



## Innovation et progrès dans le domaine des matériaux

# STRUCTURES À HAUTES PERFORMANCES À BASE DE LAMELLÉ-COLLÉ ET DE BFUP

## HIGH PERFORMANCE STRUCTURES COMPOSED BY GLULAM AND UHPC

**Laurent MICHEL\*, Kanhchan KONG\*, Emmanuel FERRIER\***

\*LMC<sup>2</sup> - Laboratoire des Matériaux Composites pour la Construction  
Université Lyon 1 – site de Villeurbanne DOUA – 82 bd Niels Bohr  
69622 Villeurbanne Cedex  
laurent.michel@univ-lyon1.fr

### 1. INTRODUCTION

La construction de structures en bois lamellé-collé (bois lamellé-collé) a augmenté de manière significative en Europe ces dernières années. Comme le bois est un matériau naturel ayant une capacité d'atténuer les effets néfastes des gaz à effet de serre, son utilisation accrue est prévisible lorsque les principes de développement durable sont pris en considération. En conséquence, la consommation de bois a augmenté de manière significative pour la construction en Europe, à un niveau tel que de nouvelles façons d'optimiser son utilisation sont maintenant nécessaires. La plus grande opportunité pour étendre l'utilisation des produits du bois tel que le bois lamellé-collé dans la construction est de combiner ce matériau avec d'autres tels que des éléments composites ou hybrides (par exemple renforcé de fibres de bois lamellé-collé). Selon K.J. Fridley [1], il est nécessaire de « développer des systèmes hybrides qui misent sur l'économie et la flexibi-

lité du bois et les caractéristiques uniques des autres matériaux pour permettre de réaliser des économies de matières et d'être plus performant dans le produit final ». L'objectif principal lors de la conception d'une telle section hybride est de faire usage des meilleures caractéristiques de chaque matériau. Les développements récents des bétons fibrés ultra haute performance ont conduit à de nouveaux matériaux cimentaires [2] ayant une résistance à la compression d'environ 150 MPa, une résistance à la traction de 10 MPa et un module de Young de 45 GPa [2]. Ces propriétés intéressantes peuvent être mises à profit pour couler des éléments minces en forme de planche qui peuvent être liés aux faces supérieures et inférieures d'une section bois lamellé-collé afin d'améliorer leurs propriétés de flexion, comme cela a été mis en évidence par Ferrier et al. [3, 4]. Le fait que le BFUP ait une résistance à la traction élevée permet l'utilisation de barres d'armature en acier ou des PRF dans la planche tendue [5]. Saadatmanesh et Buell [6] ont noté que les barres PRF de verre utilisées pour renfor-



cer une poutre lamellé-collé ont un effet positif sur la rigidité en flexion et sur la charge ultime. On peut donc s'attendre à ce que lorsque les barres de renforcement en PRF utilisées pour renforcer la zone tendue de la poutre hybride testée dans cette étude, aient des effets similaires. Les armatures PRF ont une résistance à la traction comprise entre 1200 et 2500 MPa et leur module d'Young est dans la gamme de 40 000 à 160 000 MPa. Ces propriétés mécaniques, combinées avec la légèreté et la résistance à la corrosion, rendent les armatures PRF très adaptées pour cette application. Cet article présente une étude expérimentale d'un nouveau type de poutre hybride. Comme le montre la figure 1, la poutre hybride est obtenue par collage de lamelles en BFUP armé ou non par des armatures en PRFC.

## 2. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE : POUTRE

### 2.1. Description des corps d'épreuve

Les lamelles en BFUP ont une résistance à la compression de 150 MPa et une résistance à la traction de 10 MPa, sont coulées en couches différentes d'une épaisseur comprise entre 1 et 4 cm. Afin d'augmenter les capacités ultimes en traction des planches en BFUP, des armatures PRF ont été utilisées dans la partie tendue [8, 9]. Un programme expérimental a été réalisé avec un panel de vingt poutres hybrides et dix poutres en lamellé-collé de référence en bois. Les paramètres géométriques sont la portée de (2 m), la largeur (90 mm) et la hauteur totale (170 mm) de la poutre. Le noyau de chaque poutre hybride est une poutre en lamellé-collé disponible dans le commerce du bois en pin Douglas de type Glh28. La résistance à la traction garantie de la section bois lamellé-collé est de 28 MPa et sa résistance à la compression garantie était de 30 MPa. Le module de Young en lamellé-collé a été pris égal à 13400 MPa. La hauteur totale des poutres hybrides a été

obtenue par le collage en partie supérieur et inférieur de planches en BFUP et d'une armature composite en partie tendue. Afin de faciliter une comparaison avec les poutres de référence, l'épaisseur des lamelles a été choisie de façon à obtenir une hauteur totale correspondant à celle du produit disponible dans le commerce. Les courbes charge-déplacement et les courbes moment-courbure obtenues expérimentalement à partir des travées de 2 mètres sont comparées. Les poutres composites bois-béton utilisées dans cette recherche ont été fabriquées en utilisant le collage mentionné précédemment. Afin d'augmenter la force de liaison, une couche de primaire a été appliquée sur la face supérieure de la section en lamellé-collé. Ce primaire permet d'augmenter l'adhérence entre le béton et le bois. La planche de béton a également été sablée avant le collage. Une colle époxy chargée a été appliquée sur la planche de béton avant leur mise en place sur le bois lamellé-collé. Pour éviter les bulles et les vides dans le joint de recouvrement, une pression a été appliquée sur cet ensemble pendant environ 24 heures. L'ensemble a durci pendant 7 jours à 20 °C. Au total, trente poutres en lamellé-collé (BLC) de dimension 2300x130x90mm ont été testées dans cette étude.

Vingt poutres ont été renforcées par une planche de BFUP et les dix autres ont été utilisées comme échantillons de contrôle. Sur les vingt poutres renforcées (BLC + BFUP) dix ont également été équipées d'armature composite en PRFC de diamètre 10 mm (tableau 1) dans la zone tendue (BLC + BFUP + PRFC). La planche de BFUP a une longueur équivalente à celles en lamellé-collé et avait une épaisseur et une largeur de respectivement 40 mm et 90 mm. Les éléments de composition du béton et sa formulation sont proposés dans le tableau 1. Le collage des éléments BFUP et lamellé collé est assuré par une colle époxy dont les caractéristiques techniques sont résumées dans le tableau 2. Cette colle est également utilisée pour l'interface entre les armatures de 10 mm en CFRP et le bois, par une technique utilisant un rainurage effectué à la défonceuse permettant d'obtenir une rainure de 15 par 15 mm.

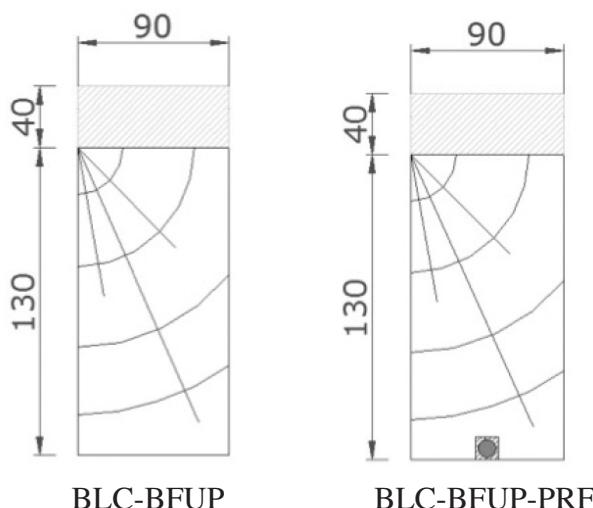


Figure 1 : Dispositif d'essai pour les poutres hybrides.





Eau [kg/m <sup>3</sup> ]	Ciment 52,5 [kg/m <sup>3</sup> ]	sable [kg/m <sup>3</sup> ]	Fumée Silice [kg/m <sup>3</sup> ]	superplastifiant [kg/m <sup>3</sup> ]	accélérateur [kg/m <sup>3</sup> ]	Fibres métal [kg/m <sup>3</sup> ]
220	550	1221	44	11	10	60

Tableau 1 : Composition du BFUP.

Densité	1,8 g /cm <sup>3</sup>
Proportion	A/B = 3/1 (en poids)
Adhérence au béton	> 4 MPa (rupture cohésive)
résistance compression (20°C, après une journée)	> 55 MPa
résistance flexion (20°C, après une journée)	> 30 MPa
Module d'élasticité	12800 MPa
Température de transition vitreuse	+ 62°C

Tableau 2 : Propriétés de la colle époxy (données fournisseur).

Résistance moyenne (MPa)	1900
Module d'élasticité moyen (MPa)	144780
Déformation moyenne (%)	1,312

Tableau 3 : Propriétés mécaniques des barres composites (résultats d'essais).

## 2.2. Dispositif d'essai

Les spécimens d'essai ont été soumis à un chargement de flexion 4 points selon la norme ASTM 3737-04 D et D 4761-05. Conformément aux normes la longueur de la distance entre l'appui et la charge appliquée est maintenue supérieure à deux fois la hauteur de la poutre. Pour une longueur de 2 m, la longueur minimale est de 0,7 m. Les essais ont été contrôlés en déplacement, tel que demandé par la norme ASTM D4761-05, et la durée d'essai totale a été maintenue entre 10 s et 10 min. La charge a été appliquée à une vitesse de 9 mm/min pour la poutre ayant un rapport portée/hauteur de 17 et 1 mm/min pour les poutres ayant un rapport portée/hauteur de 7. Les charges et les déplacements ont été enregistrés par une centrale d'acquisition de données à une fréquence de 2 Hz.

## 2.3. Analyse des résultats

Les résultats expérimentaux sont donnés sur la figure 3 et dans le tableau 4. Les dix premières poutres ont été utilisées comme référence en tant que poutres non renforcées et ont montré une disparité significative dans les résultats concernant la valeur de la charge à rupture. L'ajout d'une planche en BFUP sur la face supérieure a eu plusieurs conséquences. Ce renforcement a considérablement augmenté la charge moyenne totale à la rupture de 34 kN à 73 kN ou une augmentation de 115%, d'augmenter la rai-

deur de l'ensemble de la structure (+159%) mais aussi de réduire l'écart-type des résultats (figure 3 et tableau 4).

Dans le cas des poutres ayant été renforcées par une barre en PRFC en traction et d'une planche de BFUP, il est observé une augmentation de la charge moyenne totale à rupture jusqu'à 83 kN soit une augmentation de 159% par rapport aux poutres de référence et une augmentation de 189% de la raideur.

Les résultats à la rupture dépendent de la capacité de liaison des barres de PRF et de l'élément bois. De ce fait la disparité des résultats a augmenté à la rupture par rapport au cas de renforcement comprenant uniquement des planches en BFUP. Néanmoins l'application de renforts composites permet d'augmenter de 13% la charge totale moyenne à rupture et de 11% la raideur.

## 3. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE : PANNEAUX

Une démarche similaire a été menée sur des panneaux autoporteurs en bois avec une portée égale à 4 m.

### 3.1. Description des corps d'épreuve

La géométrie des panneaux est définie sur la figure 4 suivante :

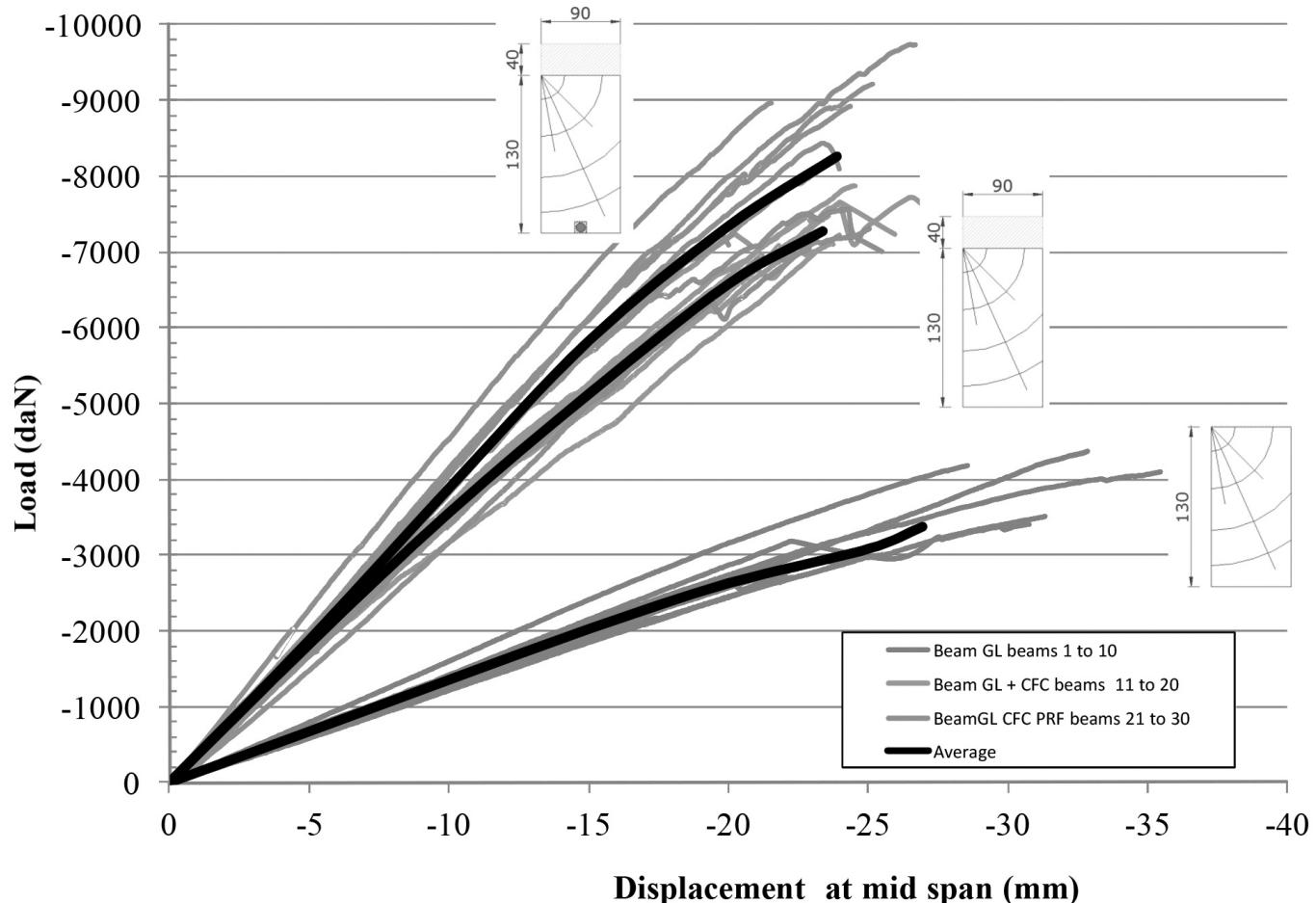


Figure 3 : Courbe charge/déplacement.

Poutre lamellé collé	N°1	N°2	N°3	N°4	N°5	N°6	N°7	N°8	N°9	N°10
Charge ultime (kN)	44	34	27	22	29	28	35	30	47	42
Moyenne	Charge ultime : 34 kN – Ecart type : 8,2 kN									
BLC + BFUP	N°11	N°12	N°13	N°14	N°15	N°16	N°17	N°18	N°19	N°20
Charge ultime (kN)	73	59	79	72	75	77	73	77	71	42
Moyenne	Charge ultime : 73 kN – Ecart type : 5,8 kN									
BLC+BFUP+PRF	N°21	N°22	N°23	N°24	N°25	N°26	N°27	N°28	N°29	N°30
Charge ultime (kN)	90	89	84	73	76	97	72	82	71	92
Moyenne	Charge ultime : 83 kN – Ecart type: 9,4 kN									

Tableau 4 : Chargement ultime des 30 poutres testées dans l'étude.

Le concept de panneau utilisé est un complexe bois composé de plusieurs éléments bois connectés entre eux par collage. Les panneaux sont composés d'éléments massifs au niveau des membrures tendues et de poutres lamellé collé au niveau des ames, les deux composants étant disposés dans le sens longitudinal. Le plafelage supérieur est

constitué de planches massives disposées transversalement.

Comme dans l'étude sur les poutres, dans le cas des panneaux, des éléments préfabriqués en BFUP ont été disposés dans la zone comprimée du panneaux et des lamelles de BFUP renforcées par PRF (fibre de verre ou carbone) ont

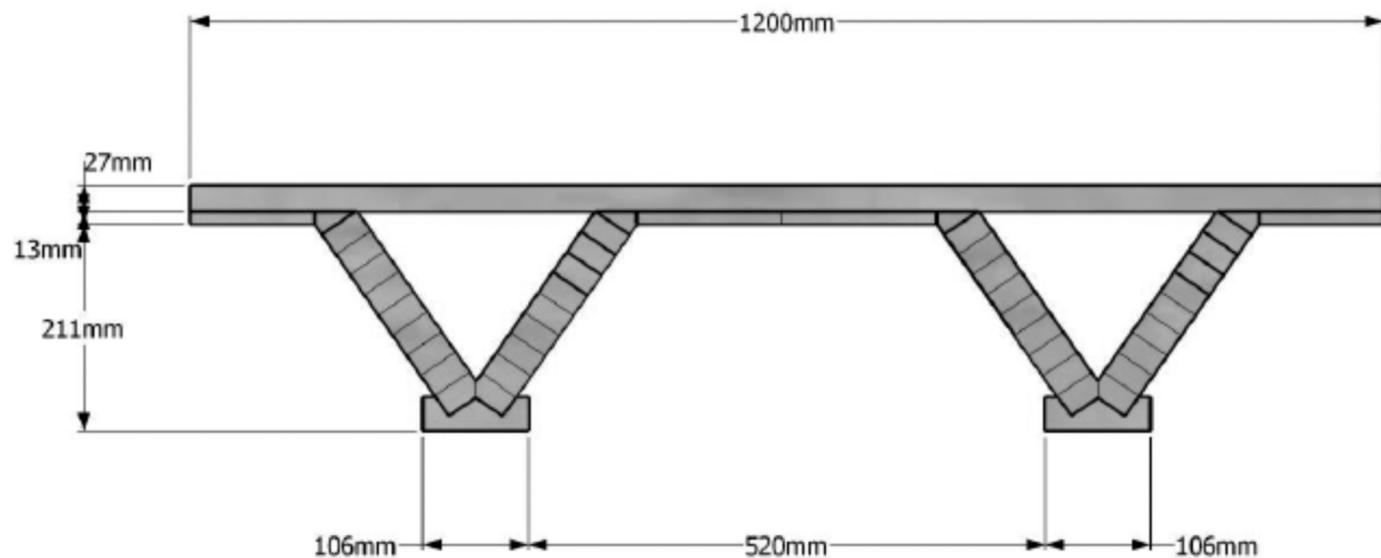
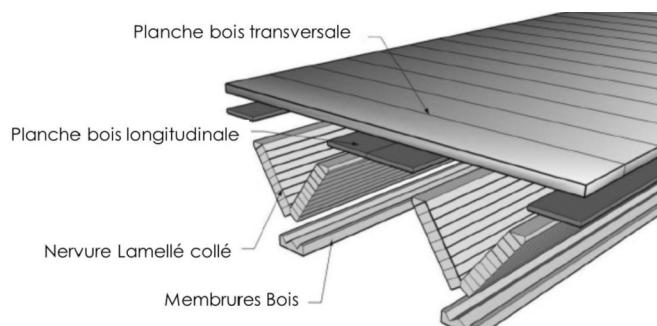
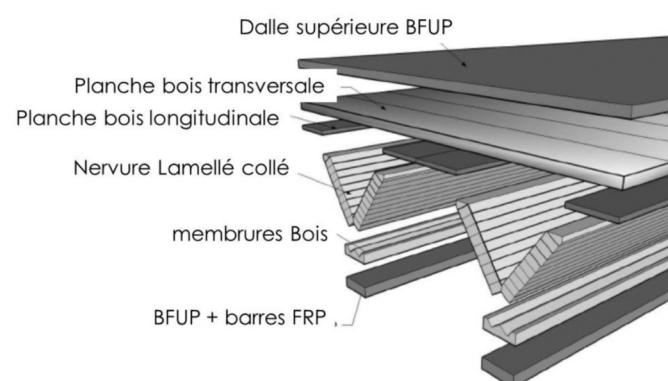


Figure 4 : Géométrie des panneaux bois BLC.



Composition des panneaux en bois



Composition des panneaux en bois renforcés

Figure 5 : Composition des panneaux bois BLC et des panneaux bois renforcés.

étés placées en zone tendue. La figure 5 regroupe la disposition type des différents spécimens.

Au sein de l'étude, plusieurs configurations ont été testées. Des panneaux avec doubles nervures, avec simple nervure, avec dalle comprimée BFUP et renforcement PRF en zone tendue ou encore PRF en zone tendue uniquement.

### 3.2. Analyse des résultats des panneaux simple nervure

Les résultats d'essai sur les panneaux simple nervure sont représentés sur la figure 6 suivante.

Les essais montrent les effets induits par les renforcements. La charge totale à rupture du panneau Bois est de 23 kN. La charge totale à rupture du panneau renforcé par une lame BFUP + PRF en zone tendue est de 62 kN soit une augmentation de 170%. Les essais montrent également que dans le cas du panneau renforcé par une lame BFUP + PRF en zone tendue le comportement est bilinéaire. La première phase correspond au comportement du panneau sans fissuration du BFUP en zone tendue. À

ce stade le comportement est similaire au comportement du panneau non renforcé. En effet dans la première phase la raideur du panneau passe de 0,23 kN/mm à 0,52 kN/mm et dans la deuxième phase de comportement la raideur du panneau renforcé par une lame BFUP + PRF en zone tendue est de 0,24 kN/mm. Pour le panneau renforcée en zone tendue et en zone comprimée, les renforcements permettent d'atteindre une rupture égale à 77 kN soit une augmentation de 235%, la raideur étant égale à 1,54 kN/mm soit une augmentation de 536% par rapport au panneau renforcé.

### 3.3. Analyse des résultats des panneaux double nervure

Les résultats d'essai sur les panneaux double nervures sont représentés sur la figure 7 suivante.

De façon similaire au panneau simple nervure, les renforcements permettent à la fois d'augmenter les charges à rupture mais également d'augmenter les raideurs de manière significative. La charge totale à rupture du panneau

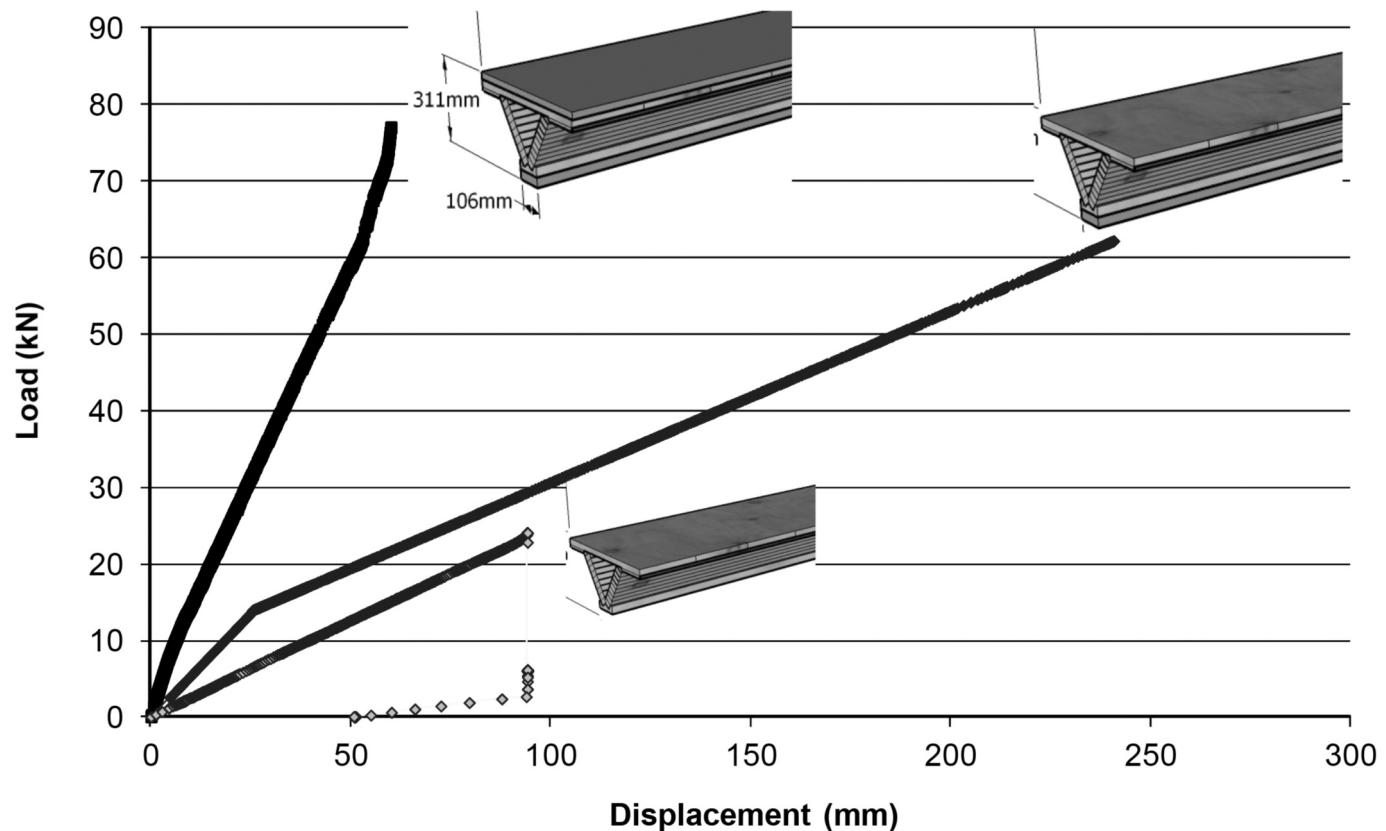


Figure 6 : Courbe charge-flèche pour les panneaux simple nervure.

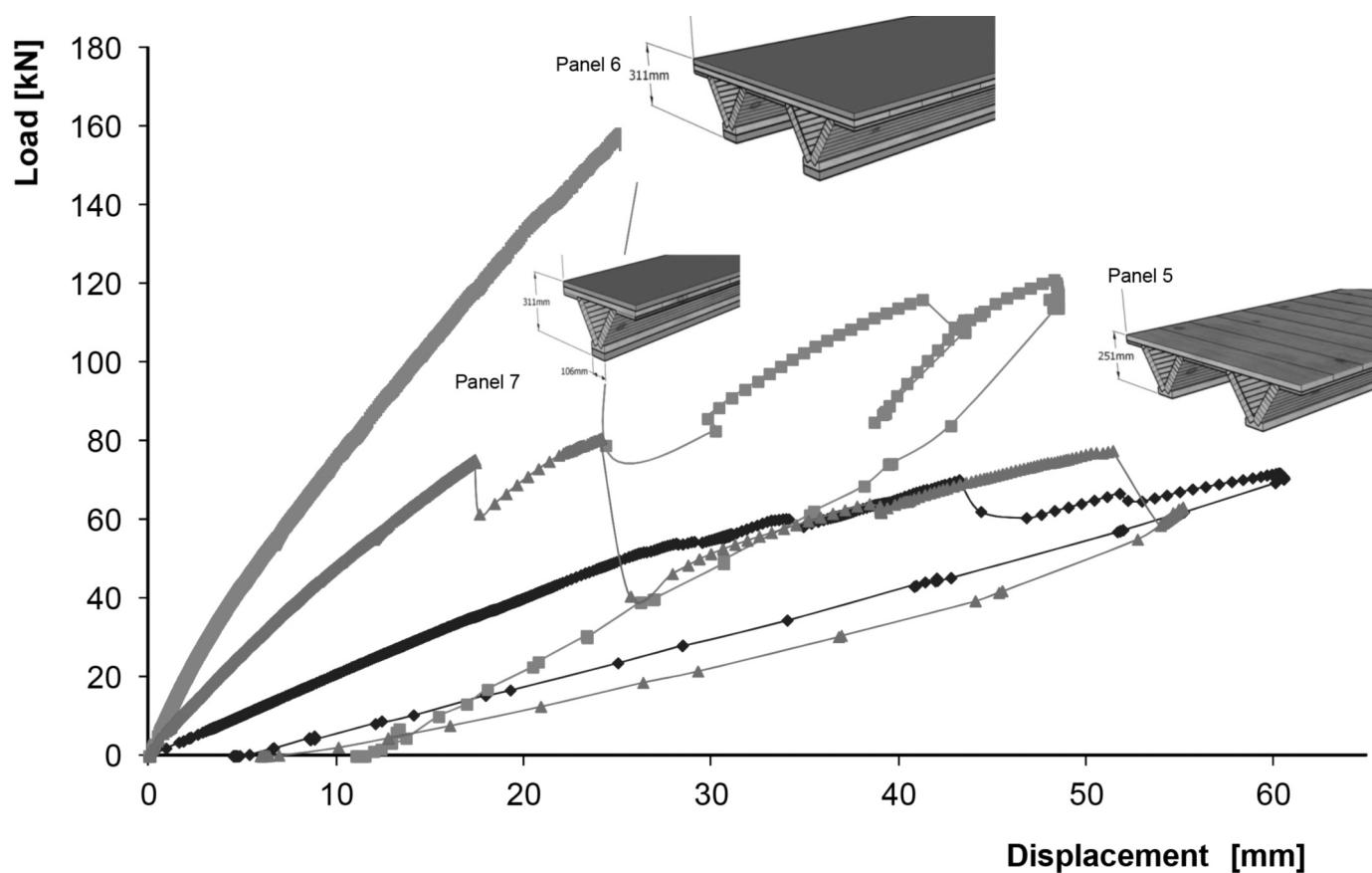


Figure 7 : Courbe charge-flèche pour les panneaux double nervure.



Bois est de 64 kN avec une raideur de 1,49 kN/mm. Le panneau renforcé à la fois en zone comprimée et en zone tendue a atteint une charge totale à rupture de 167 kN avec une raideur de 6,68 kN/mm. Cela correspond à une augmentation de 161% vis-à-vis de la charge de ruine et une augmentation de 349% vis-à-vis de la raideur.

## 4. CONCLUSIONS

Dans cette étude, des poutres et des panneaux de bois mais aussi des éléments renforcés ont été testés jusqu'à rupture afin de mettre en évidence l'intérêt fort de mettre en place des structures multimatériaux pour améliorer le comportement structural d'éléments à base de bois. Que cela soit pour les poutres ou les panneaux, le renforcement permet d'augmenter les charges à rupture de 115% à 159% pour les poutres, de 170% voire 235% pour les panneaux à simple nervure et 161% pour les panneaux à double nervure. Vis-à-vis des raideurs le renforcement permet aux poutres renforcées d'être 190% plus raides que les poutres bois non renforcées. Pour les panneaux le constat est similaire avec une raideur augmentée de 536% pour les panneaux simple nervure et de 349% pour les panneaux à double nervure. Outre les augmentations de la charge à rupture, le très fort intérêt de ces structures renforcées réside en la capacité à limiter les déplacements pour convenir des demandes aux États Limites de Service. Cela permet de diminuer de façon

non négligeable les dimensions des éléments porteurs pour une portée donnée ou bien d'augmenter les portées pour une hauteur donnée.

## 5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ASTM D4761-05, "Méthodes d'essai normalisées pour les propriétés mécaniques de bois de construction et du bois matériau à base structurelle." ASTM.
- [2] ASTM D3737 - "Pratique standard pour l'établissement des propriétés admissibles pour charpente en bois lamellé-collé (bois lamellé-collé)." 08 Comité D07.02 sur bois d'oeuvre et des produits de bois d'ingénierie, de la norme ASTM.
- [3] Dalsgaard, J., Svensson, S., Dela, B. (2005). "Basée sur la fiabilité d'étalonnage des facteurs de durée de charge pour les structures en bois." Sécurité structurale, 27, 153-169.
- [4] EUROCODE 5. (2005), NF EN 1995-1-1 "Conception et calcul des structures en bois", Afnor Standart.
- [5] Fabera, MH, KO, J., Dalsgaard Sorensenb J. (2004). "Modélisation probabiliste des propriétés du matériau bois calibrés." Sécurité structurale, 26, 295-309.
- [6] Fragiacomo, M., Gutkowski, R., Balogh, J., Fast, RS (2007). "Long-Term comportement du bois-béton de sol / plate-forme des systèmes avec des détails de connexion de cisaillement clé." Journal of Structural Engineering, vol. 133, N° 9, 1307-1315.
- [6] Fridley, K. J. (2002). "Bois et des matériaux dérivés du bois: situation actuelle et l'avenir d'un matériau de structure." Journal of Materials en génie civil, vol. 14, 531-539.