
Comportement statique de poutres hybrides composite-béton

Koaik A.¹, Bel S.², Jurkiewicz B.³.

^(1,2,3) Université de Lyon, Université Lyon 1, INSA-Lyon, LGCIE, 82 boulevard Niels Bohr, F-69622 Villeurbanne cedex, France, Tel. : 0033472692130, Fax : 0033478946906,

¹ alaa.koaik@univ-lyon1.fr

² sylvain.bel@univ-lyon1.fr

³ bruno.jurkiewicz@univ-lyon1.fr

RÉSUMÉ. L'utilisation des composites dans la construction est ralentie par la faible valeur de leur module d'élasticité qui induit des déplacements élevés en phase d'utilisation limitant l'exploitation totale de leur potentiel. Dans cette étude, nous avons testé des éléments structuraux de grande portée associant des poutres en composite pultrudés et des dalles en béton armé. La connexion des deux matériaux est réalisée au moyen de butées mécaniques ou bien par collage. Les matériaux constitutifs ont d'abord été caractérisés. Puis, les propriétés d'interface ont été déterminées au moyen de 2 séries d'essais push-out : l'une avec collage, l'autre avec les butées mécaniques. Ces différents résultats ont permis de concevoir 2 poutres de 4,80 mètres de portée: l'une utilisant les butées (PB3) et l'autre le collage (PB4). Ces poutres ont été testées en flexion 3 points jusqu'à la ruine. Dans le cas des butées, la rupture est obtenue en compression du béton. Dans le cas du collage, la rupture se produit par cisaillement longitudinal du béton à l'interface. La comparaison entre les résultats d'un modèle de poutres multicouches utilisé pour simuler le comportement en flexion et les mesures montre une précision acceptable de l'outil et souligne les points à améliorer.

ABSTRACT. The use of composites in construction is constrained by their flexibility which causes high loading deflections, thus limiting their full exploitation. In this study, we have studied long span hybrid structures associating pultruded GFRP profiles with reinforced concrete slabs. The connection of the two materials was established by means of mechanical studs (bolts) or by bonding. Characterization tests of the materials were followed by 2 series of push out tests to determine the interface mechanical properties of both types of connection. These results were exploited to design two 4.80 meter spanned beams: PB3 with a bolting connection and PB4 with a bonding connection. These beams were tested under 3 point bending up to failure. In case of PB3 (bolting), failure is obtained by concrete crushing. Meanwhile, PB4 (bonding) failed due to shearing at the interface. The comparison between the results of a multilayers beam model and the experimental measurements shows an acceptable accuracy citing some amelioration to be made.

MOTS-CLÉS : structure hybride, butée mécanique, collage, push-out, flexion 3 points, modèle analytique multicouches.

KEY WORDS: hybrid structure, mechanical studs, bonding, push-out, 3 point bending, multilayers analytical model.

1. Introduction

L'utilisation des composites dans la construction est de plus en plus importante car ces matériaux présentent des atouts indiscutables comme par exemple un très bon rapport performance / poids, une bonne résistance aux agents chimiques ou une facilité de mise en œuvre. Cependant, leur essor est ralenti par certaines faiblesses dont l'une des plus importantes est leur faible module d'élasticité qui induit des déplacements élevés en phase d'utilisation et des risques d'instabilités importants qui ne permettent pas d'exploiter tout le potentiel de ces matériaux. L'absence de normes de construction et de dimensionnement et la résistance au feu sont également un frein.

Dans le cas d'éléments de structure fléchis, une des solutions consiste à associer les profilés composites à une dalle en béton armé. Des études antérieures [COR 2009] [COR 2007] ont montré l'efficacité de cette solution innovante au moyen d'essais dans différentes conditions de chargement. Effectivement, cette structure présente une augmentation de rigidité, peut résister à l'instabilité de PRF seul et fournit une bonne exploitation de la résistance de matériaux PRF.

Dans cette étude, qui fait suite aux travaux présentés en 2015 [KOA 2015], nous avons testé des éléments structuraux de grande portée associant des poutres composites pultrudés fibres de verre / résine polyester et des dalles en béton armé. La connexion des deux matériaux est réalisée au moyen de butées mécaniques (ici de type boulons 6.8 Φ 10 mm), solution technique traditionnelle analogue aux goujons des structures mixtes acier-béton ou bien par collage, solution technique innovante.

Les matériaux constitutifs ont d'abord été caractérisés : en traction pour les profilés composites, en compression et en traction pour le béton. Puis, les propriétés d'interface ont été déterminées au moyen de 2 séries d'essais push-out : l'une avec collage, l'autre avec les butées mécaniques. Ces différents résultats ont permis de concevoir 2 poutres de 4,80 mètres de portée ne différant que par leur connexion: l'une utilisant les butées (PB3) et l'autre le collage (PB4). Ces poutres ont été testées en flexion 3 points centrée sous chargement statique jusqu'à la ruine. Cette configuration d'essai permet de localiser plus facilement la section critique et de concentrer les mesures dans cette zone.

Finalement, un modèle de poutres multicouches est utilisé pour simuler le comportement des poutres testées, dans le domaine élastique d'une part et d'autre part à la ruine. Le glissement est négligé dans le cas du collage et pris en compte dans le cas des butées. Enfin, une comparaison est faite entre les résultats de calcul et les mesures obtenues.

2. Programme expérimental

2.1. Caractérisation des matériaux

2.1.1. GFRP

Un essai de brûlage a été réalisé sur différentes zones d'un tronçon de poutre de 25mm de long (voir figure 1) pour déterminer la composition de GFRP utilisé [KOA 2015]. Les résultats sont présentés dans le tableau 1. On constate qu'il y a une certaine hétérogénéité de la distribution des fibres dans la section.

	section complète		âme		semelle (4 morceaux)		nœuds (2 morceaux)	
	% masse	% volume	% masse	% volume	% masse	% volume	% masse	% volume
fibres longitudinales	43	27	26	15	52	35	57	28
mats des fibres	16	10	20	12	16	10	12	6
total fibres	59	37	46	26	68	45	69	34
résine	41	63	54	73	32	55	31	66

Tableau 1. Pourcentages massiques et volumiques des fibres dans le profilé GFRP.

Dans un deuxième temps, un essai de traction uni-axiale a été effectué selon la norme ASTM D 3039M-08. Les essais de traction ont été réalisés sur 28 éprouvettes parallélépipédiques découpées dans les semelles et dans l'âme du profilé. Chacun des morceaux a une longueur d'environ 25 cm. La valeur moyenne des contraintes ultimes obtenues sont de 307.3 MPa dans l'âme et de 396.6 MPa dans la semelle.

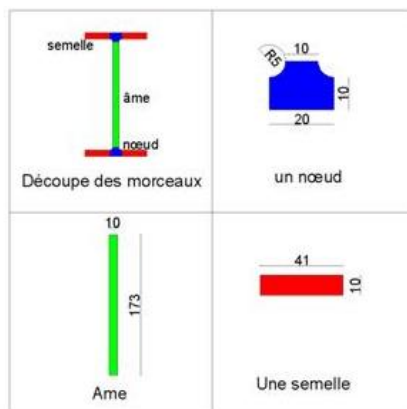


Figure 1 Zones de prélèvement pour les essais de brulage

2.1.2. La colle

L'adhésif utilisé pour les essais est une colle époxy bi-composante. Des essais de traction ont été effectués selon la norme ISO 527-2 (2002) sur des éprouvettes haltères réalisés au laboratoire. La colle présente un comportement élastique, légèrement non linéaire, jusqu'à une rupture fragile. La contrainte à rupture vaut en moyenne 25 MPa et le module d'élasticité tangent moyen atteint 14900 MPa. Notons toutefois que le comportement étudié correspond à la traction simple (les essais de cisaillement sur adhésifs seuls étant difficiles à mettre en œuvre) alors que dans nos essais, le joint de colle est essentiellement sollicité en cisaillement.

2.1.3. Le béton

Le bétonnage des différents éléments a été effectué en plusieurs fois. A chaque gâchée, des cubes de 100 mm et des cylindres $\Phi 16 \times 32$ ont été coulés pour la caractérisation en compression et en fendage à 28 jours et le jour des essais. Les résultats sont présentés dans le tableau 2.

	âge du béton au jour de l'essai	Résistance en compression sur des cubes (100mm ³) (MPa)	Résistance en fendage sur des cylindres ($\Phi 16 \times 32$) (MPa)
PB3 (poutre boulonnée)	38	48.7 ± 1.7	3.6 ± 0.6
PB4 (poutre collée)	47	55.7 ± 3.3	3.3 ± 0.2
POPB2 (push-out collé)	44	48.4 ± 3.7	-
POPB3 (push-out boulonné)	32	51.4 ± 0.6	3.3 ± 0.4

Tableau 2. Résultats des essais de caractérisation du béton par compression et fendage.

2.2. Caractérisation de l'interface (Essai push-out)

Nous avons réalisé deux séries de corps d'épreuves (POPB2 et POPB3) qui comprennent 5 spécimens identiques chacune. Pour chaque spécimen collé, la dalle est non armée et la méthodologie de réalisation a permis d'obtenir un joint de colle fin dont l'épaisseur, non mesurée, est inférieure à 1 mm environ. La surface de collage pour tous les corps d'épreuve vaut 102 x 150 mm². Pour chaque spécimen boulonné, la dalle armée est coulé sur le profilé ayant les boulons déjà fixés. La figure 2 illustre le propos.

Les essais push-out ont été effectués sur une presse de compression sous chargement monotone croissant jusqu'à la ruine à une vitesse de 0.6 mm/min. Les forces et les déplacements ont été mesurés. En outre, la technique de corrélation d'images a également été utilisée [BEL 2016].

Les spécimens collés présentent un comportement analogue, après une phase de mise en charge, La courbe force-déplacement est quasi-linéaire jusqu'à rupture. La rupture se produit par cisaillement dans le béton à proximité de l'interface et parallèlement à son plan (rupture cohésive dans le béton). La contrainte moyenne à rupture vaut 7.95 ± 0.9 MPa. Il faut noter que le glissement reste nulle lors de l'essai et monte brusquement au moment de la rupture et donc les courbes effort-glissement présentent une rigidité très importante. Cette observation nous amène à considérer que la connexion est parfaite dans le cas du collage. Par ailleurs, les spécimens boulonnés présentent un comportement analogue. La force augmente avec le déplacement de façon linéaire jusqu'à environ 80 % de la charge a rupture puis devient fortement non-linéaire jusqu'à la force maximale et finalement, elle chute rapidement. A la ruine, le glissement entre les dallettes et le profilé est visible, les boulons sont fortement inclinés : la ruine est donc dû à la plastification des boulons en flexion. La charge moyenne à rupture vaut 26.3 ± 3.5 kN et la rigidité linéique 'k' d'un boulon calculée à partir de la figure 3 est 12.75 kN/mm. La rigidité linéique 'k' est utilisée dans la modélisation des poutres mixtes en tenant compte du glissement à l'interface entre la dalle et le profilé. [LEB 87] relie l'effort linéique 'v' à l'interface au glissement 's' par la relation $v=k.s$.

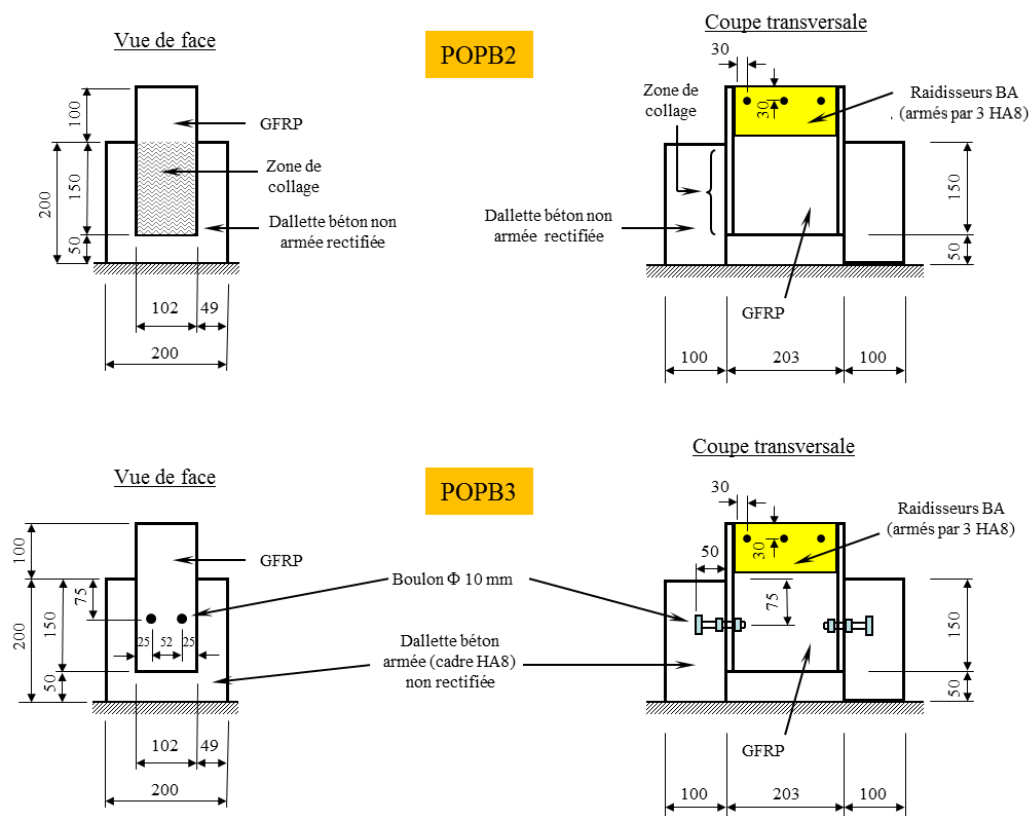


Figure 2 Eprouvette push out

2.1. Essais de flexion

Nos essais ont pour but d'étudier le comportement mécanique de deux poutres mixte (béton – composite), l'une collée et l'autre boulonnée, lorsqu'elles sont soumises à une flexion trois points (ce mode d'essai permet de localiser avec certitude la section la plus sollicitée). Elles ont toutes une longueur de 5.0 m ($L = 4.8$ m de portée). La force imposée, le déplacement vertical en section centrale (SC) et en section nord (SN), ainsi que le glissement sud et nord ont été mesurés au moyen d'un LVDT. Les déformations ont été mesurées dans SC et SN de la poutre, dans la dalle et dans le profilé, au moyen de jauges.

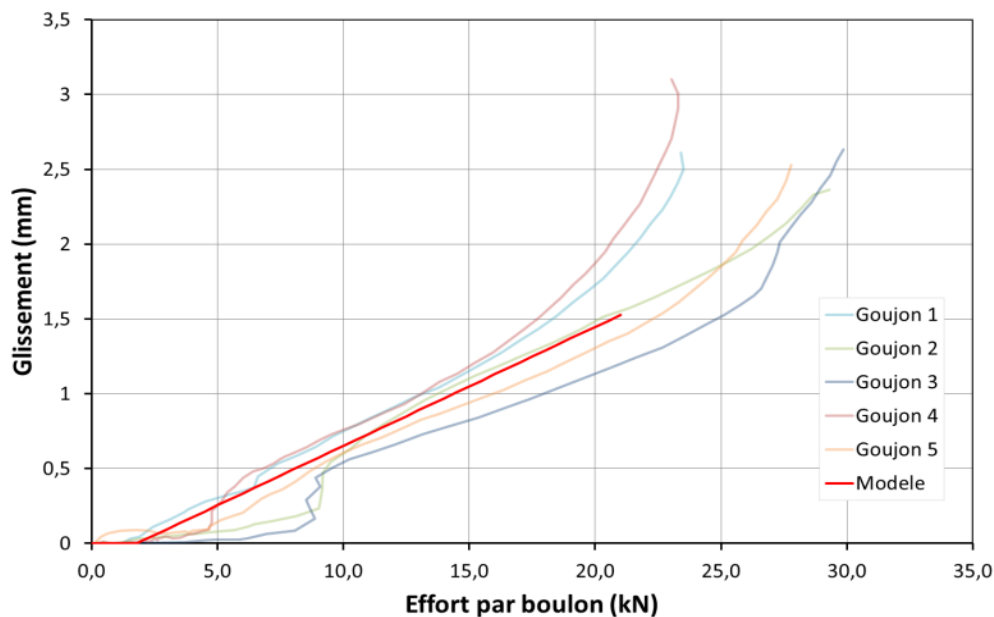


Figure 3 Résultats push-out (boulonné)

2.1.1. Géométrie et instrumentation des poutres

Les poutres sont présentées sur la figure 4. Il est à noter, qu'à chaque extrémité, des raidisseurs en béton de 15 cm de long environ ont été coulés de part et d'autre de l'âme. Ces raidisseurs permettent de rigidifier la zone d'appui et d'éviter des ruptures locales prématurées par écrasement de la semelle ou flambement de l'âme. Pour la poutre hybride collée, comme pour les corps d'épreuve push out, le profilé est nettoyé à l'acétone. La colle est appliquée le long du profilé (sur toute la largeur de la semelle) et sur chaque dalle en béton. La poutre hybride boulonnée est munie de boulons de classe 6.8 et de diamètre 10mm, espacés de 10 cm le long de la poutre et sa dalle est coulée sur place.

2.1.2. Résultats

L'évolution de la flèche et celles des déformations dans la section centrale sont présentées sur les figures 4 et 5.

Pour la poutre PB3, la courbe force-flèche perd légèrement sa linéarité vers 90 kN. La charge maximale vaut 114.62 kN et correspond à la rupture en compression du béton dans la SC. La jauge en fibre supérieure de la dalle dans cette section indique une valeur maximale de -3.2‰ , celle en fibre inférieure du profilé une valeur de 13.1‰ . Cette dernière valeur, supérieure à celle mesurée lors des essais de traction du profilé (environ 9‰), indique que la rupture du profilé en flexion est proche. En SC, les déformations évoluent de façon linéaire avec la force jusqu'à environ 110 kN, valeur de charge où apparaissent très certainement les premiers signes de rupture en compression du béton.

Pour la poutre PB4, les courbes force-flèche et force déformations sont également linéaires jusqu'à la ruine qui se produit brutalement à 86.19 kN par cisaillement à l'interface dalle-profilé. Les déformations maximales en SC valent -2.5‰ et 8.5‰ en fibre supérieure de la dalle et en fibre inférieure du profilé respectivement. Même si aucun signe d'endommagement n'a été observé dans le béton, l'écrasement du béton en compression n'est pas très éloigné compte tenu de la valeur de la déformation en fibre supérieure de la dalle en SC à la ruine. Après le déchargement, la dalle et le profilé ont été totalement séparés et on a constaté que la rupture est essentiellement cohésive dans le béton ce qui traduit une bonne qualité du collage. Le diagramme de déformation selon l'attitude reste quasiment linéaire jusqu'à la rupture (voir figure 6).

Pour les deux poutres, l'évolution des déformations en SN reste linéaire jusqu'à la ruine. Par ailleurs, le glissement dans le cas de PB3 est remarqué et atteint une valeur de 0.8mm à la ruine ; cependant, il reste nul dans le cas de PB4 jusqu'à la ruine.

2.1.3. Synthèse et analyse comparée

On constate d'abord que sur les 80 premiers % environ du comportement, les courbes force-flèche et force-déformation sont très proches les unes des autres traduisant ainsi le fait que, sur ce domaine de charge, le type de connexion n'a pas une influence majeure. On pourra toutefois noter une petite différence sur les déformations à l'interface et sur les valeurs de glissement aux extrémités entre les boulons et le collage mais ces écarts sont, pour cette géométrie, sans conséquence puisque la sous-face de la dalle est de toute façon tendue avec le collage.

Les principales différences apparaissent à l'approche de la ruine. La connexion par boulons a permis d'exploiter pleinement la capacité portante de la section droite de la poutre puisque la ruine se produit par épuisement du béton en compression et non par la ruine de la connexion. En revanche, la connexion par collage dans la même configuration ayant une rupture prématurée à l'interface, ne permet pas l'exploitation maximale de la section en compression.

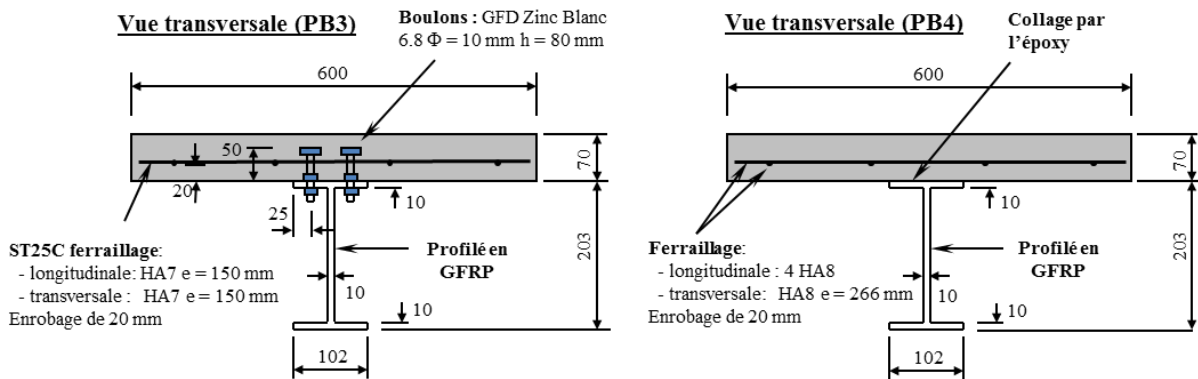


Figure 4 Les sections transversales de PB3 et PB4

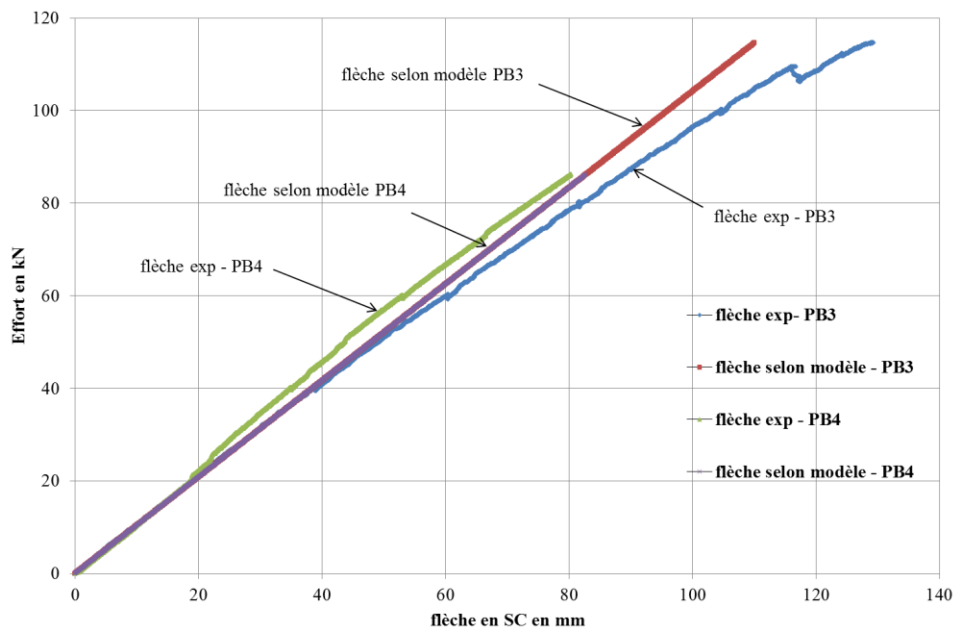


Figure 5 Les courbes force-flèche au centre pour les deux poutres

3. Modélisation

La poutre considérée est uniquement soumise à des sollicitations de type flexion plane et la modélisation est faite suivant la théorie des poutres multicouches. L'étude comprend deux parties principales : comportement élastique et comportement ultime basé sur une adaptation du concept de rotule plastique : la dalle en béton atteint la ruine par écrasement mais le profilé en composite reste élastique-fragile jusqu'à la rupture. Les deux cas sont étudiés avec ou sans la prise en compte du glissement entre le profilé et les dalles (supposées non armées). Dans

les deux cas, on admet la conservation des sections planes (hypothèse de Bernoulli), bien vérifiée expérimentalement. Par ailleurs, la flèche due à l'effort tranchant est ici prise en compte du fait de la faible valeur du module de cisaillement 'G' du profilé. Le tableau 3 définit les différents paramètres utilisés dans les équations de la modélisation.

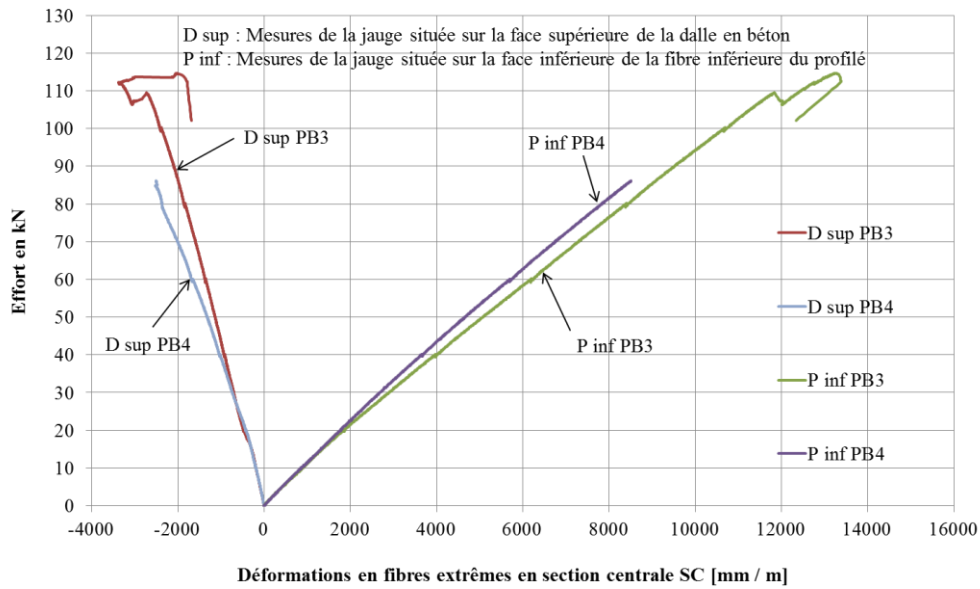


Figure 6 Les courbes force-déformations au centre pour les deux poutres.

$s_i(x)$	Le glissement*	E_p	Module d'Young du profilé	F	Charge ponctuelle appliquée
A_i et B_i	Constantes d'intégration	Z_u	La position de l'axe neutre à la ruine	G	Module de cisaillement du profilé
α, β, γ_1 et γ_2	Paramètres dépendant des propriétés mécaniques et géométriques de la poutre.	m_{1i}, m_{2i}, m_{3i} et m_{4i}	Coefficients du moment multipliés par x^3, x^2, x^1, x^0 $M_i(x) = m_{1i} x^3 + m_{2i} x^2 + m_{3i} x + m_{4i}$	f_d	Résistance ultime du béton en compression
				Ω	Aire de l'interface
				b_p	Largeur de la semelle du profilé
$T_i(x)$	L'effort tranchant	h_p	La hauteur du profilé	A_a	Aire de l'âme du profilé
h_d	La hauteur de la dalle	δ_t	Flèche due à l'effort tranchant	b_d	Largeur de la dalle
s'	La dérivée du glissement	N_d	L'effort de compression dans la dalle	K	Paramètre concernant la géométrie du profilé
ε_d	Déformation ultime du béton en compression	τ_{xy}	L'effort de cisaillement à l'interface	*i exprime le domaine d'intégration.	

Tableau 3 Nomenclature.

Le glissement relatif entre les dalles et le profilé est évalué à partir d'une équation différentielle définissant l'équilibre des efforts internes de la section dont l'effort à l'interface [BUZ 2003] :

$$s_i(x) = A_i \cosh(\alpha x) + B_i \sinh(\alpha x) - \frac{\beta}{\alpha^2} T_i(x) - \frac{6m_1\beta}{\alpha^4} \quad [1]$$

L'équation caractéristique de la position de l'axe neutre plastique est donnée par la forme [2] dans le cas où le glissement est négligé et par la forme [3] s'il est pris en compte :

$$0.8b_d f_d Z_u^2 + E_p \varepsilon_d A_p Z_u - E_p \varepsilon_d A_p \left(h_d + \frac{h_p}{2} \right) = 0 \quad [2]$$

$$0.8b_d f_d Z_u^2 + E_p A_p Z_u (\varepsilon_d + s') - E_p \varepsilon_d A_p (h_d + \frac{h_p}{2}) = 0 \quad [3]$$

La flèche due à la flexion est calculée à partir de la double intégration de la courbure, sa forme générale est la suivante :

$$f_{\bar{f}_i}(x) = \gamma_1 \left(\frac{m_{1i} x^5}{20} + \frac{m_{2i} x^4}{12} + \frac{m_{3i} x^3}{6} + \frac{m_{4i} x^2}{2} \right) + \gamma_2 \left(\frac{A_i}{\alpha} \sinh(\alpha x) + \frac{B_i}{\alpha} \cosh(\alpha x) - \frac{\beta}{\alpha^2} M_i(x) - \frac{6m_{1i}\beta}{\alpha^4} x \right) + F_{1i} x + F_{2i} \quad [4]$$

La flèche due à l'effort tranchant est calculée à partir de la méthode énergétique et sa valeur à mi-travée dans le cas de flexion trois points est la suivante :

$$\delta_t = \frac{KFx}{4GA} \quad [5]$$

Ce modèle du calcul est appliqué aux poutres PB3 et PB4 et quelques mesures sont confrontées aux résultats théoriques dans le tableau 4 et la figure 5 (flèche). On peut voir que les valeurs théoriques présentent quelques différences avec les valeurs expérimentales. Une raison générale qui crée ces différences dans les deux cas est les valeurs des modules du profilé. Nous avons obtenu ces valeurs à partir des essais de traction et flexion et la valeur de E_p variait entre une moyenne de 26 GPa et une autre de 35 GPa.

La contrainte de cisaillement à l'interface est évaluée à partir de l'effort tranchant :

$$N_d = \tau_{xy} \Omega \quad [6]$$

Où $N_d = \tau_{xy} \Omega$ et $\Omega = 0.5 b_p L$

Dans le cas du boulonnage, on obtient un effort de 18.8 kN / boulon, une valeur inférieure à celle obtenue dans le push out boulonné ce qui confirme l'absence de cisaillement des boulons à l'interface. Dans le cas du collage, pour un effort de cisaillement à l'interface de 8 MPa (la valeur de la contrainte moyenne à rupture pour les spécimens push-out) pris dans la modélisation, on obtient une valeur de force de 134.89 kN. Cette différence peut être liée au fait que les essais de push-out sont des essais de cisaillement pur ; cependant, dans le cas de PB4 (portée 4.8 m) des efforts de traction à l'interface combinés avec les efforts de cisaillement peuvent être la raison derrière cette rupture à 86.19 kN.

	expérimentale		modélisation	
	PB3	PB4	PB3	PB4
F_u (kN)	114.62	86.19	152.47	134.89
D_{sup}	-0,003374	-0,00252	-0,0035	-0.00252
P_{inf}	0,013405	0,00854	0,0158	0,0107

Tableau 4 Comparaison entre les valeurs numériques et analytiques

4. Conclusion et perspectives

Deux poutres mixtes béton-pultrudé avec deux modes d'assemblage (collage et boulonnage) sont testées en flexion trois points. Deux séries d'essai push out avec le même mode d'assemblage ont également été effectuées. Les résultats d'essais push-out corroborent ceux de la flexion. Le procédé de connexion par collage doit être amélioré pour permettre l'exploitation complète des capacités de la dalle.

Bibliographie

[BEL 2016] BEL S., «Assemblage entre profilé pultrudé et béton : comparaison entre boulonnage et collage », *Journées Thématiques Techniques d'Imagerie pour la Caractérisation des Matériaux et des Structures du Génie Civil*, Grenoble, Mars 2016, France.

[BUZ 2003] Buzon S., Modélisation du comportement mécanique des poutres mixtes sous charges modérées : réponse élastique et comportement au cours du temps, Thèse de doctorat, Université Strasbourg 3 – Robert schuman, 2003.

[COR 2007] CORREIA J., BRANCO F., FERREIRA J., « Flexural behaviour of GFRP- concrete hybrid beams with interconnection slip », *Composite Structures*, vol. 77, n° 1, 2007, p. 66-78.

[COR 2009] CORREIA J., BRANCO F., FERREIRA J., « Flexural behaviour of multi-span GFRP-concrete hybrid beams », *Engineering Structures*, vol. 31, n° 7, 2009, p. 1369-1381.

[KOA 2015] KOAIK A., BEL S., JURKIEWIEZ B., « Comportement en flexion de structures mixtes composite – béton », *Rencontres Universitaires de Génie Civil*, Bayonne, Mai 2015, France.

[LEB 1987] Lebet J.P., Comportement des ponts mixtes acier-béton avec interaction partielle de la connexion et fissuration du béton, Thèse de doctorat, l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1987.