

10^{èmes} JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

Nantes, 7, 8 et 9 mars 2005

SIMULATION D'UN CATAMARAN DE COURSE SOUMIS A LA HOULE ET A L'IMPACT HYDRODYNAMIQUE

PREDICTIONS OF A CATAMARAN UNDER WAVE AND HYDRODYNAMIC IMPACT LOADING CONDITIONS

L. GORNET, G. MARCKMANN, B. PESEUX

École Centrale Nantes, GeM UMR-CNRS 6183, BP 92101, 44321 Nantes, France,

Résumé

Cette étude porte sur la simulation de l'impact hydrodynamique de structures « sandwich » pour lesquelles les déformations de la structure sont prises en comptes. L'objectif de ce travail est de proposer et de mettre en œuvre des modèles éléments finis de voiliers multicoques de courses océaniques basés sur des caractéristiques matériaux réalistes. Ces voiliers sont réalisés à partir de structures « sandwich » constituées de peaux stratifiées carbone époxy et d'âmes Nomex®. Les propriétés mécaniques tridimensionnelles de ces âmes sont déterminées à l'aide de notre logiciel prototype NidaCore. Une approche numérique est également proposée pour résoudre le problème de l'impact hydrodynamique sur des structures sandwich. Des simulations éléments finis multi-échelle menées sur le catamaran Orange II sont illustrent cette étude.

Summary

This study deals with hydrodynamic impact problems on sandwich structures in which structural deformation are taken into account. The aim of this study is to propose and develop sandwich composite laminate simulation models dedicated to the conception of trans-ocean multihull sailing race boats based on realistic material properties. These sandwich structures are made of laminates skins and Nomex cores. Our software NidaCore is used to determined the three dimensional mechanical core properties. A numerical method is proposed to solve the hydrodynamic impact problem on sandwich structures. Multi-scale finite element predictions conducted for the validation of the catamaran Orange II are revealed.

I-INTRODUCTION

Le dimensionnement des voiliers océaniques multicoques de type catamaran ou trimaran révèle qu'une attention particulière doit être portée sur le problème de l'interaction fluide-structure. En particulier, dans des conditions de mers sévères, lorsqu'il se produit des mouvements de fortes amplitudes, les efforts prépondérants à considérer sont dus aux pressions d'impact hydrodynamique. En effet, lors de l'impact d'un flotteur ou d'un bras, les pressions d'origine hydrodynamique peuvent être suffisamment importantes pour générer des endommagements et des ruptures pouvant mettre en péril l'intégrité du voilier.

Ces voiliers de courses sont constitués de structures sandwich complexes en carbone époxy dont la conception repose sur une technologie de pointe venant de l'aéronautique. Les échantillonnages de ces voiliers sont déterminés avec de faibles marges de sécurité afin de conserver un bon rendement entre le déplacement et la puissance vélique. En conséquence, de nombreuses études expérimentales et numériques doivent être menées afin de proposer ou valider les solutions technologiques retenues sur ces voiliers. À titre d'illustration, le maillage éléments finis du Catamaran code B1 (Multiplast) mis en œuvre par notre équipe est présenté sur la figure 1. Ce modèle a été réalisé lors de la phase de conception du catamaran baptisé Orange II. Le dimensionnement de ce type de voilier est réalisé en considérant les chargements associés aux efforts véliques fournis par l'Architecte Naval et aux efforts hydrodynamiques générés par la houle (Figure 2, houle monochromatique unidirectionnelle de Stokes). Ces derniers efforts sont calculés à partir du logiciel Aquadyn (Delhommeau 1987). Un grand nombre de cas de chargement sont évalués afin de valider la structure vis-à-vis des différentes configurations de navigation.



Figure 1. Maillage éléments finis coques du voilier de course Code B1 (Multiplast).

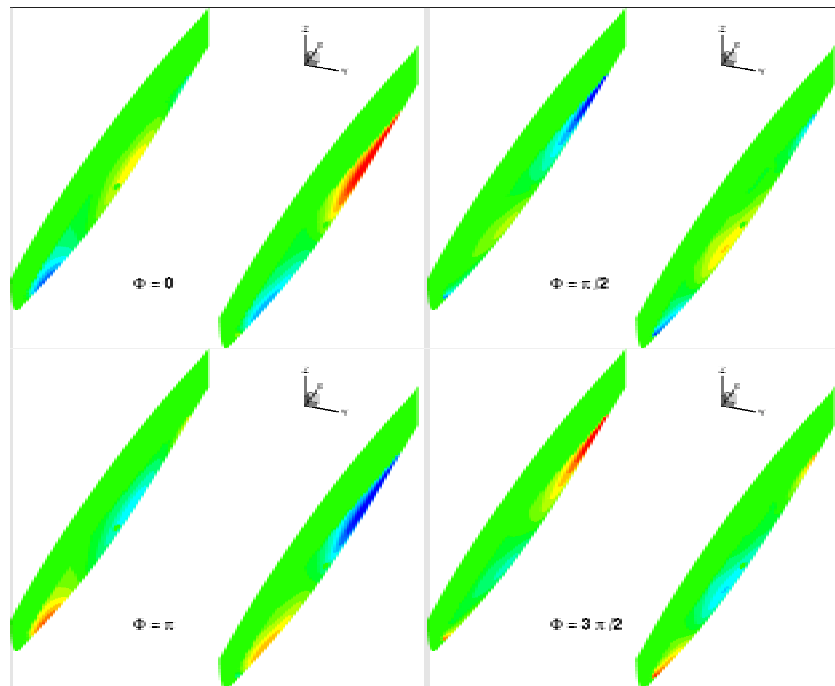


Figure 2. Distribution des pressions sur la coque du catamaran Code B1 pour différentes phases de houle.

Les travaux présentés dans la suite sont relatifs au comportement mécanique quasi-statique des âmes Nomex® usuellement employées dans la construction de ces voiliers de courses. Ces matériaux sont parfois mis en cause pour leur manque de durabilité lors des grandes courses océaniques. En particulier, la tenue de ces âmes sous l'action d'efforts de slamming conduit parfois les concepteurs à renoncer à l'utilisation de ces matériaux et à les remplacer par des mousses beaucoup plus denses. Une autre solution consiste à modifier profondément la géométrie des bras de liaison au prix de nombreuses simulations afin de limiter ces impacts hydrodynamiques. Finalement, un grand nombre d'âmes différentes sont utilisées dans la réalisation de ces voiliers. Les paramètres de ces âmes, à savoir l'épaisseur, la forme et le diamètre de la cellule, varient afin d'optimiser la résistance et le poids des différentes parties de la structure. L'optimisation du voilier conduit le concepteur à créer une structure fortement hétérogène. Lors de la phase de simulation, des procédures d'homogénéisation doivent être employées afin de déterminer les caractéristiques mécaniques équivalentes. Ces modèles numériques sont qualifiés expérimentalement afin de valider la démarche de modélisation. L'impact hydrodynamique d'une structure peut être simulé à l'aide de modélisations éléments finis en tenant compte d'un couplage faible ou d'un couplage fort. Actuellement, la plupart des travaux centrés sur le slamming sont menés dans le cadre de la théorie potentielle sous hypothèse de corps rigide bidimensionnelle pour des impacts à vitesse constante. Ces simplifications permettent alors d'obtenir des solutions asymptotiques (Cointe, 1987, Tourbier et al., 2002). La modélisation de l'impact hydrodynamique peut également être effectuée à l'aide de modèles éléments finis tenant compte d'un couplage fort et des déformations de la structure (Donguy 2002). Pour conclure, des simulations sont réalisées sur des sandwich constitués de carbone époxy et d'une âme Nomex® afin d'évaluer l'évolution des contraintes dans les peaux et dans l'âme lors de l'impact hydrodynamique.

II-SIMULATIONS DES PROPRIETES MECANQUES DES AMES NOMEX®

Le logiciel prototype NidaCore, développé par notre équipe, permet de déterminer les propriétés mécaniques des âmes Nomex® sous des chargements quasi-statiques. Il est fondé sur la mise en œuvre de la théorie de l'homogénéisation des milieux périodiques dans le cadre éléments finis. Outre la détermination des propriétés mécaniques tridimensionnelles des âmes Nomex®, ce logiciel permet de déterminer toutes les contraintes ultimes et ainsi de créer une enveloppe de stabilité en rupture. Ces contraintes sont déterminées à partir des modes de flambement du volume élémentaire représentatif (Gornet et al. 2005). À titre d'illustration, les géométries déformées d'un Volume Élémentaire Représentatif ECA-R sous l'action des deux chargements de cisaillement hors plan sont présentées sur la figure 3. Le flambement des géométries sous l'action de ces chargements est également présenté sur la figure 4.

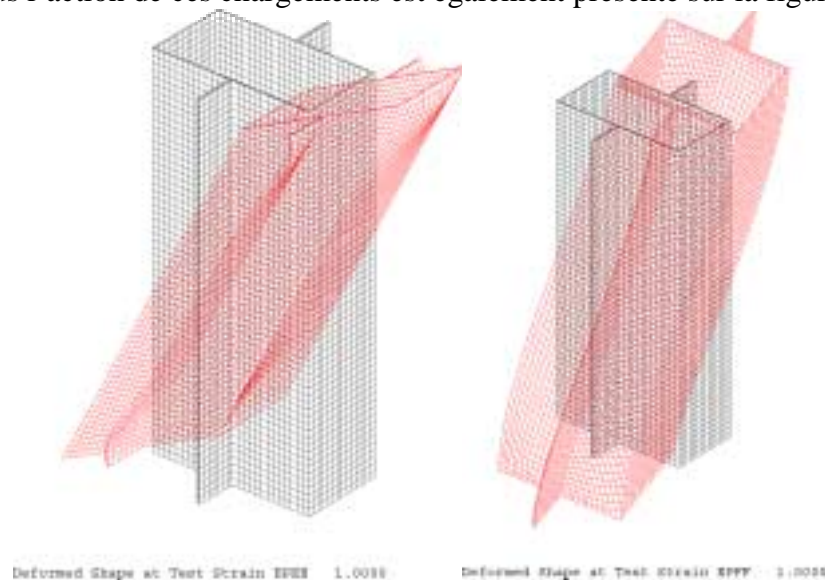


Figure 3. Déformées du Nomex® ECA-R pour les chargements (E_{13}, E_{23})

La seconde version du logiciel prototype NidaCore a permis d'obtenir un outil encore plus général en intégrant dans le VER l'interaction entre les caractéristiques mécaniques de l'âme et des peaux. Les peaux en carbone peuvent être libres de contrainte ou bloquées pour simuler un accrochage à un dispositif d'essais mécaniques (figure 5). Les caractéristiques mécaniques en cisaillement hors plan d'une âme de forme rectangulaire avec des peaux composées de tissus équilibrés carbone T700S/M10 posée à 0° ou à 45° par rapport aux directions d'orthotropie de l'âme sont présentées dans le tableaux 1. L'influence du comportement des peaux sur les valeurs de flambement de l'âme en cisaillement hors plan n'est pas négligeable. Cependant la dispersion des résultats numériques est proche de celle enregistrée lors des essais mécaniques.

Les fabricants d'âmes d'abeilles mènent classiquement des essais mécaniques de caractérisation à partir de matériau d'épaisseur 12,7mm. Pour réaliser la modélisation de ces essais, le modèle éléments finis du VER comporte 41556 nœuds. Ils correspondent à 6156 éléments hexaèdres à 20 nœuds isoparamétriques à interpolation quadratique. Le maillage du VER comporte un seul élément dans l'épaisseur élémentaire de la paroi et deux dans les parties à épaisseur double (Figure 3). Les simulations sont effectuées en faisant l'hypothèse de petits déplacements et de petites déformations. La dénomination ECA-R 4,8-29 (51) représente une âme rectangulaire de cercle inscrit de 4,8mm de densité de 29 kg/m^3 et d'une épaisseur de clinquant de 51 m. Les caractéristiques mécaniques du papier utilisé dans la fabrication des nids d'abeilles sont déterminées de manière inverse par recalage des modules de cisaillement hors-plan.

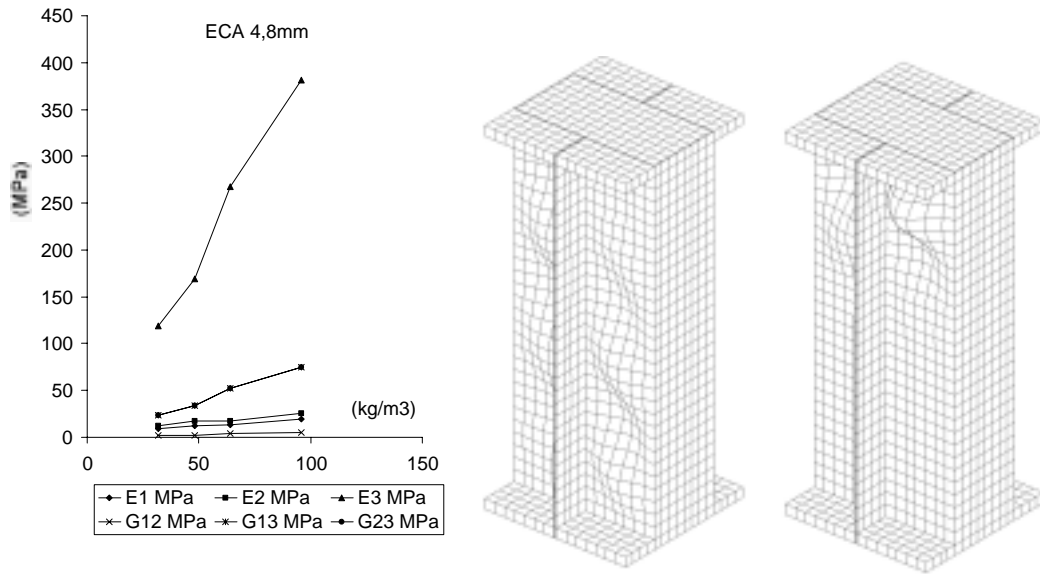


Figure 4. Propriétés mécaniques et déformées de flambement du VER sur-expansé avec peaux à 0° sous l’action d’un chargement de cisaillement hors plan E_{13} et E_{23} .

Les modules de cisaillement hors plan G_{13} et G_{23} et les contraintes de cisaillement de rupture associées σ_{13} et σ_{23} ainsi que la contrainte d’écrasement σ_{33} sont les seules données usuellement fournies par les fabricants. Ces seules données expérimentales sont manifestement insuffisantes pour réaliser l’étude des renforts tridimensionnels usuellement employés sur les voiliers océaniques (Figure 5, Gornet et al. 2004). NidaCore permet d’obtenir l’ensemble des caractéristiques mécaniques tridimensionnelles des âmes Nomex®, et par conséquent de nourrir ces modèles numériques tridimensionnels.

Tableau 1. Caractéristiques mécaniques avec et sans peaux pour une hauteur de 12,7mm d’un ECA-R-29 (51).

T700S/M10 épaisseur 0,36mm	G23 (MPa)	G13 (MPa)	σ_{13}^c (MPa)	σ_{23}^c (MPa)
Aucun	14,6	8,6	0,33	0,25
Orienté à 0°	15,4	10,2	0,511	0,690
Orienté à 45°	15,85	10,16	0,512	0,906

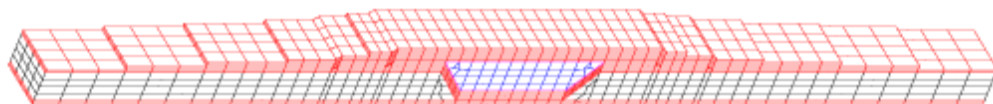


Figure 5. Modèle élément finis tridimensionnel d’un renforcement en cisaillement par pontage.

II-FORMULATION ELEMENT FINIS DE L'IMPACT HYDRODYNAMIQUE

Dans cette partie, nous rappelons le système matriciel issu de la formulation générale du problème de l'impact hydrodynamique (Peseux 1989, Tourbier et al. 2002). Au cours de l'impact hydrodynamique, l'interface fluide/structure, notée Γ_{FS} , appartient d'une part à la frontière de la structure et d'autre part à la surface libre initiale Γ_L du fluide. La difficulté principale du problème est liée au fait que l'interface Γ_{FS} et la surface libre Γ_L évoluent au cours de l'impact et sont donc des inconnues du problème. Après assemblage des formes intégrales élémentaires, pour le fluide parfait et pour la structure élastique, nous obtenons les deux systèmes d'équations linéaires couplés suivant:

$$\begin{cases} [M_s] \{\ddot{a}\} + [K_s] \{a\} = \rho_f [SF] \{\dot{\Phi}\} \\ [M_f] \{\ddot{\Phi}\} + [H_f] \{\Phi\} = -[FS] \{\dot{a}\} \end{cases}$$

$[FS]$ ou $[SF]=[FS]^t$ représente la matrice de couplage fluide-structure assemblée. Dans le cas général la résolution de ce système se fera en regroupant les inconnues nodales $\{a\}$ et $\{\Phi\}$ (Morand et Ohayon 1992) dans un même vecteur des inconnues nodales $\{W\}$ ($\{W\}^t = \langle \{a\}^t, \{\Phi\}^t \rangle$) tel que :

$$[M] \{\ddot{W}\} + [B] \{\dot{W}\} + [H] \{W\} = \{Q\}.$$

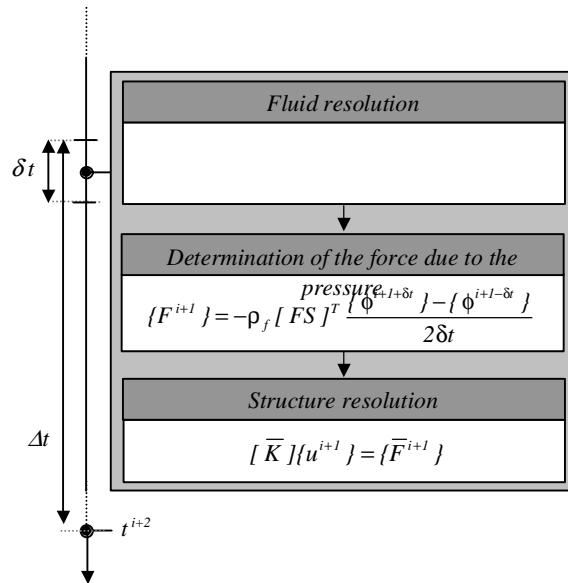
Le couplage du problème fluide et structure se fait au travers de la vitesse de glissement et par l'intermédiaire de la pression à la paroi de la structure. Lors de la résolution par éléments finis, ces conditions introduisent une matrice de couplage. Le modèle d'interaction fluide structure est développé pour la formulation éléments finis coques stratifiées. Ces développements numériques nommés Impact sont réalisés avec l'atelier logiciel Cast3M-CEA.

II-1 Algorithme de couplage itératif

L'utilisation d'un algorithme de couplage itératif permet de découpler la résolution du problème fluide et structure. Le problème couplé est résolu par une méthode itérative : calcul d'un champ de pression fluide à un instant donné et prise en compte de ce champ de pression dans l'analyse de la structure, comme une force extérieure appliquée au corps. Ces calculs sont effectués de manière itérative jusqu'à convergence des champs de pression et de déformation. Contrairement aux pratiques classiques (Kvalsvold et Faltisen 1995, Korobkin et Khabakhpasheva 1999), la force d'impact due au chargement hydrodynamique est évaluée à partir de la solution du problème extérieur corrigée par la solution intérieure. Des exemples numériques et expérimentaux sont présentés pour des matériaux métalliques dans (Donguy 202).

Deux échelles de temps caractéristiques doivent être introduites. Partant d'une configuration où les déplacements et les vitesses de la structure sont connus, deux calculs fluides sont réalisés pour déterminer la zone de contact entre le fluide et la structure, puis la force généralisée correspondant à la pression hydrodynamique est calculée et corrigée localement par la solution asymptotique intérieure (Donguy 202). Enfin une résolution du problème structure termine la phase de calcul. Cette phase de couplage correspond à une prédiction si les champs de données initiales sont ceux correspondant à l'instant précédent, ou à une phase de correction si ce sont ceux de l'itération précédente. L'algorithme d'interaction est représenté dans le Tableau 2.

Tableau 2. Algorithme fluide structure.



II-2 Impact de dièdre en carbone époxy

A titre d'illustration, on considère l'exemple de l'impact à vitesse verticale constante d'un dièdre sandwich constitué d'une âme Nomex® et de peaux carbone époxy. Pour cette étude, le demi dièdre est assimilé à un éléments coque stratifié. L'enfoncement de la structure est simulé en imposant une évolution linéaire du déplacement. Les solutions numériques obtenues sont comparées avec celles issues du dièdre indéformable (Wagner, 1932).

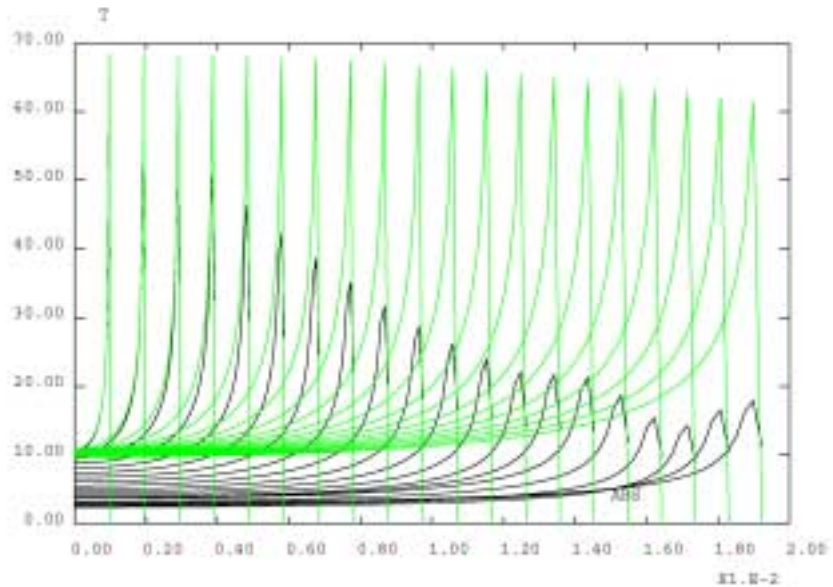


Figure 6. Comparaison entre de la distribution de pression le long des dièdres rigide et déformable à différents instants.

Les simulations sont réalisées sur un dièdre d'âme ECA-R64 (51) (épaisseur de 10mm) et deux peaux en carbone époxy T700S-M10 (épaisseur de la peau 0,36mm). La direction des fibres est suivant le dièdre. Les simulations présentées figure 6 correspondent au cas d'un

dièdre d'angle 10° percutant la surface libre avec une vitesse de 11m/s. L'influence du caractère déformable de la structure modifie fortement la pression. La figure 7 montre l'évolution de la contrainte d'écrasement dans le Nomex® (rupture 3MPa). La simulation est poursuivie jusqu'à ce que la largeur mouillée soit égale à la largeur du dièdre. Ces simulations permettent de vérifier dans une première approche les contraintes dues aux actions des pressions d'impacts hydrodynamiques.

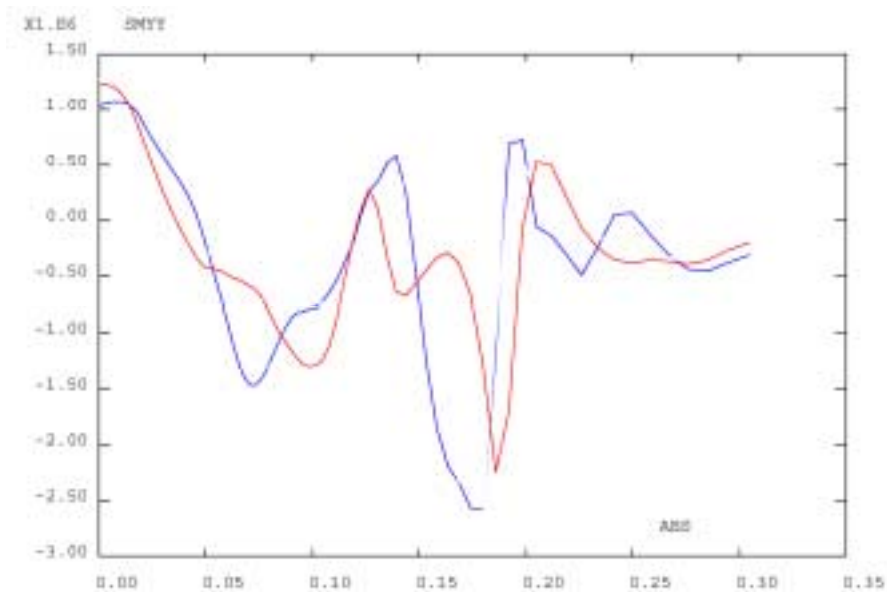


Figure 7. dièdre d'angle 10° , évolution de la contraintes d'écrasement du Nomex® lors de l'impact (Rupture compression 3MPa).

III-CONCLUSION

Après avoir rappelé le problème industriel lié à l'étude du dimensionnement d'un catamaran océanique, les outils numériques développés pour simuler le comportement des structures sandwich sous l'action d'impacts hydrodynamiques sont présentés. Des exemples de dièdres composites impactant une surface libre sont analysés. Les codes NidaCore et Impact développés au Laboratoire permettent d'évaluer les contraintes dans les peaux en carbone et dans l'âme Nomex® lors d'un impact hydrodynamique. Des essais doivent maintenant être réalisés sur des sandwichs constitués de peaux carbone époxy et d'âme nids d'abeilles afin de montrer la pertinence des simulations éléments finis sous des impacts hydrodynamiques.

REFERENCES

- Cointe, R., 1987, "L'impact hydrodynamique en deux dimensions", *1^{ère} Journées de l'Hydrodynamique, Nantes*.
- Delhommeau G., « le problème de diffraction radiation et de résistance de vagues : étude théorique et résolution numérique par la méthode des singularités, Thèse ENSM 1987
- Tourbier M, Donguy B., Peseux B., Gornet L., E « Modelling and simulation of the three dimensional hydrodynamic problem», PVP- ASME, Vancouver 2002.

- Donguy B., 2002, "Etude de l'interaction fluide structure lors de l'impact hydrodynamique",
Thèse de Doctorat, Ecole Centrale Nantes.
- Faltinsen, O., 1997, "The effects of hydroelasticity on ship slamming", *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* **355**, 575-591.
- Gornet L., Marckmann G., Lombard M.. « Détermination des coefficients d'élasticité et de rupture des âmes nids d'abeilles : homogénéisation périodique et simulations éléments finis. », *Revue Mécanique et Industries, Elsevier*, A paraître 2004.
- Morand H J-P, Ohayon R., interaction fluide structures, Masson 1992
- Peseux B, « Contribution à l'étude de structures partiellement ou totalement immergées en matériau homogène ou en composite, Thèse d'état ENSM, Nantes 1989.
- Korobkin A, Khabakhpasheva T., plane linear problem of the immersion of an élastique plate in an ideal incompressible fluid » *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 40, pp. 491-500,1999.
- Kvalsvold J., Faltisen O., « Hydroelastic modeling of wet deck slamming on multiple vessels », *Journal of Ship Research*, 1995
- Wagner, H., 1932, "Über Stoss und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten", *Z. Ang. Math. Mech.* **12**, 193-215.