

NOUVEAUX TABLIERS COMPOSITES BOIS-BHP-CARBONE POUR LES OUVRAGES D'ART

Hoai Son PHAM, Robert LE ROY, Jean-François CARON, Gilles FORET

LAMI, Institut Navier ENPC-LCPC

RÉSUMÉ

Les études présentées visent à améliorer la performance mécanique des ouvrages d'art en bois. Les performances mécaniques des tabliers mixtes, ou composites, en bois, béton et fibres de carbone (CFRP) sont étudiées. Plus précisément, la recherche porte sur l'évaluation de la rigidité des systèmes de connexion entre la dalle béton et les poutres en bois lamellé collé et sur la contribution du renforcement par des fibres de carbone. L'étude expérimentale d'un ensemble de connecteurs couvrant la plupart des familles est d'abord présentée. Les modes de fonctionnement de chaque type et les différents modes de rupture sont identifiés. C'est le système de connexion par collage qui conduit à la meilleure rigidité, tout en offrant la résistance ultime la plus importante. Une méthode permettant de calculer la raideur d'un système de connexion à partir d'essais de flexion est présentée. Enfin, deux essais en flexion sur maquettes en BFUP-Bois-CFRP ont montré que les fibres de carbones jouent un rôle positif vis-à-vis des états limites ultimes.

Mots clefs : Poutre, Bois, Béton, Connecteur, Carbone, Composite, Tablier, Pont mixte, Lamellé collé, Renforcement.

1. INTRODUCTION

Au sein du Laboratoire d'Analyse des Matériaux et Identification (LAMI) de l'ENPC, une des recherches visant à minimiser l'usage des ressources non renouvelables porte sur la conception d'ouvrages d'art utilisant le bois. Cette recherche, développée dans une thèse de l'ENPC [Pham, 2007], s'inscrit dans le projet européen « New Roads Construction Concepts » (NR2C), au sein duquel un des sous groupes réfléchit aux ouvrages d'art à l'horizon d'une quarantaine d'années.

Plusieurs travaux étrangers portent sur la conception d'ouvrages d'art mixtes composés de dalles en béton ordinaire armées, connectées à des poutres lamellées collées [Ahmadi *et al.* 1993, Gattesco 2001, Clouston *et al.* 2004, etc.]. D'autres recherches envisagent de renforcer le bois par un matériau composite dans les zones tendues afin d'accroître les performances mécaniques. Dagher montre expérimentalement que la rigidité est augmentée de 10% à 20% [Dagher *et al.* 1998, Dagher *et al.* 2002]. Chajes trouve en revanche qu'en comparaison avec un tablier dépourvu de connexion et de renforcement, une augmentation de 500 % de la rigidité d'un tablier connecté bois-béton-carbone peut être obtenue [Chajes *et al.* 1995]. Le renforcement en zone tendue permet d'augmenter les charges de rupture. Plevris montre par exemple qu'il permet d'augmenter la résistance en flexion de 50% à 100% [Plevris *et al.* 1992]. Il permet, d'après Dagher, de réduire la variabilité, due aux défauts locaux du bois, de la résistance dans la zone tendue [Dagher *et al.* 2003]. D'autres travaux similaires portant sur le renforcement avec d'autres matériaux composites comme ceux en fibres de verre (GFRP) ont été également réalisés [Weaver *et al.* 2004, Davids *et al.* 2005].

Alors que ces travaux cherchent à améliorer la résistance des zones tendues, il semble intéressant de chercher aussi à améliorer la transmission du cisaillement entre la partie béton et le bois. Dans tous les ouvrages existants, la connexion bois-béton est imparfaite, la dalle et les poutres étant alors sollicitées séparément en flexion. Dans le cas d'une connexion parfaite, le béton est sollicité en compression. En supposant qu'une telle solution soit possible, on imagine alors que les bétons fibrés ultra performants (BFUP) constituent une solution prometteuse, leur taux de travail en compression pouvant atteindre 90 MPa. Outre le poids propre faible de tels ouvrages, permettant l'exploitation de la préfabrication, la protection du bois apportée par la dalle béton est une conception en conformité avec la pratique du point de vue de la durabilité [Guide SETRA, 2007].

Un certain nombre d'indicateurs poussent par conséquent à étudier la conception de ponts mixtes en BFUP-Bois et, composites, en BFUP-Bois-CFRP.

On s'intéresse dans cet article à la connexion au bois d'éléments en béton à haute résistance et à ultra haute résistance et au renforcement de ces structures mixtes avec du carbone. La première partie est consacrée à la présentation d'essais de flexion sur des poutres mixtes Bois-BHP et d'une méthode de calcul de la raideur d'un système de connexion à partir d'essais de flexion. L'étude d'un ensemble de connecteurs couvrant la plupart des familles est présentée. La seconde partie valide la technique retenue pour la connexion du BFUP au bois et apporte des informations pratiques sur les conditions de préparation des surfaces. La dernière partie de l'article présente des résultats d'essais de flexion d'une poutre composite BHP-Bois-CFRP réalisée avec un des systèmes de connexion étudiés précédemment. Un calcul des contraintes normales et de cisaillement maximum, prenant en compte les propriétés de l'interface bois-béton, est proposée. L'intérêt mécanique du CFRP est mis en évidence.

2. ÉTUDE DE L'INTERFACE BOIS-BFUP

2.1. Procédure expérimentale

L'évaluation du comportement d'interface s'effectue traditionnellement sur des essais de cisaillement [Gattesco, 2001 ; Clouston *et al.* 2004 ; Tommola *et al.* 2005]. L'échantillon est conçu de telle manière que 2 plans de cisaillement, symétriques par rapport à la charge appliquée, sont sollicités pendant l'essai. Ce principe d'essai est simple mais son exploitation est moins évidente qu'il n'y paraît. En effet, dans le cas de connecteurs linéiques ou par collage, des concentrations de contraintes apparaissent au bord [Caron *et al.* 2002], concentrations dont il faut tenir compte dans l'analyse. Dans l'optique de réaliser des essais exploratoires à la fois simples et proches des phénomènes à étudier, il a été décidé de réaliser des essais en flexion trois points. Dix neuf poutres ont été fabriquées. Les poutres sont constituées d'une couche supérieure de béton fibré de très hautes performances, connectée à une poutrelle en bois lamellé-collé, réalisant la couche inférieure. Chaque type de connecteurs a été testé sur 2 poutres, hormis la liaison par collage qui a fait l'objet de 3 poutres.

2.1.1. Propriétés des matériaux

La partie en bois est une poutrelle en lamellé collé de classe GL28 (résistance caractéristique en flexion de 28 MPa) de hauteur 135 mm, de largeur 90 mm, et de longueur 1,25 m. Le module longitudinal a été mesuré et vaut 12 GPa. La partie en béton est un béton fibré de très hautes performances (BTHP fibré) de résistance moyenne à 28 jours de 120 MPa, dosé à 1,5 % de fibres métalliques de longueur 14 mm. Le module théorique est de 45 GPa (± 3 GPa). L'épaisseur de béton est de 50 mm et sa largeur de 90 mm, comme celle de la poutre en bois. Les proportions relatives des 2 matériaux ont été ajustées de manière à maximiser la contrainte de cisaillement à l'interface. Les systèmes de connexion ont fait l'objet d'une étude bibliographique. On distingue les systèmes de connexion réalisés par des entailles [Deperraze, 1998 ; Martino, 2005], par des éléments mécaniques, comme des clous [Ahmadi *et al.* 1993], des tubes métalliques [Alain, 1988 ; Gaymond, 1995], des plaques métalliques [Bathon *et al.* 2005], ou bien par collage [Pincus, 1970 ; Brunner *et al.* 2000]. Dans cet ensemble, trois familles différentes peuvent être distinguées : la famille des connecteurs locaux, celle des connecteurs linéiques et enfin celle du collage. Cette étude a porté sur 6 types de connecteurs couvrant ces 3 familles (Figure 1) :

- Connexion locale par tiges ou tubes. Les tiges sont des barres cylindriques de 15 mm de diamètre. Les tubes ont un diamètre extérieur de 30 mm et une épaisseur de 1,5 mm. Ces connecteurs sont collés dans des trous préparés dans le bois sur une profondeur de 50 mm et sont ancrés dans le béton sur 30 mm ;

- Bande de métal déployé. La bande de métal déployé est insérée dans une rainure du bois sur une profondeur de 50 mm et collée à l'époxy. Elle est noyée dans le béton sur 30 mm de profondeur ;
- Bande de plaque à pointes. La poutre en bois est découpée en deux dans la hauteur et les plaques à pointes sont clouées sur chaque partie. Les deux parties sont ensuite assemblées et collées à l'époxy et maintenues en compression transversale par des tiges filetées précontraintes. Les profondeurs de pénétration sont les mêmes que précédemment ;
- Ruban métallique perforé. La conception est la même que précédemment. Le métal déployé est remplacé par une bande métallique trouée d'épaisseur 1.5mm ;
- Collage. Le béton est coulé sur la poutrelle en bois, puis décoffré une fois durci. La face de béton à encoller est ensuite sablée. L'assemblage par collage est effectué 7 jours après le coulage du béton. Une couche de colle époxydique, d'une épaisseur de 1 mm environ, est appliquée sur chaque partie à coller. L'ensemble est ensuite assemblé et maintenu en contact par une légère pression pendant 24 heures. Les corps d'épreuve sont ensuite placés dans un four à 45°C pendant 24 heures. Les essais sont réalisés 4 jours après la date de réalisation de l'assemblage par collage.

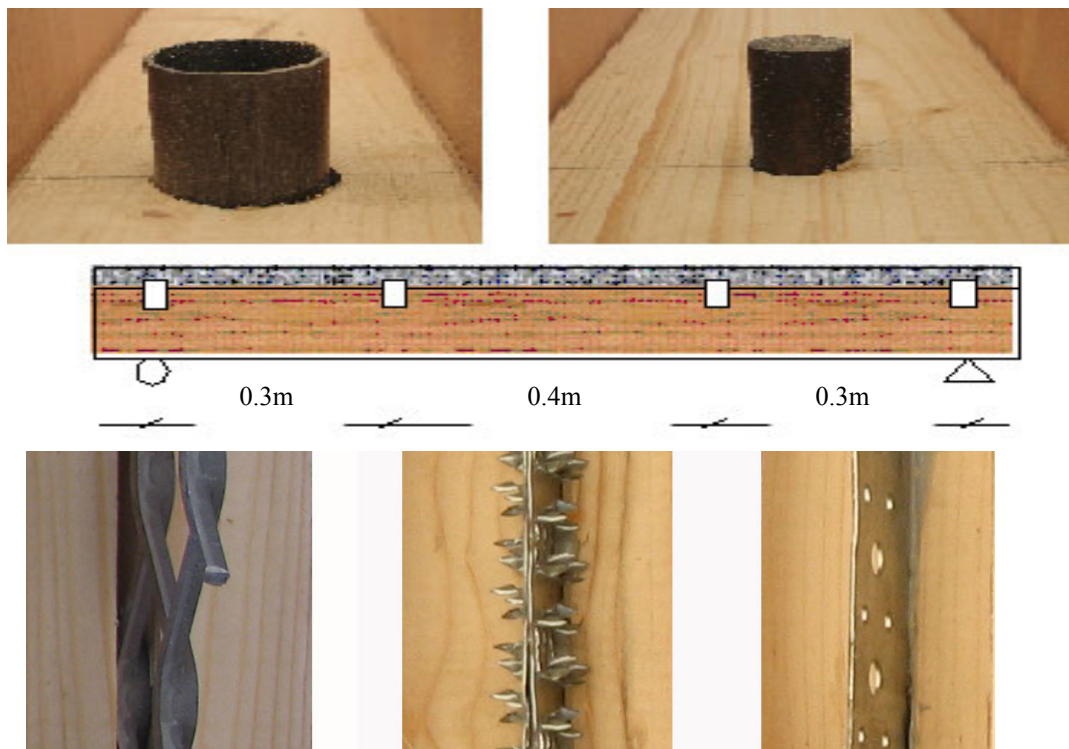


Figure 1. Exemples de connecteurs (de gauche à droite et de haut en bas) Tube (PTu), Tige (PTi), Métal déployé (PMD), Plaque à pointes (PPAP), Ruban (PR).

2.1.2. Métrologie

Les poutres sont chargées en flexion trois points à l'aide d'un dispositif installé sur une presse du LAMI (MTS M20), équipée d'une cellule de force de 100 kN. La distance entre points d'appuis est de 1 m. Les essais sont pilotés en déplacement. La vitesse de montée en charge est de 2 mm/minute et celle de déchargement de 3 mm/minute. L'essai se compose de trois phases principales (Figure 2). La première phase consiste en trois cycles de charge-décharge de 5% à 30% de la charge à la rupture F_{rup} (valeur déterminée théoriquement). Elle permet de déterminer la raideur de la poutre en négligeant le cycle initial. La deuxième phase consiste en trois cycles de charge-décharge de 5% à 60% de la charge à la rupture. Cette phase permet de vérifier que le comportement des poutres, et en particulier des connecteurs, est encore dans le domaine élastique. La dernière phase est monotone croissante jusqu'à la rupture. Elle permet de déterminer la charge ultime et le mode de rupture des poutres (dans le béton, le bois ou à l'interface).

Cinq capteurs LVDT sont disposés pour mesurer la flèche au milieu de la poutre et le glissement relatif à l'interface aux deux extrémités (Figure 2). Les tassements d'appuis, mesurés par les capteurs, sont soustraits de la mesure de la flèche au centre. Les poutres sont identifiées selon le type de connecteur et un numéro de série.

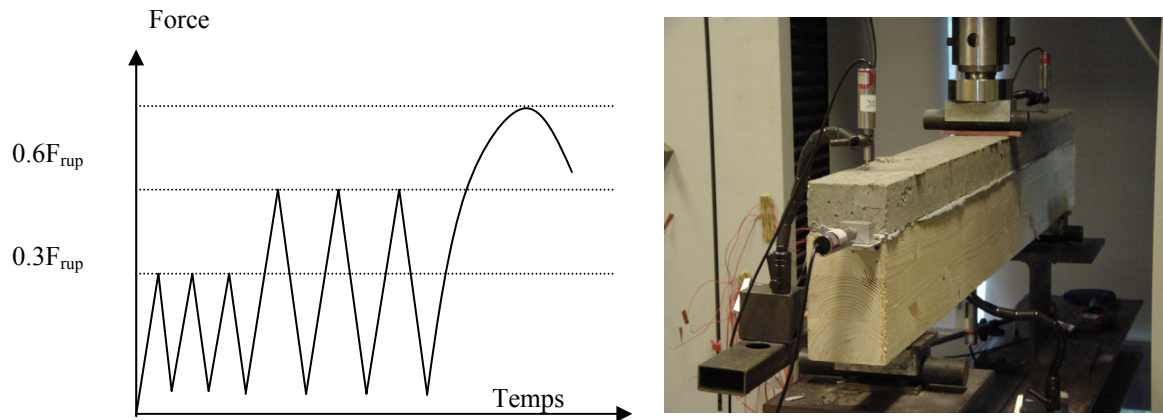


Figure 2. Cycles de chargement avec pilotage en déplacement

2.2. Résultats

2.2.1. Modes de rupture des poutres

Les observations permettent de distinguer quatre modes principaux de rupture dans les poutres. La rupture peut se développer de manière brutale à l'interface à cause d'un décollement du connecteur par rapport au bois (mode M1) ou à cause d'un cisaillement du bois au niveau de l'interface (mode M2). La perte de liaison entre les 2 matériaux dans les deux modes M1 et M2 crée des contraintes de traction dans le béton. Il s'ensuit rapidement une rupture de celui-ci à mi-portée. Un autre mode de ruine se développe par la diminution progressive de la raideur d'interface, ce qui engendre finalement une rupture dans la connexion ou par traction du béton (mode M3). La dégradation de l'interface a pour origine des décollements locaux ou des déformations des parties métalliques. Enfin, on peut constater une rupture du bois en traction ou en cisaillement (mode M4).

Poutres	PMD31-1	PMD31-2	PMD43-1	PMD43-2	PMD51-1	PMD51-2	PMD86-1	PMD86-2	PPAP-1	PPAP-2
F rupture (kN)	66	72	52	40	73	81	61	55	90	70
Mode rupture	M1	M3	M1	M1	M3	M3	M1	M3	M3	M3

Poutres	PR-1	PR-2	PTi-1	PTi-2	PTu-1	PTu-2	Pco-1	Pco-2	Pco-3
F rupture (kN)	51	55	70	57	59	80	86	82	74
Mode rupture	M3	M3	M4	M4	M4	M4	M2	M2	M2

Tableau I. modes de rupture

On présente une synthèse des modes de rupture des poutres (Tableau 1) et, pour chaque type de connecteur, un exemple représentatif des courbes décrivant l'évolution de la force en fonction de la flèche (Figure 3). Les modes M1 et M3 sont apparus pour la famille des connecteurs linéiques, i.e. le métal déployé (PMD), le ruban (PR) et la plaque à pointes (PPAP). Le mode M4 est apparu pour les connecteurs locaux, i.e. les tiges (PTi) et les tubes (PTu). Enfin, le mode M2 est apparu pour la solution par collage (Pco). Les ruptures peuvent être de types ductile ou fragile. Les flèches à la rupture sont importantes pour les connecteurs locaux. En effet, la déformation de l'interface est due à la compression locale du bois suivie de la flexion des tiges. Ce mécanisme peut absorber de grandes déformations (figure 3a, 3b). La

rupture de la connexion par collage est quant à elle soudaine (figure 3f). Une fois l'amorçage réalisé, la propagation de la surface de décollement est rapide. Les ruptures des interfaces avec métal déployé peuvent être brutales ou progressives, selon que l'amorce de la rupture est réalisée dans le plan de colle ou dans le connecteur lui-même (Figure 3e). La solution la plus performante en terme de résistance ultime est la solution collée. La force à rupture moyenne est de 80 kN. On observe que la rupture a eu lieu dans le bois au niveau de l'interface ce qui signifie que la résistance de la connexion est au moins aussi importante que celle en cisaillement du bois.

2.2.2. Comportement élastique des poutres

L'effet de glissement à l'interface influence la rigidité de la structure. Lorsque cet effet existe, on dit que la connexion de la structure mixte est imparfaite ou partielle. La première théorie élastique prenant en compte cet effet est due à Newmark [Newmark, 1951]. Une version de cette théorie, reprise de manière simplifiée dans les Eurocodes, consiste à calculer, sous chargement sinusoïdal, une raideur, $(EI)_{ef}$, équivalente. Cette dernière dépend de la rigidité d'interface, K , qui relie l'effort de cisaillement à l'interface au déplacement relatif (glissement) des 2 matériaux. La valeur de K est supposée constante le long de la poutre, ce qui est une hypothèse grossière. La solution est ensuite généralisée pour toutes les configurations de chargement. La méthode est décrite dans l'Eurocode 5 [Pr EN 1995-1-1].

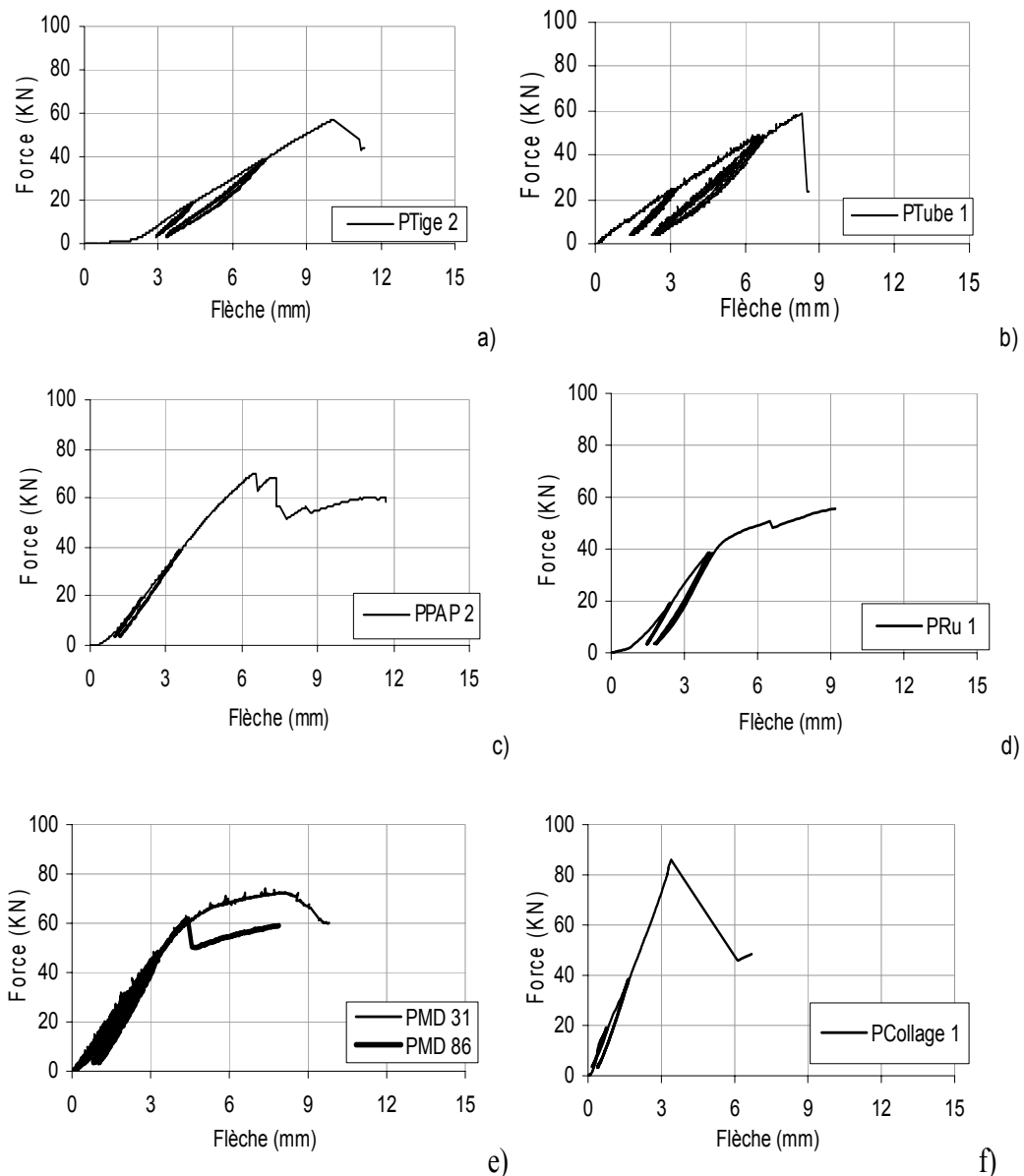


Figure 3. Exemples de résultats en flexion
a) Tige, b) Tube, c) Plaque à pointes, d) Ruban, e) Métal déployé, f) Collage

La raideur effective, $(EI)_{ef}$, des poutres de l'étude est calculée à partir de la partie linéaire des courbes force-flèche expérimentales en prenant en compte les déformations d'effort tranchant. S'agissant de poutres courtes et du matériau bois dont le module de cisaillement est faible -environ 700 MPa- il est indispensable de déduire les déformations d'effort tranchant des flèches expérimentales. La flèche s'écrit alors :

$$f = \frac{Pl^3}{48(EI)_{ef}} + \frac{Pl}{4(GS)_{ef}}$$

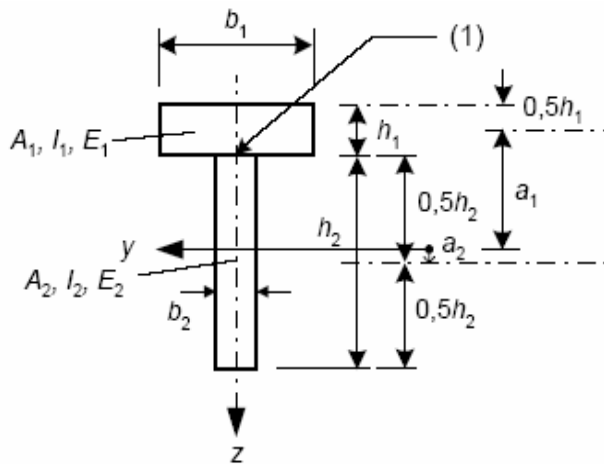
Où $(GS)_{ef}$ est la raideur en cisaillement effective de la poutre. La raideur effective d'une poutre composite est considérée par Batoz [Batoz, 1990] comme la somme des raideurs de chaque couche. Nguyen [Nguyen *et al.* 2005] montre toutefois que la raideur effective est, pour un bicouche parfaitement collée, approximée par la forme suivante :

$$(GS)_{ef} = \frac{(h_w + h_c)^2 b}{\frac{h_w}{G_w} + \frac{h_c}{G_c}}$$

Où h_w , h_c , b , G_w , G_c sont respectivement la hauteur des parties en bois et en béton, la largeur de la poutre, les modules de cisaillement du bois et du béton.

Les valeurs de K sont ensuite identifiées par la loi proposée dans la norme PrEN 1995-1 (Figure 4) ou K figure dans γ_2 :

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1} (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2)$$



$$A_i = b_i h_i$$

$$I_i = \frac{b_i h_i^3}{12}$$

$$\gamma_1 = 1$$

$$\gamma_2 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 E_2 A_2}{K l^2}}$$

$$a_1 = \frac{\gamma_2 E_2 A_2 (h_1 + h_2)}{2 \sum_{i=1} \gamma_i E_i A_i}$$

$$a_2 = (h_1 + h_2) - a_1$$

Figure 4. Grandeurs permettant de calculer la raideur en flexion selon l'EN 1995-1-1

La variation de $(EI)_{ef}$ en fonction de K est donnée sur la figure 5. On distingue clairement les 3 familles de connecteurs essayées. La première comprend les connecteurs locaux qui ont une raideur d'interface inférieure à 150 MN/m/m. Cette « souplesse » de l'interface est connue du fait du mode de fonctionnement du connecteur présenté précédemment. La deuxième famille concerne les connecteurs linéiques. Les valeurs de K sont comprises entre 150 et 1200 MN/m/m. Enfin, le système par collage offre les meilleures raideurs : $K > 1500$ MN/m/m. Les flèches sont proches des flèches calculées avec une connexion parfaite. La liaison par collage montre donc une grande performance tant en raideur qu'en charge ultime.

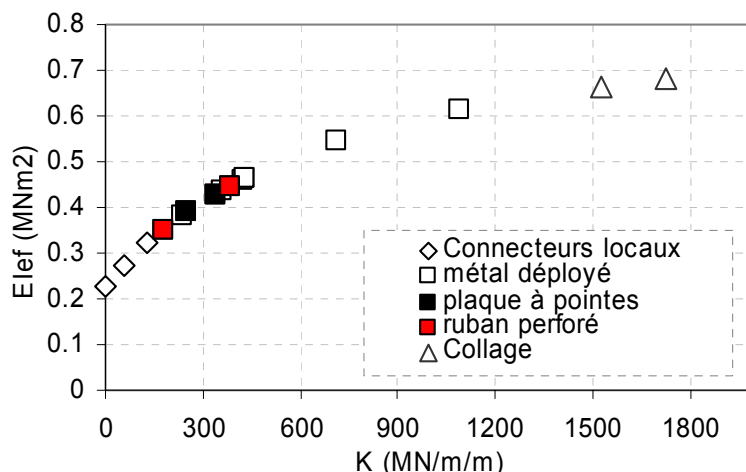


Figure 5. Raideur $(EI)_{ef}$ en fonction de la raideur d'interface K selon le modèle de l'EN 1995-1-1 pour les valeurs de $(EI)_{ef}$ mesurées

2.2.3. Raideur d'interface d'un ensemble de connecteurs parallèles

Dans une structure à poutres, le nombre de lignes de connecteurs est limité en général au nombre de poutres. Il existe néanmoins des ponts dalle en bois, constitués de poutres juxtaposées, l'ensemble étant précontraint transversalement. Dans cette conception, on peut mettre à profit les joints longitudinaux entre poutres pour y insérer des connecteurs linéiques. C'est cette technique qui a été explorée au travers de deux essais menés sur 2 poutres de 2 m de longueur, l'une étant constituée de bastaings, l'autre de demi bastaings, en bois massif. Ces éléments, sous lesquels sont collés des plats en carbone pultrudés, sont juxtaposés pour réaliser un élément de poutre-dalle sur lequel est connectée une dalle en BHP [Jouslin de Noray 2005] (voir § 4 suivant pour les détails des matériaux). L'une des poutres comporte 6 lignes de connecteurs, l'autre 9 lignes de ces connecteurs. La connexion entre le bois et le béton est réalisée par du métal déployé (Figure 6), d'une part collé entre 2 bastaings (ou demi-bastaings) sur une hauteur d'environ 10 cm et d'autre part noyé, sur une hauteur de 4 cm, dans la dalle de compression en béton coulée en place d'épaisseur 5 cm.

Les résultats des 2 essais ont été étudiés pour connaître l'effet du nombre de lignes de connecteurs sur la raideur globale de l'interface. Dans le cas présent, on a fait varier le nombre de lignes en jouant sur l'épaisseur des éléments bois, le métal déployé étant collé entre deux bastaings ou demi bastaings. La valeur médiane du domaine de raideur calculé dans l'étude précédente sur les poutres de 1 m vaut $k = 500 \text{ MN/m/m}$ pour la géométrie du métal déployé considérée. Les valeurs respectives, $K' = 6k$ et $K'' = 9k$, ont été ainsi introduites dans le calcul de raideur des 2 poutres possédant 6 lignes et 9 lignes de connecteurs. Le calcul de raideur de ces poutres prend en compte le carbone en le considérant comme une couche de bois équivalente dont l'épaisseur est celle du carbone multipliée par le rapport des modules des 2 matériaux. Les résultats sont donnés sur la figure 7. Les pentes théoriques sont comparées à celles expérimentales entre 5 et 15 kN, i.e. dans un domaine de comportement élastique des corps d'épreuve et en éliminant le pied de courbe non linéaire dont la forme est due aux tassements d'appuis. On observe que les pentes calculées et expérimentales sont proches, ce qui nous permet de considérer que la raideur globale de la connexion par métal déployé est proportionnelle à la raideur d'une ligne de connecteurs et aux nombres de ces lignes. Ce résultat donne des pistes pour l'obtention d'une grande raideur d'interface entre le bois et le béton, favorable au comportement structurel global, à partir de connecteurs de raideur moyenne à faible.

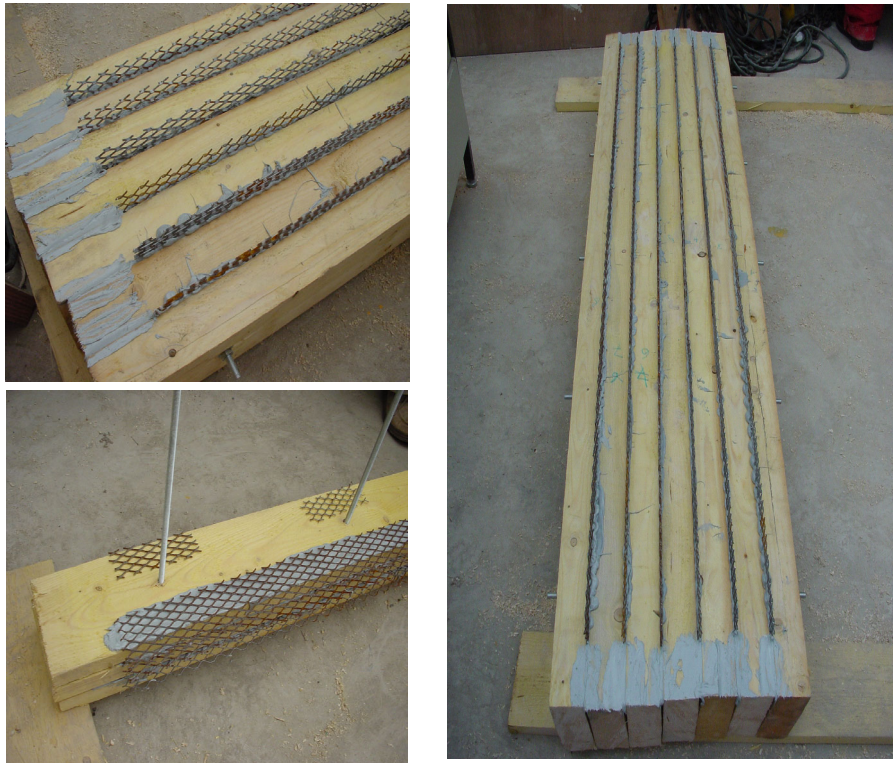


Figure 6. Préparation de la connexion d'une dalle composite

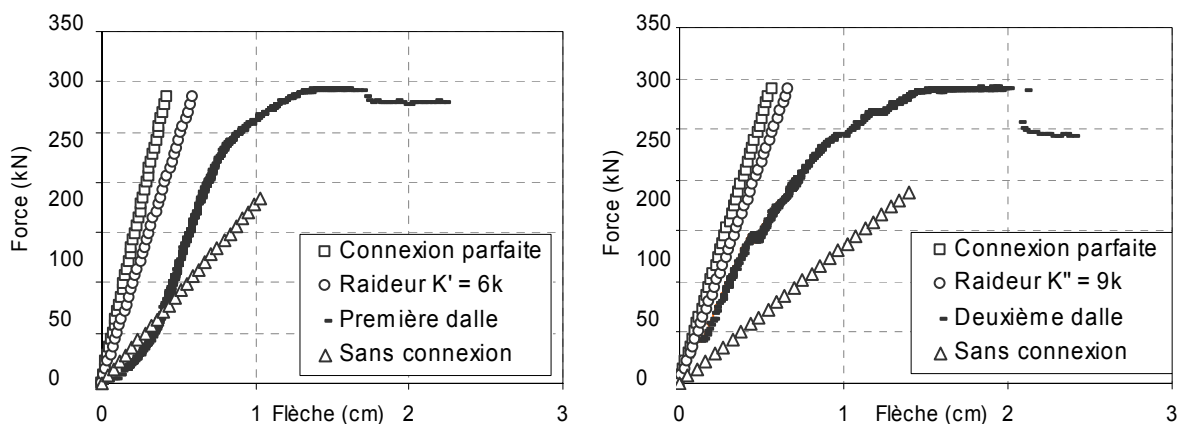


Figure 7. Résultats de deux essais en flexion sur deux dalles (à gauche, largeur 400 mm et 6 lignes de connecteurs, à droite, largeur 300 mm et 9 lignes de connecteurs)

3. VALIDATION DU COLLAGE SUR BFUP

La technique d'assemblage par collage ayant été validée avec un BHP, l'utilisation d'un BFUP, dans la cas présent du BSI® CERACEM, a nécessité une étude complémentaire visant à évaluer la performance de la colle en fonction du mode de traitement de surface du béton. Ce BFUP, dosé à 2,5 % de fibres, a une résistance caractéristique à 28 jours de 165 MPa et une résistance caractéristique en traction de 8,8 MPa. La colle utilisée est une colle époxydique de type Sikadur 30 titulaire d'un droit d'usage de la marque NF pour le collage structural. Des essais de collage ont été réalisés à partir de poutres mixtes supplémentaires de 1 m. La fabrication des éléments en BFUP a été effectuée par coulage dans un coffrage dont le fond de moule constitue la face horizontale supérieure de la poutre en bois, elle-même protégée par un adhésif plastifié. Cet adhésif donne un aspect « glacé » à la surface de béton. Aucun agent démoulant n'est appliqué sur le coffrage afin d'éviter la présence de produits gras en contact avec la colle. Avant le collage, un nettoyage des surfaces est réalisé avec chiffon imprégné d'un solvant. Le double encollage, i.e. l'application de la colle sur les 2 surfaces à coller, est pratiqué. Une première série d'essais a consisté à coller les éléments en BFUP directement sur le bois sans

traitement de surface du béton, à une échéance de 7 jours après le coulage du béton. Cette série n'a pas été concluante car un décollement du béton est rapidement apparu aux extrémités des poutrelles. Ce décollement est dû au retrait de dessiccation du BFUP. Bien que celui-ci soit réputé très faible - de l'ordre de 10^{-4} pour une humidité relative de 50 %- d'après Le Roy [Le Roy *et al.* 1999], il a néanmoins conduit à la création d'une courbure orientée vers le haut, courbure que la liaison par collage sur une surface lisse « glacée » n'a pu empêcher.

Une seconde série d'essais a été réalisée en pratiquant un traitement de surface du béton par ponçage à l'aide d'un disque diamanté et en réalisant le collage pour un âge du béton de 28 jours, de manière à ce que le retrait restant à produire après collage soit faible. Les essais ont été concluants car la liaison a résisté à une force de 100 kN correspondant à une contrainte de cisaillement de 4,7 MPa à l'interface bois-béton.

Une troisième série d'essais est programmée en réalisant un traitement de surface du BFUP par sablage.

4. RENFORCEMENT DU BOIS PAR DU CARBONE

Nous revenons ici sur le renforcement en carbone introduit sur certaines poutres de l'étude précédente. Toujours dans l'optique de l'utilisation du bois pour la conception des ouvrages d'art, on étudie aussi la possibilité de renforcer le bois par collage de matériaux composites et en particulier par un matériau composite à base fibres de carbone.

Les fibres de carbone se présentent commercialement sous forme de rubans pultrudés, de tissus unidirectionnels (UD) ou de tissus bi directionnels (BD). Le ruban pultrudé a l'avantage d'être constitué d'un taux de fibres élevé, voisin de 70%. Son module atteint 160 GPa. Il est habituellement utilisé pour renforcer le béton (ou l'acier). Les colles sont en général de type époxydique. Le renforcement du bois peut être réalisé par des techniques similaires. Une autre méthode déjà essayée consiste à insérer des plats en carbone entre les lamelles du bois, l'ensemble étant comprimé dans un banc de fabrication courant de lamellé collé.

Le tissu UD est utilisé par superposition de couches collées par une résine époxydique. Un marouflage est réalisé à chaque couche. Le module du composite obtenu est voisin de 100 GPa. Pour augmenter la densité de fibres, il est judicieux d'exercer une pression sur le composite pendant la phase de durcissement, notamment, à l'aide de la technique de la mise sous vide. La bâche utilisée pour cela vient se plaquer sur la couche de renforcement et exerce une pression homogène sur toute la surface de celle-ci. Cette technique, expérimentée à l'ENPC, fait l'objet de recherches en cours (Figure 8).



Figure 8. Exemple de poutre LC renforcé par du tissu collé sous vide (ENPC)

4.1. Expérimentation

Les corps d'épreuve sont présentés dans le paragraphe 2.2.3 précédent. Les détails géométriques sont donnés dans le tableau 2, les propriétés utiles des matériaux dans le tableau 3. Les essais sont de flexion 3 points. La distance entre appuis est de 1,70 m. Des capteurs de déplacement LVDT sont placés au centre de la dalle pour la mesure de flèche et aux extrémités pour la mesure du glissement entre le bois et le béton.

Corps d'épreuve	Bois (mm)	Carbone (mm)	Béton (mm)	Connecteurs
Poutre 1	7 bastaings 150×56	7 plats 1,7×52	Dalle 50×400	6 lignes de métal déployé
Poutre 2	10 demi bastaings 150×30	6 plats 1,7×52	Dalle 50×300	9 lignes de métal déployé

Tableau 2. Géométrie et constituants des 2 corps d'épreuve.

Matériau	Résistance en flexion (MPa)	Résistance en compression (MPa)	Résistance en traction (MPa)	Module d'Young (MPa)	Module de cisaillement (MPa)
Bois massif	22	20	13	10 000	630
Béton		90	5	51100	21000
Carbone			2500	150 000	

Tableau 3. Caractéristiques des matériaux prises en compte dans les calculs.

Résistance des poutres

La rupture a eu lieu pour une force de 292 kN pour la poutre 1 et de 287 kN pour la poutre 2, soit 2 valeurs très proches, bien qu'il y ait une différence de largeur entre les 2 poutres. La largeur plus faible de l'une d'entre elles a été compensée par la présence de 3 lignes de connexion supplémentaires, lesquelles ont rigidifié la connexion entre le bois et le béton, ce qui a conduit à diminuer les contraintes de flexion. On s'aperçoit (Figure 7) que le comportement est linéaire jusqu'à une charge de 150 kN. La non linéarité du comportement qui se manifeste ensuite témoigne d'un endommagement progressif qui a pour origine la non linéarité du glissement d'interface avec la charge. La rupture apparaît lorsque le béton (armé uniquement par le métal déployé) se rompt par cisaillement longitudinal le long des connecteurs, ce qui provoque la rupture en traction du bois puis un décollement à mi portée du carbone (Figure 9). Un béton fibré ultra performant aurait sans doute repoussé la valeur de rupture, du fait de sa résistance plus élevée au cisaillement. Toutlemonde [Toutlemonde *et al.* 2007] évalue, à partir d'essais de poinçonnement, le domaine de résistance en cisaillement de bétons ultra performants commerciaux dans une fourchette de 8 à 10 MPa.

Cette force de rupture de près de 300 kN peut être comparée à une force théorique de rupture d'une poutre en béton armé de même géométrie, ce qui permet d'avoir une idée de la performance de la structure testée. Ainsi, en considérant qu'une poutre en béton armé de largeur 400 mm et de hauteur 200 mm, dont les armatures de flexion représentent 1% de la section de béton, se rompt par plastification des aciers de flexion au cours d'un essai identique, on trouve une force à rupture d'environ 160 kN, soit presque 2 fois moins que les poutres composite testées.

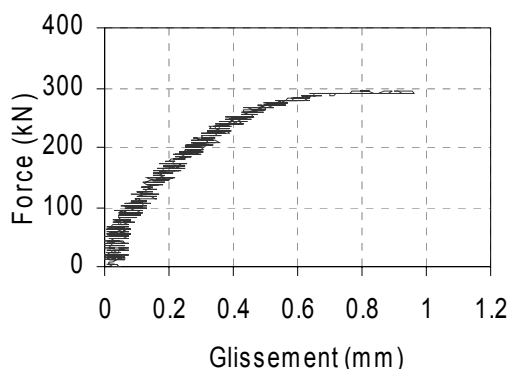


Figure 9. Glissement à l'interface à l'extrémité et la rupture en cisaillement dans le béton

4.2. Domaine d'intérêt mécanique du renforcement par du carbone

Il peut sembler difficile de justifier l'utilisation du carbone pour diminuer l'élancement des tabliers de ponts. Un ordre de grandeur sépare le module longitudinal du carbone à celui du bois. Une épaisseur de 5 mm de carbone est donc équivalente en terme de rigidité à environ 50 mm de bois, soit 1 à 2 lamelles supplémentaires, ce qui ne modifie pas significativement l'élancement.

Cependant, dans le domaine du service, un raisonnement peut être effectué en comparant deux structures de même inertie, la première étant une poutre mixte Bois-BFUP, la seconde une poutre composite BFUP-Bois-Carbone. Le renforcement conduit alors à une réduction de la contrainte de traction dans le bois (Figure 10), réduction qui est quasiment proportionnelle au gain relatif de hauteur. Cette diminution de la contrainte peut être utile pour des questions de fatigue.

En ce qui concerne les états limites ultimes, on comprend que les fibres de carbone seront utiles si le mécanisme de rupture s'initie dans le bois en flexion, ce qui suppose que l'interface entre le bois et le béton soit très résistante et que la résistance au cisaillement du béton soit élevée. Dans un tel cas, la rupture s'initierait dans le bois. La différence de résistance entre la poutre renforcée et celle non renforcée de même inertie proviendrait alors de la différence des contraintes de traction dans le bois (Figure 10), mais pas de cisaillement. Le renforcement, qui engendre une diminution des contraintes de traction du bois de 5 à 7 MPa dans le cas présent, conduira alors à une augmentation de la force à rupture. A cet effet quantifiable s'ajoute celui probable d'augmentation de la résistance du bois par la présence du carbone. Autrement dit, la rupture dans le bois renforcé pourrait s'effectuer à des contraintes bien supérieures à celles de la résistance du bois seul. Cet aspect est évidemment à confirmer par des essais.

En conclusion, pour que l'usage d'un renforcement en carbone soit mécaniquement intéressant, il faut d'abord disposer d'un système de connexion bois-béton de grande résistance et de raideur importante. Si ce n'est pas le cas, il sera probablement plus économique de chercher à améliorer cette liaison avant de recourir aux matériaux composites.

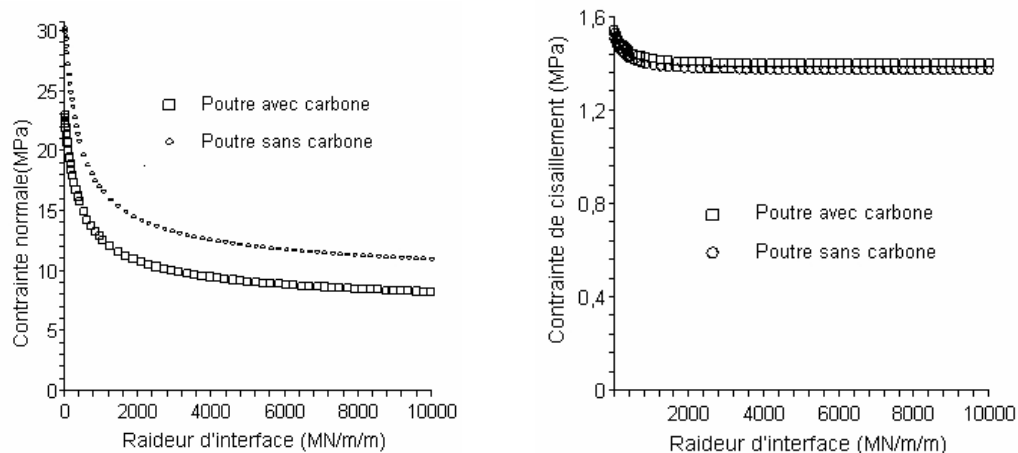


Figure 10. Evolution des contraintes normale et de cisaillement maximales dans le bois en fonction de la raideur d'interface bois-béton

5. CONCLUSIONS

Un ensemble de systèmes de connexion BHP-Bois pour des tabliers mixtes a été présenté dans cet article. Des poutrelles mixtes ont été conçues et réalisées et leurs performances en termes de charge statique ultime et de rigidité en flexion ont été mesurées. Quatre mécanismes différents de rupture sont mis en évidence. Ces mécanismes sont en général initiés au sein du connecteur ou dans le bois. Le système par collage direct du béton sur le bois se distingue de tous les autres par une raideur importante, très proche de la connexion parfaite, et par une charge ultime également plus importante que les autres d'au moins 20 %. La technique de collage a été ensuite validée avec un béton fibré ultra performant et le mode de traitement de la surface de béton à coller a été validé.

La raideur équivalente des différents corps d'épreuve a été estimée par un modèle analytique prenant en compte un glissement à l'interface. Ce modèle permet un classement des systèmes de connexion

par l'intermédiaire d'un coefficient de rigidité. Il a ainsi été possible de classer les systèmes essayés en 3 familles différentes.

L'article présente enfin les résultats de deux essais en flexion d'une poutre dalle en Béton-Bois-Carbone. La raideur de l'interface de l'élément a été trouvée proportionnelle au nombre de lignes de connecteurs à l'interface. Un calcul des contraintes de traction et de cisaillement montre que le renforcement du bois par des rubans carbone est intéressant vis-à-vis des états limites ultimes dans le cas d'une interface bois-béton à la fois rigide et résistante.

Remerciements : Les auteurs remercient les sociétés SIKA, EIFFAGE TP et AGINCO pour leur aide matérielle dans cette recherche.

6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AFGC (2002) Bétons fibrés à ultra-hautes performances, recommandations provisoires, documents scientifiques et techniques, Association Française de Génie Civil, 152 pages.

Ahmadi B.H., Saka M.P. (1993) Behaviour of composite timber-concrete floors. *Journal of Structural Engineering*, 119, 3111-3129.

Alain G. (1998) Plancher à collaboration bois-béton. Brevet d'invention, Office Européen des brevets.

Bathon T., Bathon L. (2005) Wood-Concrete-Composite systems. Brevet d'invention, United States Patent Application Publication.

Batoz J.L., Dhatt G. (1990), Modélisation des structures par éléments finis, Vol. 2, Hermes, 483p.

Brunner M., Gerber C. (2000) Composite decks of concrete glued to timber. *World Conference on Timber Engineering*.

Caron J.F., Carreira R.P. (2002) Interface behaviour in laminates with simplified model. *Composites science and technology*, 63, 633-640.

Clouston P., Civjan S., Bathon L. (2004) Experimental behavior of a continuous metal connector for a wood-concrete composite system. *Forest Products Journal*, vol. 54, pp. 76-84.

Deperraz G. (1998) Poutre mixte bois-béton pour la construction et l'ouvrage d'art. Brevet d'invention, Institut National De La Propriété Industrielle.

EN 1995-1-1, (2002) Eurocode 5, Conception et calcul des structures en bois.

Gattesco, 2001 Experimental study on different dowel techniques for shear transfer in wood-concrete composite beams. *Creative systems in Structural and Construction Engineering*

Guide SETRA (2007) Ponts en bois, comment assurer leur durabilité, guide technique, SETRA.

Jouslin de Noray H. (2005), Dimensionnement d'une dalle en matériau composite, projet de fin d'études de l'ENPC, ENPC Champs sur Marne, 80 p.

Le Roy R., C. Boulay, F. Le Maou (1999), Béton BSI – étude du comportement différé, rapport LCPC de l'étude 342 404 98.

Martino M. (2005) System for the construction of mixed wood and concrete floors, and the components required to join the two materials. Brevet d'invention, European Patent Application.

Newmark et al. (1951) Tests and analysis of composite beams with incomplete interaction. *Proc. Society for Experimental Stress Analysis*, Vol9, pp. 75-92.

Nguyen V. T., Caron J.F., Sab K (2005), A model for thick laminates and sandwich plates, *Composites Science and Technology*, 65, pp. 475-489.

Pham H. S. (2007) Ponts mixtes bois-béton – comportement à la fatigue de la connexion, thèse ENPC en cours.

Pham H.S., Le Roy R. (2006), Ponts mixtes bois-béton, étude des systèmes de connexion, Journées des sciences de l'ingénieur 2006, Marne La Vallée, 5 et 6 décembre.

Pincus G. (1970) Behavior of Wood-Concrete Composite Beams. *Journal of the Structural Division*, 96, 2009-2019.

Raymond H.G. (1995) Connecteur pour plancher mixte, plancher incorporant un tel connecteur et procédé de réalisation. Brevet d'invention, Institut National de la Propriété Industrielle.

Rossi P. (1998) Les bétons de fibres métalliques, Presses de l'ENPC.

Tommola J., Salokangas L., Jutila A. (2005) Tests on shear connectors. Rapport technique, Helsinki University of Technology-Laboratory of Bridge Engineering.