HAL
open science

# Matériaux élaborés à partir de fibres enchevêtrées pour une application coeur de structure sandwich = Porous materials made with entangled fibers network for an application as core material for sandwich structures

Laurent Mezeix, Christophe Bouvet, Dominique Poquillon

## To cite this version:

Laurent Mezeix, Christophe Bouvet, Dominique Poquillon. Matériaux élaborés à partir de fibres enchevêtrées pour une application coeur de structure sandwich = Porous materials made with entangled fibers network for an application as core material for sandwich structures. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France. 9 p. hal-00384112

**HAL Id: hal-00384112**

**https://hal.science/hal-00384112v1**

Submitted on 11 Jun 2009

**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.

Manuscrit auteur, publié dans "JNC 16, Toulouse : France (2009)"



# Matériaux élaborés à partir de fibres enchevêtrées pour une application cœur de structure sandwich

# *Porous materials made with entangled fibers network for an application as core material for sandwich structures*

**Laurent Mezeix[1, 2], Christophe Bouvet[2] et Dominique Poquillon[1]**

1 : CIRIMAT/INP-ENSIACET
Université de Toulouse – France, 118 route de Narbonne, 31077 Toulouse
Laurent.mezeix@ensiacet.fr, dominique.poquillon@ensiacet.fr

2 : ICA/UPS
Université de Toulouse - France, Bat 3PN 118 route de Narbonne, 31062 Toulouse cedex 4
bouvet@lgmt.ups-tlse.fr

## Résumé

Des matériaux à architecture poreuse et aléatoire ont été élaborés à partir de fibres de verre ou de carbone enchevêtrées en vue d'une application potentielle comme âme de panneaux sandwich ventilé. Les fibres de carbone ont été choisies pour leurs bonnes propriétés mécanique et les fibres de verre pour leur faible coût. Les contacts entre fibres sont bloqués par collage à la résine époxy. Un moyen d'élaboration original a été développé. Les fibres sont placées dans une enceinte et sont enchevêtrées par un flux d'air comprimée. La résine est vaporisée en fin de mélange. Les comportements en compression et traction ont été étudiés sur les deux types de fibres alors que seuls les matériaux élaborés à partir des fibres de carbone ont été étudiées en flexion 3 points.

## Abstract

Random porous materials have been elaborate from carbon and glass fibers for an application as core material for sandwich structure. Carbon fibers have been chosen for their high performance and glass fibers for their low cost. Fibers have been bonded by epoxy resin. An original and simple way has been designed. Fibers are introduced in a specific blower room and there are entangled using compressed air. Epoxy is vaporized at the end of the entanglement. Mechanical behavior is studied in tension, compression for carbon and glass fibers. Although only materials made from carbon fibers are tested in three-points bending.

**Mots Clés :** matériaux poreux, fibres, âme sandwich
**Keywords:** porous materials, fibers, core material

## 1. Introduction

Différents matériaux d'âme sont couramment utilisés pour les panneaux sandwich. Si les cœurs des premiers panneaux étaient en balsa, de nombreux matériaux cellulaires artificiels lui sont maintenant préférés, que cela soit des mousses organiques ou métalliques, des nids d'abeille (NA) ou plus récemment des structures 3D architecturées, comme des treillis [1-5]. Ces dernières présentent l'intérêt d'être ventilées, évitant ainsi la condensation de la vapeur d'eau dans les cellules du cœur. Ce phénomène pénalise en effet les mousses et les NA en augmentant, d'une part, leur masse et en accélérant, d'autre part, leur détérioration chimique ou physique (gel). Si les cœurs poreux ventilés et architecturés présentent des propriétés mécaniques remarquables, que les brins soient collés ou bien brasés entre eux, leur coût reste élevé. Récemment un nouveau type de matériau a été développé à partir de fibres enchevêtrées réticulées [6-10].

Les réseaux de fibres métalliques réticulées présentent de nombreux avantages pour une utilisation en tant qu'échangeur thermique [11], isolant ou absorbant acoustique [12, 13]. En effet, ces matériaux présentent une faible densité relative, une porosité importante et une simplicité d'élaboration par des moyens économiques. Des fibres ont été enchevêtrées et réticulées par pulvérisation de résine pour une application d'âme sandwich [14, 15]. Ce type de matériau présente de nombreux avantages pour une

hal-00384112, version 1 - 14 May 2009

hal-00384112, version 1 - 14 May 2009

application de cœur de panneau sandwich : porosité ouverte, multifonctionnalité, possibilité d'obtenir des panneaux courbes et/ou avec variation continu d'épaisseur ou la possibilité de faire passer des câbles dans l'âme. L'élaboration par pulvérisation de résine sous mélange par air comprimé semble intéressante en raison de son faible coût et de la possibilité de mélanger plusieurs types de fibres (carbone, acier…). Le comportement mécanique de cette architecture a été étudié sur des fibres de carbone, verre et inox [15]. Le matériau obtenu par cette méthode semble présenter aussi de bonnes capacités d'absorption vibratoire [16].

Dans la présente étude, nous nous intéressons aux matériaux aléatoires réalisés à partir de fibres enchevêtrées. Deux types de fibres seront utilisés : des fibres de carbone et des fibres de verre. Les contacts seront bloqués par pulvérisation de résine époxy. Dans une première partie le procédé d'élaboration des matériaux sera détaillé, puis les matériaux obtenus seront testés en compression, traction et flexion.

## 2. Matériaux et méthode

### 2.1 Matériaux utilisés

Les fibres de carbone (200 tex) ont été fournies par Toho Tenax. Le diamètre de fibres est de 7 µm et leur module de Young de 240 GPa. Les fibres de verre (600 tex) sont obtenues à partir de fils de chez PPG Industries. Le diamètre unitaire des fibres est de 12 µm et le module de Young de 73 GPa. Comme beaucoup de peaux de panneaux de sandwich sont faites en utilisant des tissus carbone/résine époxy, nous avons choisi d'utiliser une résine époxy pour coller les contacts entre fibres. Cette résine époxy est fournie par la compagnie SICOMIN, elle présente une faible viscosité (285 mPa.s). La polymérisation est obtenue par un traitement thermique en étuve pendant 4 heures à 80°C [15].

### 2.2 Moyens de caractérisation

Les matériaux élaborés sont observés avec un microscope électronique à balayage (LEO 435 VP) après métallisation à l'argent. Les essais mécaniques de traction/compression ont été réalisés avec une machine électromécanique de traction/compression Instron 4206 équipée d'une cellule de force de +/-100 kN. La taille des échantillons est fixée (cf. § 2.3) et vaut 60x60x40 $mm^3$. La vitesse de traction/compression est fixée à $v_0$ = 5 mm/min ce qui correspond à une vitesse de déformation initiale imposée de $\dot{\varepsilon} = 2.10^{-3}\,s^{-1}$. Dans le cas de la compression les échantillons sont placés entre deux plaques d'acier alors que pour les essais de traction les échantillons sont collés grâce à une colle époxy (Araldite 2015) sur un support en T (Figure 1). Les peaux sont constituées de 2 plis de tissu carbone.

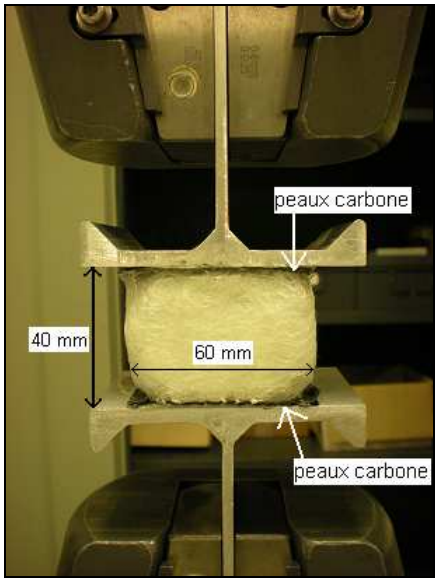
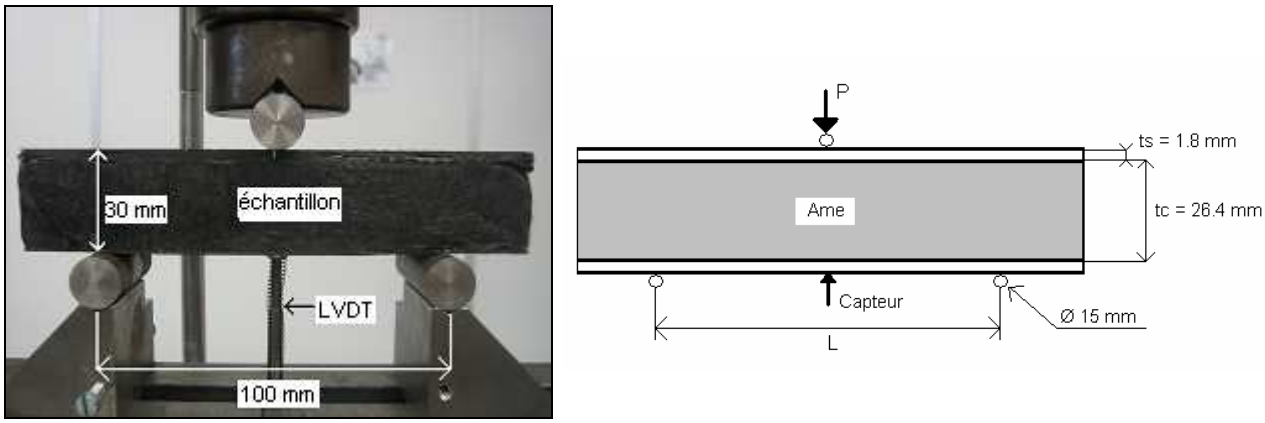



*Fig. 1 : Dispositif d'essai en traction sur échantillon fibres de verre.*

L'analyse des courbes contrainte/déformation se fait en utilisant les formules classiques. Si h est la hauteur courante de l'échantillon comprimé, $h_0$ sa hauteur initiale, $S_0$ sa section initiale et F la force appliquée, la déformation est donnée par $\varepsilon = \ln(h/h_0)$ et la contrainte par $\sigma = F/S$. Le module de Young est mesuré par décharge.

Dans le but de mesurer le module de cisaillement hors plan, des essais de flexion 3 points ont été menés sur une machine électromécanique de traction/compression Instron de 10 kN. La taille des échantillons est de 150x30x30 $mm^3$ avec une épaisseur de peaux de 1.8 mm. La distance entre les appuis inférieurs est de 100 mm (Figure 3a) et la vitesse est $v_o$ = 2 $mm.min^{-1}$. Le diamètre des appuis est de 15 mm.




(a) (b)

*Fig. 2 : (a) Essai de flexion 3 points, (b) géométrie de la poutre sandwich.*

Le chargement P est appliqué au centre de la poutre. La flèche est mesurée grâce à un capteur LVDT. L'indentation est obtenue par la différence entre le déplacement de la traverse et la flèche. L'expression de la flèche s'exprime par:

$$\delta = \frac{Pl^3}{48D} + \frac{Pl}{4S} \qquad \text{(eq. 1)}$$

Avec $D = \frac{E_s t_s h^2 b}{2}$ et $S = bhG_c$ (eq. 2)

Ou P est le chargement [N], L la distance entre les appuis inférieur (100 mm), $t_s$ l'épaisseur de la peau (1.8 mm), $t_c$ l'épaisseur de l'âme (26.4 mm), h = $t_c$ + $t_s$ (28.2 mm) et b la largeur (30 mm) (Figure 2b). Es est le module de la peau (220000 MPa) et $G_c$ le module en cisaillement de l'âme. La flèche est mesurée expérimentalement par l'essai de flexion 3 points, le seul inconnu est Gc qui est calculé par l'équation 3.

## 2.3 Elaboration

Nous avons choisi de fixer la masse volumique des fibres dans cette étude à 150 $kg/m^3$. Comme la densité des fibres de carbone diffère de celle des fibres de verre, la fraction volumique de fibres diffère pour une même masse volumique. Ce choix résulte des contraintes liées aux domaines d'application de ces panneaux : l'aéronautique et le spatial pour lesquels la masse volumique est le critère à minimiser. Pour toute l'étude, les fibres sont coupées grâce à un coupeur de pulvérisation simultanée (MATRASUR Composites) pour avoir une longueur de 45 mm. Pour chaque échantillon, la masse de fibres utilisées est mesurée en utilisant une balance Mettlers PM34 (±1 g). La masse volumique des fibres enchevêtrées est donc de 150 ± 7 $kg/m^3$. La séparation des fibres est réalisée dans une enceinte spécifique à l'aide d'un flux d'air comprimé de 4 bars. Cette technique permet de séparer les torons de 45 mm et de les enchevêtrer pour former un matériau aléatoire 3D composé de fibres unitaires enchevêtrées. Un pistolet à peinture (FIAC) est utilisé pour pulvériser la résine pendant les dernières minutes de l'enchevêtrement. La maîtrise de cette dernière phase est importante. L'étape de réticulation par ajout d'époxy fait passer la masse volumique à environ 180 $kg/m^3$. Les fibres sont ensuite introduites dans un moule spécifique. Les peaux sont constituées de tissu carbone enduit de la même résine que celle utilisée pour la vaporisation. Les morphologies obtenues sont celles de matériaux à structure aléatoire (Figures 3 et 4). Les observations MEB ne mettent pas en évidence de direction privilégiée mais seules des analyses par tomographie pourraient le confirmer.

hal-00384112, version 1 - 14 May 2009

hal-00384112, version 1 - 14 May 2009

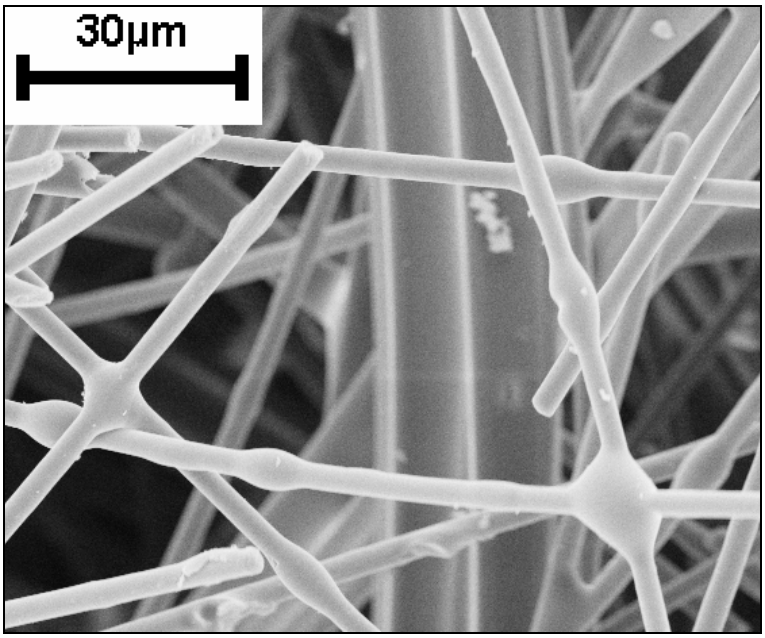



*Fig. 3 : Observation MEB sur le matériau réalisé à partir de fibres de carbone enchevêtrées (150 kg/m$^3$) réticulées par collage à la résine époxy.*

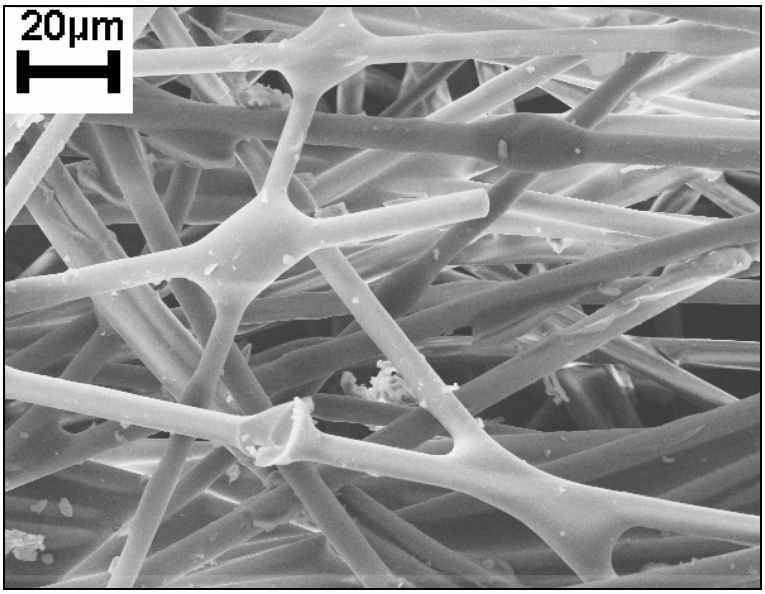



*Fig. 4 : Observation MEB sur le matériau réalisé à partir de fibres de verre enchevêtrées (150 kg/m$^3$) réticulées par collage à la résine époxy.*

La forme et la qualité des jonctions époxy diffèrent peu entre les deux matériaux. Pour les fibres de carbone, le mouillage de la résine sur la fibre est bon et il est probablement favorisé par la couche initiale d'époxy déjà présente sur les fibres (Figure 3). Pour les fibres de verre, la morphologie des ponts époxy présente une taille supérieure à celle obtenue pour les fibres de carbone (Figure 4).

## 3. Résultats

### 3.1 Essai de traction/compression

La figure 5 montre les essais de compression réalisés sur les sandwichs ayant pour âme les fibres de carbone et sur l'âme seule. L'âme seule présente une plus faible rigidité initiale par rapport aux sandwichs. En revanche, pour les sandwichs la courbe contrainte/déformation présente 3 stades : une raideur initiale (1), suivie par un plateau (2) caractéristique des matériaux cellulaires avant une courbe de densification (3). Les peaux permettent donc de rigidifier l'âme. La densification des sandwichs apparaît plus tôt que celle de l'âme testée seule. La valeur du module de Young passe de 5 MPa sur l'âme à 16 MPa avec les peaux. Les

peaux étant des tissus imprégnés de résine, celle-ci peut couler de la peau supérieur dans l'âme la rigidifiant. 3 essais ont été réalisés sur les sandwichs afin de vérifier la reproductibilité des matériaux. La rigidité initiale ne présente pas de variation significative. La densification apparaît sur les 3 essais après une déformation d'environ 35 %. La densification correspond à la perte de linéarité de la partie plateau. Le tableau 1 résume les propriétés mécaniques des essais.

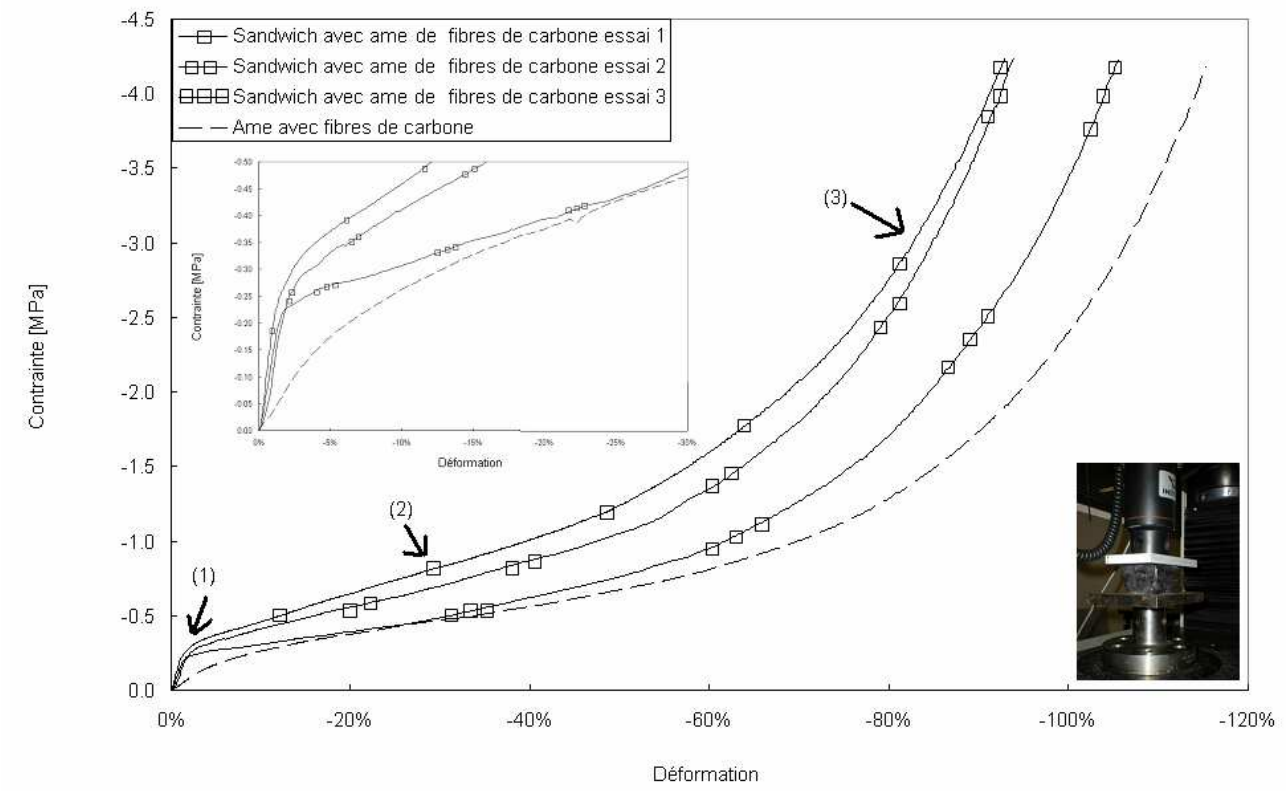



*Fig. 5 : Courbe de compression contrainte/déformation sur les sandwichs ayant pour âme des fibres de carbone et sur l'âme seule.*

La figure 6 montre les essais de compression réalisés sur les sandwichs ayant pour âme les fibres de verre et sur l'âme seule. L'âme seule présente une très faible rigidité initiale par rapport aux sandwichs. En revanche, pour les sandwichs la courbe contrainte/déformation présente comme sur les sandwichs avec âme en carbone 3 stades : rigidité initiale (1), plateau (2) et densification (3). 3 essais également ont été ici aussi réalisés sur ces sandwichs afin de vérifier la reproductibilité. La rigidité initiale présente une variation d'environ 20%. Pour une même masse volumique les sandwichs ayant pour âme les fibres de verre présente une rigidité 40 % plus faible que la même âme en carbone. La densification apparaît sur les 3 essais environ à une déformation de 50 %. La valeur du module de Young passe de 0.5 MPa sur l'âme à 6.7 MPa avec les peaux. Le tableau 1 résume les propriétés mécaniques des essais.

Les sandwichs ayant pour âme des fibres de verre présentent donc une plus faible rigidité que ceux avec des fibres de carbone pour une même masse volumique de fibres enchevêtrées (150 kg/m$^3$). L'effet des peaux est aussi plus marqué sur les fibres de verre.

hal-00384112, version 1 - 14 May 2009

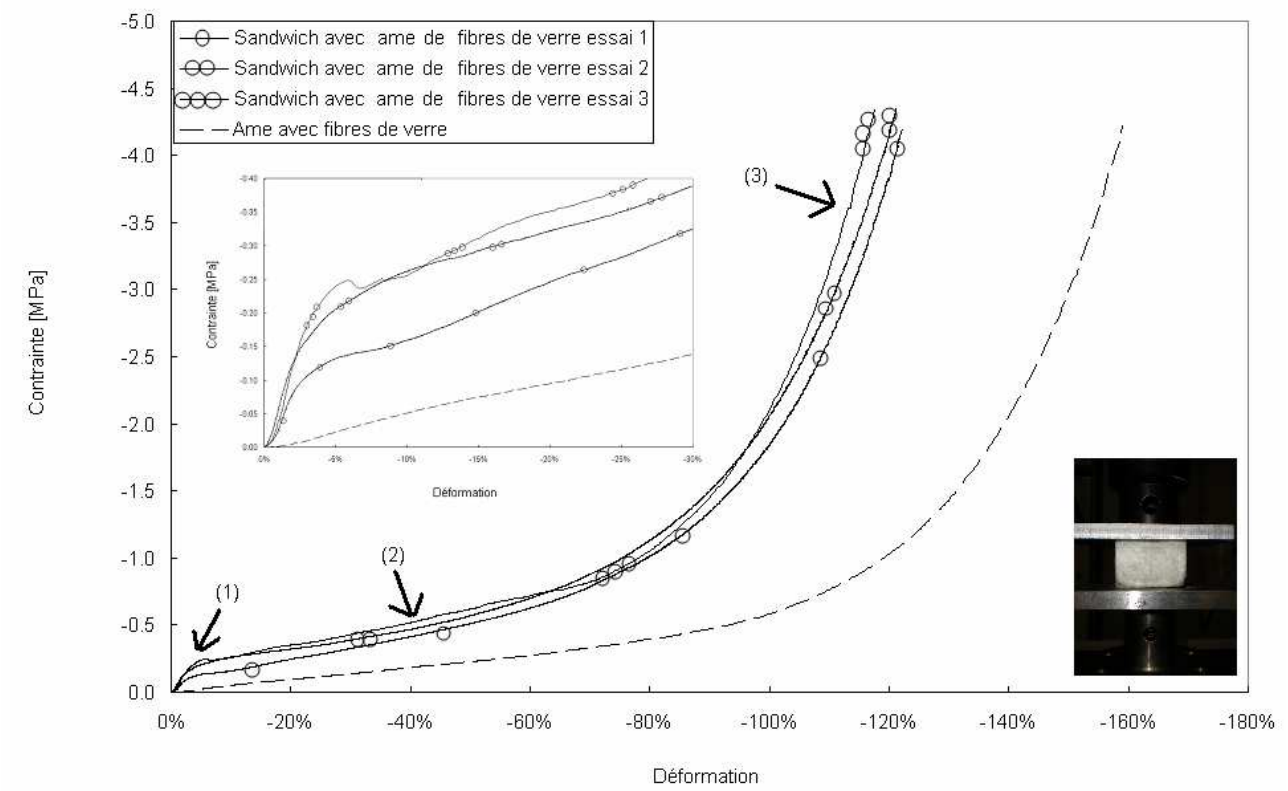



*Fig. 6 : Courbe de compression contrainte/déformation sur les sandwichs ayant pour âme des fibres de verre et sur l'âme seule.*

| Fibres | Module de Young compression E [MPa] | $\varepsilon_{densification}$ [%] | Module de Young traction E [MPa] | $\sigma_{max}$ \|MPa] |
|---|---|---|---|---|
| Sandwich avec fibres de carbone | 16 ± 1 | 35 | 20 | 0.38 |
| Sandwich avec fibres de verre | 6.7 ± 1.3 | 50 | 9 | 0.23 |

*Tab. 1 : Propriétés mécaniques en compression et traction sur les sandwichs ayant comme âme des fibres de carbone et des fibres de verre.*

Les essais de traction sont menés jusqu'à une déformation vrai de 40% (Figure 7). Le carbone présente une rigidité supérieure à celle du verre (Tableau 2). Dans les 2 cas (carbone et verre) le comportement élastique (1) est suivi d'une rupture brutale de l'échantillon (2) suivi par la dégradation de l'âme (3). Les valeurs du module de Young en traction sont proches de celles obtenues en compression confirmant les valeurs obtenues lors des essais de compression.

hal-00384112, version 1 - 14 May 2009

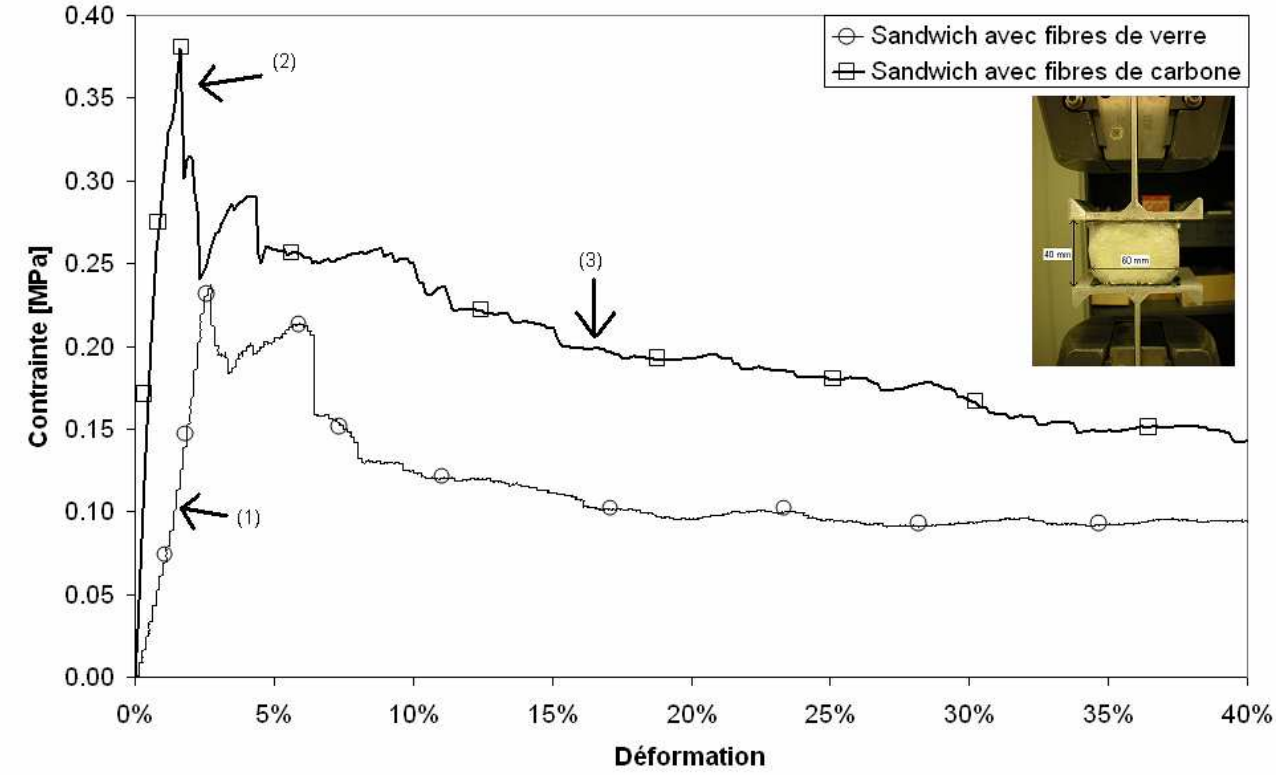



*Fig. 7 : Courbe de traction contrainte/déformation sur sandwich ayant pour âme des fibres de carbone et verre.*

## 3.2 Essai de flexion

Les sandwichs ayant pour âme les fibres de carbone montrent une rigidité supérieure à ceux avec des fibres de verre comme âme pour une même masse volumique (150 kg/m$^3$). Afin de déterminer le module de cisaillement des essais de flexion 3 points ont été menés uniquement sur des sandwichs ayant pour âmes les fibres de carbone. Les dimensions de la poutres sont 150x30x30 mm$^3$ et les peaux ont une épaisseur de 1.8 mm (cf. § 2.2). La figure 8 montre la courbe effort/flèche des essais de flexion. 3 essais ont été réalisés afin d'étudier la reproductibilité. Les valeurs sont reportées dans le tableau 2.

hal-00384112, version 1 - 14 May 2009

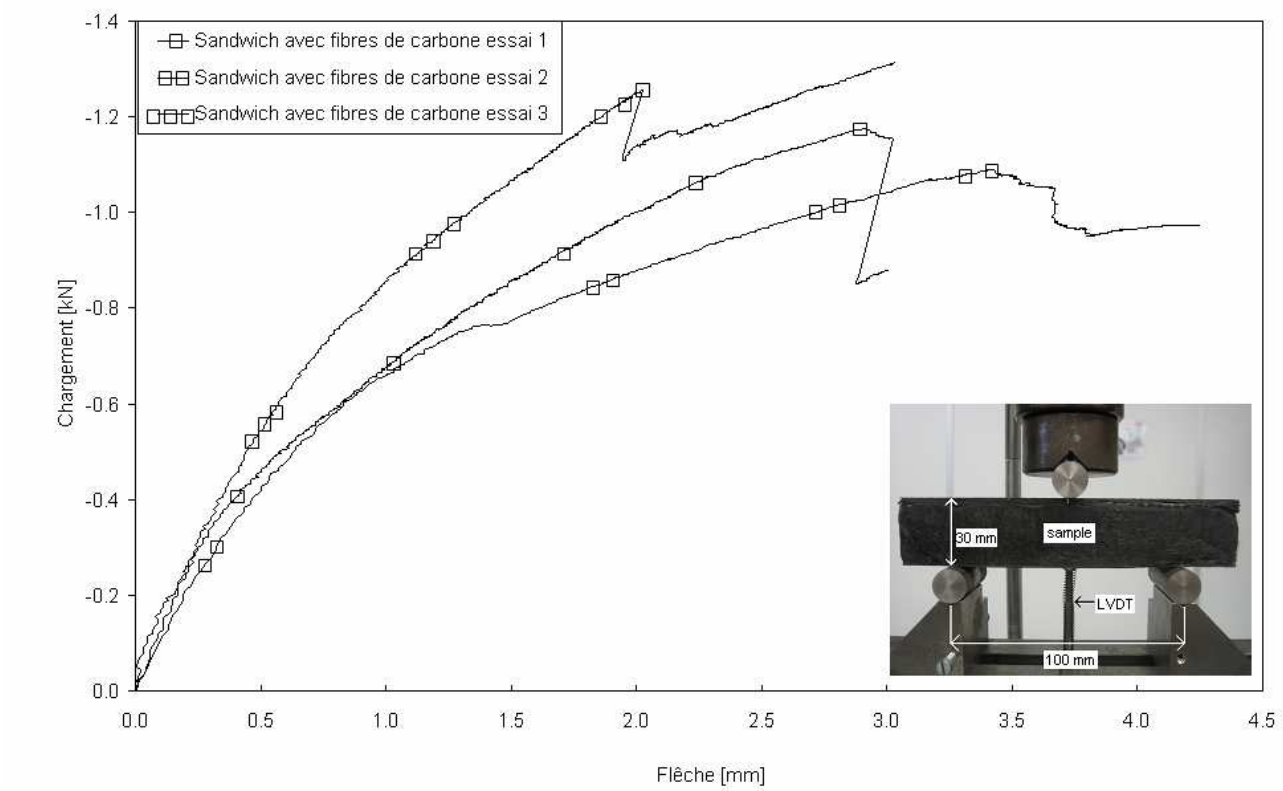



*Fig. 8 : Essai de flexion 3 points sur fibres de carbone enchevêtrées (150 kg/m$^3$), courbe effort/Déplacement.*

| Fibres | Module de cisaillement $G_c$ [MPa] | $P_{rupture}$ \|kN] | $\delta_{rupture}$ [mm] |
|---|---|---|---|
| Sandwich avec fibres de carbone | 30 ± 3 | 1.1 ± 1 | 2.8 ± 0.8 |

*Tab. 2 : Propriétés mécaniques en flexion 3 points sur les sandwichs ayant comme âme des fibres de carbone.*

## 4. Conclusion

Un procédé original et simple a été mis au point pour fabriquer des matériaux fibreux enchevêtrés réticulés offrant un rapport légèreté rigidité intéressant. Cette méthode semble prometteuse due à son faible coût et à la possibilité d'utiliser plusieurs types de fibres. Deux types de sandwichs ont été étudiés. L'un avec une âme en fibres de carbone et l'autre avec des fibres de verre. Les propriétés en traction, compression et flexion 3 points ont été étudiées. Les conclusions peuvent se résumer ainsi :

- Les sandwichs à base de fibres de carbone présentent une rigidité supérieure en traction et compression par rapport aux sandwichs avec des fibres de verre.
- Le matériau élaboré à partir de fibres de carbone présente une meilleure reproductibilité, ceci est vraisemblablement dû au procédé d'élaboration. En effet les torons de carbone se séparent mieux que ceux en verre et permettent d'obtenir un meilleur enchevêtrement.

## Remerciements

Cette étude a été rendue possible grâce au soutien financier du BQR (Bonus qualité recherche) de l'université de Toulouse. Les auteurs tiennent également à remercier Mlle YU Ping pour avoir élaboré les échantillons et les avoir testés.

## Références

[1] D.T. Queheillalt, H.N.G. Wadley, « Pyramidal lattice truss structures with hollow trusses ». *Materials Science & Engineering A,* Vol. 397, pp.132-137. 2005.
[2] G.W. Kooistra, V.S. Deshpande, H.N.G. Wadley, « Compressive behaviour of age hardenable tetrahedral lattice truss structures made from aluminium ». *Acta Materiala*, Vol. 52, pp.4229-4237. 2004.
[3] F. Coté, V.S. Deshpande, N.A. Fleck, A.G. Evans, « The compressive and shear responses of corrugated and diamond lattice materials ». *Int. J. of Sol. and Struct.*, Vol. 43, pp.6220 - 6242. 2006.

hal-00384112, version 1 - 14 May 2009

[4] S. Hyun, K.J. Kang, « Mechanical Behaviors under Compression in Wire-Woven Bulk Kagome Truss PCMs ». *Int. J. of Sol. and Struct.*, Vol. 43, N°17, pp.5228-5246. 2006.
[5] Y.H. Lee, B.K. Lee, I. Jeon, K.J. Kang, « Wire-woven bulk Kagome truss cores ». *Acta Materiala*, Vol. 55, N°18, pp.6084-6094. 2007.
[6] A.E. Markaki, T.W. Clyne, « Mechanics of thin ultra-light stainless steel sandwich sheet material Part I. Stiffness ». *Acta Materialia*, Vol. 51, N°1, pp.1341-1350, 2003.
[7] A.E. Markaki, T.W. Clyne, « Mechanics of thin ultra-light stainless steel sandwich sheet material Part II. Resistance to delamination ». *Acta Materialia*, Vol. 51, N°1, pp.1351-1357, 2003.
[8] A.E. Markaki, V. Gergely, A. Cockburn, T.W. Clyne, « Mechanical and magnetic properties of metal fibre networks, with and without a polymeric matrix ». *Composites Sci. and Tech.*, Vol. 653, Issues. 15-16, pp.2492-2499, 2003.
[9] M Delincé, F Delannay, « Elastic anisotropy of a transversely isotropic random network of interconnected fibres: non-triangulated network model ». *Acta Materialia*, Vol. 52, N°4, pp.1013-1022. 2004.
[10] D Zhou, WJ Stronge, « Mechanical properties of fibrous core sandwich panels ». *Int. J. of Mech. Sci.*, 47(4-5), 775, 2005.
[11] L.O. Golosnoy, A. Cockburn, T.W. Clyne, « Optimisation of metallic fibre network materials for compact heat exchangers ». *Adv. Eng. Mater.*, Vol. 10, N°3, pp.210-218, 2008.
[12] L.O. Golosnoy, J.C. Tan, T.W. Clyne, « Ferrous fibre network materials for jet noise reduction in aeroengines part I: acoustic effects ». *Adv. Eng. Mater.*, Vol. 10, N°3, pp.192-200, 2008.
[13] F. Paun, S. Gasser, L. Leylekian, « Design of materials for noise reduction in aircraft engines ». *Aero. Sci. and Techno.* , Vol. 7, pp.63-72, 2003.
[14] L. Mezeix, C. Bouvet, B. Castanié, D. Poquillon, « A new sandwich structured composite with entangled carbon fibres as core material. Processing and mechanical properties ». *In : Comptes-rendus des 8th International Conference on Sandwich Structure (ICCS8)*, publié par Ferreira, Porto, 6-8 mai 2008. ISBN 978-972-8953-23-2.
[15] L. Mezeix, C. Bouvet, J. Huez, D. Poquillon, « Experimental data and modelling of entangled fibers and entangled cross-linked fibers during compression », *in press Journal of Materials Science*, 2009.
[16] A. Shahdin, L. Mezeix, C. Bouvet, J. Morlier, Y. Gourinat, « Fabrication and mechanical testing of glass fiber entangled sandwich beams A comparison with honeycomb and foam sandwich beams », *in press Journal of Composite Structures*, 2009.

hal-00384112, version 1 - 14 May 2009