



**HAL**  
open science

## Une approche expérimentale et numérique dédiée à l'identification des propriétés mécaniques des âmes nids d'abeilles Nomex®

Laurent Gornet, Gilles Marckmann, Steven Marguet, Syed Kamran-Ali, Jean  
Pierre Regoin

### ► To cite this version:

Laurent Gornet, Gilles Marckmann, Steven Marguet, Syed Kamran-Ali, Jean Pierre Regoin. Une approche expérimentale et numérique dédiée à l'identification des propriétés mécaniques des âmes nids d'abeilles Nomex®. Journées Nationales sur les Composites (JNC), Jun 2007, Marseille, France. hal-01391588

**HAL Id: hal-01391588**

**<https://hal.science/hal-01391588>**

Submitted on 3 Nov 2016

**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.

**UNE APPROCHE EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE DEDIEE A  
L'IDENTIFICATION DES PROPRIETES MECANQUES DES AMES NIDS  
D'ABEILLES NOMEX®.**

**EXPERIMENTAL AND NUMERICAL APPROACHES FOR THE  
IDENTIFICATION OF HONEY COMBS NOMEX® CORES MECHANICAL  
PROPERTIES**

Laurent Gornet, Gilles Marckmann, Steven Marguet, Syed Kamran-Ali,

Jean Pierre Regoin

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](mailto:laurent.gornet@ec-nantes.fr)

**RESUME**

Une démarche expérimentale combinée à une approche numérique est mise en œuvre afin de déterminer les propriétés mécaniques tridimensionnelles des âmes nids d'abeilles Nomex®. La méthode proposée est élaborée à partir d'essais mécaniques de cisaillement hors plan sur des éprouvettes quatre blocs et d'essais de compression normalisés ASTM. Les essais mécaniques sont analysés à l'aide de simulations éléments finis prenant en compte les défauts géométriques et les modes de rupture par instabilité. Les défauts géométriques, sont répartis de manière aléatoires suivant une distribution Gaussienne. Les propriétés mécaniques tridimensionnelles des âmes Nomex® sont finalement reconstruites à l'aide du logiciel prototype NidaCore. La campagne expérimentale, combinée aux résultats numériques permet de construire une enveloppe de rupture des âmes Nomex® fondée sur la compréhension des mécanismes locaux d'instabilité.

**ABSTRACT**

The mechanical properties of Nomex honeycomb cores are determined through a combined experimental and numerical approach. The proposed method relies on out-of-plan shear tests on four blocks specimens and on standard ASTM compressive tests. These mechanical tests are analyzed thanks to finite element simulations involving randomly distributed geometric defects and failure due to instabilities. The full three dimensional mechanical properties of Nomex honeycomb cores are then computed with the prototype software NidaCore by inverse scattering on available data. Moreover, the shape of failure of Nomex cores are predicted by the use of a crossed method involving experimental results and numerical simulations and based on the understanding of local instability mechanisms.

**MOTS CLES :** nids d'abeilles, âmes Nomex®, homogénéisation, modélisation éléments finis, compression, cisaillement, essais, carbon epoxy.

**KEYWORDS :** honeycombs, Nomex Cores, homogenization, finite element modelling, compression, shear, testing, carbon epoxy.

## INTRODUCTION

L'objet de cette étude est de mieux comprendre et de mieux modéliser le comportement mécanique des âmes nids d'abeilles Nomex® utilisées dans la réalisation des structures sandwich à peaux carbone époxy constituant les voiliers de courses transocéaniques (Gornet et al. 2006). Le comportement mécanique des différents matériaux élémentaires constituant le voilier doit être vérifié afin d'intégrer dans les simulations éléments finis des données expérimentales sur les matériaux en adéquation avec le mode d'élaboration des structures (Martin et al. 2006). Les travaux présentés sont relatifs à une démarche expérimentale et numérique combinée. Cette approche permet de déterminer le comportement mécanique tridimensionnel des âmes nids d'abeilles Nomex® sous l'action de sollicitations quasi-statiques. Les modes de rupture de ces nids d'abeilles à cellules hexagonales ou rectangulaires sont liés à des phénomènes de perte de stabilité (Gibson L. J., Ashby M.F., 1988). Leur destruction est due au flambement des parois qui conduit à leur détérioration plus ou moins progressive (Gornet et al. 2004). Le catalogue d'âmes Nomex® Hexcel (1999) indique que : « *Users should make their own assessment of the suitability of any product for the purposes required* », le message d'Euro-Composite (1999) est « *Les valeurs résultent de notre expérience et des essais et sont communiquées en bonne foi. Cela engage en aucun cas notre responsabilité en cas de perte ou des dommages subis* » .

Par conséquent, les âmes Nomex® doivent être validées par les concepteurs de structures afin de vérifier de manière pertinente leurs designs. Dans cette étude, la caractérisation du comportement mécanique tridimensionnel des âmes nids d'abeilles Nomex® est réalisée à l'aide d'une campagne expérimentale menée conjointement avec des simulations éléments finis. Les propriétés mécaniques tridimensionnelles des âmes Nomex® sont reconstruites à l'aide du logiciel prototype NidaCore développé au Laboratoire à partir du code éléments finis Cat3M-CEA (Gornet et al. 2004). Les premières simulations ont été validées à l'aide des catalogues des fabricants Hexcel et Euro-Composite (1999). D'un point de vue expérimental, nous proposons la caractérisation mécanique en compression hors plan à partir de la norme ASTM C365 alors que celle en cisaillement hors plan est fondée sur la proposition d'un essai non normalisé. Il convient de rappeler que l'essai de cisaillement (ASTM C273) largement utilisé par les fabricants de Nomex® pour qualifier leurs matériaux ne produit pas un état de cisaillement pur. Par conséquent, nous proposons d'utiliser une éprouvette comprenant quatre blocs de nids d'abeilles Nomex® assurant une cinématique de glissement pur. La géométrie de l'éprouvette a été déterminée à l'aide de nombreuses simulations éléments finis afin de vérifier la pertinence de ce type d'essai vis-à-vis de l'effet d'échelle. En particulier la présence de l'effet d'échelle mise en évidence numériquement a été confirmée expérimentalement. De plus, le comportement mécanique élastique ainsi que les contraintes ultimes sous l'action de sollicitations complexes ont été déterminés numériquement à partir du logiciel prototype NidaCore (Gornet et al. 2006). Ce logiciel repose sur la théorie de l'homogénéisation des milieux périodiques et sur la détermination des modes d'instabilité du Volume Élémentaire Représentatif. Les VER des nids d'abeilles comportant trois plans de symétrie orthogonal, ils conduisent à des milieux équivalents linéaires orthotropes. Les simulations éléments finis réalisées à l'aide du code NidaCore permettent non seulement de minimiser la campagne expérimentale mais également de définir l'enveloppe des contraintes de rupture sous l'action de sollicitations mécaniques complexes à partir de la compréhension des mécanismes locaux d'instabilité. Le mécanisme de rupture par

flambement est clairement admis dans la littérature (Gibson et Ashby 1988, Zhang J., M.F. Ashby 1992, Petras et Sutcliffe, 1999, 2000, Aminanda et al. 2005, Gornet et al. 2004, 2006). La pertinence de l'approche théorique proposée pour l'enveloppe de rupture est confirmée par les résultats expérimentaux issus du dispositif ARKAN présentés par (Petras A, Sutcliffe, 2000)..

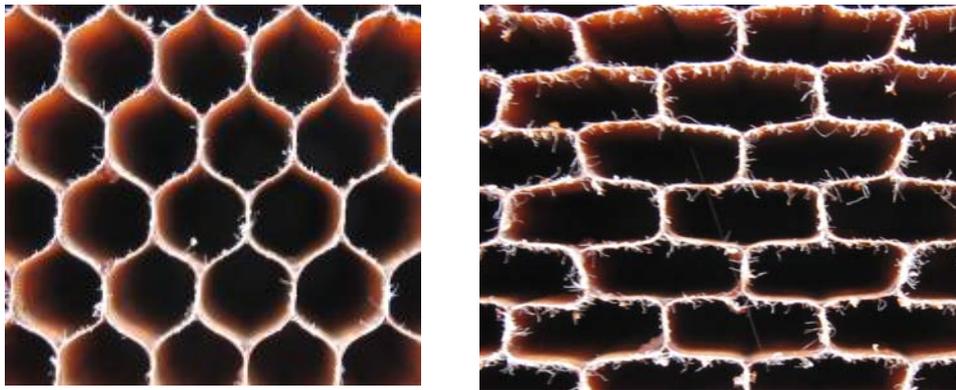


Figure 1 : Géométries Nomex® ECA et ECA-R 6,4 mm 64 kg.m<sup>-3</sup>  
*ECA and ECA-R 6,4 mm 64 kg.m<sup>-3</sup> Nomex® geometries*

### CAMPAGNE EXPERIMENTALE

Un grand nombre d'essais mécaniques faisant ou non l'objet de normes est proposé dans la littérature pour caractériser le comportement mécanique des âmes nids d'abeilles. On peut citer les essais mécaniques suivants : l'essai de délaminage des parois (ASTM C362), l'essai de compression (ASTM C365), l'essai de cisaillement (ASTM C273), l'essai de compression cisaillement ARKAN, ou encore, l'essai de flexion sur sandwich (ASTM C393). Dans cette étude, une base canonique de trois essais mécaniques associée à des simulations éléments finis, est proposée pour déterminer l'ensemble des propriétés mécaniques tridimensionnelles quasi-statiques des âmes nids d'abeilles Nomex® (Hexcel 1999, Euro-Composite 1999).

L'approche proposée est fondée sur : une éprouvette de cisaillement pur sens L, une éprouvette de cisaillement pur sens W et d'une éprouvette de compression hors plan normalisée ASTM (ASTM C365).

La campagne d'essais présentée a permis de caractériser le comportement mécanique de deux types d'âmes nids d'abeilles Nomex®. Les investigations expérimentales ont porté sur les géométries hexagonale ECA et rectangulaire sur-expansée ECA-R en diamètre 6,4 mm. Ces deux matériaux ont la même masse volumique (64 kg.m<sup>-3</sup>). Les études réalisées sur une hauteur normalisée de 12,7mm ainsi que sur la hauteur non standard de 40mm ont permis de vérifier l'influence de ce paramètre géométrique sur les propriétés mécaniques. Les essais ont été réalisés sur une machine de traction hydraulique quasi-statique MTS.

Le propriétés mécaniques mesurées à l'issue de la phase expérimentale sont : le module de compression ( $E_T$ ), la déformation à l'instabilité, les deux modules de cisaillement hors plan ( $G_L$  et  $G_W$ ) ainsi que les deux contraintes et déformations de rupture associées. Lors des essais mécaniques, la présence d'un effet d'échelle a été mise en évidence par l'utilisation de plusieurs dimensions d'éprouvettes. Ce phénomène a été retrouvé numériquement à partir d'études éléments finis.

### Essais de compression hors plan

Les essais de compression hors plan proposés dans (ASTM C365) permettent de déterminer le module de compression ( $E_T$ ) et la contrainte à rupture associée ( $\sigma_{TR}$ ). Le résultat de la compression d'une éprouvette de 40mm de hauteur est présenté figure 2. Les courbes de réponse contrainte déformation pour différentes vitesses de sollicitation sont montrées figure 3.



Figure 2 : Ecrasement d'une éprouvette ECA-R pour le chargement ( $E_T$ )  
*ECA-R failure shapes for loadings ( $E_T$ )*

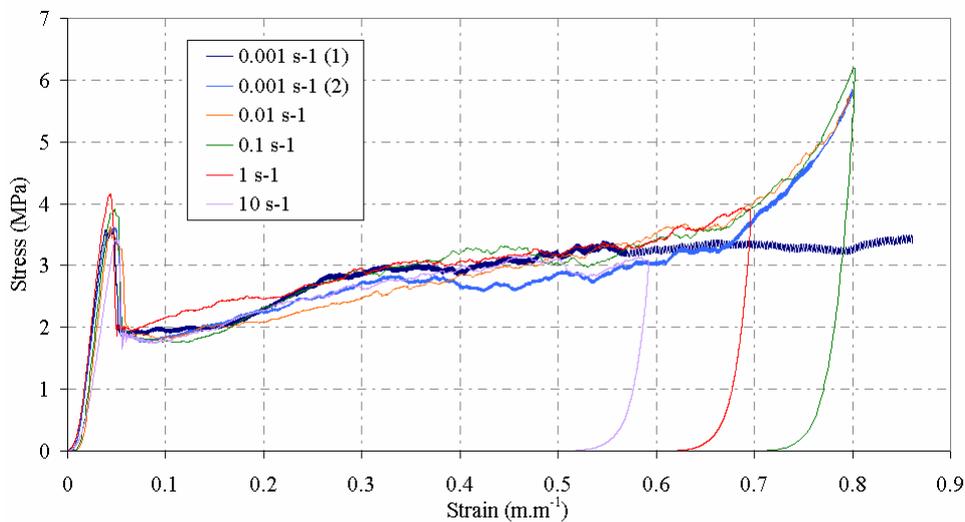


Figure 3 : Contrainte/déformation pour un ECA-R en compression  
*ECA-R under compressive loadings ( $E_T$ ), stress versus strain curve*

### Essais de cisaillement hors plan

Les essais de cisaillement hors plan sont élaborés à partir d'éprouvettes quatre blocs assurant une cinématique de cisaillement pure pour chacun des quatre blocs (figure 4). Ces essais permettent de mesurer les deux modules de cisaillement hors plan ( $G_L$  et  $G_W$ ). La courbe contrainte déformation établie à partir des essais de cisaillement est présentée (figure 5).

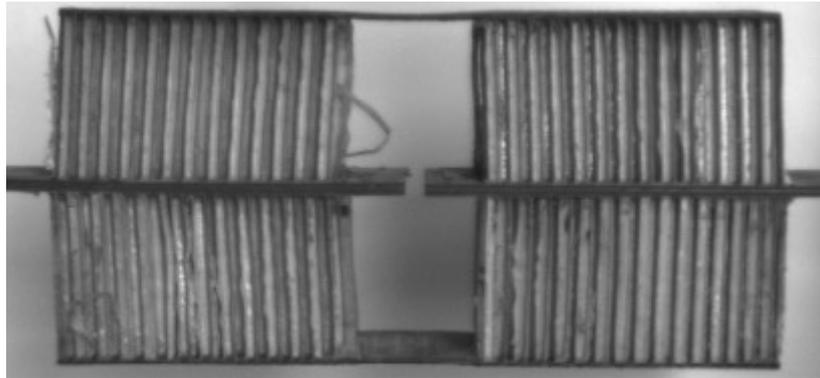


Figure 4 : Essai de cisaillement, configuration déformée ECA-R ( $E_L$ )  
*Shear test, initial and deformed configuration, ECA-R ( $E_L$ )*

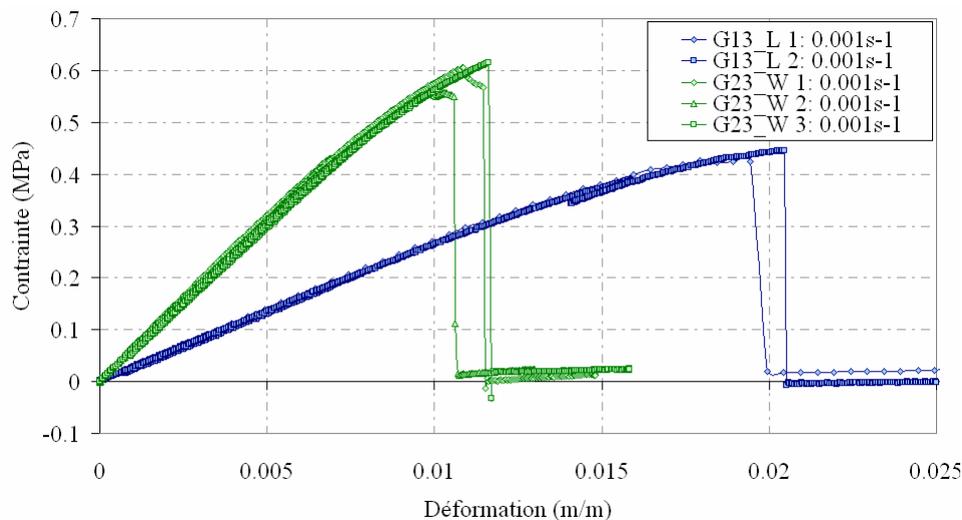


Figure 5 : Essais de cisaillement du Nomex ECA-R 6,4mm, 64 Kg m<sup>-3</sup> (40mm)  
*Nomex ECA-R 6,4mm, 64 Kg m<sup>-3</sup> (40mm), Shear tests*

### Effet d'échelle en cisaillement hors plan

La présence d'un effet d'échelle a été vérifiée expérimentalement sur des éprouvettes de cisaillement Nomex ECA-R 6,4mm, 64 Kg m<sup>-3</sup>. Les blocs cisailés ont été amputés successivement de 1/7<sup>ième</sup> ; 2/7<sup>ième</sup> ; 3/7<sup>ième</sup> ; 4/7<sup>ième</sup> ; 5/7<sup>ième</sup> et 6/7<sup>ième</sup> de leur surface initiale des blocs retenue. L'évolution des modules de cisaillement mesurés expérimentalement est présentée figure 6.

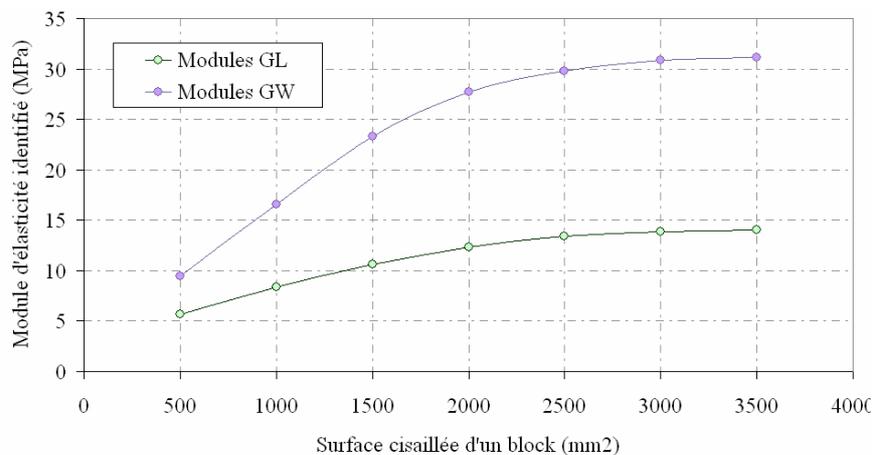


Figure 6 : Evolution des modules de cisaillement d'un bloc de Nomex ECA-R 6,4mm, 64 Kg m<sup>-3</sup> en fonction de la surface de l'éprouvette  
*Shear modulus evolution versus bloc shear surface for Nomex ECA-R 6,4mm, 64 Kg m<sup>-3</sup>*

### SIMULATION NUMERIQUE DE L'EFFET DE BORB EN CISAILLEMENT

Dans cette partie, des simulations Eléments Finis réalisées sur une rangée de cellules modélisées par des éléments coques ont permis de déterminer l'évolution du module de cisaillement hors plan en faisant varier différents paramètres géométriques.. Les simulations ont été réalisées en élasticité linéaire petite perturbation pour des hauteurs d'âme égales à 4 ; 12,7 ; 40 et 90 mm. La longueur de l'éprouvette virtuelle a été prise égal à 2 ; 4 ; 8 ; 12 ; 24 ; 48 ; ou 96 cellules. La répartition d'énergie dans le modèle éléments finis d'une rangée de cellules est présentée figure 7. L'effet de bord conduit à un effet d'échelle sur les propriétés de résistance de l'éprouvette.

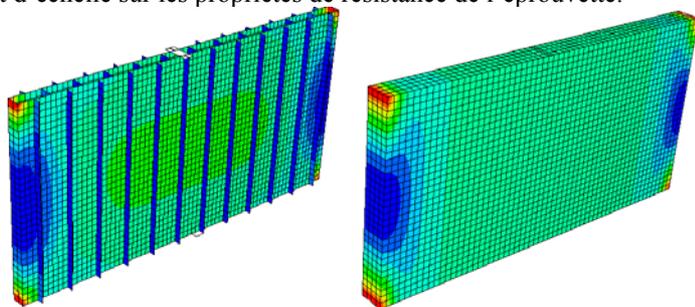


Figure 7 : Répartition de l'énergie ECA-R 6,4mm, 64 Kg m<sup>-3</sup> en cisaillement, et milieu homogène équivalent  
*Energy distribution for ECA-R 6,4mm, 64 Kg m<sup>-3</sup> and homogeneous equivalent body under shear loading.*

La figure 8 montre que pour une hauteur de bloc donnée, le module de cisaillement identifié tend asymptotiquement vers sa valeur stabilisée lorsque le nombre de cellules augmente. Dans le cas de l'éprouvette quatre blocs proposée, les longueurs de blocs doivent être de 127,2mm dans la direction L et de 157,2mm dans la direction W. Il convient de rappeler que la norme (ASTM C273-94) préconise pour son essai une longueur de bloc égale à 12 fois la hauteur de l'âme ce qui correspond dans notre cas à une longueur de 152,4mm. Pour une hauteur de bloc normalisée de 12,7mm (ASTM

C273-94), il semble nécessaire de prendre en compte au moins 24 cellules dans la direction de cisaillement pour obtenir un module de cisaillement qui ne traduise pas d'effet d'échelle (figures 8 et 9).

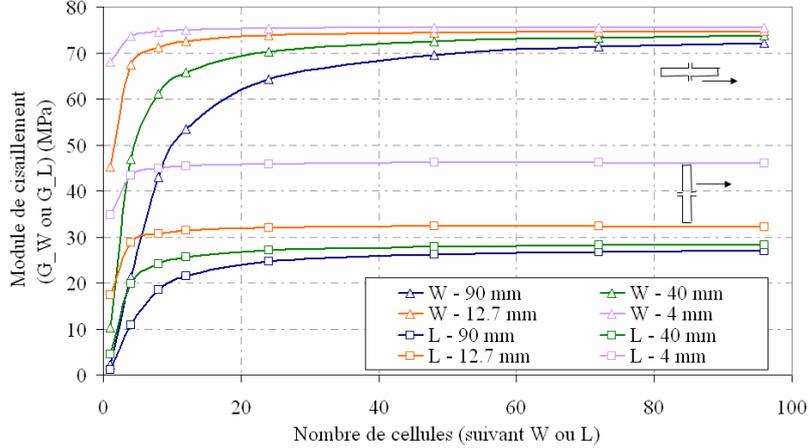


Figure 8 : Modules de cisaillement en fonction de la géométrie du bloc cisailé  
*Shear modulus versus number of Nomex cells ECA-R 6,4mm, 64 Kg m<sup>-3</sup>*

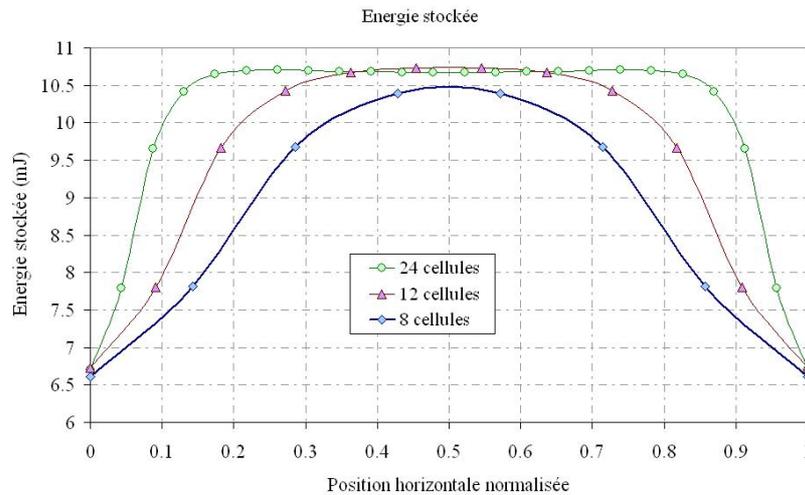


Figure 9 : Répartition de l'énergie ECA-R 6,4mm, 64 Kg m<sup>-3</sup> en cisaillement.  
*Energy distribution for ECA-R 6,4mm, 64 Kg m<sup>-3</sup> under shear loading*

### LE PROGRAMME EPROUVETTE VIRTUELLE

L'éprouvette virtuelle nommée "Virtual-sample" entièrement paramétrée est constituée d'éléments coques. Elle a été développée à l'aide du code éléments finis Cast3M afin de valider la pertinence des résultats expérimentaux. Cette éprouvette virtuelle peut être sollicitée en compression ou en cisaillement hors plan. Une zone de dépouillement interne peut être inspectée afin de valider la longueur de pénétration des effets de bord dans le bloc de nids d'abeilles Nomex®. L'influence de la zone d'effet de bord peut donc être évaluée numériquement à partir du calcul de l'énergie de

déformation. De plus, des imperfections géométriques peuvent être générées sur les cellules des nids d'abeilles à l'aide d'un bruit gaussien (figures 1 et 11). La recherche des modes de flambement permet alors de déterminer les contraintes ultimes comme pour le logiciel NidaCore. Les défauts géométriques introduisent une multitude de modes d'instabilité de valeurs proches. La zone de bord est paramétrable et non représentée autour de l'éprouvette sur la figure 10. Le dépouillement des propriétés mécaniques hors de cette zone bord conduit à des valeurs plus fortes que si l'on considère toute les cellules de l'éprouvette. Ces simulations numériques permettent de valider les résultats issus des essais mécaniques. Ces résultats sont également comparés au milieu périodique infini.

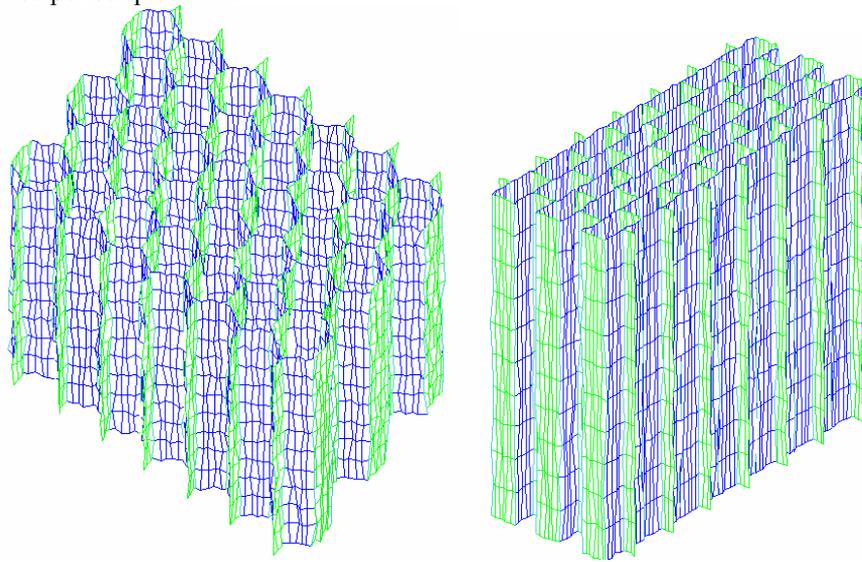


Figure 10 : Défauts aléatoires dans la zone interne des éprouvettes virtuelles.  
*Uncertain flaws in center of virtual samples.*

### 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 (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 modules de cisaillement hors plan  $G_L$  et  $G_W$  et les contraintes de cisaillement de rupture associées  $\sigma_L$  et  $\sigma_W$  ainsi que la contrainte d'écrasement  $\sigma_T$  sont les seules données usuellement fournies par les catalogues des constructeurs. La seconde version du logiciel prototype NidaCore a permis d'obtenir un outil plus général en intégrant dans le Volume Élémentaire Représentatif l'interaction entre les caractéristiques mécaniques de l'âme et des peaux (Gornet et al. 2006). Outre la détermination des propriétés mécaniques tridimensionnelles, le logiciel permet également de déterminer toutes les contraintes ultimes de stabilité et ainsi de créer une enveloppe de rupture. A titre d'illustration, l'application de chargements combinés de compression cisaillement suivant les sens L et W sont présentées figures 11 et 12 pour une âme *ECA-R 64 Kg m<sup>-3</sup>*.

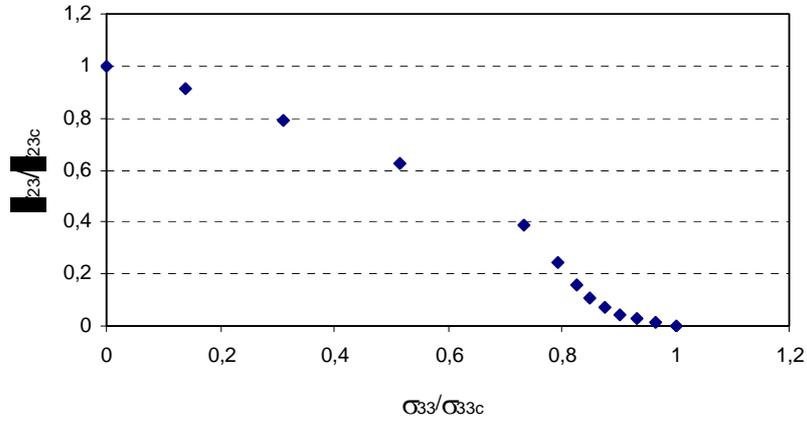


Figure 11 : Critère de rupture d'un ECA-R 64 Kg m<sup>-3</sup>.  
*Failure Criteria for ECA-R 64 Kg m<sup>-3</sup>*

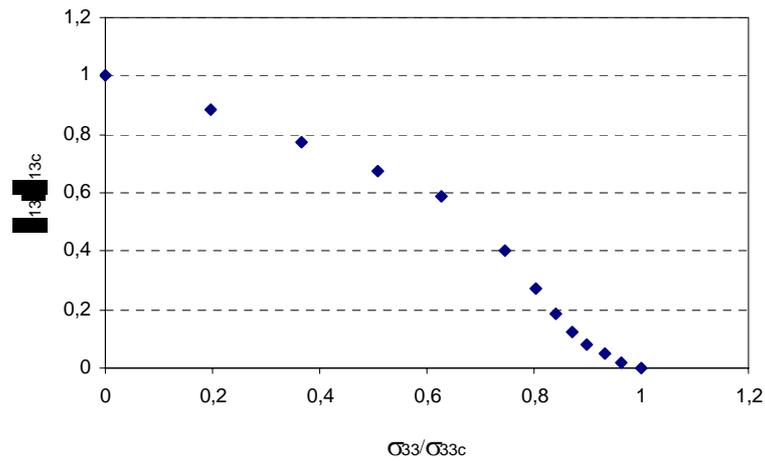


Figure 12 : Critère de rupture d'un ECA-R 64 Kg m<sup>-3</sup>.  
*Failure Criteria for ECA-R 64 Kg m<sup>-3</sup>*

Ces contraintes ultimes sont déterminées à partir des modes de flambement du VER. Les simulations numériques réalisées à l'aide du logiciel NidaCore sont conforme aux résultats expérimentaux de Petras et Sutcliffe obtenus à partir d'un dispositif expérimental ARKAN. Cependant, il convient de noter que le changement de pente observé numériquement (figures 11 et 12) est certainement masqué dans les travaux de Petras et Sutcliffe (2000) par le faible nombre de points expérimentaux.

## CONCLUSION

Une base canonique de trois essais mécaniques associée à des simulations éléments finis est proposée pour déterminer l'ensemble des propriétés mécaniques tridimensionnelles quasi-statiques des âmes Nomex®. L'approche proposée est fondée sur, une éprouvette de cisaillement pur sens L, une éprouvette de cisaillement pur sens W et d'une éprouvette de compression hors plan normalisée ASTM. La pertinence des essais mécaniques et en particulier de l'effet d'échelle est validée à l'aide du programme virtual-sample. La démarche expérimentale menée en interaction avec des études sur le logiciel prototype Nidacore développé à partir du code éléments finis Cast3M-CEA permet d'évaluer les contraintes de rupture sous l'action de chargements complexes sans réaliser d'essais mécaniques supplémentaires de type ARKAN.

### BIBLIOGRAPHIE

- Aminanda, Y B. Castanié, JJ Barrau, P. Thevenet, 2005 Experimental analysis and modeling of the crushing of honeycomb cores, *Applied Composite Materials*, pp. 213-227.
- Euro-Composite 1999, Nids d'abeilles Nomex®, <http://www.euro-composites.com>
- Gibson L. J., Ashby M.F., 1988 Cellular solids structures and properties, *Pergamon Press*. Oxford.
- 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*, pp. 595-604.
- Gornet L., Marguet S., Marckmann G., 2006 Failure criteria and effective elastic properties of Nomex® honeycomb cores : modelling and experimental validation, *International Journal Computer Material & Continua*, Tech science Press, 4, 2.
- Hexcel 1999 HexWeb<sup>TB</sup> Honeycomb Attributes and properties, *Hexcel Composites*
- Martin F, Alesandrini B., Gornet L., Markmann G., Roland P., Gilles Ollier Design Team, 2006 Conception d'un grand multicoque de course au Large : l'exemple d'«Orange II». *Association Technique Maritime et Aéronautique*.
- Petras A, Sutcliffe, 1999 Failure Mode Maps for Honeycomb Sandwich panels, *Composite Structures*, 44, 237-252.
- Petras A, Sutcliffe, 2000 Indentation failure analysis of sandwich beams, *Composite Structures*, 30, pp. 311-318.
- Zhang J., M.F. Ashby, 1992 The Out of Plane Properties of Honeycombs, *International Journal of Mechanical Sciences*, 35 (5) pp. 475-489.