
Comportement en flexion de structures mixtes 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. Les composites ayant des atouts mécaniques et environnementaux, présentent un point faible qui entrave leur utilisation dans la construction. Dans cette étude, des essais de caractérisation de l'interface collée ont d'abord été effectués, puis nous avons testé en flexion un profilé composite seul et deux poutres hybrides associant des poutrelles composites fibres de verre et des dalles en béton armé. La connexion des deux matériaux est réalisée au moyen de butées mécaniques (boulons) ou bien par collage. Ces poutres ont été testées en flexion 3 points jusqu'à la ruine. La résistance et le mode de ruine des structures confirment le bon fonctionnement mécanique de ce système hybride. Un modèle existant de poutres multicouches est finalement utilisé pour simuler le comportement des poutres testées. La comparaison entre les résultats de calculs et les mesures montre une précision acceptable en particulier dans le cas de collage où l'hypothèse d'adhérence parfaite est prise mais pas dans le cas de boulons ; une modélisation par poutre mixte en interaction partielle devrait être plus précise dans ce cas.

ABSTRACT. Composites with mechanical and environmental assets have a weakness point that hinders their widespread in construction. In this study, first, characterization tests of the bonded interface were performed then a pultruded GFRP beam in addition to two hybrid beams combining glass fiber composite beams and RC slabs were statically tested in 3-point bending until failure. The connection of the two materials was established by means of mechanical studs (bolts) or by bonding. Ultimate load and failure modes confirm the good functioning of the hybrid system suggested. An existing multilayers beam model is finally used to simulate the behavior of the tested beams. The comparison between the calculations results and the experimental measurements shows an acceptable accuracy in particular in the case of bonding where the perfect adhesion hypothesis is made, but not in the case of bolts; modelling the composite beam by partial interaction should be more accurate in this case.

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

Les matériaux PRF (polymère renforcé de fibres), déjà employés dans le domaine de l'aéronautique et de l'ingénierie maritime, sont de plus en plus utilisés dans le domaine du génie civil. Grâce à leurs propriétés mécaniques et environnementales, ces matériaux peuvent remplacer les matériaux traditionnels de construction surtout l'acier. Effectivement, leurs haute résistance, haute rapport de performance/ poids ainsi que performance/cout, leur résistance élevée contre les conditions environnementales agressifs comme les conditions chimiques (corrosion) et la facilite et rapidité de mise en œuvre un matériau très intéressant dans le domaine de réparation de structures endommagées [SAA 1991], planchers hybrides [SAT 2014], et récemment dans les conceptions des ponts et passerelles [MEN 2011] [GON 2014]. Cependant, ces matériaux présentent quelques faiblesses qu'il convient de maîtriser : leur grande souplesse et leur orthotropie. Ces propriétés mécaniques tendent à gouverner leur comportement en flexion. Effectivement, la majorité des essais de flexion sur une poutre GFRP s'achèvent par des modes de rupture fragiles et prématurés sans avoir atteint 60 % de la capacité ultime de GFRP en flexion.

Une solution adaptée par plusieurs auteurs [COR 2009] [COR 2007] [HAC 2012] est l'assemblage de profilé PRF ou GFRP - avec une dalle de béton. 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. De plus, cette structure nommée structure hybride, selon le type de connexion dalle-PRF, peut avoir une rupture moins fragile que le PRF seul.

Nos travaux visent à étudier le comportement mécanique de structures hybrides à l'échelle des matériaux, de l'interface et de la structure. En effet, les essais de caractérisation de GFRP et béton sont faits dans un premier temps, puis des essais de caractérisation de l'interface sont effectués par l'essai push-out pour des éprouvettes de GFRP collées sur des substrats en béton, et finalement trois poutres sont testées : Pu1 une poutre en GFRP, PB1 une poutre hybride où la connexion à l'interface est établie par collage, PB2 la même que PB1 mais avec une connexion par boulonnage.

2. Programme expérimental

2.1. Caractérisation des matériaux

2.1.1. GFRP

Un essai de brulage a été réalisé pour déterminer la composition de GFRP utilisé. En effet, le profilé est constitué de fibres de verre et d'une matrice polyester. Lors de l'opération de brûlage, la matrice subit une combustion complète, ne restent alors que les fibres de verre. Le verre a une température de fusion qui vaut environ 1400°C alors que celle de la matrice polyester est de 255°C. Nous pouvons assurer la combustion de la matrice sans dégrader les fibres de verres. Le pourcentage de fibre diffère selon que l'on soit dans l'âme ou la semelle. Nous avons procédé au test de brulage sur différentes parties d'un profilé : un morceau découpé dans l'âme, quatre morceaux découpés dans la semelle et deux morceaux dans la liaison âme semelle. Une section complète (non découpée) sera aussi soumise au test de brûlage. 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 massique et volumique des fibres dans le profilé GFRP.

Dans un deuxième temps, un essai de traction uniaxiale a été effectué sur quatre morceaux de profilé découpés dans les semelles du composite. Chacun des morceaux a une dimension de 25 cm x 4 cm, l'épaisseur vaut 1 cm. Une jauge de déformation est placée sur l'éprouvette. Lors de ce test, la vitesse de déplacement est imposée. Le comportement est présenté sur la figure 1. On a obtenu lors des essais un module d'Young moyen de 32800 MPa et une résistance ultime moyenne à la traction de 295 MPa.

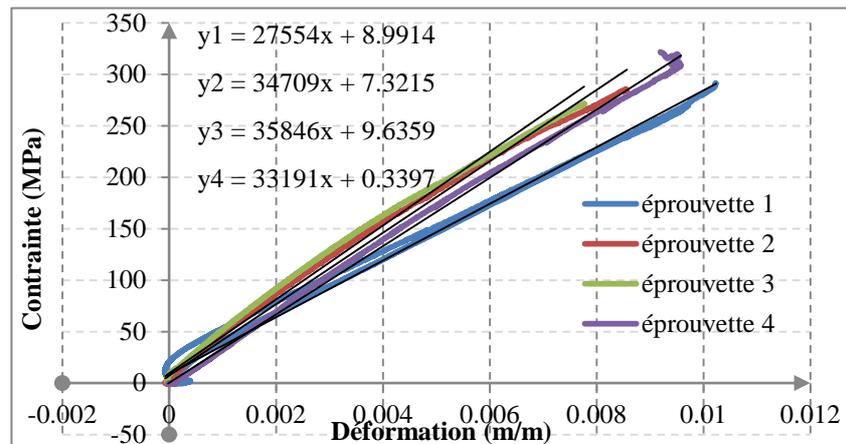


Figure 1. Résultat des essais de traction sur le GFRP.

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 alors que dans nos essais, le joint de colle est essentiellement sollicité en cisaillement.

2.1.3. Le béton

Le béton utilisé est un pré mélange de type C25/30 avec une taille du plus gros granulat de 8 mm de la marque WEBER BETON STANDARD. Des éprouvettes $\Phi 16 \times 32$ ont été préparées pour la caractérisation des matériaux le jour des essais. Pour chaque gâchée, des cylindres 16×32 ont été réalisés pour être testés le jour de l'essai de la poutre correspondante. La résistance en compression a été déterminée par des essais d'écrasement selon la norme NF P 18-406 sur éprouvette préalablement rectifiée et la résistance en traction par des essais de fendage selon la norme NF P 18-408. Les résultats sont présentés dans le tableau 2.

	âge du béton au jour de l'essai	Résistance en compression (MPa)	Résistance en traction (MPa)
gâchée 1 (poutre collée)	62	42.4 ± 0.7	3.0 ± 0.3
gâchée 2 (poutre goujonnée)	52	33.5 ± 1.6	2.7 ± 0.2

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

2.2. Essais push out

En l'absence de norme pour une connexion par collage, la géométrie des corps d'épreuve des essais push-out est inspirée de celle de l'EC4. Nous avons réalisé une série de corps d'épreuves qui comprend 6 spécimens identiques. Pour chaque spécimen, 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 $102 \times 150 \text{ mm}^2$ comme indiquée sur la figure 2. Une fois le collage réalisé, des raidisseurs en bois ont été ajoutés entre les semelles pour éviter le voilement de l'âme lors de l'essai.

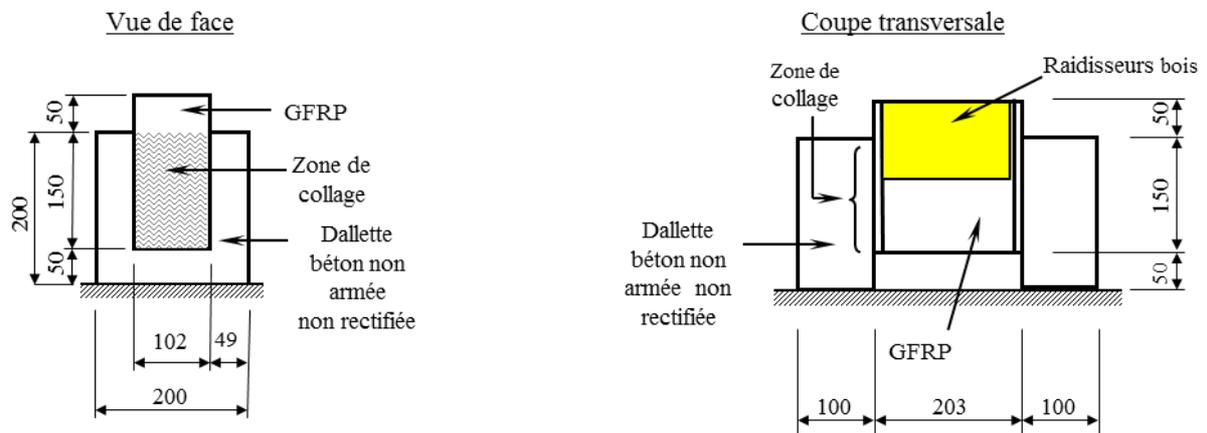


Figure 2. Epreuves push-out.

Les essais push-out ont été effectués sur une presse de compression sous chargement monotone croissant jusqu'à la ruine. Seule la force a été mesurée. Les résultats sont présentés dans le tableau 3. Nous obtenons donc une valeur moyenne de cisaillement : $\tau_m = 1.8 \pm 0.8$ MPa.

épreuve n°	contraintes (MPa)	mode de rupture
1	1.86	mixte
2	2.19	mixte
3	0.82	mixte
4	1.31	mixte
5	3.01	mixte
6	1.4	mixte

Tableau 3. Résultats essais push out.

L'examen des corps d'épreuves rompus laisse apparaître une rupture mixte sur l'ensemble des six essais, plus un arrachement d'un bout de profilé. Ils présentent tous une rupture par cisaillement et une rupture d'adhérence. Nous avons à la fois une rupture dans la colle et dans le béton. L'examen des contraintes moyennes ultimes montre des disparités assez élevées. Des défauts de planéité des substrats peuvent en être la cause, car un calage important fut effectué lors de l'essai.

2.3. 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 goujonnée et d'un profilé composite seul, lorsqu'elles sont soumises à une flexion trois points. Ils ont tous une longueur de 2.08 m. Outre la force imposée, le déplacement vertical en section centrale a été mesuré au moyen d'un LVDT. Les déformations ont été mesurées dans différentes sections de la poutre, dans la dalle et dans le profilé, au moyen de jauges.

2.3.1. Géométrie et instrumentation des poutres

Les poutres sont présentées sur la figure 3. Pu1 ne comporte pas de dalle en béton. La préparation nécessaire consiste à la découpe de la poutre aux bonnes dimensions et placer les raidisseurs. Ces raidisseurs en bois, sont mis aux appuis et le point d'application de la force ponctuelle lors de l'essai. Ils sont placés de part et d'autre 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 sur le tout le long du profilé (sur toute la largeur de la semelle) et sur le béton. La poutre hybride boulonnée est munie de boulons de classe 6.8 et de diamètre 8mm, espacés de 10 cm le long de la poutre.

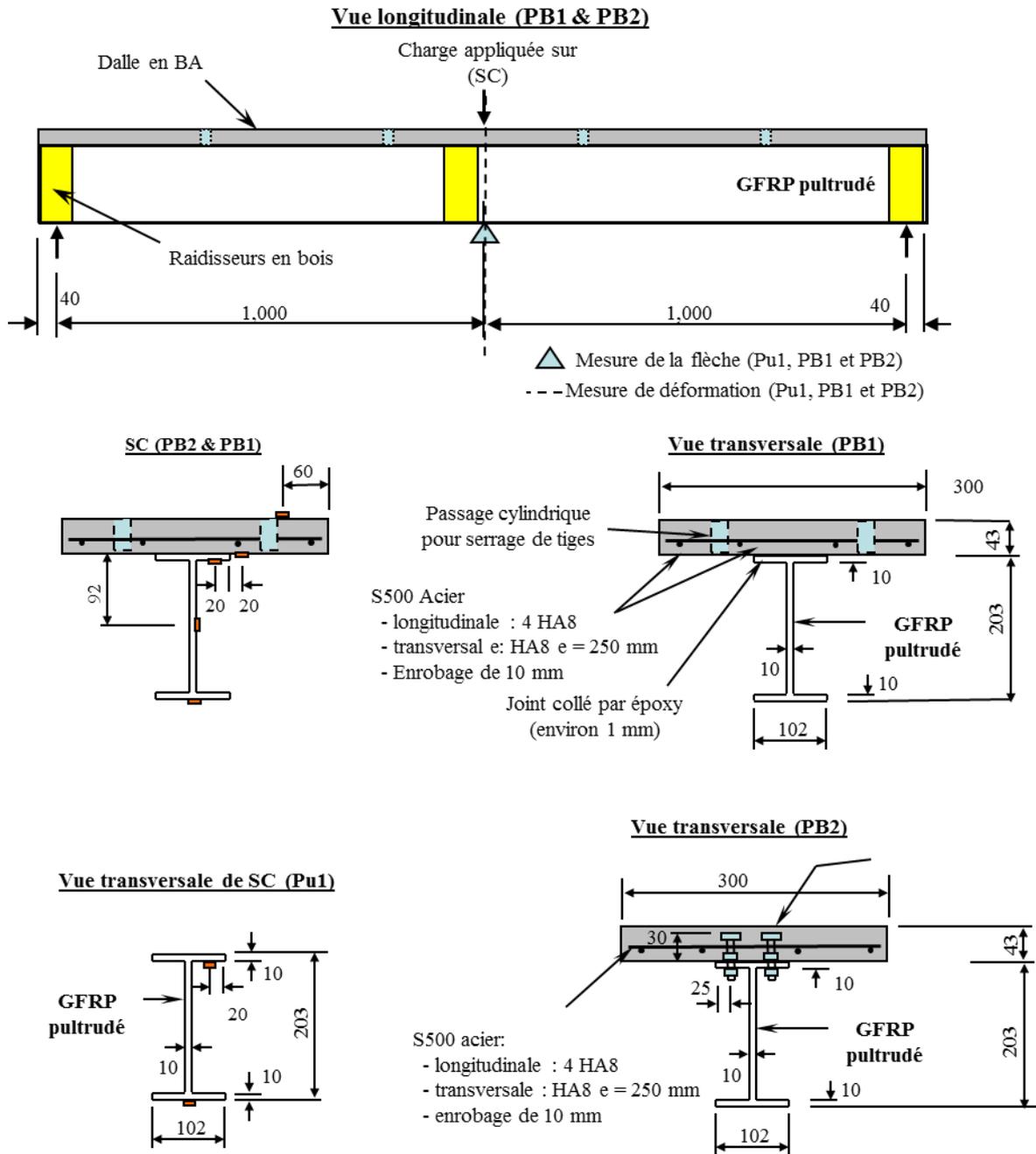


Figure 3. Géométries et instrumentation des trois poutres.

2.3.2. Résultats

L'évolution de la flèche et celles des déformations dans la section centrale sont présentées sur les figures 4 et 5. On constate tout d'abord, comme attendu, le gain important apporté par la présence d'une dalle en BA tant sur la raideur flexionnelle d'ensemble que le mode ou la charge de ruine.

Pour la poutre PB1, figure 5 nous indique que la flèche et la force augmentent linéairement dans un premier temps, puis, lorsque le béton de la dalle de compression commence à plastifier, on observe donc que la pente de la courbe diminue.

Pour ce qui est des déformations dans la section au cours du chargement et notamment à la charge de ruine soit 13 505 daN, on observe que le béton en compression est à 0,0038 mm alors que sa déformation ultime est de 0,0035mm. Nous en déduisons donc que, malgré une rupture par déversement aux appuis, la ruine par rotule

plastique avec écrasement du béton était très proche. Pour ce qui est du pultrudé en traction, celui-ci admet une déformation de 0,0102mm, on en déduit que la ruine en traction du profilé était encore loin (δ°/∞ lors de la ruine en flexion).

Le comportement de PB2 est semblable à celui de PB1 mais il présente quelques différences. La ruine se produit par rotule plastique et écrasement du béton. A la ruine, la fibre inférieure du GFRP présente une déformation de l'ordre de 8 ‰, il reste 18 % de déformation au profilé pultrudé avant d'atteindre la ruine par traction des fibres inférieures. Si l'on souhaite optimiser la poutre mixte, il faudrait donc augmenter la résistance du béton en compression en augmentant l'épaisseur de la dalle de compression.

L'examen des flèches figure 5 nous montre que PB2 présente une rigidité flexionnelle presque 2 fois plus petite que celle de PB1. Cette différence est principalement due au mode de connexion : les butées mécaniques induisent, par le perçage ou la déformation locale, une connexion imparfaite entre la dalle et le profilé.

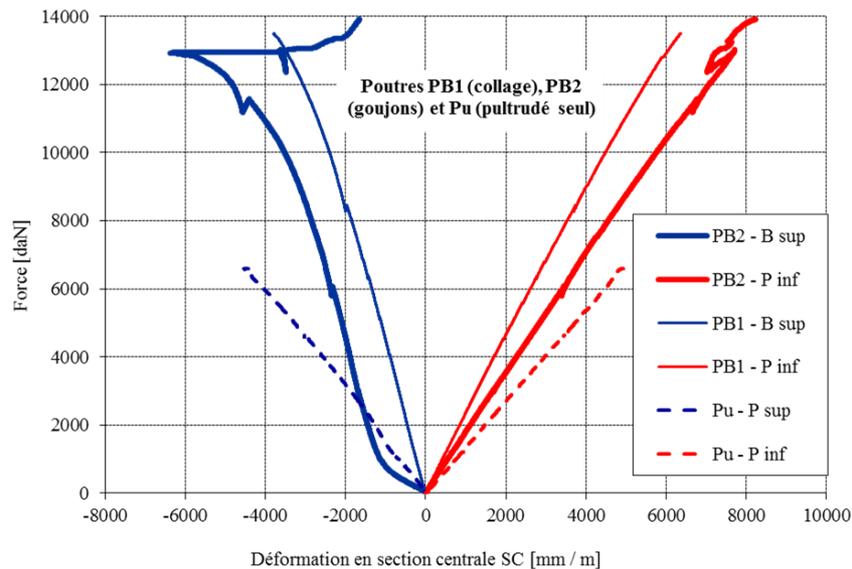


Figure 4. Courbes force- déformation en section centrale pour les trois poutres.

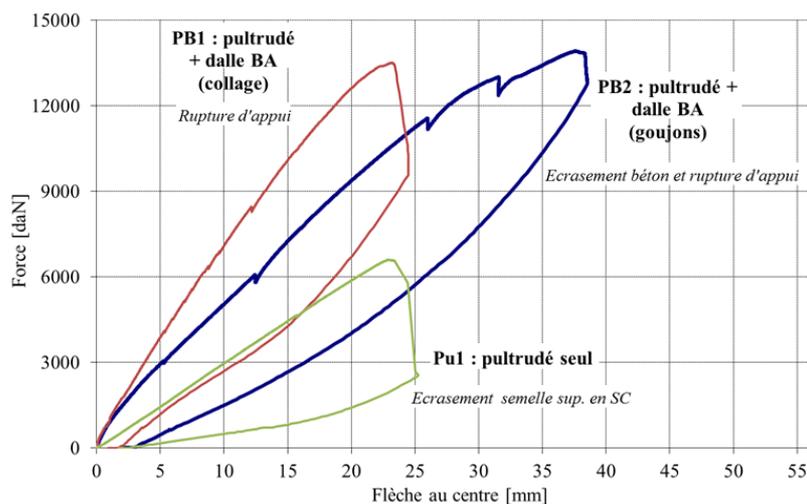


Figure 5. Courbes force-flèche au centre pour les trois poutres.

3. Modélisation

En phase élastique, la modélisation d'une poutre mixte composite/ béton est analogue à celle d'une poutre mixte acier-béton. La principale différence est que la flèche d'effort tranchant présente une valeur relative à celle du moment fléchissant plus importante du fait de la faible valeur du module de cisaillement du profilé composite pultrudé.

A la ruine, le composite reste élastique et on admet pour la dalle, supposée ici non-armée, le diagramme rectangulaire simplifiée (voir figure 4). On peut alors montrer [COR 2007] que, si le glissement est négligé, le moment maximal M_u que peut supporter la section critique s'écrit :

$$M_u = 0,8.f_c.X_u^2.0.6.b_b. + (0.5).b_p.t_f.E_p.(ε_{cu}/X_u).(2.h_c+t_f-2X_u).[h_c-X_u+t_f-(t_f/3)].(E_p) (ε_{cu}/X_u)(3h_c+t_f-3X_u)/(2h_c+t_f-2X_u) + 0.5.(h_w)(E_p) (ε_{cu}/X_u)(t_w)(2.h_c+h_p-2X_u).[(h_c-t_f+h_p-X_u)-(h_w/3)].(E_p) (ε_{cu}/X_u).(3h_c+t_f-3X_u+h_p)/(2h_c+h_p-2X_u)+0.5.b_p.t_f.(E_p) (ε_{cu}/X_u)(2h_c+2h_p-2X_u-t_f).[h_c+h_p-X_u-(t_f/3)].(E_p) (ε_{cu}/X_u)(3h_c+3h_p-3X_u-2t_f)/(2h_c+h_p-2X_u-t_f) \quad [1]$$

Où f_c est la contrainte ultime du béton en compression, E_p est la module d'élasticité du profilé, h_w est la hauteur de l'âme, $ε_{cu} = 3.5 ‰$ et les autres paramètres étant définis sur la figure 4.

Ce modèle du calcul est appliqué aux poutres PB1 et PB2 et quelques mesures sont confrontées aux résultats théoriques dans le tableau 4. On peut voir que les valeurs théoriques présentent quelques différences avec les valeurs expérimentales. Ces différences peuvent en partie s'expliquer par le fait que, dans notre calcul, on n'a pas pris en compte le glissement entre la dalle et le profilé.

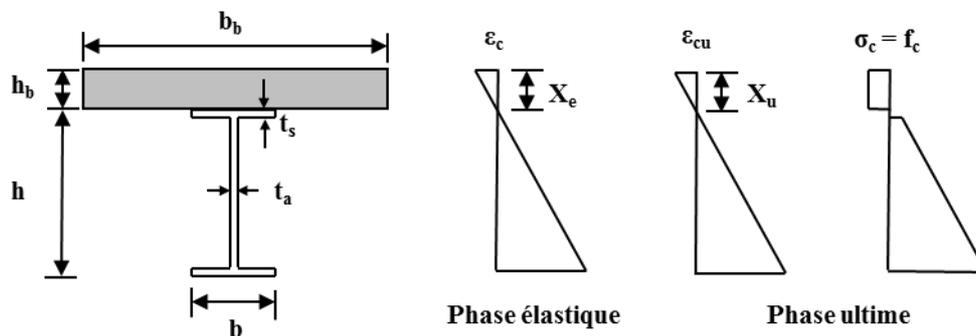


Figure 4. Contrainte-déformation diagramme d'une section sous flexion positif sans glissement.

	PB1 (collée)	PB2 (boulonnée)
Mode de ruine observé	Rupture d'appui	Rupture d'appui + écrasement du béton en SC
Moment ultime (KN.m)	93.7 (67.5)	78.1 (69.5)
Déformation Dalle-sup (‰)	-3.5 (-3.8)	-3.5 (-1.7*)
Déformation Profilé-inf (‰)	8.3 (6.4)	7.1 (8.2)

*La valeur correspond au moment ultime expérimental.

Tableau 4. Comparaison entre les valeurs théorique et les valeurs expérimentale. (Les valeurs expérimentales sont entre parenthèses).

La contrainte de cisaillement à l'interface est évaluée à partir de l'effort rasant et des équations suivantes.

$$N_c = (\tau_{xy}) \times (\Omega) \quad [2]$$

$$N_c = (0,8) \times X_u \times (b_b) \times (f_{ck}) \quad [3]$$

$$\Omega = (L/2) \times (b) \quad [4]$$

Avec : N_c = résultante des efforts de compression du béton

τ_{xy} = résultante des contraintes de cisaillement à l'interface engendrées par le béton

Ω = surface de collage de la demie portée de la poutre

Dans le cas de collage, on a obtenu $\tau_{xy} = 4,3$ MPa ce qui est supérieure à la résistance en traction du béton et à la contrainte ultime de cisaillement obtenue lors des essais push out.

Les écarts obtenus entre essais et calculs tendent à montrer que le modèle utilisé dans cet article doit être amélioré pour prédire de façon plus précise le comportement de telles structures.

4. Conclusion et perspectives

Deux poutres mixtes béton-pultrudé avec deux modes d'assemblage (collage et boulonnage) et une poutre composite seule sont testées en flexion trois points. Les résultats nous montrent que ces deux méthodes sont équivalentes en terme de charge de ruine, mais le mode de rupture observé diffère. Le collage fournit une bonne répartition des contraintes de cisaillement à l'interface et fournit une continuité des contraintes et des déformations dans la section, là où l'on a glissement pour la poutre goujonnée. De plus, les calculs théoriques donnent des résultats assez proches des mesures mais ils peuvent être améliorés. Une approche plus précise est en cours de développement.

5. Bibliographie

[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.

[GON 2014] GONILHA J., BARROS J., CORREIA J., SENA-CRUZ, J., BRANCO F., RAMOS L., GONÇALVES D., ALVIM M., SANTOS T., « Static, dynamic and creep behaviour of a full-scale GFRP-SFRSCC hybrid footbridge », *Composite Structures*, vol.118, 2014, p.496-509.

[HAC 2012] EL-HACHA R., DONNA C., « Behaviour of hybrid FRP-UHPC beams subjected to static flexural loading », *Composites Part B: Engineering*, vol.43, n°2, 2012, p.582-593.

[MEN 2011] MENDES D., BARROS J., SENA-CRUZ J., TAHERI M., « Development of a pedestrian bridge with GFRP profiles and fiber reinforced self-compacting concrete deck », *Composite Structures*, vol.93, n°11, 2011, p.2969-2982.

[SAA 1991] SAADATMANESH H., EHSANI M., « RC Beams Strengthened with GFRP Plates. I: Experimental Study », *Journal of Structural Engineering*, vol.117, n° 11, 1991 p. 3417-3433

[SAT 2014] SATASIVAM S., BAI Y., ZHAO X., « Adhesively bonded modular GFRP web-flange sandwich for building floor construction », *Composite Structures*, vol.111, 2014, p. 381-392.