
Comportement en flexion d'un panneau sandwich avec peaux hybrides (GFRP–Matrice minérale) liées par une âme GFRP.

Khaled DJAMA, Laurent MICHEL, Aron GABOR, Emmanuel FERRIER

Université de LYON, Université Claude Bernard Lyon1 - Laboratoire des Matériaux Composites pour la Construction (LMC²), 82 boulevard Niels Bohr, La Doua, 69622 Villeurbanne Cedex

khaled.djama@gmail.com, laurent.michel@univ-lyon1.fr, aron.gabor@univ-lyon1.fr, emmanuel.ferrier@univ-lyon1.fr

RÉSUMÉ. Les panneaux sandwich sont grandement utilisés dans le domaine de l'aéronautique. En génie-civil, leur utilisation comme panneaux d'habillage en façade est assez répandue. En tant qu'éléments structurels, celles-ci restent peu étendues. L'objectif de ces travaux de recherche porte sur le développement de panneau de façade performant du point de vue mécanique. Les résultats de cette étude montrent un bon comportement en flexion de la structure testée, ainsi qu'une possibilité d'utilisation comme panneaux de grandes portées (1 à 6 m) pour une masse surfacique d'environ 20kg/m² (avec peaux hybride GFRP-Matrice minérale). La liaison des deux peaux du panneau GFRP-matrice minérale par des connecteurs en GFRP permet un comportement limitant les effets de cisaillement. Les couches minérales de part et d'autre du panneau permettent la tenue au feu, participent à la rigidification du système et reprennent les efforts de compression. Une modélisation numérique est proposée. Une loi de comportement plastique-endommageable est retenue pour la modélisation des couches minérales. L'effet de l'introduction d'une loi de traction-séparation (mode 2) dans la modélisation de l'interface GFRP–Matrice minérale est discuté.

ABSTRACT. Sandwich panels are widely used mainly in the aeronautic field. In civil engineering, we find some applications as cladding panels. The use of sandwich panels as structural elements is still rare. The results of the current research show an efficient bending behaviour related to the weight of the panel (20kg/m² using hybrid GFRP and mineral matrix skins). The connection of the two skins by GFRP connectors leads to a monolithic behavior. The mineral matrix guarantees protection against high temperature solicitations, increases the stiffness of the system and avoids the buckling of the compressed GFRP skin. A finite element model is presented using a Concrete Damage-Plasticity law for the mineral matrix. The effects of introducing a tensile-slip law (mode 2) for the GFRP–Mineral matrix interface are discussed.

MOTS-CLÉS : Panneaux sandwich, Âme en GFRP, Élément fini, Flexion, Plastique-endommageable, Traction-séparation.

KEY WORDS: Sandwich panels, GFRP core, Finite element, bending, Concrete Damage-plasticity, tensile-slip mode.

1. Introduction

Dans le but de garantir des performances mécaniques élevées tout en minimisant la masse, les panneaux sandwichs sont généralement constitués d'un matériau d'âme peu dense lié avec deux peaux de part et d'autre de l'âme. Le matériau d'âme peut prendre la forme de mousse (généralement en polymère) ou de structure creuse (nid d'abeille, structure en I, structure en Z...) [BIR 18]. Les peaux peuvent être métalliques ou en matériaux composites (à matrice organique ou inorganique). Les matrices inorganiques ont une masse volumique plus importante que les matrices conventionnelles époxydiques, néanmoins elles reprennent parfaitement les efforts de compression et répondent à la problématique de tenue au feu. Leur utilisation comme parement de façade est très appréciée des architectes.

Les problématiques mécaniques rencontrées avec l'utilisation des panneaux sandwich sont principalement :

- Une flèche de cisaillement non négligeable, due dans la plupart des situations à une faible rigidité de l'âme
- La délamination entre les différents constituants.
- Le flambement des peaux fines sous chargement concentré.

Globalement, il s'agit donc de limiter le cisaillement inter laminaire en assurant une bonne liaison entre les peaux.

2. Le panneau sandwich étudié

Le panneau sandwich étudié est constitué de deux peaux en GFRP reliées par connecteurs mécaniques avec un angle de $\pm 45^\circ$ formés de la même matière (procédé SAERTEX [SAE 18]). Les fibres de verre de ces connecteurs sont aiguillées dans une mousse polyuréthane. Après la mise en place des tissus de verre qui renforcent les peaux, le panneau est polymérisé par infusion sous vide [YEN 09] avec une matrice vinylester dont la viscosité est compatible avec ce processus de fabrication. Une couche de matrice minérale est coulée de chaque côté de ce panneau. La Figure 1 illustre ce propos.



Figure 1. Description de la géométrie des panneaux

3. Caractéristiques géométriques et mécanique des matériaux

Le Tableau 1 donne les caractéristiques géométriques et mécaniques des peaux et des connecteurs en GFRP. Le module d'élasticité du composite est calculé par la loi des mélanges. Le textile constituant les peaux est en fibres de verre tissées bidirectionnel d'un grammage de 400gr/m².

Tableau 1. Caractéristiques géométriques et mécaniques des peaux et des connecteurs en GFRP.

Dénomination	Caractéristiques [mm]	V _f [%]	E _{fibres} [MPa]	E _{résine} [MPa]	E _{composite} [MPa]
Peaux GFRP	Epaisseur : 1,3	50%	73000	4000	38500
Connecteurs GFRP	Rayon : 1	10%	73000	4000	10900

La matrice minérale à base cimentaire a une masse volumique de 1900kg/m³ à l'état durci. Ses caractéristiques mécaniques sont déterminées par des essais de compression et de traction directe [BRO 05] réalisés sur 5 éprouvettes cylindriques, de 4cm de diamètre et de 8cm de hauteur, dans chacun des cas.

4. Essais et discussion des résultats

L'étude se compose de deux types de tests en flexion :

– Un test de flexion trois points sur appuis rapprochés (L=25cm ; H/L=0,08), générant de fortes contraintes de cisaillement. Il est réalisé sur des plaques de 9cm de large. Les épaisseurs e_{m-sup} et e_{m-inf} (Figure 1) sont de 5mm. L'épaisseur e est de 10mm. L'essai est piloté en déplacement avec une vitesse de 1mm/mn. Les résultats force – déplacement à mi-travée sont présentés dans la Figure 2.

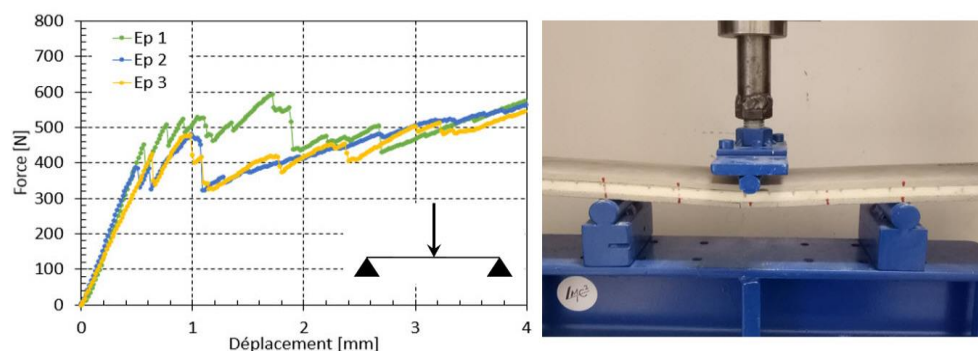


Figure 2. Flexion 3 points. A gauche : Courbe force – déplacement. A droite : Photographie de l'essai.

Les courbes force – déplacement de la Figure 2 présentent un comportement quasi-linéaire jusqu'à 400N environ, puis il s'en suit une phase d'endommagement de la matrice minérale tendue accompagnée d'une délamination à l'interface GFRP–Matrice minérale.

– Un test de flexion sur des plaques d'échelle 1 (120cm×60cm) biarticulées d'éclatement H/L de 0,026. La portée est de 108cm. Le chargement est réparti sur 63cm et appliqué par le biais d'un coussin gonflable. Les épaisseurs e_{m-sup} et e_{m-inf} sont respectivement de 5mm et 2mm. L'épaisseur e est de 20mm. Le chargement est appliqué sur la couche de 5mm de matrice minérale. L'essai est conduit en augmentant la pression dans le coussin. Les résultats sont présentés dans la Figure 3.

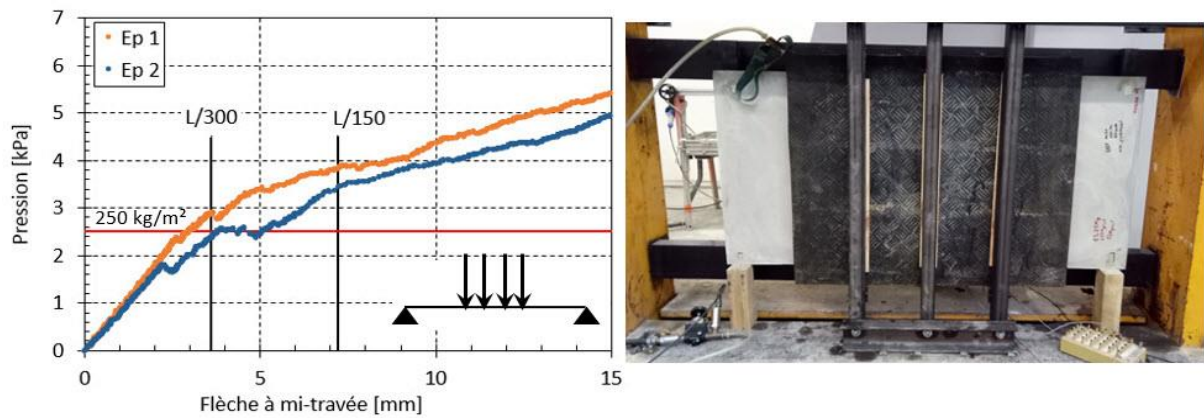


Figure 3. Résultats de l'essai de flexion sous chargement réparti + Photographie de l'essai.

Les résultats montrent une courbe quasiment bilinéaire. La perte de rigidité est associée à la fissuration de la matrice minérale tendue. Cela est confirmé par des résultats de jauges de déformation qui font apparaître l'amorce de la phase de fissuration. Comme le montre la modélisation numérique explicitée dans le paragraphe suivant, cette phase est accompagnée par un endommagement de l'interface GFRP – Matrice minérale.

5. Modélisation numérique

5.1. Modèle et lois de comportement

La modélisation numérique est réalisée sous le logiciel *Abaqus/CAE*. Une formulation implicite avec une résolution par la méthode de Newton est utilisée. Les peaux GFRP sont modélisées par des éléments coques à 4 nœuds (5mm×5mm) et les connecteurs les reliant sont modélisés par des éléments treillis (1 élément par connecteur). La loi de comportement adoptée est linéaire isotrope. La matrice minérale est modélisée par des éléments massifs cubiques à 8 nœuds (5mm×5mm×1mm) (Figure 4). Une loi de comportement plastique-endommageable est retenue pour approcher le comportement non linéaire en compression et la fissuration par des déformations inélastiques. C'est une extension du modèle de Drucker-Prager [LUC 96] basée sur la définition d'une surface limite au-delà de laquelle le comportement n'est plus linéaire [CHI 17]. Une loi de traction-séparation définie la rupture en mode 2 de l'interface GRFP–Matrice minérale [PEN 13]. Ses paramètres sont calés sur l'essai de flexion 3 points (Figure 2) et sont repris dans la modélisation des panneaux d'échelle 1.

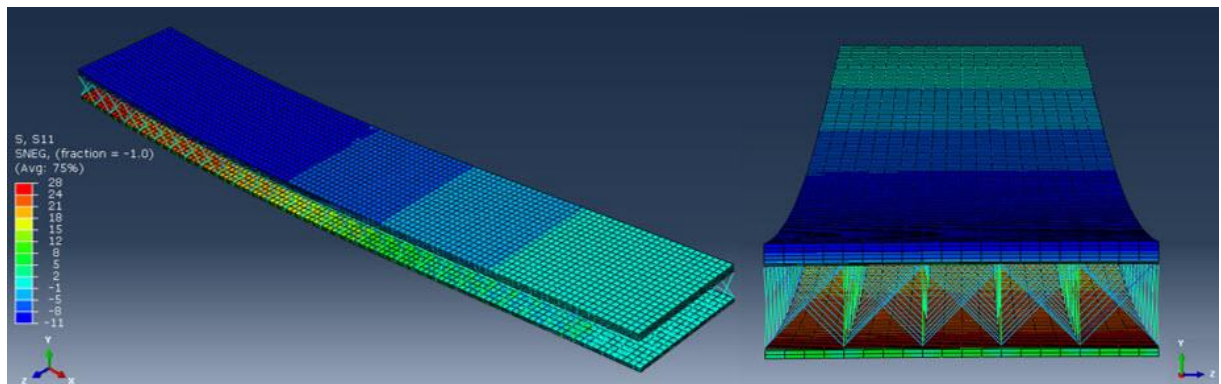


Figure 4. Visualisation du maillage Eléments finis

5.2. Confrontation avec les résultats expérimentaux

Les résultats de la modélisation sont confrontés aux résultats expérimentaux dans la Figure 5.

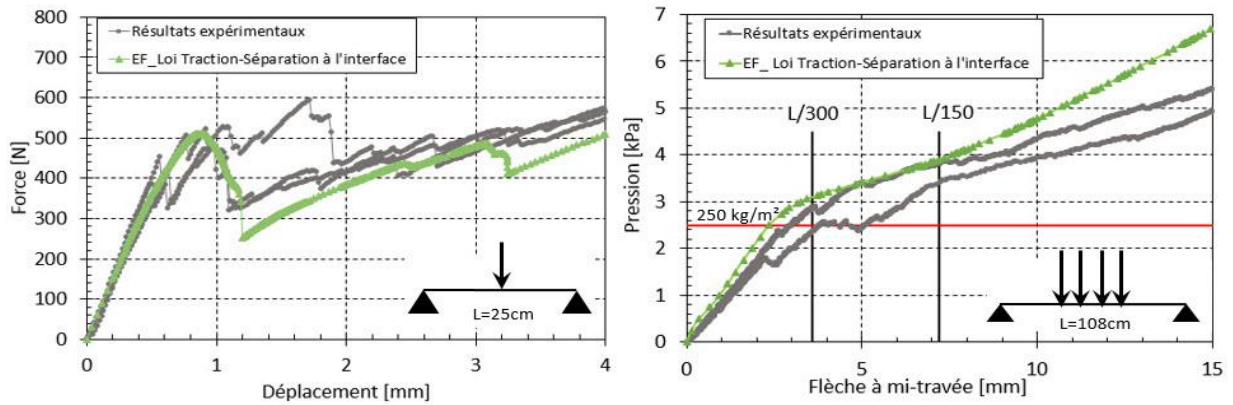


Figure 5. Confrontation modélisations – essais

Ils montrent une bonne corrélation par rapport aux résultats expérimentaux. La prise en compte de l'endommagement de l'interface GFRP–Matrice minérale par la loi de traction-séparation est nécessaire pour reproduire précisément le comportement des poutres testées en flexion 3points. Pour les plaques d'échelle 1, l'analyse numérique montre que les contraintes de cisaillement générées n'endommagent pas l'interface. Cela correspond aux observations expérimentales.

6. 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.

7. Conclusions et perspectives

La liaison des peaux du panneau sandwich par des connecteurs rigides permet un comportement monolithique du panneau. Vu les résultats de flexion (Figure 3), une utilisation comme panneaux de bardage de grandes dimensions, ou comme éléments structurels légers (environ 20kg/m² pour les configurations présentées) est envisageable sous réserve d'études complémentaires : impact, fatigue, fluage.... Les paramètres de la loi de traction-séparation de l'interface GFRP–Matrice minérale (contrainte de cisaillement ultime, énergie de propagation des fissures, rigidités des éléments d'interface) feront l'objet d'une détermination rigoureuse par l'expérience, pour consolider l'implémentation du modèle numérique (essais push-out, End Notched Flexure tests). L'impact de l'introduction d'une telle loi sur le résultat de la modélisation dépend grandement des paramètres géométriques du test et du mode de chargement.

Bibliographie

- [BIR 18] BIRMAN V., KARDOMATEAS G. A., « Review of current trends in research and applications of sandwich structures », *Compos. Part B Eng.*, vol. 142, p. 221- 240, juin 2018.
- [BRO 05] BROCKMANN T., Mechanical and fracture mechanical properties of fine grained concrete for textile reinforced composites, Thèse de doctorat, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2005.
- [CHI 17] CHI Y., YU M., HUANG L., XU L., « Finite element modeling of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete using modified concrete damaged plasticity », *Eng. Struct.*, vol. 148, p. 23- 35, oct. 2017.
- [JUN 16] JUNES A., SI LARBI A., « An indirect non-linear approach for the analysis of sandwich panels with TRC facings », *Construction and building materials*, vol 112, p.406-415, mars 2016.
- [LUC 96] LUCCIONI B., OLLER S., DANESI R., « Coupled plastic-damaged model », *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 129, no 1, p. 81- 89, janv. 1996.
- [PEN 13] PENG L., Modélisation numérique d'assemblages collés : Application à la réparation de structures en composites, Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 2013.
- [SAE 18] « Core material for composites: SAERfoam® ». [En ligne]. Disponible sur : <https://www.saertex.com/en/products/saerfoam>. [Consulté le : 09-mars-2018]
- [YEN 09] YENILMEZ B., SENAN M., MURAT SOZER E., « Variation of part thickness and compaction pressure in vacuum infusion process », *Compos. Sci. Technol.*, vol. 69, no 11, p. 1710- 1719, sept. 2009.