



**HAL**  
open science

## Simulation du processus de mise en oeuvre d'âme de papier d'aramide par origami pour une modélisation prédictive du comportement hors plan d'un sandwich

Pierre-Alain Guidault, Emmanuel Baranger, Christophe Cluzel

### ► To cite this version:

Pierre-Alain Guidault, Emmanuel Baranger, Christophe Cluzel. Simulation du processus de mise en oeuvre d'âme de papier d'aramide par origami pour une modélisation prédictive du comportement hors plan d'un sandwich. 11e colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2013, Giens, France. hal-01722055

**HAL Id: hal-01722055**

**<https://hal.science/hal-01722055>**

Submitted on 2 Mar 2018

**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.

Public Domain

# Simulation du processus de mise en œuvre d'âme de papier d'aramide par origami pour une modélisation prédictive du comportement hors plan d'un sandwich

Pierre-Alain GUIDAULT<sup>1</sup>, Emmanuel BARANGER<sup>1</sup>, Christophe CLUZEL<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> LMT-Cachan, ENS Cachan/UPMC/CNRS/PRES UniverSud Paris, France, {guidault,baranger,cluzel}@lmt.ens-cachan.fr

<sup>2</sup> IUT-SGM Evry, France

**Résumé** — La simulation du comportement hors-plan de structures sandwich en papier plié met en jeu des problèmes de stabilité. Aussi, l'analyse de la sensibilité de ces structures aux défauts géométriques doit être étudiée. L'objectif de l'étude étant d'optimiser la géométrie du pliage, les défauts doivent être définis par simulation du procédé de pliage lui-même. Ce travail s'intéresse à la modélisation numérique de défauts géométriques pertinents basée sur la simulation du processus de pliage. Il est montré que les défauts ainsi générés ont une forte influence sur le comportement en compression hors-plan et dans une moindre mesure sur le cisaillement hors-plan. Le point clé réside dans la modélisation des défauts induits sur la rectitude des arêtes de pliage obtenues. Les résultats numériques montrent une bonne corrélation avec les défauts observés sur les échantillons ainsi qu'avec les résultats expérimentaux de compression jusqu'au pic de charge.

**Mots clés** — structure sandwich, défauts géométriques, modélisation, pliage

## 1 Contexte

Dans le cadre du projet européen CELPACT (*CELLular materials for imPACT performances* [1]), différents types d'âmes pour panneau sandwich sont étudiés vis-à-vis de leur rigidité spécifique, leur résistance, leur capacité d'absorption d'énergie et de leur coût de production. Parmi celles-ci, nous nous intéressons à une âme en origami obtenue par pliage d'une feuille de papier composée de fibres d'aramide et d'une matrice phénolique (**Fig. 1**). Contrairement aux âmes en nids d'abeille, plus courantes,

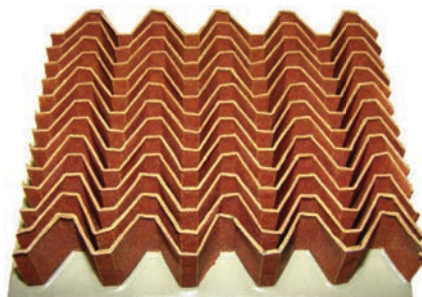


Fig. 1 – Âme en papier plié

elle présente l'avantage de permettre une circulation d'air afin de limiter l'humidité et de pouvoir être produite par un procédé de mise en forme continu [2, 3, 4]. Insérée entre deux peaux, l'âme est sollicitée principalement en cisaillement et doit résister à la compression hors-plan dans le cas d'impact. L'optimisation de la géométrie et du pattern de pliage de l'âme passe par la simulation de son comportement sous chargement de compaction et de cisaillement hors plan. Ces simulations donnent lieu à des instabilités géométriques impliquant des mécanismes de flambage locaux et globaux. Dans ce cas, les défauts géométriques jouent un rôle important dans la réponse de la structure [5]. Dans ce travail, nous nous intéressons au comportement jusqu'au pic de charge précédent l'effondrement et la compaction de l'âme [6].

## 2 Modélisation numérique de défauts géométriques pertinents

Dans le cadre d'un processus d'optimisation de la géométrie, la modélisation des défauts ne peut se baser simplement sur des observations ou mesures sur échantillon. Les défauts doivent être représentatifs d'une classe d'échantillons de patterns de pliage similaires. La méthode proposée ici diffère des approches classiques consistant à perturber les noeuds du maillage [10, 11] ou à introduire des modes de flambage. Elle repose sur une simulation du processus de pliage [7]. Les défauts sont introduits au niveau du tracé des arêtes de pliage sur le papier avant pliage. Cette imperfection de positionnement des plis associée au processus de pliage génère des défauts de rectitude des arêtes (**Fig. 7**) si particulier à ces structures en origami.

### 2.1 Observations expérimentales des défauts

Le processus de pliage s'effectuent en trois étapes. La première consiste au tracé/marquage du pattern de pliage sur une feuille du papier pré-imprégné constitutif de l'âme à l'aide d'un outil coupant ou roulant. La deuxième étape consiste à plier la feuille. La polymérisation de la structure pliée obtenue est effectuée à la troisième étape.

Une vue de dessus de l'âme (**Fig. 2**) montre que les lignes de pliages obtenues sur la face supérieure présentent des déviations allant jusqu'à environ 2 mm par rapport à la géométrie idéale. Du flambage localisé est également observés en particuliers au bord de l'échantillon.

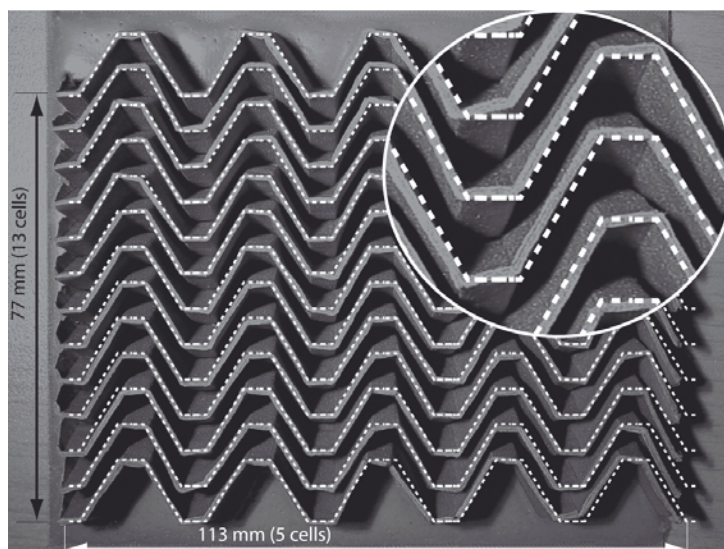


Fig. 2 – Vue de dessus d'un échantillon de l'âme (pattern CELPACT 31). Les lignes blanches correspondent au motif de pliage théorique

Théoriquement, le pattern de pliage marqué sur la feuille présente la compatibilité cinématique requise pour conduire à un pliage sans contrainte. Cependant, due aux imperfections du tracés ou au processus de mise en œuvre (l'âme est générée progressivement à partir d'une feuille en flot continu [3, 4] et non en une seule étape), des défauts de pliage peuvent ainsi survenir et conduire au défauts observés : non-rectitude des arrêtes, flambage localisé...

### 2.2 Génération numérique de la géométrie de l'âme pliée avec défauts

La modélisation est faites sous ABAQUS Implicit. La feuille de papier non polymérisée, plane, est maillée à l'aide d'éléments plaques. Une estimation grossière des propriétés matériau du papier avant cuisson est suffisante dans la mesure où le processus de pliage met en jeu essentiellement des petites déformations et des grands déplacements/grandes rotations ainsi que des modes de flambage élastiques. Un comportement élastique est donc supposé.

Les défauts géométriques sont introduits au niveau du tracé du pattern (**Fig. 3**). Chaque nœud du

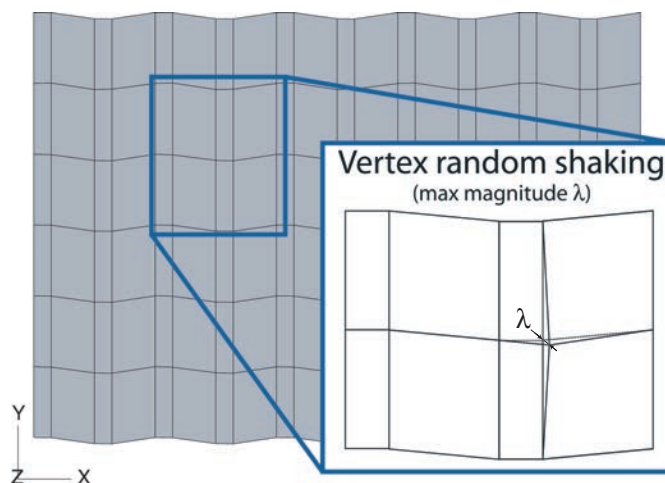


Fig. 3 – Pattern de pliage et positionnement aléatoire des noeuds

pattern est positionné aléatoirement par rapport à sa position nominale. Les lignes de pliages sont modélisées comme des articulations parfaites compte tenu de la faible épaisseur (20% de l'épaisseur du papier) de la zone pliée et sa plus faible teneur en fibres (**Fig. 4**). L'incertitude sur la position du marquage est

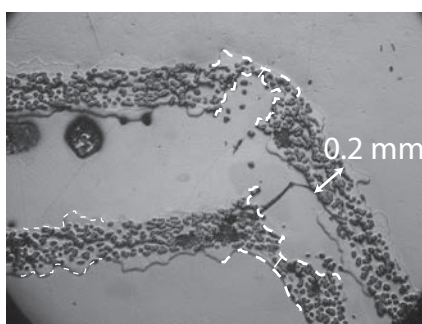


Fig. 4 – Observation de deux arrêtes pliées en coupe

approximativement de l'ordre de l'épaisseur du papier. Aussi, les noeuds ont été bougés aléatoirement dans un domaine de variation de  $\pm 0.2 \text{ mm}$ . Trois rangées de cellules ont été considérées afin de s'assurer de la représentativité des conditions limites pour la rangée centrale (**Fig. 5**). Cinq colonnes de cellules sont traitées pour faciliter les comparaisons avec les essais de compaction réalisés sur l'échantillon de cinq cellules de large (**Fig. 1**).

Le processus de pliage est bien entendu complexe à modéliser. Il ne s'agit pas ici d'en faire une modélisation fine. L'objectif est d'obtenir des défauts sur la géométrie pliée qui correspondent aux observations expérimentales soulignées précédemment. Aussi, la modélisation du procédé proposée est très simplifiée : certains noeuds sont contraints à rester dans un plan inférieur alors que d'autres sont contraints à s'élever de  $20 \text{ mm}$ , épaisseur finale de l'âme pliée. Les conditions limites sont précisées en **Fig. 5**. Seule la configuration finale ne sera retenue dans la suite. L'état de contrainte et de déformation sera ignoré dans la mesure où la cuisson relâche cet état en première approximation.

La **Fig. 6** montre la géométrie finale obtenue pour le Pattern CELPACT 31 [8] (densité  $113 \text{ kg/m}^3$ ). Seule la configuration géométrique de la rangée centrale/intérieure de cellules (en gris foncé sur la **Fig. 5**) est retenue pour les analyses numériques suivantes, les deux autres rangées ayant été modélisées pour représenter l'environnement de cette rangée centrale lors du pliage. La configuration géométrique obtenue en vue de dessus, **Fig. 6**, est similaire à celle observée sur la **Fig. 2** : déviation des lignes de pliages en face supérieure par rapport au pattern idéal et flambage localisé sur les bords.

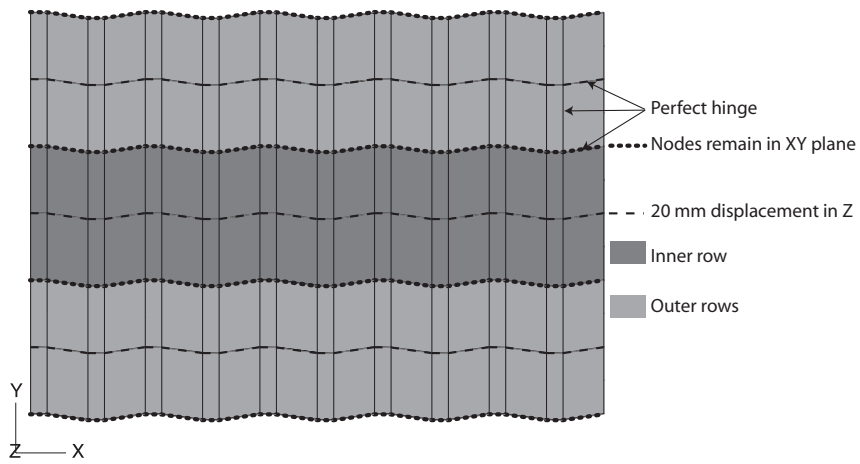


Fig. 5 – Conditions limites pour la simulation du pliage

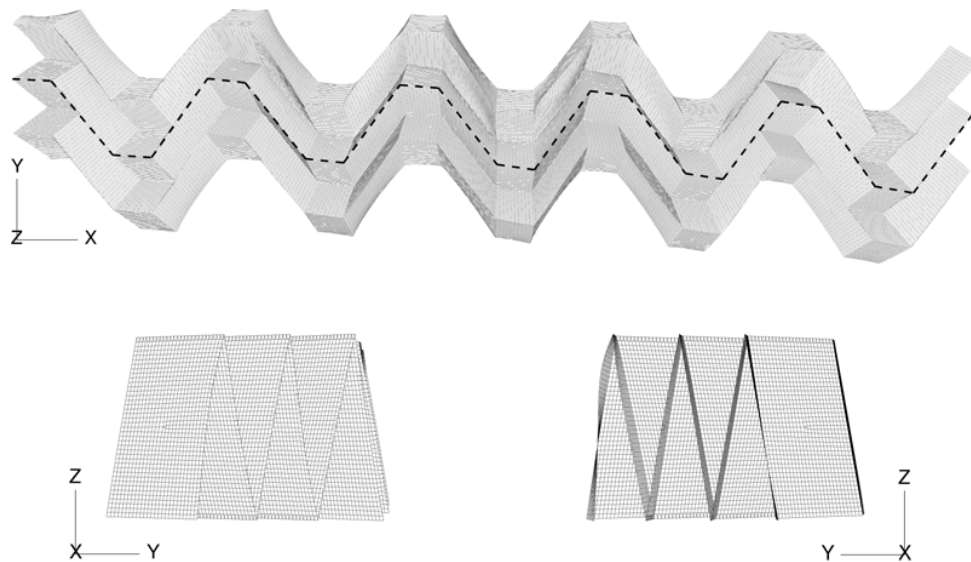


Fig. 6 – Géométrie générée de l'âme pliée

Par ailleurs, les défauts de rectitude des arrêtes obtenues par rapport à ceux reconstruits à partir des résultats d'un scanner par sonde Laser d'un échantillon d'âme effectué à l'IFB Stuttgart [7], montrent une bonne corrélation tant par la forme des défauts que par leur amplitude (**Fig. 7**).

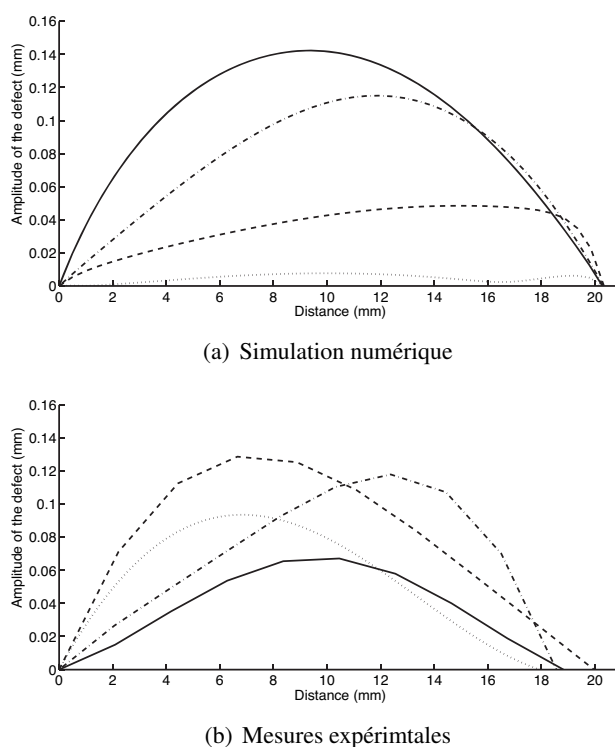


Fig. 7 – Défauts de rectitude sur différentes arêtes de pliage

L'âme avec défauts générée numériquement suivant la méthodologie décrite ci-dessous est ainsi utilisée pour réaliser des simulations numériques de compaction et de cisaillement hors-plan

### 3 Comportement hors-plan de l'âme

#### 3.1 Comportement en compression

Un test de compaction jusqu'à écrasement total a été effectué sur une structure sandwich composée de l'âme en papier plié étudiée (Pattern CELPACT 31) et de deux peaux composites très épaisses en fibres de verre et matrice époxy (**Fig. 8**). L'âme est composée de  $5 \times 13$  cellules élémentaires pliées. L'échantillon testé a une dimension de  $120 \times 107 \times 24 \text{ mm}^3$ . Une liaison rotule a été installée sous la face supérieure de l'éprouvette afin de charger correctement celle-ci en compression. Un capteur LVDT permet de mesurer le rapprochement relatif des deux peaux du sandwich. La vitesse de déplacement est de  $0.1 \text{ mm.min}^{-1}$ . La courbe d'essai effort-déplacement jusqu'au pic de chargement est représentée en trait

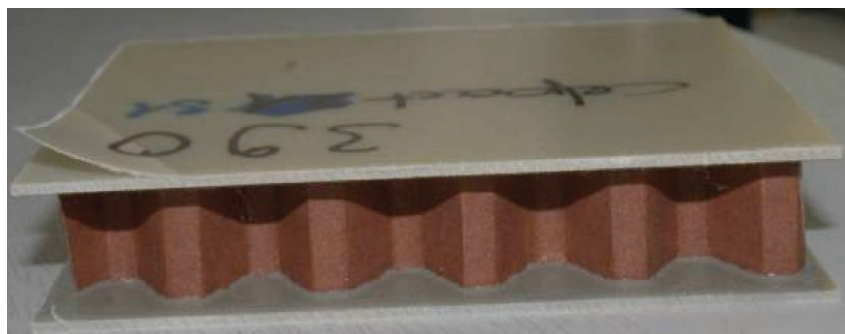


Fig. 8 – Eprouvette composite sandwich pour l'essai de compression

noir fort en **Fig. 10**. Les résultats de test ont été corrigés en prenant en compte la raideur de la machine

d'essai ainsi que celle de la liaison rotule.

Une simulation en non linéaire géométrique sous ABAQUS Implicit a été réalisée sur une rangée de cinq cellules présentant des défauts géométriques générés selon la méthodologie décrite précédemment. L'âme étant supposée être parfaitement collée aux peaux très rigides, on suppose que les bords inférieurs sont encastrés et qu'un déplacement suivant  $\vec{z}$  de  $-0.35 \text{ mm}$  est imposé sur le bord supérieur, tous les autres degrés de libertés (rotations et translations) étant imposés nuls (**Fig. 9**). Les simulations sont

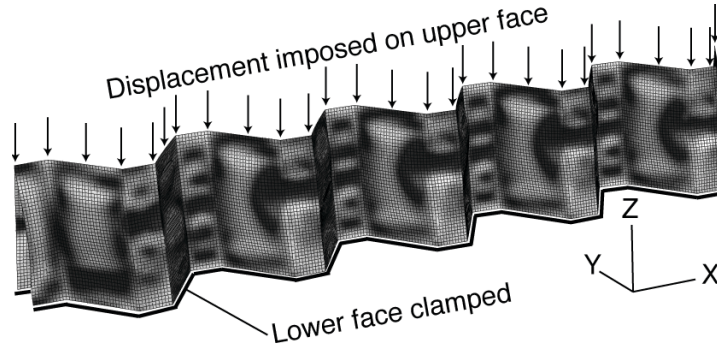


Fig. 9 – Conditions limites pour l'essai de compression hors-plan

réalisées pour trois géométries d'âme comportant des défauts d'amplitude  $\pm 0.125$ ,  $\pm 0.19$  et  $\pm 0,25 \text{ mm}$ . Par ailleurs, un modèle d'endommagement décrit dans [6] a été testé afin de prendre en compte les mécanismes de dégradations qui surviennent dans les couches extérieures du papier et apprécier ainsi l'effet de non-linéarités matériau. Un calcul en non-linéaire géométrique, sans défauts, est également donné pour comparaison.

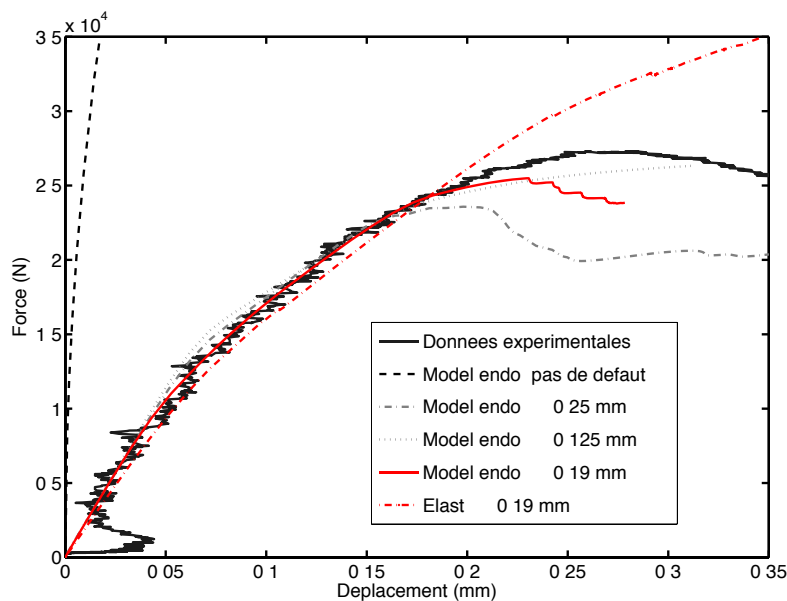


Fig. 10 – Comportement de compression hors-plan de l'âme

On constate que les simulations présentant les défauts modélisés permet de prédire de façon très satisfaisante la raideur apparente initiale en compression (**Fig. 10**). Notons qu'une simulation sans défaut géométrique conduit à une réponse beaucoup trop raide. La modélisation de la réponse jusqu'au pic de charge nécessite d'introduire un comportement matériau endommageable.

	Simulation	Simulation selon [12]
$G_{yz}$ (en MPa)	50	60
$G_{xz}$ (en MPa)	83	84

Tableau 1 – Modules élastiques de cisaillement apparents

### 3.2 Comportement en cisaillement

Pour la simulation sous sollicitation de cisaillement, le calcul est effectué sur la même rangée de cinq cellules que pour l'essai de compression et avec un défaut de  $\pm 0.19 \text{ mm}$  (**Fig. 9**). Un déplacement, de  $1 \text{ mm}$  suivant  $\vec{x}$  puis suivant  $\vec{y}$  est cette fois-ci imposé sur la ligne supérieure. Comme précédemment, tous les autres degrés de libertés (rotations et translations) restants de la ligne supérieure sont imposés nuls pour représenter la cinématique très rigidifiante imposée par la plaque sandwich supérieure. Il est à noter que cette condition limite est à discuter suivant le type d'essai de cisaillement servant pour la validation.

Sur cette gamme de chargement, la réponse est quasi-linéaire. Les deux calculs permettent ainsi de caractériser les modules de cisaillement apparents notés  $G_{xz}$  et  $G_{yz}$  et simplement définis par :

$$G_{xz} = \frac{n_{\text{cell}} F_x}{S} \frac{h}{u_{dx}} \quad \text{et} \quad G_{yz} = \frac{n_{\text{cell}} F_y}{S} \frac{h}{u_{dy}}$$

où  $h$  est la hauteur de l'âme,  $F_x$  (resp.  $F_y$ ) est l'effort de réaction résultant qui travaille avec la condition limite en déplacement suivant  $\vec{x}$ ,  $u_{dx}$  (resp.  $\vec{y}$ ,  $u_{dy}$ ).  $n_{\text{cell}}$  est le nombre de rangées de 5 cellules suivant la direction  $\vec{y}$ .  $S$  est la surface effective retenue pour calculer la contrainte de cisaillement équivalente. Pour les calculs, on a retenu  $n_{\text{cell}} = 13$  et  $S = 77 \times 113 \text{ mm}^2$ .

Les résultats obtenus sont en bon accord avec les résultats obtenus par le DLR dans [12] (**Tab. 1**). Contrairement au comportement en compression, les mêmes défauts de mise en œuvre jouent un rôle mineur en cisaillement au moins pour caractériser les propriétés élastiques initiales.

## 4 Conclusion

Ce travail s'intéresse à la modélisation numérique de défauts géométriques pertinents basée sur la simulation du processus de pliage afin de modéliser le comportement hors-plan (compression, cisaillement) d'une âme en papier plié. Il est montré que les défauts ainsi générés ont une forte influence sur le comportement en compression hors-plan et dans une moindre mesure sur le cisaillement hors-plan. Le point clé réside dans la modélisation des défauts induits sur la rectitude des arêtes de pliage obtenues.

L'introduction de défauts réalistes dans la modélisation de ce pliage en origami impose une étape préalable de simulation de mise en œuvre, mais dispense d'un recalage global du comportement du papier et du niveau de perturbation initiale des nœuds. Cette introduction des mécanismes permet d'utiliser la simulation prédictive de patterns non testés. La validation sur des cas de charges combinées est à l'étude.

### Références

- [1] CELPACT European project, AST5-CT-2006-031038, [http://cordis.europa.eu/projects/rcn/79967\\_en.html](http://cordis.europa.eu/projects/rcn/79967_en.html)
- [2] D. Hachenberg, C. Mudra, M. Nguyen. *An alternative sandwich core material for future aircraft concepts*, Deutscher Luft und Raumfahrt Kongress, Munich, 165-174, 2003.
- [3] K. Drechsler, R. Kerhle. *Manufacturing of folded core structures for technical applications*, SAMPE Europe 25th international conference, Paris, 234-239, 2004, 2004.
- [4] E. Elsayed, B. Basily. *A continuous folding process for sheet materials*. International Journal of Materials and Product Technology, 21(1-2-3), 217- 238, 2004.
- [5] Z. Bažant, L. Cedolin. *Stability of structures : elastic, inelastic, fracture and damage Theories*, Oxford University Press, New York, 1991.



- [6] E. Baranger, C. Cluzel, P.A. Guidault. *Modelling of the behaviour of aramid folded cores up to global crushing*, Strain, 47(2), 170-178, 2011.
- [7] E. Baranger, P.A. Guidault, C. Cluzel. *Numerical modeling of the geometrical defects of an origami-like sandwich core*, Composite Structures, 93(10), 2504-2510, 2011.
- [8] A. Johnson, S. Kilchert, R. Mines, K. Drechsler, D. Hachenberg, O. Allix, O. Petrinic. *D11-1 CELPACT Specification*, EU FP6 project AST5-CT-2006-031038, 2007.
- [9] E. Baranger, C. Cluzel, P.-A. Guidault. *Prediction of the crushing behaviour of a folded core sandwich structure*. 9th International Conference on Sandwich Structures ICSS 9, Pasadena, 2010.
- [10] S. Heimbs. *Virtual testing of sandwich core structures using dynamic finite element simulations*. Computational Materials Science, 45, 205-216, 2009.
- [11] S. Kilchert, A. Johnson, H. Voggenteiler. *FE modelling of phenolic resin impregnated aramid paper adopted in foldcore sandwich cores*. Ninth International Conference on Computational Structures Technology (CST 2008), Athens, 2008.
- [12] P.A. Guidault, A. Johnson, S. Kilchert, H.G. Reimerdes, M. Klaus, P. Middendorf, S. Heimbs. *D22-1 Homogenised models for foldcore structures*, EU FP6 project AST5-CT-2006-031038, 2008.