
Expérimentation et modélisation de planchers multi-matériaux bois-béton

Augeard Eric¹, Michel Laurent¹, Ferrier Emmanuel¹

¹ Université de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, Laboratoire des matériaux composites pour la construction (LMC2), 82 bd Niels Bohr, 69622 Villeurbanne. eric.augeard@univ-lyon1.fr

RÉSUMÉ. Le renforcement des structures bois est un enjeu majeur dans le génie civil. Le but est d'augmenter d'une part la capacité portante mais également de réduire les déplacements en augmentant la rigidité des éléments hybrides. Une méthode est de mixer le bois avec des matériaux plus rigide comme le béton ou des armatures comme les polymères renforcés aux fibres. Pour connecter les matériaux entre eux, plusieurs techniques existent avec leurs avantages et inconvénients. Cet article traite d'une connexion innovante à base de collage pour réaliser des prototypes de planchers composites bois-béton. Ces panneaux sont testés en flexion 4 points dans l'optique de caractériser le comportement mécanique à court terme. En parallèle, un modèle analytique basé sur l'étude du profil de déformation de la section et de l'équilibre des forces internes est développé. Ce modèle est ensuite confronté aux résultats expérimentaux. Les résultats montrent que les planchers ont un comportement mécanique presque linéaire jusqu'à la rupture. Le nouveau traitement de surface à base de collage résiste parfaitement et permet d'avoir une marge de sécurité par rapport aux charges classiques des Eurocodes. Au niveau des déplacements, la mixité bois-béton permet d'augmenter la rigidité de la structure et donc de diminuer la flèche. Le modèle reproduit correctement la rigidité de la structure. Des écarts jusqu'à 20% sont observables entre les résultats théoriques et empiriques sur les planchers au niveau des valeurs à rupture. Au final, ces planchers hybrides sont une excellente alternative aux méthodes courantes de construction bois puisqu'ils allient performance, technologie innovante et écologie.

ABSTRACT. Strengthening wood structures is a major issue in civil engineering. The goal is to increase both the load capacity and rigidity of the hybrid elements. One method is to mix wood with more rigid materials such as concrete or reinforcements such as fiber-reinforced polymers. To connect the materials together, several techniques exist with their advantages and disadvantages. This paper deals with an innovative bonding connection in order to make composite wood-concrete floors. These panels are tested in 4-point bending to characterize the short-term mechanical behavior. In parallel, an analytical model based on the study of the deformation profile of the section and the equilibrium of the internal forces is developed. This model is then confronted with the experimental results. The results show that the mechanical behavior of the floors is quite linear until failure. The new surface treatment resists perfectly and provides a margin of safety over conventional Eurocode loads. In term of displacements, the mix of wood and concrete increases the rigidity of the structure and thus decreases the midspan displacement. The modelling correctly reproduces the rigidity of the structure. Between the theoretical and empirical results difference up to 20% can be observable at final values. Finally, these hybrid floors are an excellent alternative to common wood construction methods as they combine performance, innovative technology and ecology.

MOTS-CLÉS : plancher, bois, béton, composite, modélisation, liaison

KEY WORDS: floor, wood, concrete, composite, modelling, bond

1. Introduction

Dans la construction bois, le bois lamellé collé (BLC) est le matériau le plus utilisé car en plus d'être résistant il est écologique et réduit le bilan carbone des structures. Le caractère naturel du matériau et son élasticité nécessitent la prise en compte de coefficients de sécurité très significatifs sur les propriétés du matériau (1.5 à 2). De plus son module d'élasticité relativement faible fait que le dimensionnement de ces structures dépend essentiellement des conditions liées aux déplacements limites imposés par la réglementation ou aux phénomènes d'instabilité.

Depuis une dizaine d'année, des études sur le renforcement des structures bois ont montrées qu'il était possible d'augmenter la capacité portante et la rigidité des constructions. Les solutions les plus communes sont d'augmenter l'inertie de la section ou d'associer le bois à des matériaux plus rigides. Ainsi le bois a été mixé avec du béton ou des armatures du style polymères renforcés aux fibres (PRF) comme dans les travaux de [PHA 07, FER 14]. En combinant des matériaux comme le béton fibré ultra-hautes performances (BFUP) et les PRF, les sections peuvent être réduites tout en augmentant la rigidité et la résistance des structures.

Afin de combiner au mieux les différents matériaux entre eux, différents systèmes de liaison ont fait l'objet de recherches et de nouveaux systèmes ont été inventés et expérimentés. Les connexions se divisent en trois catégories : les connecteurs locaux, les connecteurs continus et le collage. Les études montrent que la connexion locale présente un glissement à l'interface bois-béton dû à la fissuration du béton sous concentration de contrainte [GEL 99, CAR 10]. Les connecteurs continus rigidifient d'avantage les structures. Le glissement était alors réduit à quelques millimètres [BAT 04, MIO 12]. Enfin le collage supprime le glissement en diffusant les contraintes mais la rupture est fragile comparée aux deux solutions précédentes [BEN 07, PHA 07, PRO 13].

Cet article présente un nouveau système de connexion à base de colle structural pour les structures hybrides. Des planchers composite bois-béton renforcés avec des armatures font l'objet de test de flexion 4 points afin de caractériser leur comportement mécanique à court terme. Un modèle analytique basé sur une procédure itérative a été développé pour prédire le comportement des planchers. Ce modèle intègre le comportement non-linéaire des matériaux en considérant la compatibilité des déformations. La courbe charge-flèche est obtenue à travers l'équilibre des forces internes de la section. Les résultats théoriques sont confrontés aux résultats expérimentaux.

2. Programme expérimental

Un essai de flexion 4 points est utilisé pour tester les planchers sous chargement statique. Les paramètres suivants sont mesurés au cours de l'essai : la force appliquée, la flèche et le profil de déformation à mi-portée.

2.1. Matériaux et spécimens

Les matériaux constituant les planchers sont du bois lamellé collé de classe GL24h, du béton ordinaire (BO), du béton fibré à ultra-hautes performances (BFUP) et des armatures de renforcement type acier de construction (HA) ou polymère renforcé aux fibres de carbone (CFRP). Un adhésif structural de type époxy est également utilisé. Les propriétés mécaniques des matériaux sont regroupées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Propriétés mécaniques des matériaux

MATERIAU		BFUP	BO	Bois	CFRP	HA
Traction	f_{ctk} [MPa]	9	3.5	50	2200	550
	ε_{el} [‰]	0.16	0.1	4	13.3	2.6
	ε_{lim} [‰]	2.5	-	-	-	25
Compression	f_{ck} [MPa]	180	50	24	-	-
	ε_{el} [‰]	4	2	1.92	-	-
	ε_{lim} [‰]	-	3.5	5.76	-	-
Module d'Young	E [MPa]	45 000	35 000	12 500	165 000	210 000

Les deux prototypes de planchers expérimentés sont représentés en Figure 1. La longueur des planchers est de 8,15m pour une portée de 7,5m lors des essais de flexion. La liaison entre le bois et le béton est assurée par un traitement de surface qui consiste à étaler une couche fraîche de colle sur les poutres bois et de saupoudrer de

sable immédiatement. Le sable se mélange alors à l'adhésif qui réticule. Après un délai de 24h minimum, le béton peut être coulé directement sur le traitement précédemment exécuté.

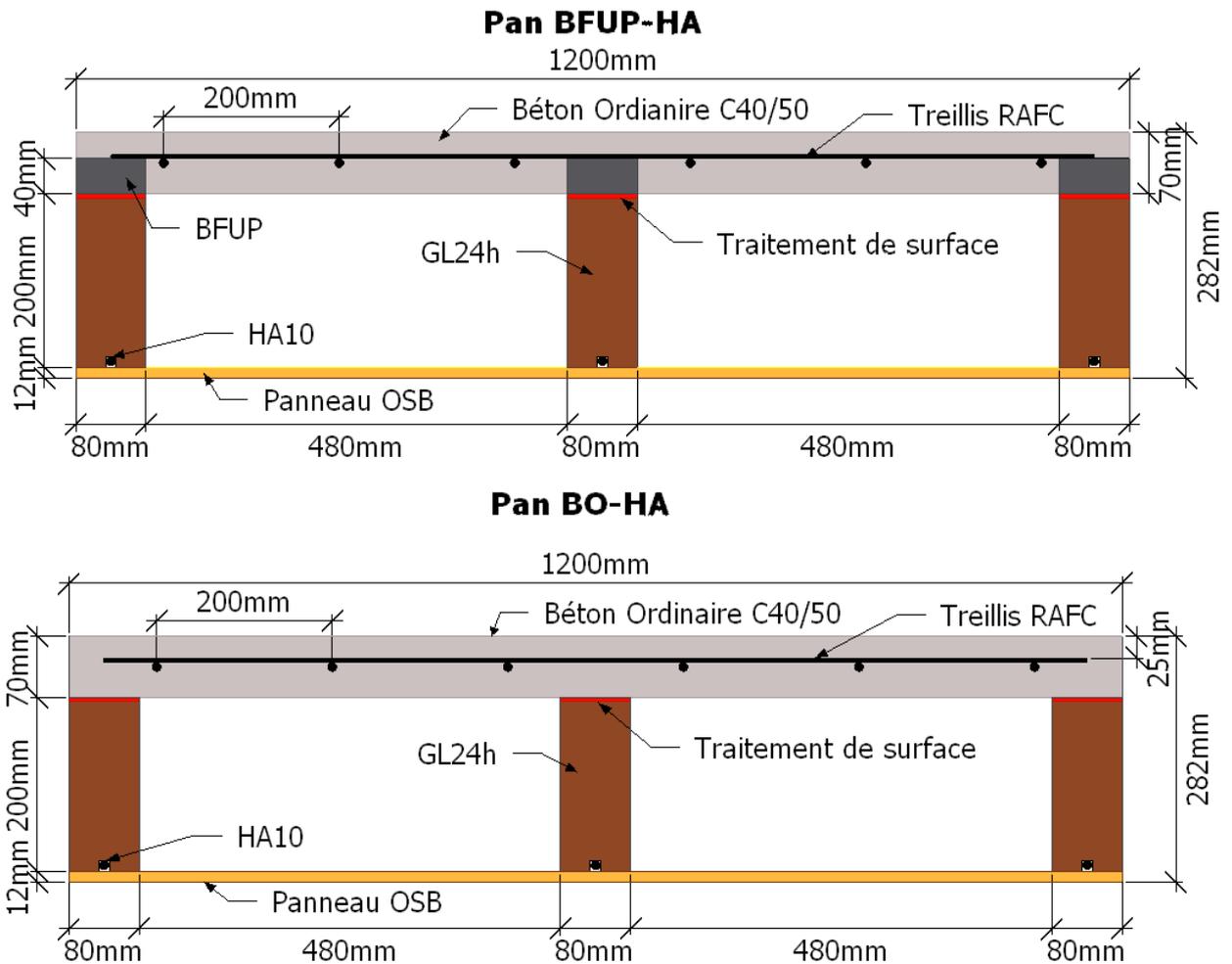


Figure 1. Section des planchers hybrides : BFUP-HA (haut) et BO-HA (bas)

3. Modèle analytique

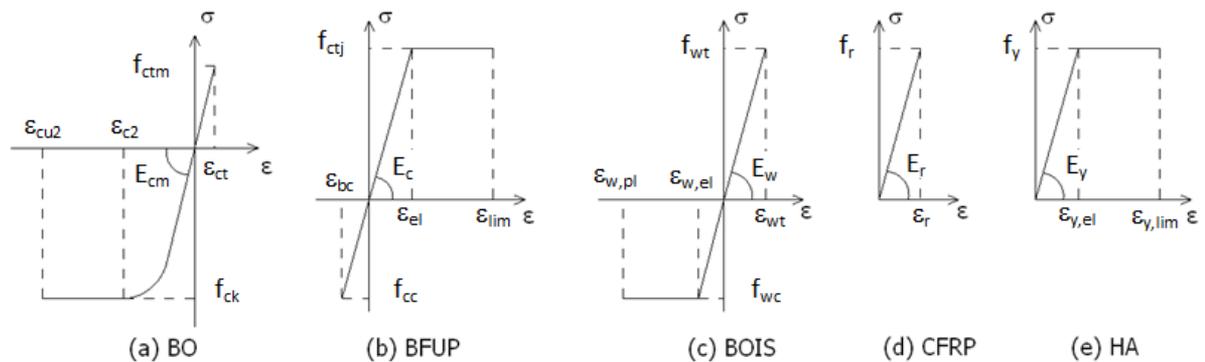


Figure 2. Loi de comportement utilisé pour la modélisation de chaque matériau

La modélisation se base sur un calcul itératif. L'hypothèse de Bernoulli est faite et le profil de déformation de la section est calculé à partir de la déformation supérieure de la section, fixé arbitrairement, tout comme l'axe neutre initial. Grâce aux lois de comportement (cf. Figure 2), le profil de contrainte puis les forces internes sont calculés. L'axe neutre est incrémenté jusqu'à équilibre des forces internes, puis la déformation supérieure est augmentée et le calcul recommence tant qu'une limite de déformation d'un des matériaux n'est pas atteinte.

4. Résultats et Observations

Le comportement mécanique des prototypes de plancher est présenté en Figure 3. Les résultats expérimentaux et de modélisation sont regroupés sur la courbe moment-flèche ainsi que les moments à l'état limite ultime (ELU) et de service (ELS) et la limite de flèche L/300. Ces moments ultime (54,4kN.m) et de service (38 kN.m) sont calculés à partir des charges classiques rencontrées dans les bâtiments de type bureau ou logement d'après les Eurocodes. Par rapport à l'ELU, le moment maximal montre un gain de 240% et 171% pour les prototypes BO-HA et BFUP-HA respectivement. Au niveau des flèches, la limite est de 25mm pour une flèche expérimentale à l'ELS de 16.5mm et 17mm pour le plancher BO et BFUP respectivement, soit une marge de l'ordre de 30%.

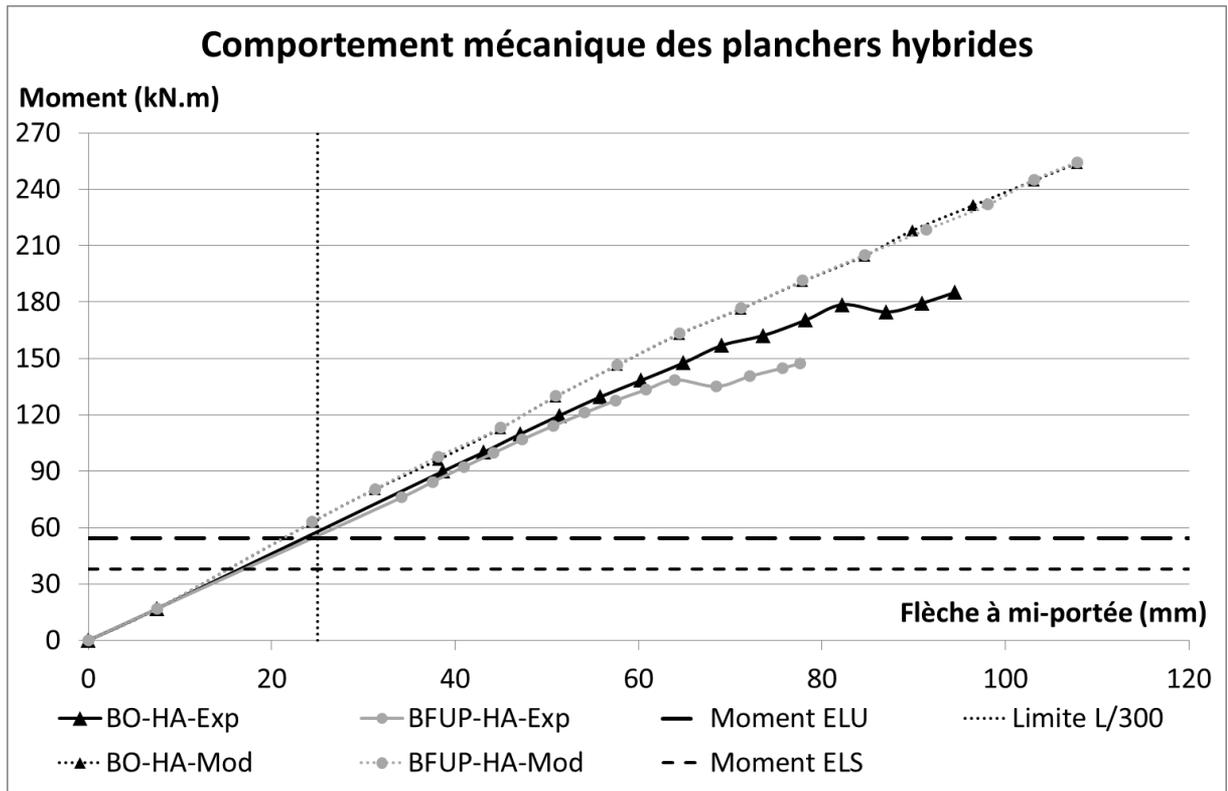


Figure 3. Résultats expérimentaux et théoriques des planchers en flexion 4 points

Tableau 2. Récapitulatif des résultats empiriques et théoriques sur plancher

PLANCHER	BO-HA			BFUP-HA		
	Exp	Theor	Ecart (%)	Exp	Theor	Ecart (%)
Moment max (kN.m)	185,2	254	27	147,2	254,5	42
Flèche max (mm)	94,5	107,8	12	77,6	107,8	28
Rigidité ($\times 10^{12}$ MPa.mm ⁴)	13,2	14,7	10	12,6	14,7	14
Mode de rupture	Bois (nœud)	Bois (traction)	-	Bois (about) & Décol	Bois (traction)	-

Les planchers montrent un comportement linéaire jusqu'à 180kN.m et 140kN.m pour les planchers BO-HA et BFUP-HA respectivement. Puis le moment diminue avant de continuer à augmenter légèrement jusqu'à la ruine. Cette perte est à mettre en relation avec des craquements au niveau du bois, sûrement une rupture d'une

des poutres. Néanmoins, les planchers continuent de résister jusqu'à la ruine avec un comportement toujours linéaire. Le modèle proposé reproduit le comportement linéaire des prototypes avec une précision acceptable au niveau de la rigidité. Plus on s'approche des valeurs maximales et plus le modèle diffère des essais. Le Tableau 2 récapitule les résultats obtenus. Le panneau BFUP-HA possède une résistance inférieure due au décollement entre les deux parties bétons. Aucun traitement de surface n'a été appliqué d'où une mauvaise connexion et une rupture prématurée. Ainsi les résultats théoriques basés sur une connexion parfaite montrent des écarts importants qui varient de 14% à 42%.

5. Conclusion

Les structures hybrides bois-béton ont pour but d'utiliser les avantages de chaque matériau pour réaliser une structure plus performante. Un concept de plancher composite utilisant le collage comme liaison a été présenté et expérimenté en flexion 4 points. Un modèle analytique a été développé pour prédire le comportement mécanique instantané des prototypes testés. Ce modèle s'appuie sur la compatibilité des déformations et sur l'équilibre des forces internes de la section.

Les résultats expérimentaux montrent que les planchers ont un comportement quasiment linéaire jusqu'à la ruine. Par rapport aux règles Eurocodes, les deux planchers offrent une marge de sécurité au niveau des flèches et de la résistance soit au niveau des deux états limites.

La modélisation analytique reproduit le comportement linéaire des panneaux et le mode de rupture. Pour le plancher BO-HA, les écarts sont compris entre 10 et 27%. Pour le panneau BFUP-HA, les différences sont plus importantes dues à la mauvaise adhésion entre les deux types de béton.

Finalement, ces planchers et son nouveau système de liaison résistent à des charges supérieures aux charges classiques des Eurocodes et proposent une alternative performante et innovante aux méthodes de construction actuelles. Des essais complémentaires de chargement cyclique sont actuellement en cours pour étudier le comportement différé des planchers hybrides.

6. Bibliographie

- [BAT 04] BATHON L. A., CLOUSTON P., « Experimental and numerical results on semi prestressed wood-concrete composite floor systems for long span applications », *8th World Conference of Timber Engineering*, 2004, Finland.
- [BEN 07] BEN MEKKI O., TOUTLEMONDE F., CARON J. F., Testing innovative aspects of a 10 m-span composite UHPFRC-carbon fibers-timber bridge, Deliverable D3.4 + D3.5, New Road Construction Concepts (NR2C), 2007.
- [CAR 10] CARVALHO E. P., CARRASCO E. V. M., « Influence of test specimen on experimental characterization of timber-concrete composite joints », *Construction and Building Materials*, vol. 24, n° 8, 2010, p. 1313-1322.
- [FER 14] FERRIER E., AGBOUSSOU A., MICHEL L., « Mechanical behaviour of ultra-high-performance fibrous-concrete wood panels reinforced by FRP bars », *Composites Part B: Engineering*, vol. 60, 2014, p. 663-672.
- [GEL 99] GELFI P., GIURIANI E., « Behaviour of stud connectors in wood-concrete composite beams », *Structural studies, repair and maintenance of historical buildings VI*, vol. 42, 1999, p. 565-578, WIT Press, Germany.
- [MIO 12] MIOTTO J. L., DIAS A. A., « Evaluation of perforated steel plates as connection in glulam-concrete composite structures », *Construction and Building Materials*, vol. 28, n° 1, 2012, p. 216-223.
- [PHA 07] PHAM H. S., Optimisation et comportement en fatigue de la connexion bois-BFUP pour de nouveaux ponts mixtes, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2007.
- [PRO 13] PROULX F., Etude expérimentale des poutres en bois lamellé-collé renforcées de béton fibré à ultra-haute performance et de barres de polymère renforcé de fibres, Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Canada, 2013.