

COMPARAISON DE METHODES EXPERIMENTALES POUR LA DETERMINATION DES EFFORTS INTERNES A UNE STRUCTURE NAVALE

COMPARISON OF EXPERIMENTAL METHODS TO ASSESS INTERNAL LOADINGS APPLIED TO A NAVAL STRUCTURE

T. DUPAU*, J.F. LE GUEN*, M. DARQUIER*

*DGA - Bassin d'essais des carènes, Chaussée du Vexin, BP 510, 27105 Val de Reuil Cedex

Résumé

L'objet de cet article est de présenter des résultats obtenus par le Bassin d'essais des carènes dans le cadre du projet CYCLOPE, projet dédié à la sécurité et à la durée de vie des navires. Le Bassin a eu pour principale tâche, la réalisation d'essais sur modèles segmentés à poutre rigide et à poutre élastique, destinés à déterminer le moment de flexion verticale. La comparaison quantitative des deux campagnes d'essais montre que les deux technologies aboutissent aux mêmes résultats, même par mer sévère et en présence de chargements transitoires. Grâce à cette étude, le Bassin a pu dégager les spécificités propres à chacun de ces deux types de modèle, et fournit des éléments permettant d'arrêter le choix sur l'un ou l'autre selon les résultats attendus, les données d'entrée à disposition et les contraintes de mise en œuvre, de coûts et de délais admissibles.

Summary

The aim of this article is to present results obtained by "le Bassin d'essais des carènes" during CYCLOPE project, which was devoted to security and lifetime of surface ships. "Le Bassin" had mainly to achieve trials with rigid and elastic beam segmented models, in order to determine the vertical bending moment. Quantitative comparison of testing campaigns shows that the two techniques give the same results, even in severe sea conditions and even though transient loadings occur. Thanks to this study, "le Bassin" has underlined particularities attached to each type of segmented model, and provides elements helping to choose between them, taking into account waited results, input data, and methodology, cost and schedule constraints.

1 Introduction

Le Ministère de l'Industrie a financé un projet Performance dénommé « CYCLOPE », consacré aux méthodes de suivi et d'analyse de la sécurité et de la durée de vie des navires, devant aboutir dans le domaine structure, à la fourniture:

- d'une méthodologie et d'outils pour la conception,
- de critères de dimensionnement vis-à-vis des contraintes réglementaires,
- de méthodes de mesures et d'analyse pour les suivis en exploitation.

Le projet a été conduit en partenariat avec Principia (outils de calculs et méthodologie) pilote de l'ensemble, ALSTOM (concepteur), Bureau Veritas (réglementation), Centrale Nantes (R&D numérique et expérimentale) et DGA / Bassin d'essais des carènes (méthodes expérimentales) dénommé plus loin « Bassin ».

A cette occasion, le Bassin a effectué des essais sur modèle réduit d'un navire, permettant d'aborder expérimentalement les différents aspects du problème de l'interaction fluide-structure, que sont notamment :

- le chargement de la poutre navire à la fréquence de houle,
- les efforts d'excitation dus aux impacts de tossage,
- le comportement vibratoire de la poutre navire en résultant.

Ces campagnes d'essais ont eu pour finalités :

- de fournir une base de données particulièrement riche pour la validation de la méthodologie proposée et des outils numériques associés,
- de dégager des éléments permettant de statuer sur le type d'essais à mettre en œuvre, en particulier lorsqu'il s'agit d'évaluer le moment fléchissant vertical (M_f) lorsque le navire se trouve mer de face.

Pour répondre au deuxième point, deux technologies de modèle segmenté du même bâtiment, de type paquebot, ont été successivement mises en œuvre:

- la première a consisté en un modèle segmenté muni d'une poutre rigide, désigné par la suite par le vocable PR, montage le plus adapté à la détermination des chargements aux fréquences de houle,
- et la seconde en un modèle segmenté muni d'une poutre élastique, désigné par la suite par le vocable PE, visant à obtenir la meilleure similitude hydroélastique avec le navire réel, indispensable pour appréhender expérimentalement le phénomène « de whipping », qui correspond à la mise en vibration de la poutre navire sur ses modes propres suite à un impact hydrodynamique.

La bonne reconduction des conditions d'essais entre les deux campagnes, que ce soit en termes de montage expérimental ou en termes de temporels de houle, a permis d'effectuer des comparaisons quantitatives temporelles et statistiques des résultats obtenus par les deux types de modèle, que ce soit pour les chargements aux fréquences de houle ou bien transitoires.

Pour prendre en compte ces derniers, une simulation numérique du modèle PE a été réalisée en élaborant un modèle poutre numérique, adoptant les caractéristiques modales (fréquences propres et amortissements associés) du modèle PE déterminées par mesure en eau, et chargé par les efforts hydrodynamiques mesurés lors de la campagne d'essais PR. Le Bassin a validé

cet outil numérique, en montrant la très bonne reproduction numérique des valeurs mesurées lors de la campagne d'essais PE.

Cet article présente en premier lieu les principaux résultats obtenus par le Bassin au travers des divers essais et simulations numériques réalisés pour appréhender les valeurs de M_f , puis son retour d'expérience sur l'emploi des deux types de modèle segmenté.

La confidentialité attachée au projet CYCLOPE ne permet pas d'afficher ici de valeurs chiffrées, ce qui explique en particulier l'absence d'échelles sur les différents graphiques

2 Principaux résultats issus du comparatif essais PE et essais PR

Précisons que d'une campagne d'essais à l'autre, les mêmes spectres de houles irrégulières ont été reproduits sur des mêmes durées, les modèles étant mus à la même vitesse d'avance, permettant des comparaisons directes entre les résultats obtenus sur le moment de flexion verticale. Au passage, il peut être noté que les états de mer correspondants étaient sévères, avec une hauteur significative de 10m, voire très sévères, avec une hauteur significative de 15m, une caractérisation des effets non-linéaires dus aux fortes amplitudes de la houle, indépendamment des effets de « whipping », étant recherchée. Signalons aussi que les composantes du moment de flexion dont il est question ci-après ne prennent en compte que ses valeurs dynamiques, la composante en eau calme, au point fixe, ayant été soustraite une fois pour toutes.

2.1 Présentation du modèle réduit et du montage expérimental

2.1.1 Description du modèle réduit

Les essais ont utilisé un modèle dit segmenté. Ce type de modèle se caractérise par le fait qu'il est composé de plusieurs segments en bois, assemblés par une poutre, qui dans le cas présent a d'abord été de « type rigide », puis de « type élastique ». Le modèle comprend 8 segments afin de multiplier les points de mesure le long de la poutre navire (voir figure 3, page 13).

Dans le cas de la poutre rigide, on cherche à obtenir des fréquences propres de maquette très élevées, afin de pouvoir respecter l'hypothèse forte de corps rigide sous tendant l'ensemble des calculs réalisés tant pour la cinématique que pour la détermination des efforts internes subis par le navire. Une raideur importante de la maquette permet en effet de se prémunir de déformations parasites se produisant lorsque les efforts de houle viennent exciter les modes propres du modèle. Ainsi la poutre adoptée ici est rectangulaire, de section importante et en acier. Les segments sont liés à la poutre rigide par l'intermédiaire de capteurs d'efforts qui permettent la mesure des efforts hydrodynamiques appliqués sur chaque segment indépendamment des autres.

Dans le cas de la poutre élastique, on cherche à assurer la bonne flexibilité de l'ensemble, c'est-à-dire celle permettant de reproduire la première fréquence propre de flexion verticale du bateau réel, voire la deuxième, en interdisant des modes basse fréquence dans les autres plans, qui pourraient venir parasiter les mesures. Ces conditions, ainsi que le souhait d'obtenir une poutre élastique simple à fabriquer, ont conduit à des sections de profils en H en acier, placées aux intersegments, leur âme étant mise à l'horizontale, et reliées par boulonnage à des tronçons rectangulaires, de section importante et en acier, à raison d'un par segment de maquette. Ces profils en H, munis de jauges de déformations, puis étalonnés, servent de capteurs fournissant directement la valeur de M_f .

2.1.2 Description du montage expérimental

Le montage d'essais utilisé est identique entre les campagnes PR et PE et consiste en un montage avec six sandows, reliant la maquette via la poutre à la plateforme de traction (voir figure 3, page 13). Ce montage a été préféré au montage classique avec bras de pilonnement, qui aurait induit des efforts de liaison, pénalisant les mesures dans le cas PE. La maquette est donc quasiment libre sur ses 6 degrés de liberté, et tout particulièrement dans le plan vertical, le plus influent dans le cas présent.

La raideur des sandows est suffisamment faible pour ne pas perturber les mouvements à la fréquence de houle. Cependant, la maquette n'étant tenue que par des sandows, connaît un phénomène de rappel très basse fréquence, principalement dû aux sandows avant. Ces efforts longitudinaux sont sans influence sur les efforts internes qui entraînent les déformations de la poutre navire dans le plan longitudinal et que nous étudions ici.

2.2 Comparaison des résultats obtenus par modèle PE et modèle PR en basse fréquence

2.2.1 Séparation des composantes « de houle » et « de whipping »

La comparaison des réponses en efforts internes obtenus via les modèles PE et PR, n'a de sens que dans le domaine basse fréquence.

Lorsqu'on s'intéresse aux déformations de la poutre navire, en particulier dans son plan longitudinal, on peut dégager trois grandes familles, que sont les déformations très basse fréquence, les déformations basse fréquence (BF) et les déformations haute fréquence (HF).

Les premières, non considérées dans le cas présent, sont par exemple induites par les écarts poids poussée le long de l'axe navire (purement statiques) ou par les écarts en température amenant des déformations lentes de la structure.

Le domaine BF correspond quant à lui à la plage des fréquences de la houle, et donc aux fréquences naturelles de pilonnement et de tangage du navire.

Enfin, le domaine HF correspond à la mise en vibration de la poutre navire sur ses modes propres :

- soit en régime continu par des composantes de houle en marche suffisamment énergétiques aux fréquences propres du navire, ce qui peut s'observer sur les navires très rapides, ou bien très longs et donc à première fréquence de flexion très basse. Ce phénomène de « springing » n'est pas observé ici,
- soit consécutivement à un impact ayant lieu entre la coque et la surface libre (tossage). Ce phénomène de « whipping » s'est effectivement manifesté ici.

Ce décroisement dans les plages de fréquence permet d'obtenir les réponses BF d'une part et HF d'autre part, par simple filtrage des mesures réalisées lors des essais. La fréquence de coupure doit être suffisamment éloignée de la première fréquence propre du modèle PE et telle que la très grande majorité du spectre de houle en marche soit prise en compte. Ainsi, dans le cas qui nous intéresse, et lorsqu'on considère la position relative de la première fréquence propre du navire vis-à-vis du spectre de houle tel qu'illustré sur la figure 4 (page 13), une fréquence de coupure fixée à 0,5 Hz répond à cette double exigence. Les composantes BF peuvent être alors rapprochées l'une de l'autre.

2.2.2 Résultats sur « splash »

Le terme « splash » désigne un groupe de vagues déterministes. C'est une houle irrégulière avec un large contenu fréquentiel. Les différentes périodes de houle sont générées avec un déphasage tel qu'elles soient toutes en phase en un point du bassin et à un instant donné. Les signaux de réponse obtenus sont du type fonction de réponse impulsionnelle. Traité par transformée de Fourier rapide ils permettent d'obtenir la fonction de transfert linéaire de la grandeur mesurée par rapport à la houle.

Il est possible de comparer les courbes d'amplitude des fonctions de transfert obtenues sur « splash », entre modèles PE et PR. Ainsi, la figure 1 ci-dessous présente les amplitudes des fonctions de transfert de M_f au maître couple des modèles à poutre élastique et à poutre rigide, obtenues pour une vitesse d'avance particulière.

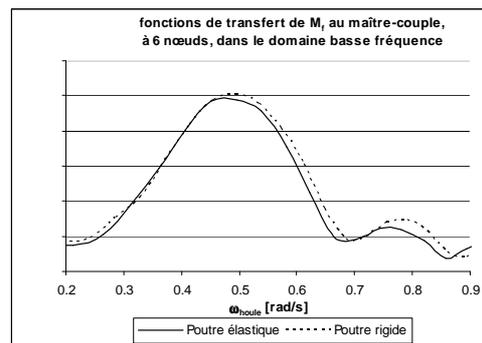


figure 1 : amplitudes comparées des fonctions de transfert de M_f au maître couple

La très bonne adéquation entre les deux courbes assure que les deux modèles ont des réponses semblables pour des mêmes efforts de houle, dont les fréquences d'excitation sont dans la plage prise en compte par la figure ci-dessus. Autrement dit, la déformabilité de la poutre navire ainsi que le type de montage adopté, sont sans influence sur le moment fléchissant aux fréquences de houle. Par conséquent, la comparaison des résultats des deux campagnes d'essais, poutre rigide et poutre élastique, est tout à fait valide.

2.2.3 Résultats sur houle irrégulière

La figure 5 (page 14) est extraite d'une configuration mer sévère, qui montre une très bonne reproduction de la houle en marche et du tangage entre les deux campagnes d'essais PE et PR, après synchronisation des acquisitions. Il est donc possible de superposer les courbes de réponse en moment de flexion, ce qui est fait sur le troisième graphique de la même figure. A des fins de comparaison directe, le signal du moment de flexion pour les deux types de poutre a été filtré à l'aide d'un filtre passe-bas, afin de supprimer la composante « de whipping » qui est sans objet dans le cas rigide. Seul le temporel de M_f au maître couple est représenté.

Cette figure montre que le moment de flexion au maître couple est lui aussi parfaitement retrouvé d'une campagne d'essais à l'autre, alors que les modèles ne sont pas les mêmes et que les méthodes d'obtention de cette grandeur sont fondamentalement différentes, la première consistant à calculer le moment de flexion à partir d'efforts hydrodynamiques mesurés au niveau de chaque segment du modèle, la deuxième consistant en une lecture directe de ce moment sur un capteur de mesure. On peut d'ores et déjà conclure que retenir le modèle à poutre rigide ou le modèle à poutre élastique pour obtenir la composante basse fréquence de M_f , dite « de houle », est indifférent.

L'analyse approfondie des différentes statistiques élaborées par analyse vague par vague du moment de flexion à l'issue des deux campagnes d'essais, vient confirmer ce résultat, même pour des conditions de mer très sévères. A titre d'exemple, le tableau 1 ci-après récapitule les écarts mesurés sur la valeur significative (c'est-à-dire la moyenne du tiers supérieur) de la hauteur crête à creux de M_f en différents points de la poutre navire, de la campagne PR sur la campagne PE, pour les deux configurations de mer précisée en introduction du §2, le navire ayant une vitesse d'avance de 6 noeuds. Les ratios mesurant ces écarts sont corrigés des variations de houle d'une campagne d'essais à l'autre, afin de les rendre transparents vis-à-vis du chargement, par application de l'hypothèse de linéarité.

configuration	Ecart entre PE et PR sur H1/3 de M_f à x m/PPAR, corrigé des variations de houle [%]						
	x=12.2	x=50.7	x=89.2	x=128.2	x=161.9	x=195.5	x=229.2
H10 T14 V6	2.6	-2.0	-4.5	-4.7	-6.0	-5.5	0.2
H15 T20 V6	7.9	5.9	3.8	3.6	2.4	2.4	9.5

tableau 1: écarts sur la composante « de houle » significative de M_f obtenue via poutre élastique et poutre rigide, corrigés des variations de houle d'une campagne d'essais à l'autre

On constate dans le tableau ci-dessus, que la détermination de la hauteur significative du moment de flexion, issue rappelons-le, d'un filtrage des signaux du moment de flexion pour en extraire la composante dite « de houle », est donc très correcte, même si au vu de la figure 5 (page 14), on pouvait s'attendre à mieux.

L'explication de cet écart est à rechercher dans les différences sur les houles effectivement produites lors des deux campagnes d'essais, car il faut retenir que si nous pouvons afficher des séquences quasi-identiques, comme par exemple dans le cas de la figure précédente valable sur 150 secondes pour la condition de mer sévère, ce n'est pas le cas de la totalité des parcours, d'une durée totale de 4190 secondes pour cette configuration et dont les tirages de phase n'ont pas été toujours les mêmes d'une campagne à l'autre. La conséquence immédiate est que les attitudes du modèle ne peuvent être confondues, induisant des disparités sur M_f .

On peut conclure que, malgré des mers sévères, certes aux spectres visés identiques d'une campagne d'essais à l'autre, mais aux champs de vagues finalement produits différents, on peut évaluer de façon tout à fait satisfaisante (moins de 5% d'écart pour les deux configurations traitées ici) la valeur significative de la composante « de houle » du moment de flexion au maître couple, en utilisant indifféremment le modèle à poutre élastique ou à poutre rigide.

2.3 Comparaison des résultats obtenus par essai et simulation numérique du modèle PE, en vue de caractériser les phénomènes haute fréquence

S'il s'avère nécessaire de prendre en compte le phénomène de « whipping », les deux approches expérimentales PE et PR sont possibles. En effet, dans le prolongement des essais, une simulation numérique du modèle PE a été réalisée en élaborant un modèle poutre numérique, adoptant les caractéristiques modales (fréquences propres et amortissements associés) du modèle PE déterminées par mesure en eau, et chargé par les efforts hydrodynamiques mesurés lors de la campagne d'essais PR, comme suggéré par le synoptique ci-dessous. Le Bassin montre alors la très bonne reproduction numérique des résultats obtenus lors de la campagne d'essais PE, pour les composantes haute et basse fréquence du moment de flexion.

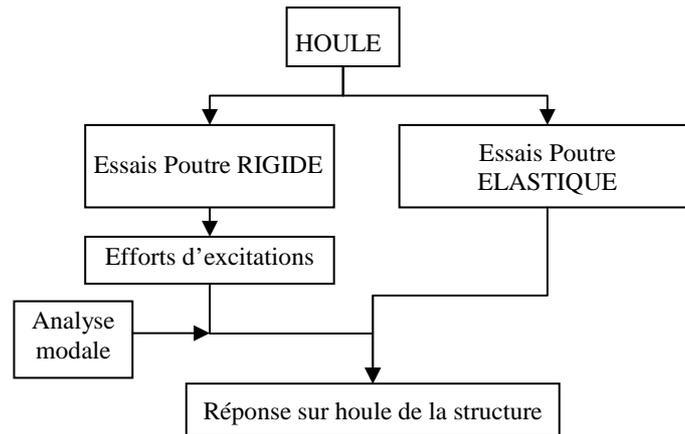


figure 2 : synoptique montrant l'assimilation possible entre essais PR et PE

La supériorité de ce modèle de simulation sur le modèle PE, réside dans le fait qu'il laisse la possibilité de fixer librement la valeur des différents paramètres modaux, permettant d'une part, d'en mesurer les conséquences sur la valeur globale du moment de flexion verticale et, d'autre part, d'intégrer au modèle de simulation numérique la valeur déterminée le cas échéant sur le navire réel.

2.3.1 Elaboration d'un modèle de simulation numérique

La poutre navire rentre en vibration sur ses modes propres en eau, définis par une fréquence et une déformée associée. L'assimilation de la poutre navire à une poutre « résistance des matériaux » (poutre RDM) permet, grâce à l'approche modale, de passer des chargements aux déformations et donc au moment de flexion. Il suffit pour cela d'élaborer un modèle numérique de poutre discrétisée, disposant des mêmes propriétés vibratoires que la poutre navire réelle, et de venir appliquer les chargements extérieurs aux nœuds de ce modèle pour en obtenir la réponse par superposition modale, en utilisant les fonctions de transfert [déplacement / force] tirées de la formule :

$$H_{ij}(p) = \frac{X_i(p)}{F_j(p)} = \sum_k \frac{\psi_{i,k} \cdot \psi_{j,k}}{(p^2 + 2 \cdot \zeta_k \cdot \omega_k \cdot p + \omega_k^2)}$$

avec :

- $X_i(p)$: déplacement au point i,
- $F_j(p)$: force injectée au point j,
- $\psi_{i,k}$: déformée modale au point i pour le mode k,
- $\psi_{j,k}$: déformée modale au point j pour le mode k,
- ω_k : pulsation propre du mode k,
- ζ_k : amortissement du mode k.

Dans le cas général, les informations nécessaires à l'élaboration d'un tel modèle numérique de poutre élastique, c'est-à-dire les fréquences propres, les déformées modales et l'amortissement modal associés, peuvent être :

- soit approchées, via un calcul sommaire, nécessitant, outre la définition de la géométrie de la carène, une connaissance assez précise de la répartition des masses, et de l'inertie de surface par rapport à l'axe longitudinal, qui peut dans un premier temps se limiter à la région de la coupe au maître,

- soit déterminées plus finement, via un calcul plus approfondi faisant appel à un maillage éléments finis de la structure, qui au passage, fournira les modes propres dans les autres plans (flexion latérale et torsion), mais obligera à disposer d'une définition précise de l'échantillonnage de toute la structure,
- soit mesurées par analyse modale expérimentale à bord du vrai navire.

Les données d'entrée indispensables à chacune des trois approches ci-dessus, ne sont disponibles que dans cet ordre selon l'avancement du projet du navire considéré, en partant de l'avant-projet jusqu'à la réalisation effective du bâtiment.

Dans le cas présent, une analyse modale expérimentale a été effectuée sur le modèle réduit muni de sa poutre élastique, permettant d'en déduire la valeur de la fréquence propre de chacun des deux premiers modes de flexion verticale et les amortissements associés. Par souci de simplification, on s'est placé dans l'hypothèse dite de Bernoulli pour la poutre RDM, en négligeant les effets de l'effort tranchant et de l'inertie en rotation. Ainsi, il n'a pas été recherché de similitude directe entre le modèle à poutre élastique qui a été utilisé pour les essais en bassin de traction et le vrai navire au niveau de la surface effective travaillant au cisaillement, qu'il est toujours difficile d'appréhender.

Ces données modales ainsi que les efforts hydrodynamiques mesurés sur chacun des segments du modèle lors des essais avec poutre rigide, ont été injectés dans le modèle RDM ci-dessus, permettant une comparaison directe entre les résultats atteints par simulation numérique et par mesure lors de la campagne d'essais menée avec la poutre élastique.

La superposition modale a été limitée au premier mode propre, car il a été démontré à l'issue des essais que le premier mode est énergétiquement dominant.

2.3.2 Comparaison des valeurs de M_f obtenues par essais PE et par simulation de PE

La comparaison porte sur différentes statistiques issues d'une analyse vague par vague et relatives aux :

- composantes globales des signaux de réponse entre les modèles à poutre élastique réel et numérique, à effort de houle comparable, comme déjà réalisé au §2.2 dans le cas de la seule composante de houle,
- composantes de houle et haute fréquence de ces signaux de réponse, dites « de whipping ».

Elle est destinée à valider l'assimilation entre simulation numérique basée sur des essais PR, complétés d'une analyse modale et essais PE.

En reprenant l'extrait de temporel du §2.2.3 relatif au moment de flexion au maître couple, la réponse, non filtrée, mesurée lors des essais poutre élastique peut être affichée en parallèle de la réponse calculée à partir du modèle de simulation numérique de la poutre élastique. C'est l'objet de la figure 6 (page 14).

L'analyse des figures montre une excellente reconstruction du signal temporel relatif au moment de flexion mesuré au maître couple lors des essais poutre élastique, via le modèle numérique de simulation, malgré les hypothèses simplificatrices adoptées pour le comportement de la poutre RDM et pour la synthèse modale, arrêtée au premier mode. Les écarts observés sur les deux composantes « de whipping » correspondent à des impacts subis par le modèle lors des essais avec la poutre rigide et non vus lors des essais avec la poutre

élastique et inversement, l'attitude du modèle pouvant différer légèrement d'une campagne à l'autre, celui-ci étant très faiblement contraint en déplacement.

L'analyse détaillée des statistiques relatives aux différentes valeurs caractéristiques, que ce soit pour les hauteurs crête à creux, ou pour les amplitudes en arc et en contre-arc, a permis de statuer définitivement sur la validité de la simulation numérique du modèle à poutre élastique. A titre d'illustration, nous fournissons ci-dessous un tableau synthétique de quelques écarts calculés entre des valeurs significatives de M_f obtenues par mesure d'une part et par simulation numérique d'autre part.

configuration	Ecart sur $H_{1/3}$ de M_f à x m/PPAR, pour PE simulée vs essayée, corrigé des variations de houle [%]						
	x=12.2	x=50.7	x=89.2	x=128.2	x=161.9	x=195.5	x=229.2
H10 T14 V6, composante globale	-28.8	-5.1	10.2	10.6	12.5	6.3	1.3
H10 T14 V6, composante "de houle"	-3.2	2.1	4.7	5.4	6.6	5.9	0.1
H15 T20 V6, composante globale	-21.9	-0.2	6.7	7.2	6.8	2.5	-2.4
H15 T20 V6, composante "de houle"	-5.6	-6.1	-3.5	-3.3	-1.9	-2.1	-8.5

tableau 2: écarts sur $H_{1/3}$ de M_f corrigés des variations de houle, pour les composantes globale et « de houle », obtenues via simulation numérique et essais sur poutre élastique

On constate dans le tableau ci-dessus, que la détermination de la hauteur significative du moment de flexion, via simulation numérique, est excellente pour la composante « de houle ». On y voit aussi les conséquences du « whipping » sur la valeur globale.

Le modèle de simulation numérique ayant été ainsi validé, la représentativité des essais PE a pu être évaluée, en recalant les valeurs modales de ce modèle sur celles du vrai navire, obtenues par mesure à bord. En particulier, une analyse de la sensibilité de la réponse en moment de flexion à l'amortissement structural a été menée, ce dernier ayant au niveau du modèle PE fabriqué, une valeur sensiblement plus forte que celle mesurée sur le vrai navire, alors que la première fréquence propre du modèle était très proche de l'objectif (2% d'écart). A titre d'information, il peut être précisé que la hauteur significative de M_f , déterminée par simulation numérique, augmente d'environ 3% lorsque l'amortissement passe de la valeur mesurée sur le modèle PE, à la valeur déterminée à bord.

3 Spécificités propres à chaque modèle

Les deux campagnes d'essais dont il est question ci-dessus, ont permis au Bassin d'établir un retour d'expérience sur l'emploi des modèles segmentés, dans la détermination des efforts internes dus aux chargements de houle et plus particulièrement dans le cas du moment de flexion verticale, grandeur de tout premier ordre dans l'échantillonnage de la structure des bâtiments de surface. Ainsi, ce chapitre présente les spécificités propres à chacun des deux types de modèle relevées par le Bassin, éléments permettant d'arrêter le choix sur l'un ou l'autre, en fonction des données d'entrée à disposition, des résultats attendus et des contraintes de mise en œuvre, de coûts et de délais admissibles.

3.1 Choix du type de modèle

Le choix entre modèle PR et modèle PE est en premier lieu dicté par le degré de connaissance que l'on a des caractéristiques massiques et modales du navire réel.

- le modèle PR, qui permet grâce aux équations de la mécanique des corps rigides, de déterminer les efforts internes à partir des efforts hydrodynamiques mesurés par les

capteurs d'efforts, ne nécessite de connaître pour la réalisation des essais que les caractéristiques massiques globales du navire et seulement en phase de post-traitement, la répartition des masses le long du navire afin d'obtenir les chargements de houle en termes de moment fléchissant et d'effort tranchant,

- le modèle PE, qui a pour finalité dans le cas traité ici de reproduire le comportement hydroélastique du navire en flexion verticale, oblige non seulement à connaître la répartition longitudinale de masse le long de la poutre navire avant l'essai en Bassin, mais aussi les inerties de surface de ses sections, l'altitude de la fibre neutre, ainsi que les fréquences propres en eau et les amortissements associés à cette flexion.

Le premier type de modèle est donc accessible très tôt dans le projet du navire, le second ne pouvant être conçu qu'après avoir déterminé les modes propres du navire, que ce soit par calcul en réalisant un maillage éléments finis puis en utilisant un code de calculs fluide structure adéquat, ou par analyse modale réalisée in situ sur le navire réel. Dans tous les cas, le modèle PE ne peut donc être mis en œuvre que tardivement.

3.2 Résultats accessibles par type de modèle

Dans les deux cas, le résultat essentiel attendu est le moment de flexion le long de la poutre navire et plus particulièrement aux intersegments.

Dans le cas PR, la composante de « whipping », qui correspond à la mise en vibration de la poutre navire suite à un impact hydrodynamique, n'est pas directement accessible. Pour l'obtenir, il faut recourir à de la simulation numérique, intégrant les caractéristiques modales de la poutre navire, comme décrit plus haut. Les équations de la mécanique permettent d'avoir accès à l'effort tranchant.

A l'inverse, dans le cas PE, les composantes basse et haute fréquence du moment de flexion aux mêmes intersegments sont directement accessibles, simultanément ou par décomposition. La limitation en fréquence est donnée par la finesse de la décomposition en segments du modèle : plus le nombre de segments est grand, plus les fréquences observables sont importantes, avec augmentation du nombre des modes propres représentatifs du réel. Il faut noter que l'instrumentation adoptée dans le cadre de ces essais n'a pas permis d'avoir accès à l'effort tranchant, ce qu'il est toujours possible d'obtenir par le biais d'un montage adéquat.

3.3 Contraintes de mise en œuvre par type de modèle

3.3.1 Modèle à poutre rigide

Dans le cas PR, une première difficulté concerne la tenue du devis de masse, car la masse de la poutre et celle des capteurs d'efforts sont très élevées. En effet, concernant la poutre, le niveau de rigidité attendu oblige à employer un matériau à fort module d'Young E , et à adopter une section présentant une inertie importante selon l'axe horizontal, mais aussi vertical afin de se prémunir de vibrations parasites.

On aboutit ainsi à une barre de section rectangulaire en acier, présente dans les catalogues des fournisseurs de profilés, qui possède un module E intéressant, puisque valant par exemple trois fois celui de l'aluminium (autre matériau facile d'emploi et traditionnellement utilisé pour la confection des modèles segmentés), mais pour une densité presque trois fois supérieure. La masse alors atteinte par la poutre est considérable, et peut même être rédhibitoire pour l'équilibrage final du modèle. Ainsi, sauf à investir lourdement dans la

conception de la géométrie de la poutre, et à se priver de l'approvisionnement d'une poutre standard et donc de l'économie associée, le devis de masse à respecter constitue un point sensible à bien analyser. Cette difficulté est d'autant plus contraignante que la finesse du navire est importante et que l'échelle est petite. Dans le cas de CYCLOPE, pour se donner la plus grande latitude sur le réglage en inertie de la maquette, elle a été fabriquée par le Bassin en nid d'abeille sur structure bois, permettant de réduire son poids de 20 % par rapport à une fabrication classique en bois latté.

Le montage de l'ensemble capteurs et poutre dans le modèle bois est une opération délicate qui constitue une deuxième difficulté associée à la PR.

Enfin, le traitement numérique à développer pour aboutir aux valeurs de M_f (qui nécessite l'estimation expérimentale ou numérique de la valeur des inerties des éléments pesés par les capteurs d'efforts) constitue la contrainte la plus importante induite par l'emploi d'un modèle à PR. Ce type d'essais nécessite en effet, un traitement long et fastidieux, qu'il est très difficile d'automatiser à 100%, du fait de la spécificité de chaque essai qui oblige à procéder, à chaque nouvelle campagne, à une réécriture partielle ou totale des programmes de traitement.

3.3.2 Modèle à poutre élastique

Dans le cas PE, une première contrainte concerne le dimensionnement de chaque intersegment, constitué ici d'un profilé en H, qui doit permettre d'obtenir un modèle en bonne similitude hydroélastique avec le navire réel. Pour y parvenir, des calculs de modes propres en air et en eau, sont à produire par itération sur divers modèles poutres, en prenant en compte la raideur propre du boulonnage entre les différents tronçons de la poutre.

Une autre contrainte est que le type de conception adopté ici pour la PE est tel que la seule possibilité éventuelle de modification des fréquences propres du modèle après analyse modale simple en eau, est une correction à la baisse, par rectification des ailes des H.

Un écart avec le modèle à poutre rigide, est que la fabrication de la PE est plus ouvragée, nécessitant l'usinage et le soudage de pièces diverses.

Enfin, contrairement à la PR, un étalonnage (statique) de chaque intersegment est nécessaire, afin de le transformer en capteur permettant une mesure directe de M_f .

Il faut bien noter qu'il ne doit pas être considéré que ce type d'essais permet d'obtenir assurément les fréquences propres en eau du navire, ni encore moins l'amortissement structural de la poutre navire, la seule mise à l'échelle de la raideur par section ne permettant pas d'atteindre la similitude hydroélastique parfaite.

3.4 Coûts et délais

Pour ce qui est de la fabrication, le prix du modèle permettant d'accueillir une poutre rigide est le plus souvent supérieur à celui d'un modèle prévu pour une poutre élastique, car sa masse doit être plus faible pour permettre le respect du devis de masse global après installation de la poutre, des capteurs d'effort et du lest d'équilibrage. Ainsi, dans le cas présent, on a précisé plus haut qu'il a été nécessaire de réaliser certaines parties du modèle en panneaux composites « nid d'abeille » afin de l'alléger au maximum, ce qui en a augmenté le coût et les délais de fabrication.

A l'inverse, si on peut réutiliser une poutre rigide déjà existante, des économies en budget et en temps pourront être réalisées par rapport à une poutre élastique, pour laquelle il faudra presque sûrement reprendre la définition complète des intersegments servant de capteurs. Cela signifie des surcoûts et des délais supplémentaires pour concevoir, fabriquer, équiper de jauges de déformation et étalonner ces pièces, pour chaque nouveau navire à tester, alors que dans le cas PR, les capteurs existent et sont le plus souvent déjà étalonnés, la durée de validité de l'étalonnage étant de plusieurs années.

Pour ce qui est du montage, le cas PE nécessite une installation sous la plateforme avec des sandows retenant le modèle en lacet, roulis et embardée, ce qui nécessite une instrumentation dédiée aux mouvements plus complexe que dans le cas PR, pour lequel il est possible d'utiliser un bras de pilonnement.

Enfin, pour ce qui est du traitement numérique, on a déjà précisé plus haut que les coûts et délais associés étaient très importants dans le cas PR.

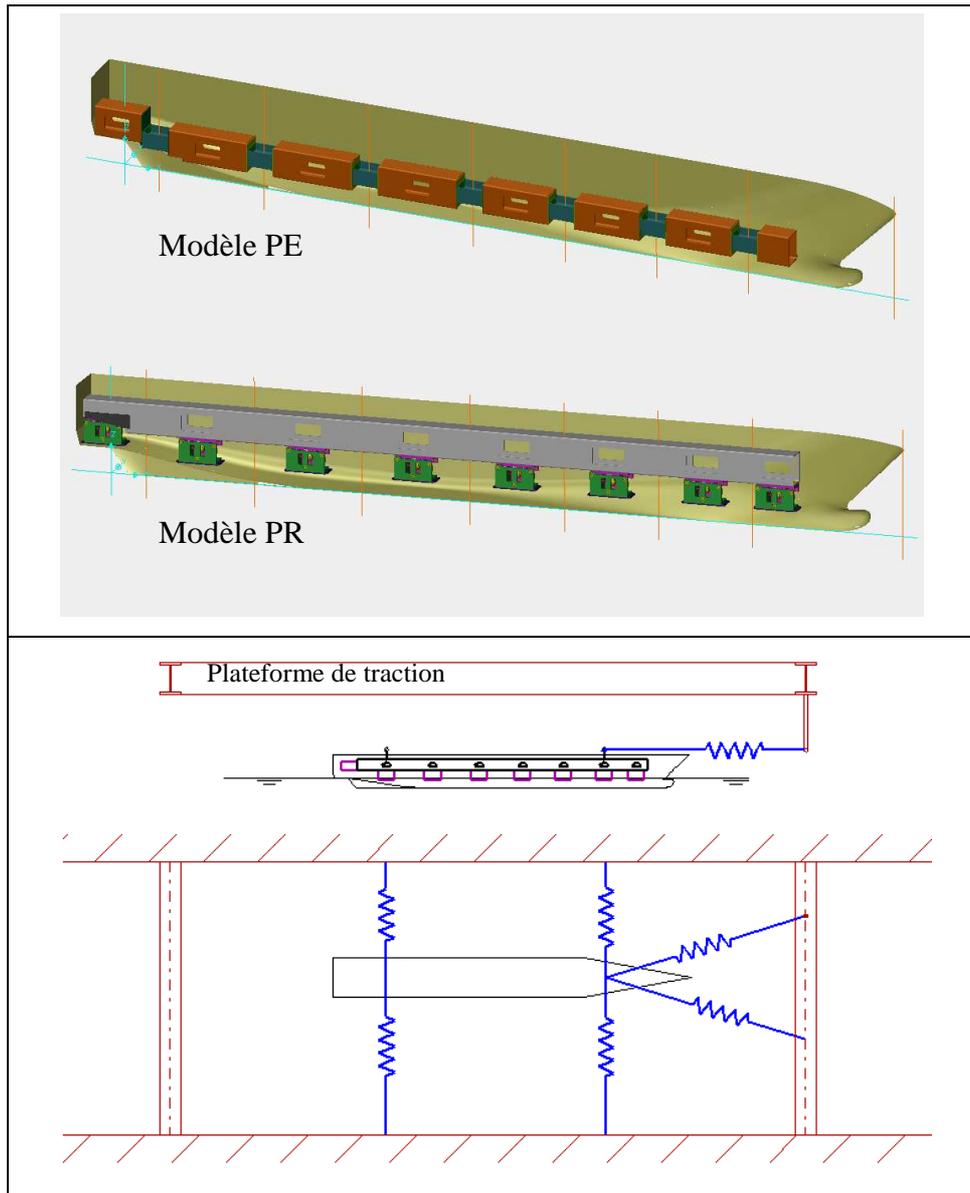


figure 3 : modèles PE et PR et montage expérimental

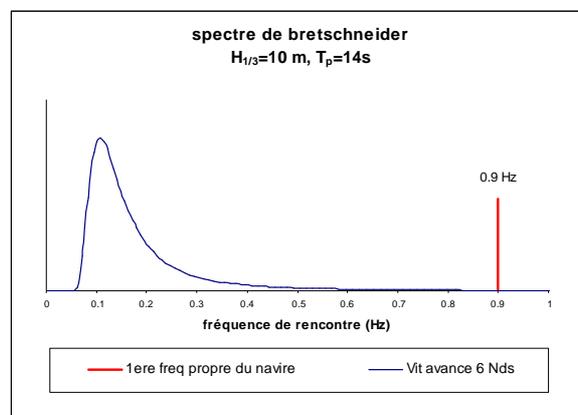


figure 4 : positions relatives du 1^{er} mode propre de flexion du navire et du spectre de houle en marche

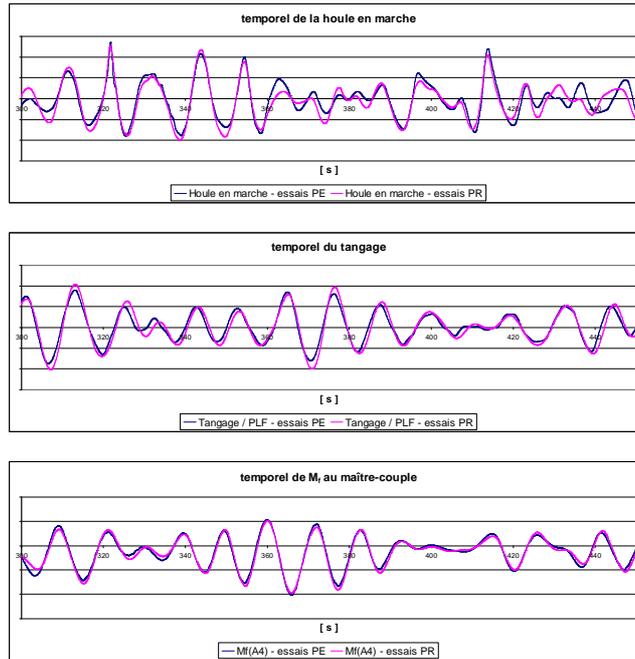


figure 5 : extrait d'un temporel de M_f basse-fréquence, au maître couple, pour les modèles élastique et rigide

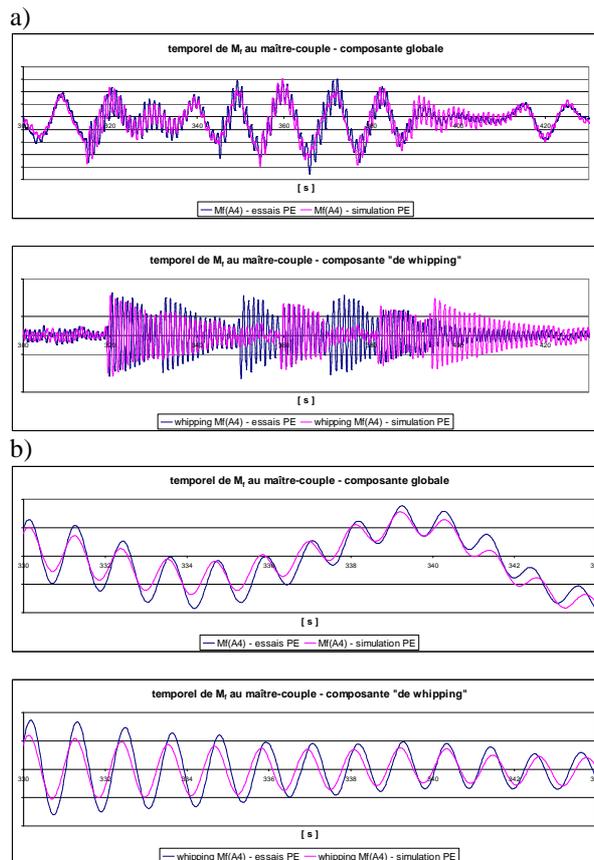


figure 6 : extrait d'un temporel de M_f au maître couple, issu des essais poutre élastique et de la simulation numérique de la poutre élastique
a) de t=300s à t=450s, b) de t=330s à t=344s