



**HAL**  
open science

# Modélisation et identification expérimentale multi-échelle du comportement non linéaire d'une âme d'un matériau sandwich plié

Christophe Cluzel, Emmanuel Baranger, Olivier Dorival, Fatima Razzouck

► **To cite this version:**

Christophe Cluzel, Emmanuel Baranger, Olivier Dorival, Fatima Razzouck. Modélisation et identification expérimentale multi-échelle du comportement non linéaire d'une âme d'un matériau sandwich plié. 17e Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers, France. pp.1. hal-01023413

**HAL Id: hal-01023413**

**<https://hal.science/hal-01023413>**

Submitted on 12 Jul 2014

**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.

# Modélisation et identification expérimentale multi échelle du comportement non linéaire d'une âme de matériau sandwich plié

## *Modelling and multiscale experimental identification of an origami-like sandwich core*

Christophe Cluzel<sup>1,2</sup>, Emanuel Baranger<sup>1</sup>, Olivier Dorival<sup>1</sup> et Fatima Razzouck<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LMT-Cachan (ENS Cachan/CNRS/UPMC/PRES UniverSud Paris)  
61 av. du Président Wilson, F-94230 Cachan, France

<sup>2</sup> IUT-SGM Evry, rue du Père Jarlan, F-91025 Evry Cedex  
e-mail : cluzel@lmt.ens-cachan. fr, baranger@lmt.ens-cachan.fr

### Résumé

Cette étude porte sur une approche expérimentale dédiée à l'identification d'un modèle de comportement d'une âme pliée. Le comportement de type flambage de l'âme est modélisé jusqu'à la formation de plis dans le papier. Cette âme est réalisée par pliage continu de type origami, d'une feuille composite de mat de fibres aramide pré-imprégné d'une matrice Phénolique. Pour optimiser la géométrie de pliage, une modélisation du comportement de l'âme a été réalisée par éléments finis à partir de la description de la géométrie du pliage. L'objet de cet article est de présenter la démarche expérimentale utilisée pour valider la réponse élastique en cisaillement de l'âme, mais également pour alimenter la base de données matériau du papier, notamment en flexion. La validation est réalisée à l'échelle macroscopique par un essai de vibration d'un sandwich. Le module de cisaillement de l'âme est alors obtenu par recalage d'un macro-modèle. Par contre, à l'échelle du papier, un montage flambage basé sur une colonne de Shanley est exploité pour identifier le comportement en flexion du papier avec l'évolution de l'endommagement et la formation d'un pli localisé formant une liaison de type pivot parfaitement plastique.

### Abstract

This study presents the experimental approach developed to identify the out-of-plane behaviour model of a folded core up to the global peak load. This material is made of aramid fibre with phenolic impregnated paper folded by an origami like continuous process. In order to optimise the fold geometry, a finite element meso-model had been defined. The objective of the present article is to propose an experimental approach that gives all the material data needed both to validate the core shear elastic modulus, and to know the elastic and anelastic bending paper behaviour which is needed for a predictive numerical simulation. The proposed approach handles the problem at different scales: fibre, paper and core scales. At the macro-scale, the core shear modulus is identified by vibration tests of a sandwich. But at the paper scale, buckling test based on a shanley column has been used to identify the paper bending behaviour including damage evolution and the formation of plastic hinge.

**Mots Clés :** Sandwich, Comportement d'âme, Essais de flexion, Ame pliée

**Keywords :** Sandwich, core mechanical behaviour, Bending tests, Folded core

## 1. Introduction

Dans le cadre d'un projet européen CELPACT, un nouveau type d'âme de matériaux sandwichs a été étudié. Il est réalisé par un pliage continu de type origami d'un papier de fibres aramide pré-imprégné d'une résine phénolique [1]. L'objectif final est de pouvoir optimiser le pliage par l'utilisation d'une modélisation fine de son comportement. Les propriétés d'une âme de sandwich sont principalement la rigidité en cisaillement et l'endommagement en compaction et cisaillement. Le comportement en compaction de ce type d'âme, est fortement piloté par des mécanismes de flambage et semble non-linéaire dès le début du chargement.

Comme pour le nid d'abeille Nomex™, l'âme étudiée est réalisée à partir d'une feuille N637 de papier pré imprégné. Mais dans ce cas, l'âme est obtenue par un pliage continu d'une unique feuille comme en origami [2]. Pour définir la position des plis, des marquages de la feuille plane sont réalisés par fraisage léger ou par roulage. Les géométries de pliages ainsi que la densité de plis peuvent être modifiées en fonction des propriétés recherchées.

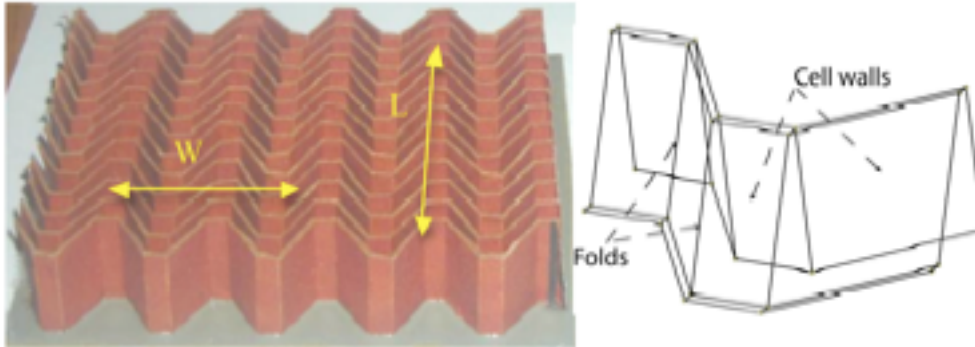


Fig. 1 : Âme pliée ref. CELFACT 31 et sa cellule élémentaire

L'âme présentée figure 1 correspond à un pliage de moyenne densité. Sur la structure d'âme ainsi réalisée, deux directions sont définies : sens L pour la direction continue et W pour la direction coupée (largeur initiale du papier). Les principales directions de sollicitations macroscopiques de l'âme sont en compaction (direction normale au plan moyen) et en cisaillement hors plan (sens L et sens W). Le comportement des plis parallèles au plan moyen n'influe pas sur le comportement du sandwich car ils sont figés dans la colle entre âme et peau. La décohésion âme/peau fait l'objet d'une analyse spécifique, mais n'est pas abordée dans cette présentation. Par contre les autres plis (notés "Fold" sur la figure 1) interviennent directement dans le comportement en compression hors plan.

Généralement, dans un sandwich, les composantes élastiques importantes sont les modules de cisaillement hors plan alors que la caractérisation de la dégradation porte à la fois sur le cisaillement et sur la compression hors plan. Le comportement de ce type d'âme est piloté à l'échelle du papier par des mécanismes de flambage. En comparaison avec les nids d'abeilles, une spécificité de ces âmes pliées avec des facettes inclinées par rapport à la normale au plan est la présence de défauts de rectitude des arrêtes pliées. Une simulation du procédé de pliage permet de générer des défauts de rectitude des arrêtes parfaitement cohérent avec les mesures effectués sur l'âme pliée [3]. L'exploitation de la géométrie de l'âme ainsi définie est réalisée par élément fini. La simulation du comportement élastique en cisaillement n'est pas affectée par la présence de ces défauts, par contre, dans cet article [3], il est montré que la prise en compte des défauts de rectitude des arrêtes affecte à la fois la charge limite d'instabilité, mais également le comportement élastique en compression.

Les simulations présentées figure 2 intègrent l'endommagement diffus du papier présenté au chapitre 3. Elles montrent que ne pas prendre en compte les défauts géométriques de ce type d'âme peut modifier complètement la relation d'homogénéisation entre le comportement élastique du papier et la zone quasiment linéaire du comportement.

Pour identifier expérimentalement les données nécessaires à la modélisation prédictive du comportement d'une âme avec un pliage donné, il est important de séparer les données élastiques des non linéarités géométriques et matériau des constituants de base. L'objectif de l'étude expérimentale présentée ci-après est de décrire les différentes démarches expérimentales permettant à la fois de comprendre les mécanismes de dégradation, de caractériser le plus précisément possible le domaine élastique et les évolutions d'endommagement du papier lors d'une sollicitation de flexion engendrée par le flambage.

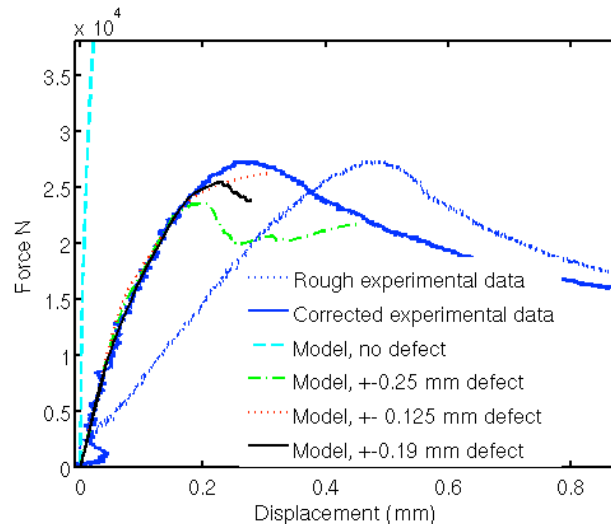


Fig. 2 : Âme pliée ref. CELPACT 31 et sa cellule élémentaire de  $120 \times 107 \text{ mm}^2$ .

Les principales sollicitations du papier sont de la compression, puis de la flexion. L'identification est alors complexe, car le comportement en compression d'un papier de 0,36 mm d'épaisseur est toujours fortement influencé par le flambage. Les essais réalisés ont pour objectif d'une part d'identifier le comportement élastique en compression pur et flexion du papier, mais également de définir les mécanismes d'endommagement et identifier la fonction d'évolution correspondante.

Pour constituer la base de données expérimentales, la démarche est basée sur une exploitation de trois échelles d'analyses combinées à la réalisation d'essais spécifiques pour chaque partie.

L'échelle microscopique donne une information qualitative sur la présence de mécanismes de dégradation dans l'épaisseur du papier.

L'échelle mésoscopique correspond directement à l'échelle de la modélisation éléments finis du papier. Les informations sont quantitatives, mais les difficultés expérimentales sont fortes à cause de la forte tendance au flambage qui perturbe les répartitions de contraintes.

L'échelle macroscopique permet de décrire le comportement de l'âme dans un sandwich. Les résultats sont également quantitatifs, mais les essais sont différents selon que les paramètres à identifier soient le domaine élastique, l'évolution non linéaire ou le comportement post pic.

## 2. Essais Macroscopiques sur sandwich.

Deux domaines du comportement sont abordés : le domaine élastique linéaire, qui est limité à des petites déformations compte tenu de la faible zone linéaire, et le domaine de dégradation de l'âme.

### 2.2 Comportement élastique – Cas du cisaillement hors plan

Pour mesurer le comportement en cisaillement de l'âme, J.M. Berthelo présente dans [4] une démarche de type flexion 3 points permettant une caractérisation du module de cisaillement élastique de l'âme, mais pour le sandwich dont nous disposons d'une longueur des peaux de 298 mm et d'épaisseur entre deux peau 20,3 mm, la flèche au centre dans le domaine élastique linéaire est de l'ordre du 1/100 mm. Avec une telle raideur, la mesure manque de précision. Un essai cisaillement basé sur la mesure de translation relative des deux peaux détaillé dans la norme ASTM C273 ou même amélioré en le symétrisant comme le propose L. Gornet dans [5], permet une identification via une simulation numérique pour palier à la non homogénéité du champ de déformations de cisaillement. Mais la réponse de ce type d'essai normalisé sur une structure CELPACT présenté dans [6] montre une réponse avec une non linéarité dès le début de la courbe contrainte/déformation. De plus, la précision d'une mesure de module à partir d'une mesure de

déplacement globale est toujours difficile à obtenir. Il est possible d'améliorer la qualité de mesure en réalisant une identification différentielle par rapport à un essai de référence sur une éprouvette infiniment rigide par rapport à la pièce, mais pour une identification purement élastique, la démarche proposée ci-après consiste à réaliser un essai de vibrations forcées. La sollicitation est alors identique à celle utilisée dans les calculs dynamiques et les amplitudes sont suffisamment faibles pour s'assurer un comportement élastique. Les mesures de vitesses sont obtenues avec un vélocimètre laser. Les déplacements obtenus par intégration sont très précis y compris pour des amplitudes de déplacement d'ordre inférieur au micromètre. La mesure de la réponse en fréquence est renouvelée sur tous les points d'un maillage. La reconstruction de la réponse temporelle permet de visualiser les principaux modes propres. Pour s'assurer la présence de modes liés au cisaillement de l'âme, une optimisation du placement des masses sur l'éprouvette a été réalisée sur une modélisation analytique de type poutre. Le choix retenu consiste à coller trois masses sur une peau comme présenté figure 3. L'ordre de grandeur est de 1kg par masse d'extrémité et 2 kg pour la masse au centre. L'ensemble est posé sur une mousse et l'excitation est réalisée à l'aide d'un pot vibrant. Deux directions d'âmes sont testées : sens L dans la direction longitudinale de l'éprouvette figure 3 – gauche et sens W dans la direction longitudinale de l'éprouvette figure 3 – droite. Pour chaque point de mesure, le pot réalise un balayage en fréquence. Pour les 273 points du maillage figure 4, un essai dure ¼ d'heure.

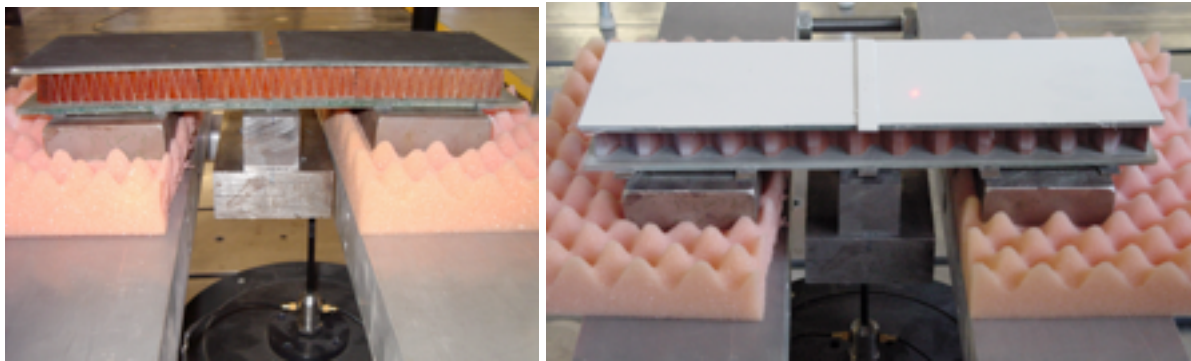


Fig. 3 : Montage d'essai dynamique, sens L (à gauche) et sens W (à droite)

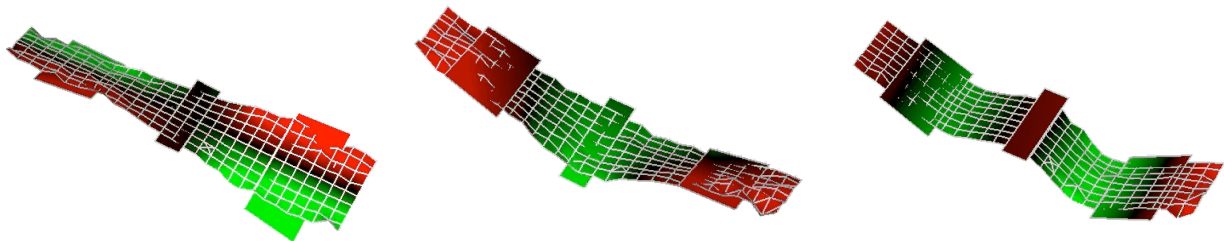


Fig. 4 : Construction expérimentale des trois principaux modes propres sollicitant l'âme en cisaillement. Les trois modes représentés sont torsion antisymétrique (261Hz), Torsion symétrique (279Hz), Cisaillement symétrique (681Hz)

Les quatre modes retenus sont (1) Torsion antisymétrique ; (2) Torsion symétrique ; (3) Cisaillement antisymétrique et (4) cisaillement symétrique. Les fréquences obtenues pour ces quatre modes sont données dans le tableau 1 pour chaque direction d'éprouvette.

Forme du mode	Fréquence mesurée sens L	Fréquence mesurée sens W
Mode (1) Torsion antisymétrique.	261 Hz	258 Hz
Mode (2) Torsion symétrique.	279 Hz	280 Hz
Mode (3) Cisaillement antisymétrique.	681 Hz	679 Hz
Mode (4) Cisaillement symétrique.	758 Hz	760 Hz

Tab. 1 : Fréquences mesurées de chaque mode pour les deux directions d'essais.

Ces résultats montrent que pour cette configuration de pliage Ref CELPACT 31, il y a très peu de différence de comportement entre les deux directions de cisaillement. Cette tendance est confirmée dans [7] sur une configuration de pliage proche avec des essais normalisés qui présentait un écart de 6 % sur les deux modules. Pour réaliser l'identification, du module de cisaillement, il est nécessaire de tenir compte du champ de déformation très inhomogène. Un ensemble de simulations par éléments finis a été réalisé avec un comportement isotrope en cisaillement. Les données recalées [8] sont le module des peaux et le module de cisaillement de l'âme dont l'influence est majoritaire. Le module obtenu de  $G_{\text{âme}} = 85 \text{ MPa}$  permet une erreur cumulée sur les fréquences propres de 2,8 %. La mesure est donc basée sur les valeurs des fréquences propres alors que la visualisation des modes mesurés fig. 4 ou calculés numériquement fig. 5 permet simplement de vérifier que ce sont les mêmes cinématiques des modes simulés et mesurés.

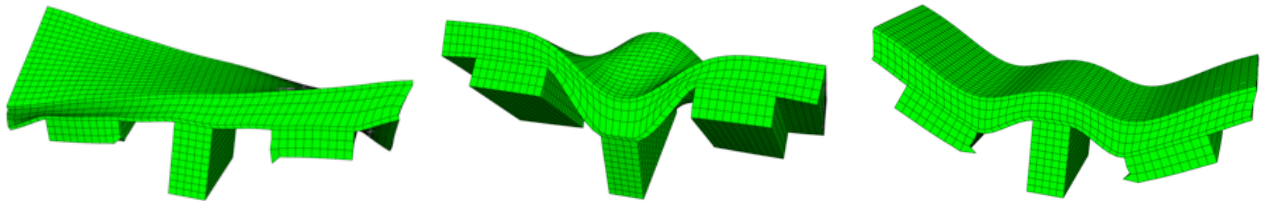


Fig. 5 : Simulation 3D des trois principaux modes propres sollicitant l'âme en cisaillement sens  $W$  correspondants aux trois mesures de surface présentés sur la figure 4.

### 2.3 Comportement non linéaire.

Pour obtenir l'évolution du comportement non linéaire en cisaillement, l'essai normalisé DIN 53294 présenté sur une âme CELPACT dans [6] est utilisable. Pour le comportement macroscopique de compression hors plan, un essai de compression a été réalisé sur un sandwich. Le plateau inférieur est rotulé et l'exploitation des résultats est réalisée par mesure différentielle par rapport à la réponse du test de compression des deux plateaux de chargement en contact direct. On constate sur la figure 6 que la correction de mesure liée à la rigidité du montage est non négligeable.

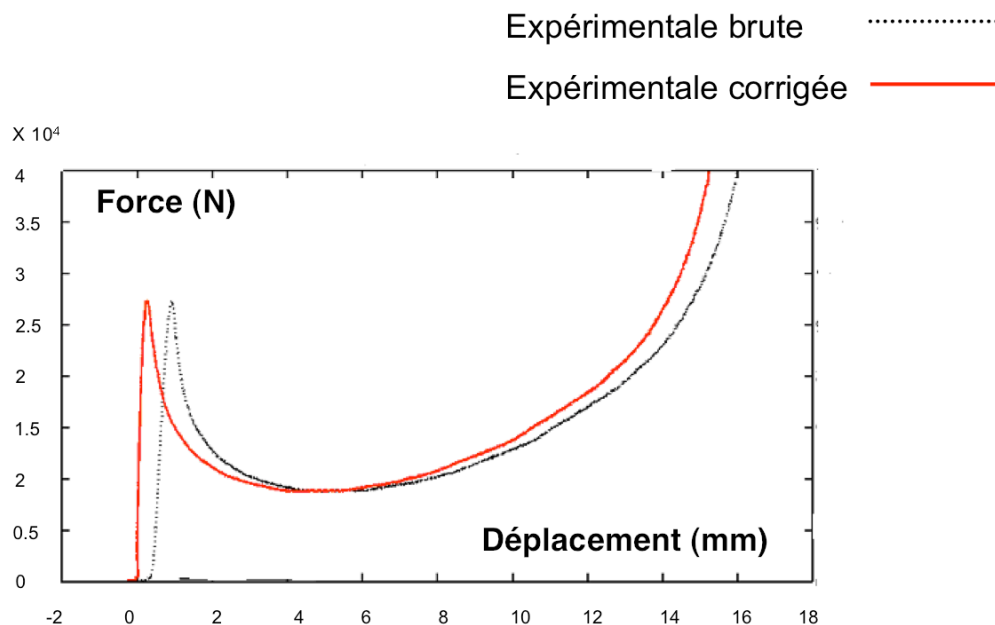


Fig. 6 : Essai de compression hors plan : Courbe charge déplacement avec correction de la rigidité du montage

Lors de la compaction, les flans et les arrêtes sont déformés très rapidement (Fig. 7-a, 7-b, 7-c) puis augmentent progressivement jusqu'à formation de plis marqués dans chaque cellule au delà de la charge maximale (Fig. 7-c à 7-d).

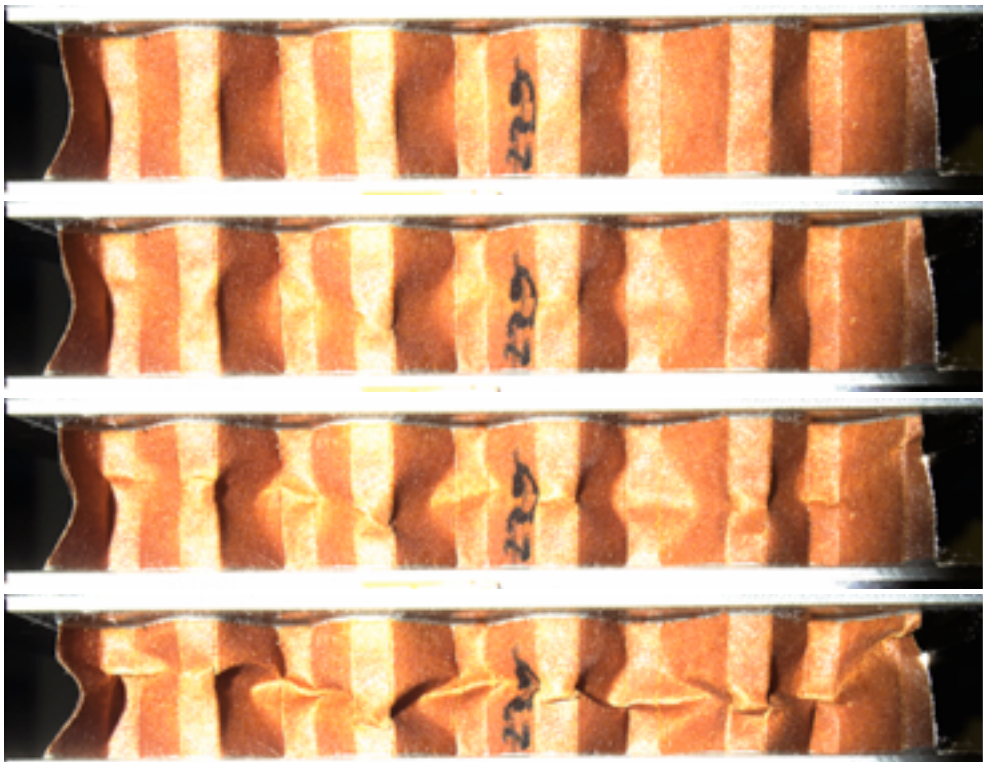


Fig 7-a

Fig 7-b

Fig 7-c

Fig 7-d

Fig. 7 : Essai de compression d'une âme CELPACT : fig. 6-a correspond au tout début de la charge avec flambage initial des flans et une accentuation du défaut de rectitude des arrêtes ; à la moitié de la charge maximale fig 7-b ouverture ou fermeture des plis avec augmentation de la courbure ; au niveau de la charge maximale fig.7-c Chaque cellule localise la dégradation en formant un pli ; puis poste pic de chargement, fig. 7-d, accentuation de l'angle de fermeture de chaque pli.

Parmi les modes de dégradation apparents lors des essais de compression hors plan, il y a des déchirement (fig. 8-c) et des délaminages (fig. 8-b), mais la grande majorité des dégradation sont liées à la formation de plis sur les flans du papier (fig. 8-a).



Fig. 8 - a : Plis



Fig. 8 - b : Délaminage

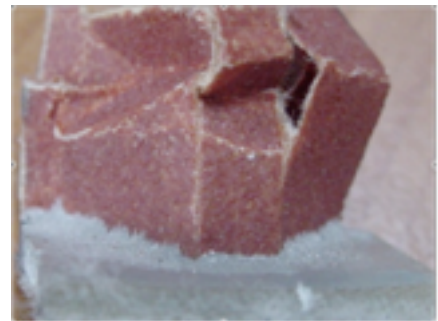


Fig. 8 - c : Déchirement

### 3. Analyse mésoscopique : Essais de flexion jusqu'à rupture

Après l'identification du comportement élastique compatible entre compression et flexion, le principal mécanisme de dégradation de l'âme est lié une sollicitation de flexion. Un essai de flexion est donc recherché mais permettant une courbure très importante. Un essai de flambage direct d'une feuille de papier la plus petite possible, mais ayant un élancement important permet d'atteindre un rayon de courbure maximal de  $0,2 \text{ mm}^{-1}$  mais sans maîtrise de la formation d'un pli. La procédure d'identification retenue est basée sur le montage d'essais présenté figure 9. C'est une adaptation d'une colonne de Shanley [9]. Une feuille de papier d'une largeur de 60 mm, est montée sur un système de pinces. Les contacts entre chaque lame et les plateaux de la machine sont effilés et permettent une rotation. Pour éviter les problèmes d'alignement, le plateau inférieur de la machine est rotulé. L'exploitation de cet essai peut être réalisé de façon simplifié, car la prise en compte de la

courbure répartie du papier n'engendre pas de variation importante de la distance présentée figure 10. A partir des dimensions initiales et du déplacement de la traverse de la machine d'essai, l'ensemble de la cinématique (angle de rotation  $\theta$  & distance de déflection  $d$ ) du montage est connu (Eq. 1) :

$$d = \left( h\delta - \frac{\delta^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \& \quad \theta = \text{Arccos}\left(\frac{h - \delta/2}{h}\right) \quad \text{Eq. 1}$$

$$M_f = F(d + ep/2) \quad \& \quad \gamma = \frac{2\theta}{e} \quad \text{Eq. 2}$$

Le moment de flexion et la courbure vus par le papier sont alors simplement donnés par (Eq. 2). Pour la première partie de l'essai, la courbure est supposée homogène dans toute la zone utile de longueur ( $e$ ), donc la déformée de la figure 10 est supposée être un arc de cercle.

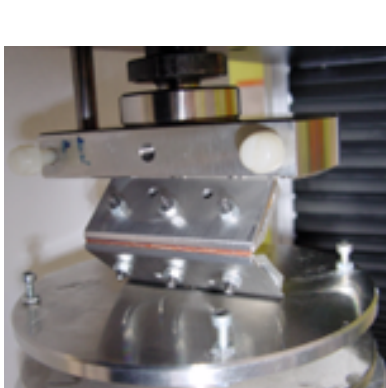


Fig. 9 : Montage de flexion

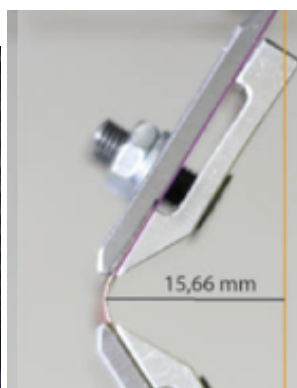


Fig. 10 : Mesure de  $d$

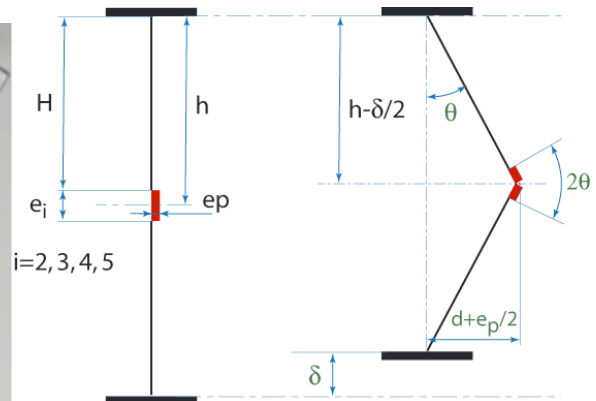


Fig. 11 : Analyse cinématique simplifiée

Des essais ont été réalisés pour différentes longueurs de zone utile de papier : ( $e = 2, 3, 4$  et  $5$  mm). Les résultats de deux essais pour 4 longueurs de papier différentes sont donnés figure 12, puis l'exploitation en comportement de flexion à partir des équations 2 est présentée figure 13.

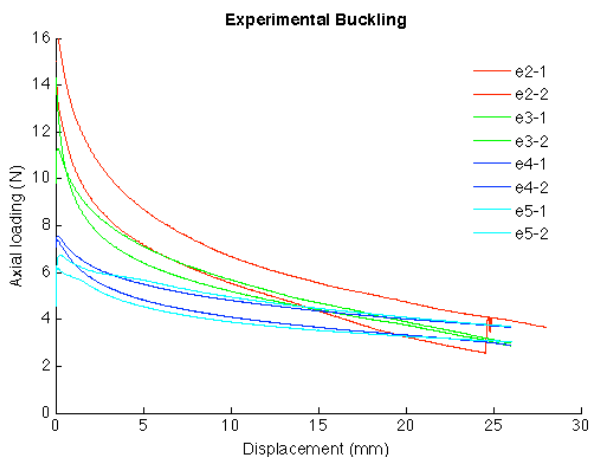


Fig. 12 : Courbe brut de flambage du montage

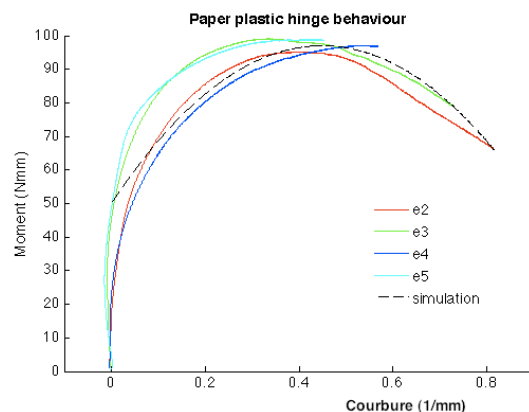


Fig. 13 : Comportement de flexion du papier identifié.

#### 4. Analyse de la dégradation du papier.

Jusqu'à la valeur maximale du moment (Fig. 13), la courbure est uniforme et le papier présente une courbure régulière comme sur la figure 10. Mais la non linéarité de la réponse en flexion traduit un endommagement que l'on suppose donc diffus à l'échelle du papier. Pour analyser cette dégradation, on utilise un modèle d'endommagement directement défini sur le comportement de flexion. La densité d'énergie de déformation élastique "plaque" est donnée par l'Eq. 3 :



$$e_d = \frac{1}{2} \frac{M^2}{k_o (1 - d_m)} \tag{Eq. 3}$$

avec  $k_o$  : rigidité en flexion du papier (en Nmm). et  $d_m$  : paramètre d'endommagement.

Le comportement élastique est alors donné par :

$$\gamma = \left. \frac{\partial e_d}{\partial M} \right)_{d_m \text{ cst}} = \frac{M}{k_o (1 - d_m)} = \frac{M}{k} \tag{Eq. 4}$$

La force pilote de l'endommagement est donnée par :

$$Y = \left. \frac{\partial e_d}{\partial d_m} \right)_{M \text{ cst}} = \frac{1}{2} \frac{M^2}{k_o (1 - d_m)^2} = \frac{1}{2} k_o \gamma^2 \tag{Eq. 5}$$

Pour tracer cette variable, l'hypothèse initiale d'endommagement sans anélasticité permet d'utiliser la courbure directement. La rigidité  $k$  est calculée pour chaque essai par la pente initiale de la courbe correspondante de la figure 13.

L'endommagement est donné par :

$$d_m = 1 - \frac{k}{k_o} = 1 - \frac{M}{k_o \gamma} \tag{Eq. 6}$$

La courbe d'endommagement ainsi obtenue expérimentalement présentée figure 14 est assez uniforme sur l'ensemble des essais réalisés.

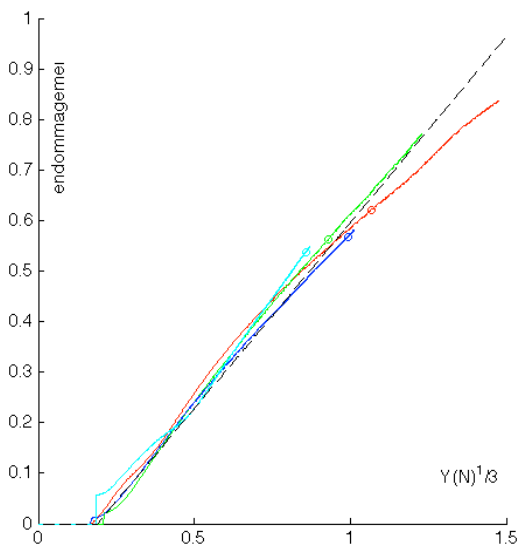


Fig. 14 : Courbe d'endommagement diffus. Les cercles représentent la limite d'instabilité.

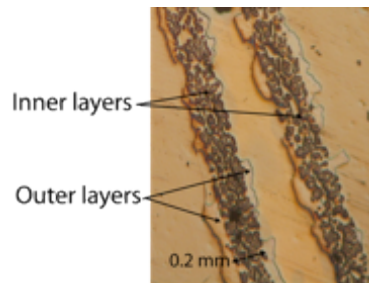


Fig 15 : Morphologie

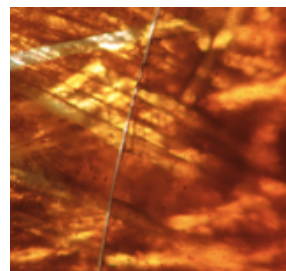


Fig 16 : Fissure matricielle dans un papier Nomex®

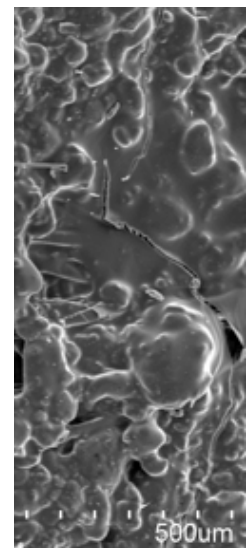


Fig. 17 Fissure matricielle dans le papier CELPACT

A partir de cette courbe d'endommagement, la loi identifiée est en pointillés figure 14, avec les valeurs suivantes :  $Y_o = 69.10^{-4} \text{ N/mm}$  ;  $Y_c = 3,724 \text{ N/mm}$  ;  $n = 1/3$

$$d_m = \frac{Y^n - Y_o^n}{Y_c^n - Y_o^n} \tag{Eq. 7}$$

Une section du papier présenté figure 15, montre que la répartition des fibres est concentrée dans une zone centrale d'épaisseur assez constante, mais que la surface est constituée de matrice répartie de façon irrégulière. Les mesures du comportement élastique du papier en flexion dynamique et traction [10] montrent par une modélisation de type stratifié à trois plis, que les couches extérieures jouent un rôle significatif en flexion. L'endommagement ainsi identifié est attribué à des fissures dans les couches extérieures de matrices comme il est possible d'en voir figure 17. A titre de comparaison, on retrouve une fissure du même type (Fig.16) mais plus régulières dans un papier Nomex dont la surface est lisse. Au delà du point de chargement de flexion maximum, il y a localisation de la dégradation. Les figures de 18 à 20 montrent l'évolution d'une fissure avec déchaussement de fibres et formation d'une "rotule plastique".

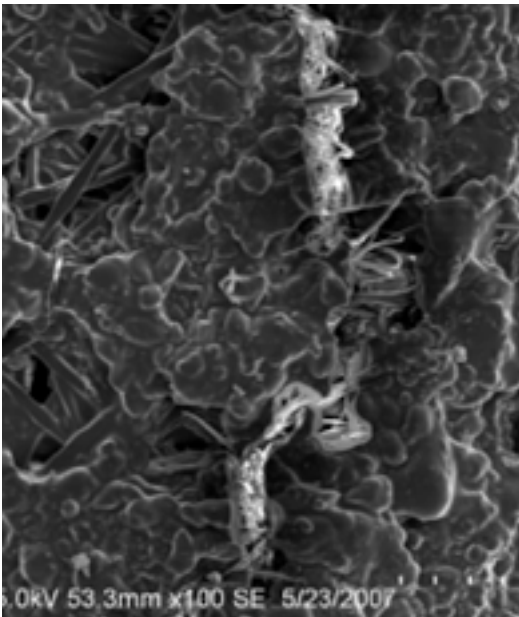


Fig. 18 : Localisation de l'endommagement d'endommagement

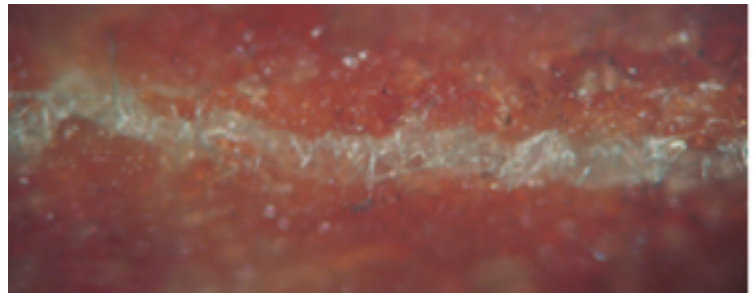


Fig. 19 : Ouverture de fissure de surface et déchaussement de fibres



Fig. 20 : Formation d'un pli à l'échelle du papier

A partir du point de localisation, le mécanisme d'endommagement change et la procédure d'analyse doit le prendre en compte. La fissure ainsi créée ne se referme pas. Il est alors possible d'identifier la relation entre la variation de l'angle anélastique du pli, avec la diminution du moment.

$$\alpha^{ané} = 2\theta - 2\theta^{élas} \quad \text{avec}$$

$$2\theta^{élas} = \frac{M}{k_o(1 - d_{instabilité})} (e - L_i) \quad \text{Eq. 8}$$

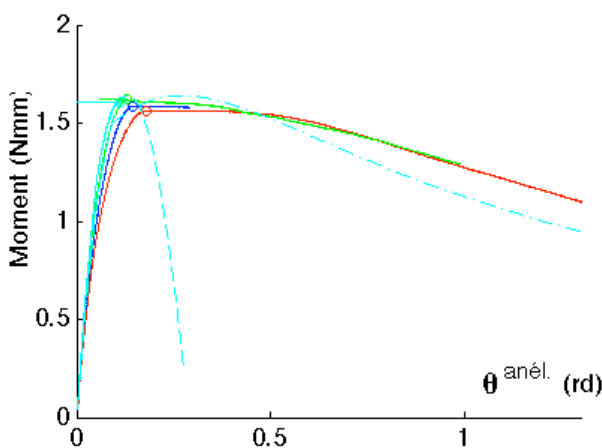


Fig. 21 : Evolution de la rotule plastique

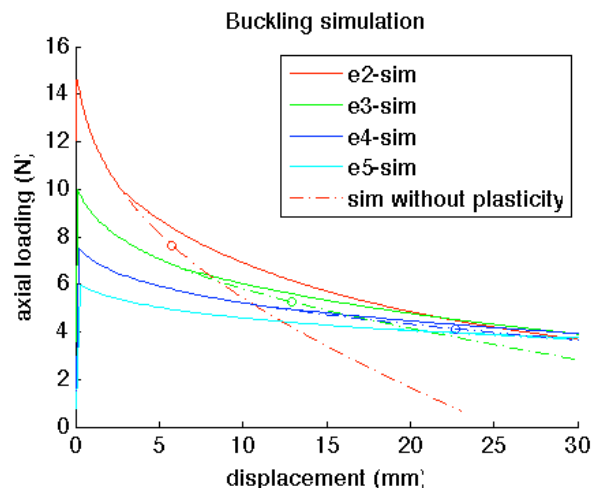


Fig 22 : Simulation des essais de flexion

La courbe intrinsèque de la formation de la rotule plastique est alors présentée figure 21. En réalisant les simulations des différentes configurations d'essais avec ou sans prise en compte de la localisation (Fig. 22), il est possible de visualiser l'effet de la partie anélastique sur ce type d'essais.

## 5. Conclusion.

Le comportement en flexion du papier est assez complexe avec deux mécanismes de dégradations qui induisent deux différentes évolutions non linéaires. Beaucoup d'articles sur le comportement des âmes portent sur le calcul, mais peu de travaux visent à identifier le comportement du papier. Dans le cas des âmes pliées, il y a une compétition entre les effets de non linéarité du papier, l'influence forte des défauts géométriques et la présentation du papier comme un stratifié, donc avec une problématique sur l'identification élastique en traction /flexion. Mais la prise en compte de l'ensemble de ces mécanismes est nécessaire pour pouvoir réaliser une simulation prédictive de toute forme de géométrie d'âme pliée.

Les essais proposés d'identification du comportement du papier à l'échelle mésoscopique fournissent les données de base pour la réalisation des simulations numérique du comportement de l'âme par éléments finis jusqu'à la formation de plis dans le papier. Mais les essais de cisaillement dynamique doivent valider que l'influence des défauts est limitée à la compression, et pas au module de cisaillement élastique de l'âme.

## Remerciements

The E.U. is greatly acknowledged for its funding of the CELPACT European project, the presented work is part of this project.

## Références

- [1] CELPACT European project, AST5-CT-2006-031038, <http://www.easn.net/supported-projects/celpact/celpact.htm>
- [2] K. Drechsler, R. Kehrlé. "Manufacturing of Folded Core-Structures for Technical Applications". *25th International SAMPE Europe Conference, Paris*, pp. 508-513, 2004.
- [3] E. Baranger, P.A. Guidault, C. Cluzel. "Numerical modelling of geometrical defects of an origami-like sandwich core". Accepted in *Composite Structures* 2011.
- [4] J.M. Berthelo. "Matériaux Composites – Comportement mécanique et analyse des structures". *Editions Tec & Doc Paris* 1999.
- [5] L. Gornet, G. Marckmann, S. Marguet, S. Kamran-Ali, J.P. Regoin. "Une approche expérimentale et numérique dédiée à l'identification des propriétés mécaniques des âmes nids d'abeilles Nomex®" JNC15. 2007.
- [6] Fischer S, Drechsler K, Kilchert S, Johnson A. Mechanical Tests for Fold-Core Base Material Properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, doi: 10.1016/j.compositesa.2009.03.005, 2009.
- [7] S. Fischer, S. Heimbs, S. Kilchert, M. Klaus, and C. Cluzel. "Sandwich Structures with Folded Core: Manufacturing and Mechanical Behavior". *International SAMPE Europe Conference, Paris*. (2009)
- [8] G. Eyer, B. Leboime. "Utilisation d'un essai de vibration sur plaque sandwich pour l'identification du module de cisaillement". *Travaux encadrés de recherche, ENS Cachan*. (2010)
- [9] Bazant, Z. and Cedolin, L. "Stability of Structures: Elastic, Inelastic, Fracture and Damage Theories". Oxford University Press, New York, ISBN 0-486-42568-1. (1991)
- [10] E. Baranger, C. Cluzel, P.A. Guidault "Modelling of the behaviour of aramid folded cores up to global crushing" On line in *Strain* 2010, doi: 10.1111/j.1475-1305.2010.00753