

Modélisation du comportement non-linéaire et post-pic d'un panneau sandwich avec une âme non-conventionnelle

Khaled Djama¹, Laurent Michel¹, Emmanuel Ferrier¹, Aron Gabor¹

¹ Université de Lyon, Université Lyon 1, Laboratoire des Matériaux Composites pour la Construction (LMC2), 82 bd Niels Bohr, 69622 Villeurbanne Cedex, France

RÉSUMÉ.

Cette étude traite du comportement mécanique en flexion trois points d'un panneau sandwich innovant avec une âme non-conventionnelle. Cette dernière est renforcée par des connecteurs en GFRP (glass fibre reinforced polymer) qui lient les peaux elles aussi en GFRP. Le procédé de fabrication trouve son caractère innovant dans l'insertion des fibres de verre au travers d'une mousse polyuréthane avant une infusion du panneau par une matrice époxy. Une modélisation par éléments finis est proposée pour prédire le comportement non-linéaire et post-pic du test de flexion trois points. Elle utilise le modèle d'Hashin [HAS 80] et a permis de dégager la cinématique de l'endommagement des connecteurs et des peaux du panneau sandwich. Une confrontation avec des résultats expérimentaux est réalisée pour valider le modèle. La prise en compte de mousse polyuréthane dans la modélisation (indispensable dans la phase de fabrication) n'a qu'une influence minime sur la raideur et la force maximum. Elle pilote en revanche le comportement post-pic de l'essai.

ABSTRACT.

This study investigated the mechanical behaviour of a truss core sandwich panel under three-point bending load. The sandwich panel was made of GFRP skins and GFRP connectors. During the manufacturing process, the fibres of the connectors are first inserted in a polyurethane foam before a vacuum infusion by an epoxy matrix. A finite element model is used to predict the nonlinear and the post-peak behaviour of the three-point bending test, using the Hashin model [HAS 80]. The model allowed a step-by-step visualisation of the damage of connectors and the skins. The results were compared with the experimental data for validation purposes. It emphasises that the role of the polyurethane foam (that is required in the manufacturing process) in the model was insignificant in terms of stiffness and maximum load, but it has an influence on the post-peak behaviour.

MOTS-CLÉS : panneau sandwich, âme non-conventionnelle, flexion, éléments finis.

KEYWORDS: sandwich panel, truss core, bending, finite element method.

1. Introduction

Le concept de panneaux sandwich a été introduit durant la deuxième guerre mondiale pour assurer de haute performance mécanique tout en garantissant une faible masse surfacique. Aujourd'hui les panneaux sandwichs sont utilisés dans plusieurs domaines : l'aéronautique, l'automobile, le ferroviaire... En génie civil, on retrouve plusieurs applications comme des passerelles [CHR 17], des planchers [HOP 17] ou des panneaux de façade [SHA 13]. Ce travail s'inscrit dans le cadre des panneaux sandwichs non-conventionnels [BIR 18] avec une âme renforcée par des connecteurs en GFRP (glass fibre reinforced polymer) dans le but de répondre à la problématique de cisaillement de l'âme. La fabrication de ces panneaux est faite par une méthode innovante présentée dans [DJA 19]. Des connecteurs en GFRP ont été créés en insérant des fibres de verre dans une mousse polyuréthane, avant de procéder à l'infusion sous vide du panneau sandwich [DJA 19]. Cet article aborde d'abord la caractérisation des composants du panneau sandwich étudié, ensuite le comportement en flexion, et enfin la modélisation par éléments finis du comportement non-linéaire et post-pic. L'impact de la prise en compte de la mousse polyuréthane dans le modèle a été présenté.

2. Caractérisation des composants du panneau sandwich

Le panneau sandwich étudié est composé de peaux en GFRP et de connecteurs du même matériau. Afin d'implémenter un modèle numérique capable de prédire son comportement mécanique, il est nécessaire d'évaluer les modules d'élasticité et les contraintes à rupture de chaque composant. La réponse mécanique des peaux [0°, 90°] en GFRP a été évaluée par des essais de traction conformément à la norme EN 527. Pour évaluer le degré d'orthotropie du matériau, ce test a été effectué suivant les directions 0° et 90° du textile. La Figure 1 présente les résultats de la caractérisation des peaux. Les courbes montrent un comportement bilinéaire gouverné par les rigidités $E_{EN\ 527}$ et E_2 . La rupture des éprouvettes s'est produite de manière fragile. Pour le module d'élasticité de la mousse polyuréthane, nous nous sommes référés aux données du fabricant (1,8 MPa selon la norme NF EN 826).

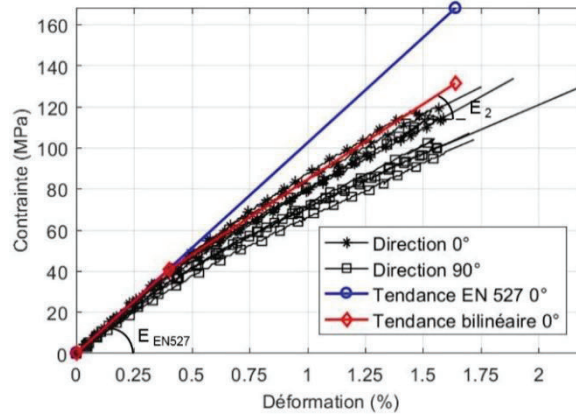


Figure 1. Caractérisation des peaux en GFRP.

Les connecteurs ont été caractérisés par l’essai présenté dans la Figure 2. L’essai a été conduit en déplacement avec une vitesse de 0.3 mm/min. L’acquisition de la force appliquée et de l’écartement relatif des peaux en GFRP s’est faite avec une fréquence de 2 Hz. Afin d’apprécier l’incidence des éventuels défauts de planéité de la machine sur les mesures, les éprouvettes une, deux et trois ont été testées selon la configuration 1, et les éprouvettes quatre et cinq selon la configuration 2 (cf. Figure 2). Les contraintes de compression et de traction dans les connecteurs ont été calculées par l’équation 1.

$$\sigma_{con} = F \cos \alpha / 4\pi d^2 \tag{1}$$

Le paramètre α est l’inclinaison des connecteurs au cours de l’essai. Il a été calculé suivant l’équation 2. L_{ix} est la longueur du connecteur projetée sur l’axe horizontal, esp_{peaux} est l’espacement initial des peaux et U le déplacement de la traverse.

$$\tan \alpha = (esp_{peaux} + U) / L_{ix} \tag{2}$$

En supposant la variation de l’angle α très petite, la longueur des connecteurs au cours de l’essai L a été calculée suivant l’équation 3. Ainsi, la déformation longitudinale du connecteur est calculée et les courbes contrainte-déformation des essais de compression et de traction ont été construites (cf. Figure 2).

$$L = \sqrt{L_{ix}^2 + (esp_{peaux} + U)^2} \tag{3}$$

Les paramètres extraits de la caractérisation des composants du panneau sandwich sont résumés dans le Tableau 1.

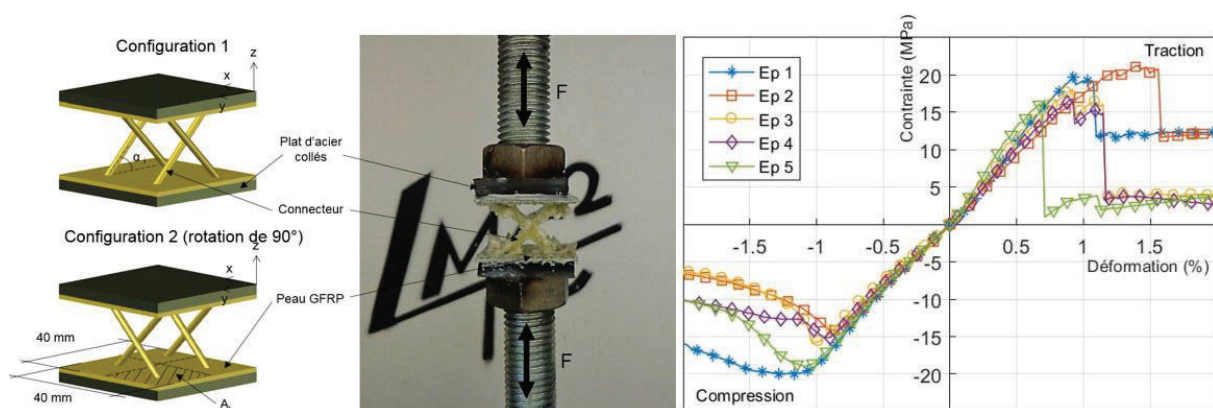


Figure 2. Caractérisation des connecteurs en GFRP.

Tableau 1. Paramètres extraits de la caractérisation des composants du panneau sandwich.

	E (MPa)		σ_{max} (MPa)	
Peaux	0° : 10230 (6,9%)	90° : 8963 (5,6%)	0° : 138 (15,5%)	90° : 109 (14,0%)
Connecteurs	Compression: 1593 (5.6%)	Traction: 2331 (11.6%)	Compression: 17 (13.4%)	Traction: 18 (10.4%)

3. Comportement en flexion

3.1. Essais de flexion trois points

Les éprouvettes testées ont une longueur de 300 mm, une largeur de 90 mm et une épaisseur de 22 mm. La portée est de 250 mm. La vitesse de conduite de l'essai et la fréquence d'acquisition sont respectivement de 1 mm/min et 2 Hz. Ce test de flexion est illustré à la Figure 3. Le comportement mécanique est linéaire jusqu'à une flèche de 1.5 mm en moyenne. Le comportement non linéaire qui s'en suit est associé à la rotation des sections des connecteurs et à leur endommagement. Le mode de rupture enregistré est un écrasement de la peau supérieure au droit de la ligne de chargement. La force ultime enregistrée est en moyenne de 899 N (7.14%).

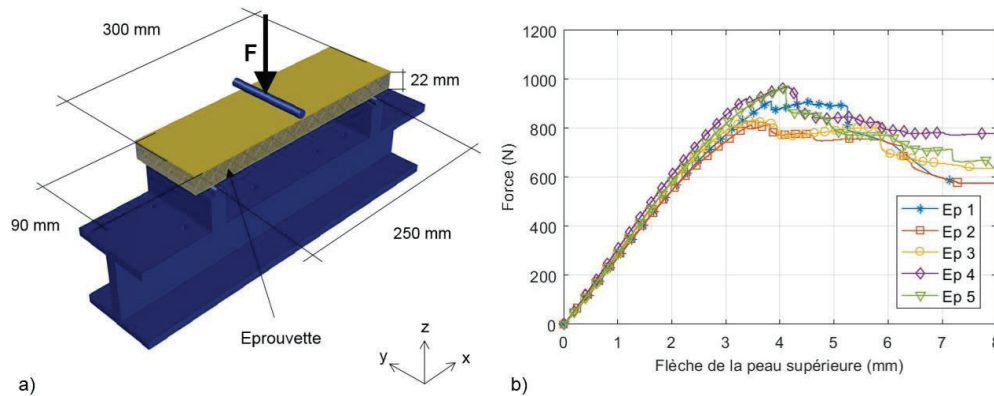


Figure 3. Essai de flexion trois points : dimensions et résultats expérimentaux.

3.2. Modélisation par éléments finis

Une modélisation 3D par éléments finis (EF) sous le logiciel ABAQUS [ABA 19] est proposée pour reproduire le comportement mécanique en flexion. Des éléments coques volumiques SC8R (hexaèdres), avec 5 points d'intégration dans leur épaisseur (méthode de Simpson) ont été retenus pour mailler les peaux et les connecteurs. L'hypothèse d'état de contraintes planes est donc prise. Les paramètres mécaniques définissant le comportement élastique sont présentés dans le Tableau 2. Le modèle de Hashin [HAS 80] a été retenu pour prendre en compte la ruine en traction des fibres, la ruine en compression dans le sens des fibres, la fissuration transversale de la matrice tendue, l'écrasement de la matrice comprimée dans le sens transversal. Plus de détail sur les critères d'initiation des modes de ruptures et l'énergie dissipée par chacun d'eux sont présentés dans [HAS 80], [ABA 19]. Le Tableau 3 présente les contraintes ultimes et les énergies dissipées pour chaque mode de rupture.

Tableau 2. Paramètres mécaniques implémentés dans le modèle pour définir le comportement élastique.

Paramètre mécanique	Symbole	Peaux	Connecteurs
Module longitudinal (MPa)	E_{xx}	10230	1947
Module transversal (MPa)	E_{yy}	8963	1947
Coefficient de poisson	ν_{xy}	0.21	0.33
Module de cisaillement (MPa)	$G_{xy}; G_{xz}; G_{yz}$	4000 ; 4000 ; 4000	730 ; 730 ; 730

Tableau 3. Contraintes ultimes et énergies dissipées pour chaque mode d'endommagement du modèle d'Hashin.

Mode d'endommagement	Sens longitudinal			Sens transversal		
	Traction	Compression	Cisaillement	Traction	Compression	Cisaillement
Connecteur	$X^T = 18.4 \text{ MPa}$	$X^C = 70 \text{ MPa}$	$S^L = 14 \text{ MPa}$	$Y^T = 70 \text{ MPa}$	$Y^C = 70 \text{ MPa}$	$S^T = 14 \text{ MPa}$
	$G_{ft}^c = 0.14 \text{ N/mm}$	$G_{fc}^c = 1.18 \text{ N/mm}$	/	$G_{mt}^c = 1.24 \text{ N/mm}$	$G_{mc}^c = 1.24 \text{ N/mm}$	/
Peau	$X^T = 70 \text{ MPa}$	$X^C = 70 \text{ MPa}$	$S^L = 14 \text{ MPa}$	$X^T = 109 \text{ MPa}$	$Y^C = 70 \text{ MPa}$	$S^T = 14 \text{ MPa}$
	$G_{ft}^c = 1.43 \text{ N/mm}$	$G_{fc}^c = 1.20 \text{ N/mm}$	/	$G_{mt}^c = 2.96 \text{ N/mm}$	$G_{mc}^c = 1.43 \text{ N/mm}$	/

La confrontation des résultats de la modélisation avec la réponse expérimentale est présentée sur la Figure 4. Deux modélisations ont été effectuées, en négligeant ou non la mousse polyuréthane (quand elle a été considérée, elle a été modélisée par un comportement élastique parfait). Dans un cas comme dans l'autre, la réponse en termes de raideur et de force maximum est satisfaisante en comparaison avec les valeurs expérimentales (l'erreur est inférieure à 10% dans les deux cas). Toutefois, la considération de la mousse aboutit à une réponse du modèle qui reproduit mieux la réponse expérimentale. Le comportement post-pic est par contre très affecté par la prise en

compte ou non de la mousse polyuréthane dans le modèle. Bien que le modèle reproduise le comportement post-pic d'une façon plus satisfaisante avec la prise en compte de cette dernière, l'hypothèse d'un comportement élastique parfait pour ce matériaux ne permet pas de reproduire la diminution de la force entre 6 mm et 8 mm de flèche. La modélisation par éléments finis a permis d'avoir accès à la cinématique de l'endommagement qui se traduit par un endommagement des connecteurs tendus à leur jonction avec les peaux (entre 1,8 mm et 3 mm de flèche), puis un endommagement de la peau supérieure au droit de la ligne de chargement et à son alentour. Enfin, il est à noter que la géométrie de la mousse, qui est un parallélépipède auquel est soustraite la géométrie des connecteurs, impose un maillage très dense pour approcher son volume réel, et augmente le temps de calcul de 150% par rapport au premier cas.

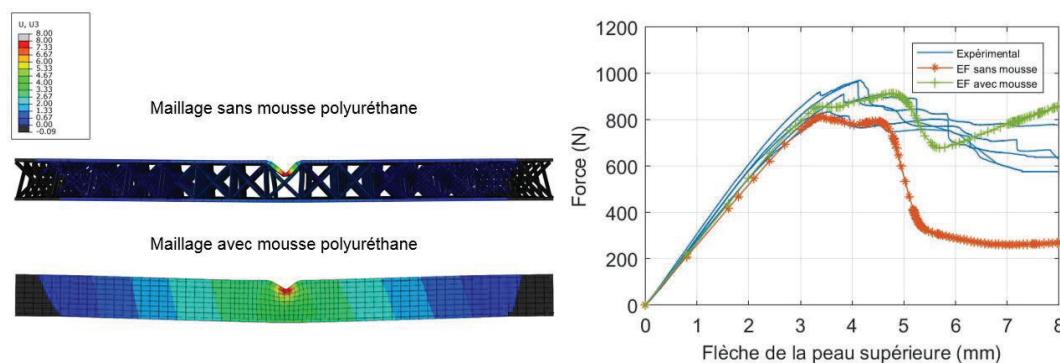


Figure 4. Cartographie de la flèche et confrontation des résultats de la modélisation avec la réponse expérimentale.

4. Conclusions

La modélisation numérique présentée est en accord avec les résultats expérimentaux. Elle confirme l'observation expérimentale que l'apport mécanique de la mousse polyuréthane sur la raideur et la force maximum est négligeable. Quant au comportement post-pic, il est hautement impacté par la considération ou non de la mousse polyuréthane. En somme, la considération ou non de cette dernière est un compromis entre la précision visée par le modèle en comparaison avec la réponse expérimentale, et le temps de calcul de la modélisation. La validation du modèle présenté permet d'ouvrir la perspective de l'étude de l'influence des paramètres géométriques des connecteurs (densité surfacique, angle, diamètre...).

5. Remerciements

Les auteurs remercient le projet FUI « Printcim » pour le financement de l'étude et également l'entreprise SAERTEX pour la fourniture des matériaux d'âme des panneaux. Les auteurs remercient également l'équipe de techniciens (E. Janin et N. Cottet) pour leur support technique.

6. Bibliographie

- [HAS 80] HASHIN Z., « Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites », *J. Appl. Mech.*, vol. 47, no. 2, pp. 329–334, Jun. 1980.
- [CHR 17] CHRÓSCIELEWSKI J., MIŚKIEWICZ M., PYRZOWSKI L., SOBCZYK B., and WILDE K., « A novel sandwich footbridge - Practical application of laminated composites in bridge design and in situ measurements of static response », *Compos. Part B Eng.*, vol. 126, pp. 153–161, Oct. 2017.
- [HOP 17] HOPKINS P. M., NORRIS T., and CHEN A., « Creep behavior of insulated concrete sandwich panels with fiber-reinforced polymer shear connectors », *Compos. Struct.*, vol. 172, pp. 137–146, Jul. 2017.
- [SHA 13] SHARAF T. and FAM A., « Analysis of large scale cladding sandwich panels composed of GFRP skins and ribs and polyurethane foam core », *Thin-Walled Struct.*, vol. 71, pp. 91–101, Oct. 2013.
- [BIR 18] BIRMAN V. and KARDOMATEAS G. A., « Review of current trends in research and applications of sandwich structures », *Compos. Part B Eng.*, vol. 142, pp. 221–240, Jun. 2018.
- [DJA 19] DJAMA K., MICHEL L., GABOR A., and FERRIER E., « Mechanical behaviour of a sandwich panel composed of hybrid skins and novel glass fibre reinforced polymer truss core », *Compos. Struct.*, vol. 215, pp. 35–48, May 2019.
- [ABA 19] « Abaqus Analysis User's Guide (6.14) ». [Online]. Available: <https://www.sharcnet.ca/Software/Abaqus/6.14.2/v6.14/books/usb/default.htm>. [Accessed: 25-Jan-2019].