



HAL
open science

SIMULATION MULTI-ECHELLE DES VOILIERS DE COURSE MULTICOQUES CONSTITUES D'AMES NOMEX®.

Laurent Gornet, Gilles Marckmann

► **To cite this version:**

Laurent Gornet, Gilles Marckmann. SIMULATION MULTI-ECHELLE DES VOILIERS DE COURSE MULTICOQUES CONSTITUES D'AMES NOMEX®. 14es Journées Nationales sur les Composites (JNC14), Mar 2025, Compiègne, France. hal-04927033

HAL Id: hal-04927033

<https://hal.science/hal-04927033v1>

Submitted on 3 Feb 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

**SIMULATION MULTI-ECHELLE DES VOILIERS DE COURSE
MULTICOQUES CONSTITUES D'AMES NOMEX®.**

**MULTI-SCALE PREDICTION OF MULTIHULL SAILBOATS MADE OF
NOMEX® CORES**

Laurent Gornet, Gilles Marckmann

École Centrale Nantes, GeM UMR-CNRS 6183, 1 Rue de la Noë, BP 92101, 44321
Nantes Cedex 3, France, Tel. (33)2 40 37 25 82, Fax. (33)2 40 37 25 73

e-mail : laurent.gornet@ec-nantes.fr

e-mail : gilles.marckmann@ec-nantes.fr

RESUME

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 des structures de type « sandwich » complexes 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. Le logiciel repose sur la théorie de l'homogénéisation des milieux périodiques et sur la détermination des modes de flambement du volume élémentaire représentatif (VER). Cette démarche, confortée par des résultats expérimentaux permet de construire une enveloppe de rupture fondée sur la compréhension des mécanismes locaux de dégradation. L'influence des peaux en carbone époxy sur les propriétés de l'âme est également discutée. Des simulations éléments finis multi-échelle menées lors de la phase de validation du catamaran code B1 (Orange II) sont exposées. Les stratégies de renforcement des « sandwich » mises en oeuvre sur des trimarans avant le départ de la course « La route du Rhum 2002 » sont également présentées.

ABSTRACT

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. The software is based on the periodic homogenization theory and on the buckling properties of the Representative Elementary Volume. This approach strengthens by experimental results leads to a failure criteria based on the mechanical understanding of local damage effects. The skin effect on the core properties is discussed for several carbon-fiber epoxy-matrix laminated skins. Multi-scale finite element predictions conducted for the validation of the catamaran code B1 (Orange) are revealed. Sandwich reinforcement strategies used for Trimarans before the start of the Rhum 2002 race are also presented.

MOTS CLES : Ames Nomex, Composites stratifiés, Voiliers multicoques.

KEYWORDS : Nomex Cores, Composite Laminates, Multihull Sailboats.

INTRODUCTION

Les simulations numériques éléments finis jouent un rôle déterminant lors du développement d'un nouveau voilier multicoque de courses océaniques. Ces voiliers de type catamaran ou trimaran sont constitués de structures « sandwich » complexes en carbone époxy dont la conception repose sur une technologie de pointe venant de l'aéronautique. Les stratifications de ces voiliers sont déterminées à partir 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 employées sur ces voiliers. Les simulations éléments finis sont menées pour de nombreux cas de chargements hydrodynamiques et véliques correspondant à différentes configurations de navigation. À titre d'illustration, deux maillages de voilier réalisés et mis en œuvre par notre équipe sont présentés sur les figures 1 et 2. Ces modèles éléments finis ont été réalisés lors de la phase de conception du code B1 (Fig. 1) et lors de la modification du BP3 (Fig. 2) avant la route du Rhum 2002. Nos travaux scientifiques sont généralement dévoilés dans la presse spécialisée par les architectes ou les équipes sportives (Gilles 2001, Carpentier 2003). Le comportement mécanique des différents matériaux élémentaires constituant le voilier doit être vérifié afin d'intégrer dans les simulations des données expérimentales en adéquation avec les structures fabriquées par les chantiers. Les essais mécaniques sont réalisés à partir d'éprouvettes normalisées et l'influence de l'effet d'échelle sur les valeurs des propriétés mécaniques doit être pris en considération afin d'intégrer des valeurs réalistes dans les simulations éléments finis du voilier considéré (Fig. 1 et 2).

SAMCEF - BACON : V 9.1-4

JUN 4 2003 13:47:56

Geometric scale
1000.

Numerical scale 1/1441.585705

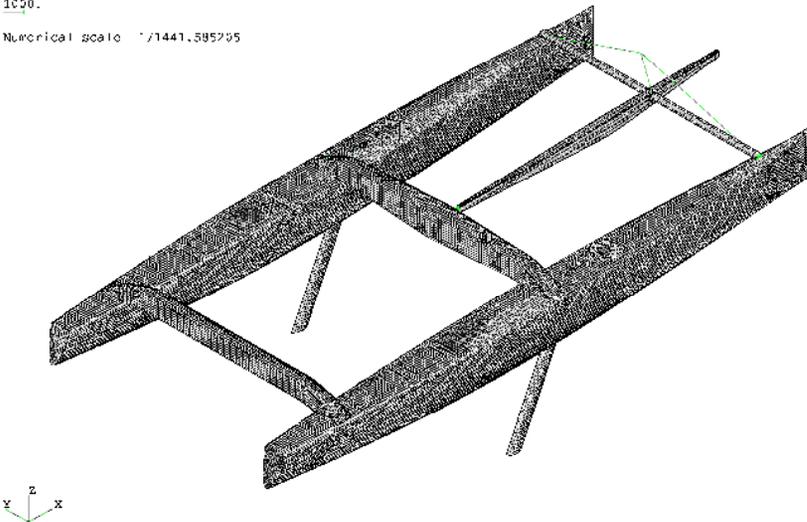


Figure 1 : Maillage éléments finis coques du voilier de course Code B1 (Gilles Ollier Multiplast).

Finite Element Mesh of the Code B1 sailing race boat (Gilles Ollier, Multiplast)

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 dans les domaines linéaire ou non-linéaire. Ces modèles numériques sont qualifiés expérimentalement afin de valider la démarche de modélisation.

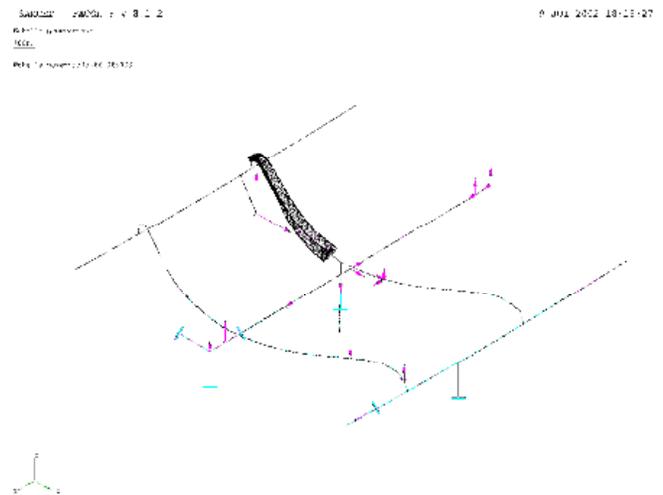


Figure 2 : Maillage éléments finis mixte poutres et coques du Trimaran de 60 pieds BP3 (Marc Lombard, CDK)

Finite Element Mesh of the 60' BP3 Trimaran sailing race boat (Marc Lombard, CDK)

Dans la suite, le calcul par éléments finis des propriétés mécaniques élastiques homogénéisées tridimensionnelles d'âmes nid d'abeilles Nomex® est mené à bien à l'aide de notre logiciel prototype NidaCore. Cet outil permet d'analyser finement le comportement mécanique de ces âmes et d'évaluer numériquement les contraintes de rupture. Les contraintes de cisaillement issues des simulations sont proches de celles qui sont déterminées expérimentalement par les fabricants. Comme le rappelle le document concernant les propriétés mécaniques des nids d'abeilles (Hexcel 1999), *Users should make their own assessment of the suitability of any product for the purposes required.* Par conséquent, les concepteurs de structures « sandwich » à peaux carbone époxy stratifiées doivent réaliser leurs propres validations. L'étude des propriétés mécaniques des constituants élémentaires (peau et âme) est une étape primordiale dans la phase de validation des structures. La simulation numérique des âmes est abordée par Grediac

(1993) et Hohe et Becker (2001). A titre d'exemple, les résultats issus des simulations réalisées avec le logiciel NidaCore permettent de nourrir les modèles tridimensionnels dédiés à l'étude des zones localement pontées (Fig. 3). Ce type de renforcement est pris en compte dans le modèle éléments finis global du voilier à l'aide d'une plaque équivalente dont les propriétés mécaniques sont issues d'une procédure d'homogénéisation fondée sur une cinématique de plaque.

Figure 3 : Modèle éléments finis tridimensionnel d'un renforcement par pontage
Tridimensional Finite Element modelling of a Scarf

ASPECTS THEORIQUES DU LOGICIEL « NIDACORE »

Ce logiciel prototype est fondé sur la mise en œuvre de la théorie de l'homogénéisation des milieux périodiques dans le cadre éléments finis. Le logiciel est développé à l'aide du langage de commande Gibiane du code éléments finis Cast3M-CEA. Outre la détermination des propriétés mécaniques tridimensionnelles, le logiciel permet également 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. Ce mode de rupture est présenté par Aminanda et al. (2003) et Gibson et Ashby (1988).

Caractéristiques élastiques homogénéisées

Une approche en déformation moyenne a été retenue pour la programmation du logiciel. Cette méthode conduit à déterminer l'opérateur de complaisance du VER à partir de conditions limites de type déplacements imposés. Il convient de rappeler que dans le cas des milieux périodiques l'approche en contrainte et en déformation moyenne sont équivalentes (Suquet 1982). Le processus d'homogénéisation est fondé sur la résolution de six problèmes élémentaires d'élasticité linéaire présentés ci-après. Ces six problèmes correspondent à des conditions limites telles que : $E_{kh} = 1$ et $E_{ij} = 0$ si $(i, j) \neq (k, h)$. Chaque problème élémentaire d'élasticité linéaire posé sur le VER (Y) est résolu par la méthode des éléments finis. Les équations sont présentées ci-après.

$$\operatorname{div}(\sigma(y)) = 0 \quad \sigma(y) = C(y) \varepsilon(u(y)) \quad \text{dans } Y$$

$$\varepsilon(u) = \operatorname{grad}_s(u(y))$$

$$\sigma(y) \vec{n}_{ext} = \vec{0} \quad \text{sur } \partial Y_{21}$$

$$\vec{u}(y) = E \vec{y} + \vec{v}_{per} \quad \text{sur } \partial Y_{22}$$

Les caractéristiques mécaniques homogénéisées du VER sont déterminées à partir de l'approche énergétique de Hill-Mandel. Ce théorème bien connu impose que l'énergie du VER est la moyenne de l'énergie de ses constituants élémentaires et il permet de déterminer le tenseur de rigidité :

$$\langle \sigma \varepsilon \rangle = \Sigma : E$$

$$\frac{1}{|Y|} \int \sigma : \varepsilon dy = E : (C^{VER} E)$$

Les constantes de flexibilité, à savoir les modules d'Young, coefficients de Poisson et modules de cisaillement du matériau homogène équivalent, sont déterminés à partir du tenseur des souplesses.

Enveloppe de stabilité en rupture

Les nids d'abeilles Nomex® sont connus pour avoir un comportement mécanique élastique linéaire fragile jusqu'à leur charge critique de flambement et l'on considère que sous des chargements quasi-statiques, cette charge correspond à leur limite d'utilisation. Les déformations critiques de flambement sont déterminées pour l'ensemble des cas de chargements par :

$$[K + \lambda^2 K_s] \bar{X}_\lambda = \bar{0}$$

Où K représente la raideur du VER, K_s est la raideur géométrique due à la précontrainte « s ». λ^2 est le coefficient multiplicateur du chargement, \bar{X}_λ est le mode propre de flambement associé à la valeur propre λ^2 . L'étude des modes de flambement élastiques linéaires d'Euler permet de déterminer les déformations critiques : $E_j^c = \lambda^2 E_j$.

Dans le cas d'un matériau dont le comportement homogénéisé est orthotrope, nous proposons de déterminer les six contraintes critiques élémentaires associées aux déformations critiques E_j^c en appliquant la loi de comportement homogénéisée $\hat{\sigma}_I^c = \hat{C}_{IJ} \hat{E}_J^c$. Les résultats obtenus montrent que les contraintes issues des essais mécaniques sont retrouvées.

PROPRIETES MECANIQUES DES NIDS D'ABEILLES NOMEX®

Les essais mécaniques menés par les fabricants sont classiquement réalisés à partir d'âmes nids d'abeilles 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 de la famille de Serendip. L'intégration numérique de cet élément est réalisée à l'aide de 27 points de Gauss. Le maillage du VER comporte un seul élément dans l'épaisseur élémentaire de la paroi et deux dans les parties à épaisseur double. Des études de convergence ont été réalisées pour différentes discrétisations et les maillages retenus sont optimaux vis-à-vis de la convergence numérique et du temps de calcul. Les simulations sont effectuées sous l'hypothèse des petits déplacements et des 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/m³ et d'une épaisseur de clinquant de 51µm. La dénomination ECA 4,8-29 (51) est équivalente pour une âme de section hexagonale.

Dans le cas d'un VER rectangulaire, les neuf géométries déformées sous l'action des chargements élémentaires sont présentées sur les figures 1 à 6. La base (1) (2) et (3) relative aux symétries matérielles est utilisée pour décrire le VER afin de limiter le nombre de simulations numériques. Les géométries déformées sous l'action des deux chargements de cisaillement hors plan lors du flambement sont présentées figure 7.

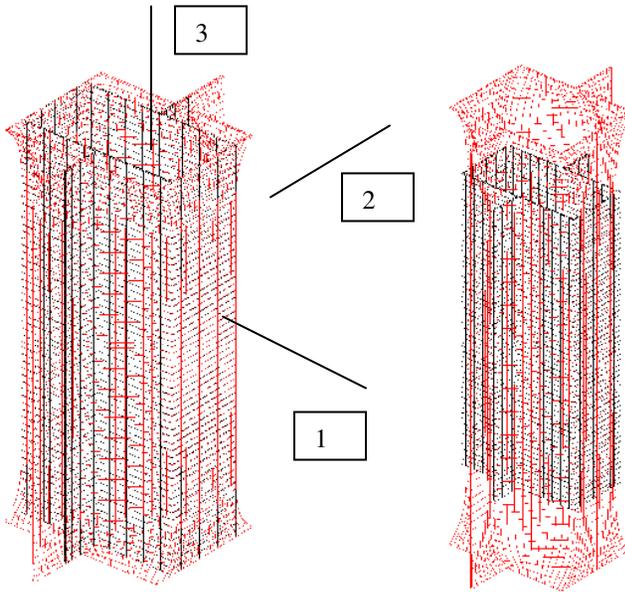


Figure 4 : Déformées du ECA-R pour les chargements ($E_{22}, E_{22} \text{ et } E_{33}$)

RVE ECA-R deformed shapes for loadings ($E_{22}, E_{22} \text{ et } E_{33}$)

T700S/M10 épaisseur 0,36mm	G_{23} (MPa)	G_{13} (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

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

ECA-R-29 (51) Mechanical properties with and without skin for 12,7 thickness

T700S/M10 épaisseur r 0,36mm	G_{23} (MPa)	G_{13} (MPa)	σ_{13}^C (MPa)	σ_{23}^C (MPa)
Aucun	12,3	8,25	0,212	0,213
Orienté à 0	13,1	9	0,420	0,220
Orienté à 45	13	9,3	0,418	0,221

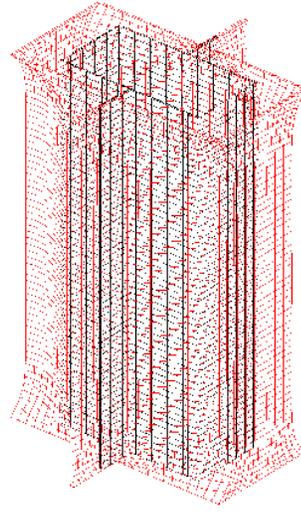
Tableau 2 : Caractéristiques mécaniques avec et sans peau pour une hauteur de 12,7mm d'un ECA-29 (51).

ECA-29 (51) Mechanical properties with and without skin for 12.7 thickness

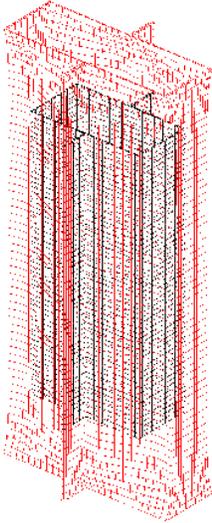
Le logiciel permet également d'appréhender finement les propriétés mécaniques quasi-statiques pour des nids d'abeilles de dimensions géométriques non usuelles. En particulier l'influence de l'épaisseur de l'âme sur les contraintes de cisaillement est retrouvée par la simulation. En première approche, ce phénomène est pris en compte dans les catalogues des constructeurs à l'aide d'un facteur de correction appliqué aux contraintes de cisaillement ultimes d'une géométrie de référence.



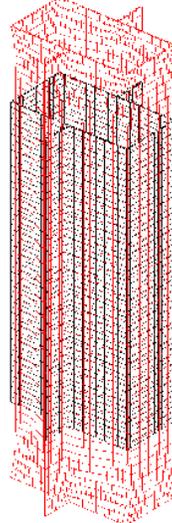
Deformed Shape at Test Strain EFAA 1.0000



Deformed Shape at Test Strain EFAA 1.0009



Deformed Shape at Test Strain EFAA 1.0009

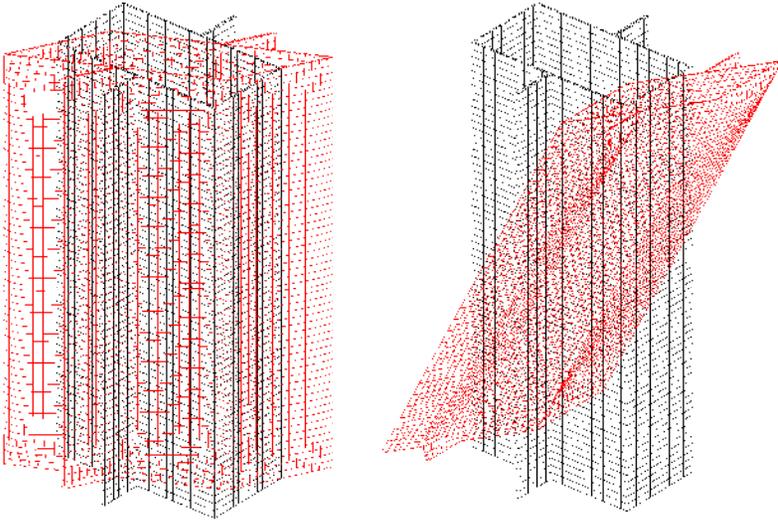


Deformed Shape at Test Strain EFAA 1.0009

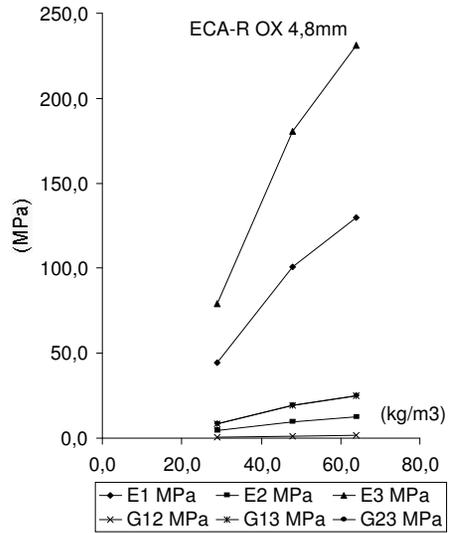
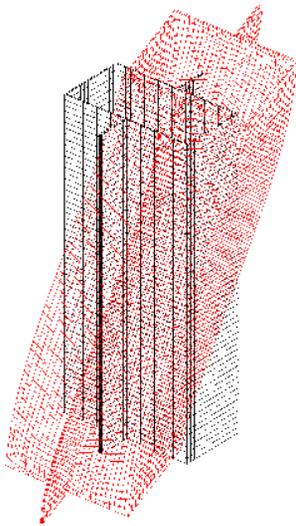
Figure 5 : Déformées du VER ECA-R pour les chargements

$$(E_{11}, E_{11} \text{ et } E_{22}, E_{11} \text{ et } E_{33}, E_{33})$$

RVE ECA-R deformed shapes for loading conditions $(E_{11}, E_{11} \text{ et } E_{22}, E_{11} \text{ et } E_{33}, E_{33})$



Deformed Shape at Test Strain EPDE 1.0003 Deformed Shape at Test Strain EPDE 1.0003



Deformed Shape at Test Strain EPDE 1.0003

Figure 6 : Déformées du ECA-R pour les chargements (E_{12}, E_{13}, E_{23})
RVE ECA-R deformed shapes for loading conditions (E_{12}, E_{13}, E_{23})

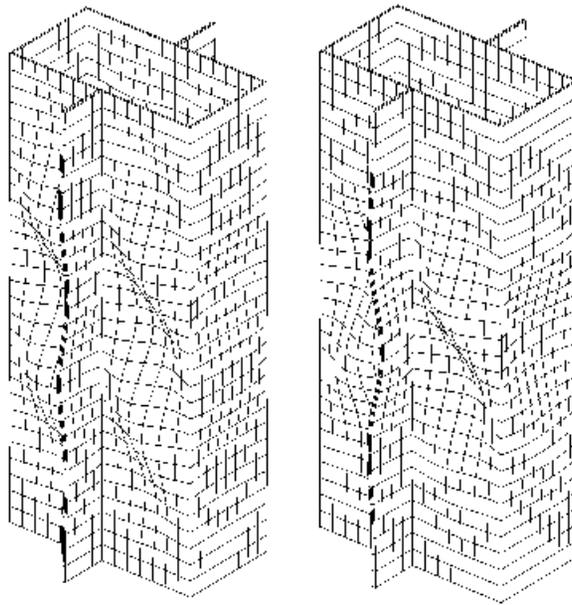


Figure 7 : Déformées du ECA-R pour les chargements de flambement (E_{13}, E_{23})

RVE ECA-R deformed shapes for buckling loadings (E_{13}, E_{23})

Dans le cas des nids d'abeilles à cellules hexagonales ou rectangulaires, les symétries conduisent à un comportement mécanique homogénéisé orthotrope. Le modèle Eléments Finis du VER fournit une approximation de qualité de l'ensemble des propriétés mécaniques du matériau homogène équivalent (Gornet et al. 2004).

Les caractéristiques mécaniques du papier Nomex® utilisées dans le logiciel sont déterminées de manière inverse par recalage des modules de cisaillement hors-plan de l'âme homogénéisée par rapport aux résultats expérimentaux. Les résultats qui illustrent cette étude sont déterminés à partir du catalogue du fournisseur (Euro-Composite 1999). 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 catalogues des constructeurs. Ces seules données sont manifestement insuffisantes pour réaliser des études Eléments Finis tridimensionnelles des renforts usuellement employés sur les voiliers (Fig. 3).

La seconde version du logiciel prototype NidaCore a permis d'obtenir un outil général en intégrant dans le VER l'interaction entre les caractéristiques mécaniques de l'âme et des peaux. Les peaux en carbone époxy peuvent être libres de contrainte ou bloquées pour simuler un accrochage du VER à un dispositif d'essais mécaniques. Les caractéristiques mécaniques de cisaillement hors-plan d'une âme de forme rectangulaire et hexagonale avec des peaux composées de tissus équilibrés carbone T700S/M10 posés à 0° ou à 45° par rapport aux directions d'orthotropie de l'âme sont présentées ci-avant dans les tableaux 1 et 2. L'influence de l'épaisseur de l'âme sur les caractéristiques mécaniques d'une âme rectangulaire ECA-R 4,8 d'une densité proche de 64 kg/m³ est présentée dans le tableau 3. Les simulations sont menées sur des hauteurs de 12,7 mm et 25,4 mm. Les résultats du tableau 3 sont cohérents avec le facteur de réduction des contraintes de cisaillement présenté dans Hexcel (1999).

Hauteur	G_{23} (MPa)	G_{13} (MPa)	σ_{13}^C (MPa)	σ_{23}^C (MPa)
---------	----------------	----------------	-----------------------	-----------------------

12,7 mm	32, 273	55, 3278	0, 155642	0,159171
25,4 mm	29, 9512	55, 2617	0,152708	0,141265

Tableau 3 : caractéristiques mécaniques d'un ECA-R 4,8-X pour des épaisseurs de 12,7mm et 25,4mm

ECA-R 4,8-X Mechanical properties for 12.7mm and 25.4mm thickness

CONCLUSION

Le logiciel prototype NidaCore développé par notre équipe permet d'obtenir des caractéristiques mécaniques quasi-statiques réalistes des âmes Nomex®. Des études expérimentales doivent être entreprises afin de valider la pertinence de la prise en compte des peaux en carbone époxy dans la dernière évolution du logiciel. La validation des propriétés mécaniques des matériaux carbone époxy et des âmes Nomex®, est essentielle pour élaborer les modèles éléments finis des voiliers océaniques.

Les résultats présentés dans ce chapitre sont issus des travaux réalisés sur les maxi-catamarans « Code 0 », « Code B1 » et sur le trimaran « BP3 » déjà évoqués. Ces voiliers sont plus connus sous le nom de leurs commanditaires à savoir les catamarans *Club Med, Innovation Explorer, Team Adventure, King-Fisher, Orange* et le trimaran *Banque PopulaireIII*.

BIBLIOGRAPHIE

- Aminanda Y., Castanie B., Barrau J.J., Thevenet P., 2003 "Etude expérimentale et modélisation de l'indentation des structures sandwichs à âme nid d'abeilles", *JNC 13*, pp.461-470.
- Carpentier P., 2003 "B1 The Cata", *course au Large*, 8, pp. 78-81.
- Euro-Composite 1999, "Nids d'abeilles Nomex®", <http://www.euro-composites.com>
- Gilles D., 2001, "Gilles Ollier, un architecte composite", *Bateaux*, 514, pp. 98-102.
- Gornet L., Marckmann G., Lombard M., 2004 "Détermination des coefficients d'élasticité et de rupture d'âmes nids d'abeilles Nomex® : homogénéisation périodique et simulation numérique", *Mécanique Industrie, A paraître*.
- Gornet L., J. Royer, S. Sablin. 2000 "Prévision de la dégradation de composites carbone époxy stratifiés : application aux voiliers multicoques", *JNC 12*. pp. 51-59
- Gibson L. J., Ashby M.F., 1988 "Cellular solids structures and properties", *Pergamon Press*. Oxford.
- Grediac M., 1993 "A finite element study of the transverse shear in honeycomb cores", *International Journal of Solids Structures*, 30, pp.1777-1788.
- Hexcel 1999 "HexWeb^{TB} Honeycomb Attributes and properties", *Hexcel Composites*
- Hohe J., Becker W., 2001 "A refined analysis of the effective elasticity tensor for general cellular sandwich cores", *International Journal of Solids Structures*, Elsevier, 38, pp.3689-3717.
- Suquet P., 1982 "Plasticité et homogénéisation", *Thèse de Doctorat d'état, Université Paris 6*.