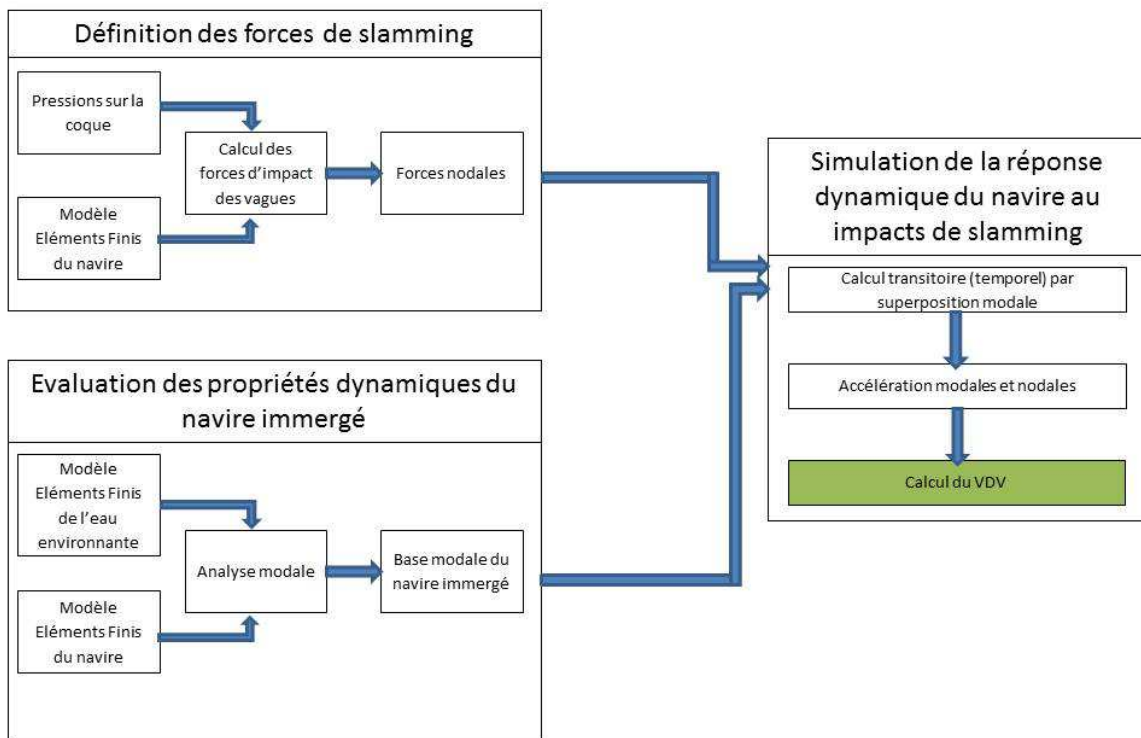


Figure 13 : Procédure de calcul du critère VDV de réponse aux impacts de slamming

Un exemple de modèle éléments finis de navire et de l'eau environnante est représenté sur la figure 14. Ce modèle est composé d'une partie structurale de navire utilisant des éléments plaques, poutres et masses ponctuelles et d'une partie fluide utilisant des éléments fluides volumiques (bleus et roses) et surfaciques (rouges). La base modale est créée à partir d'un modèle de ce type.

Les efforts sur la carène sont déterminés à partir des emplacements des sondes de pressions (provenant d'un essai ou de calcul CDF) et de la forme de la coque. Ils sont définis dans les trois directions. Un exemple d'effort total dans la direction transversale calculé à partir d'essais expérimentaux est donné sur la figure 15.

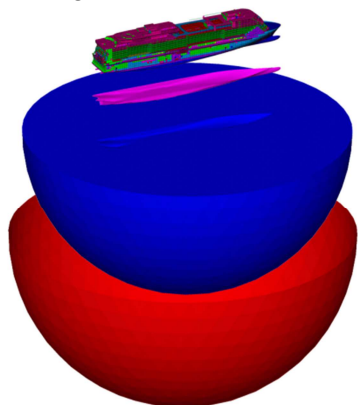


Figure 14 : Modèle éléments finis de navire immergé

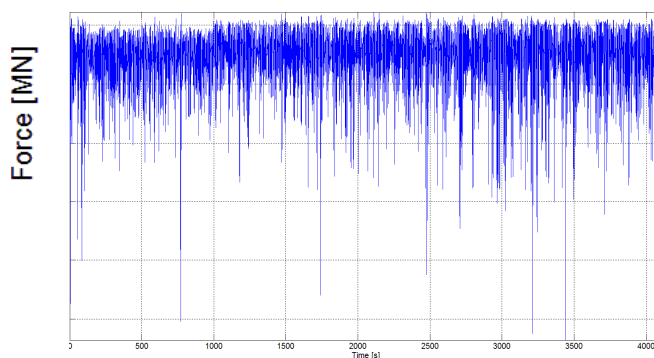


Figure 15 : Effort total transversal

Ces efforts sont alors utilisés pour effectuer le calcul transitoire de réponse du navire aux sollicitations des impacts de vagues. Ce type de calcul, de nature temporelle, ne peut être effectué par une méthode directe compte tenu des temps prohibitifs auquel il conduit (plusieurs dizaines de jours pour les historiques les plus longs). Il n'y a donc pas d'autre alternative que d'utiliser une méthode de superposition modale. Elle consiste à créer une base modale qui sera utilisée par la suite pour le calcul transitoire en temporel.

Un exemple de réponse vibratoire calculée sur un nœud du navire est donné sur la figure 16.

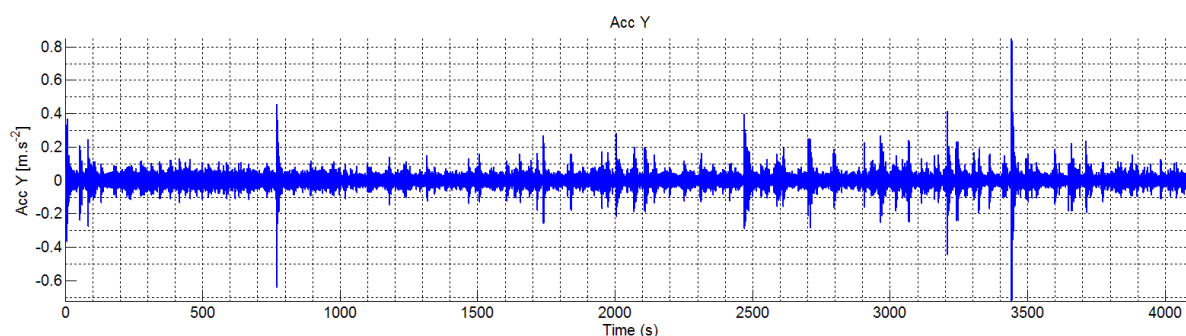


Figure 16 : Exemple de réponse vibratoire sur un nœud du navire

Ce niveau, exprimé en accélération, est alors filtré en fréquence selon les filtres présentés précédemment. On vient ensuite calculer le critère VDV grâce à la formule défini dans la norme ISO 2631 - 1 [1]. Une illustration du critère VDV représenté sur l'ensemble d'un navire est présentée en figure 17.

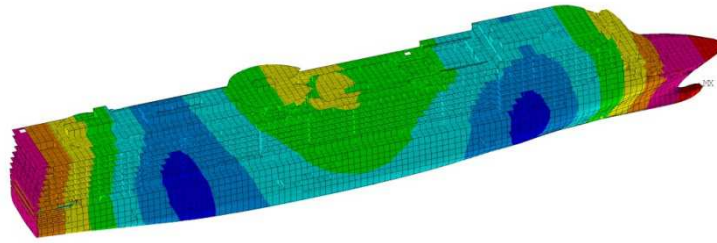


Figure 17 : Critère VdV calculé sur l'ensemble d'un navire

IV. Chaîne de calcul fluide-structure pour calcul VdV : cas d'application

La démarche en cours de réalisation consiste à réinjecter les efforts calculés par le biais de la CFD dans le calcul dynamique. Il faut pour cela monitorer les pressions en certains points de la carène sur un évènement représentatif. On extrapole de façon spatiale et temporelle afin de pouvoir réinjecter un historique de pression sur houle irrégulière sur les éléments de maillage du modèle par éléments finis [4]. Ce modèle numérique permettra d'investiguer le phénomène de confort au slamming et de discuter de l'approche VdV utilisée pour le caractériser. Il est prévu d'examiner la sensibilité du résultat au nombre et à la position des capteurs d'instrumentation, ainsi qu'au choix du temporel de houle.

V. CONCLUSION

Une méthode de calcul des VdV, résultant de slamming avant et arrière, implémentée chez STX-France a été présentée dans ce papier. La simulation numérique CFD mise en place permet de calculer les efforts d'excitation de slamming d'un navire sur houle. La comparaison avec des mesures expérimentales montre que le modèle est capable de prédire la localisation et l'intensité de l'impact sur les parties avant et arrière. Des applications de prédiction numériques sur des variantes de formes de carènes ou de conditions environnementales ont été également présentées. L'analyse transitoire effectuée permet de calculer la réponse vibratoire du navire sur houle à partir d'un historique d'effort issu des mesures expérimentales ou des calculs CFD. Les prochains travaux porteront sur les hypothèses de chargement du calcul dynamique. La sensibilité du résultat vibratoire final à différents paramètres de simulation sera mise en avant et comparées à des mesures en mer.

Références :

- [1] Norme Internationale ISO 2631-1, deuxième édition, mai 1997, "*Vibrations et chocs mécaniques - Evaluation de l'exposition des individus à des vibrations globales du corps - Partie 1 : Spécifications générales et amendement 1*".
- [2] Griffin, M. J., 1990. *Handbook of Human Vibration*. Academic Press. 988p. ISBN 0-12-303040-4.
- [3] Kukkanen, T., Soininen, H. 2000. *GTS Millennium Sea Trial Measurements. Assessment of slamming induced vibration levels*. Technical Research Centre of Finland, VTT Research Report VAL32-001624. Confidential.
- [4] *Whipping loads due to aft body slamming* ; G.K. Kapsenberg¹, A.P. van 't Veer, J.P. Hackett, and M.M.D. Levadou ; Fukuoka, JAPAN, 8-13 July 2002