

# Comportement mécanique des structures hybrides GFRP-béton

**Koaik Alaa<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Doctorant, LMC2 / Université Lyon 1, 82 bd Niels Bohr, 69622 Villeurbanne Cedex ,tel : +33 4 72 69 21 30, fax : +33 4 78 94 69 06, alaa.koaik@univ-lyon1.fr

Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert »

*RÉSUMÉ. L'utilisation des composites dans la construction des bâtiments ou des ouvrages d'art est de plus en plus importante grâce à leurs atouts indiscutables. Cependant, leur essor est ralenti par certaines faiblesses dont l'une des plus importantes est leur souplesse qui induit des déplacements élevés et des risques d'instabilités importants qui ne permettent pas d'exploiter tout le potentiel de ces matériaux. Dans le cas d'éléments de structure fléchis, une des solutions consiste à associer les profils composites à une dalle en béton armé. Dans cette étude, après une phase de caractérisation des différents matériaux et de l'interface par l'essai push-out, nous avons testé 3 modes de connexion sur des éléments structuraux (poutres) de différentes portées. Les résultats d'essais montrent le comportement correspondant à chaque mode connexion : la connexion par butées mécaniques simples est à ce jour celle qui s'avère la plus efficace. Les mesures sont également comparées aux résultats obtenus par calcul sur des modèles de poutres multicouches. Les écarts modèles / calculs restent acceptables sauf à proximité de l'interface où les déformations peuvent être affectées par la fissuration du béton qui reste difficile à prédire de façon précise.*

*ABSTRACT. Advanced composites are increasingly used in construction thanks to their indisputable advantages such as high strength to weight ratio and ease of implementation. However, their growth is hindered by a main weak point: low stiffness. Composite materials risk instabilities under high loads which makes it not possible to exploit their full potential. Considering flexural elements, one of the solutions proposed consists in associating the composite profiles with a reinforced concrete slab. In this study, after characteriwation of materials and the interface by push-out test, 9 beams with 3 different connection modes are tested. The results allow distinguishing 3 behaviour modes relative to the 3 connection types: the connection by mechanical studs proves to be the most efficient so far. The measurements are also compared to the results obtained by a multi-layer beam model. The differences are acceptable except in the vicinity of the interface where the deformations can be affected by the cracking of the concrete which remains difficult to predict precisely.*

*MOTS-CLÉS : Structure hybride, push-out, boulonnage, collage, glissement, béton.*

*KEYWORDS: Hybrid structure, push-out, bolting, bonding, interface slip, concrete.*

Au cours des trois dernières décennies l'utilisation de matériaux composites dans la construction a considérablement augmenté. Ce développement est dû principalement à la réduction des coûts initiaux grâce à l'automatisation de la fabrication, y compris les coûts indirects et la durée de vie. Le recul et l'expérience acquis dans l'utilisation des composites sans oublier le progrès dans le domaine de la caractérisation des composites ont encouragé les ingénieurs et chercheurs à développer des nouvelles structures en polymères renforcés de fibres (PRF). Les premières utilisations des PRF dans la construction concernent la réparation des structures existantes où les fibres de carbone ou de verre étaient principalement utilisées [RAM 04, TRI 92, MEI 95, ARD 97]. Par ailleurs, les PRFs peuvent être fabriqués par pultrusion. Ces produits, essentiellement en GFRP, sont de plus en plus utilisés dans la construction des passerelles et structures sandwichs grâce à leurs propriétés mécaniques intéressantes. Malgré ce développement dans l'utilisation des profilés pultrudés en GFRP dans ces structures, la nature orthotrope et l'instabilité de ces profilés posent toujours des problèmes pour les chercheurs. Pour résoudre ce problème et bénéficier des avantages nombreux des PRF, des auteurs ont proposé la connexion (boulonnage ou collage) des profilés à des dalles béton pour créer un élément mixte qui soit plus rigide pour améliorer la résistance du profilé seul à l'instabilité [DES 95, HAL 98, CAN 99]. Dans ces travaux, les auteurs réussissent à augmenter la rigidité et la charge de ruine des profilés pultrudés. Cependant, le comportement fragile du profilé empêche toujours d'avoir un comportement ductile qui ressemble au comportement des structures mixtes acier-béton. Une des raisons qui peut modifier ce comportement est le type de connexion à l'interface. Il existe deux méthodes : collage et boulonnage. Les deux méthodes ont leurs points faibles et avantages concernant la rapidité de mise en œuvre et installation d'un côté, et le comportement mécanique global de la structure d'un autre côté.

## 2. Objectifs du travail

La section hybride qu'on proposera dans cette étude est montrée sur la figure 1. Cette section est facile et simple à construire. La section en I peut présenter des points faibles concernant la distribution hétérogène des fibres entre la semelle et l'âme mais elle reste la section la plus économique à utiliser. La largeur de la dalle et la portée des poutres testées seront choisies de telle sorte à se rapprocher de dimensions réalistes. Les comportements mécaniques des deux modes de connexion à l'interface, le boulonnage et le collage, seront aussi étudiés. Pour cela, la caractérisation de l'interface sera indispensable. Cette dernière est faite par l'essai push out après la caractérisation de tous les matériaux utilisés. Ensuite, des essais de flexion 3 points seront effectués sur des poutres ayant des différentes portées. Ainsi, un modèle numérique multicouches est développé pour modéliser les poutres testées.

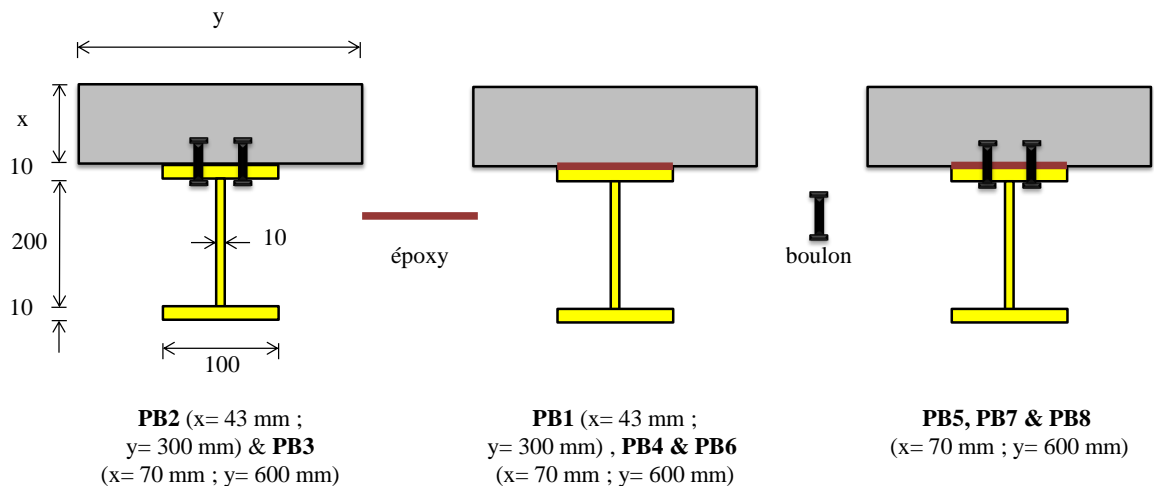


Figure 1. La géométrie des poutres testées (toutes les dimensions sont en mm)

## 3. Campagne expérimentale

Un total de 8 monopoutres (PB1 à PB8) a été testé en flexion 3 points centrée ainsi que 7 séries push-out (POPB1 à POPB7). Les différentes caractéristiques sont représentées dans les tableaux 1 et 2. Pour les poutres

"longues" (PB3 à PB8) et (PB7 et PB8) ont des dimensions de la dalle de 600 x 70 (choisie) pour correspondre approximativement à l'échelle 1/2 d'une passerelle réelle de 10 m de portée et en tenant compte des moyens de levage disponibles. Pour les poutres courtes (PB1, PB2 et PB6), c'est approximativement une réduction à l'échelle 1/2 qui a été choisie.

**Tableau 1.** Les différentes poutres testées

Poutre	Portée (mm)	Connexion	Dimensions de la dalle (mm x mm)
PB1	2000	époxy	300 x 43
PB2	2000	boulons M8 6.8	300 x 43
PB3	4800	boulons M10 6.8	600 x 70
PB4	4800	époxy	600 x 70
PB5	4800	époxy + boulons M10 6.8	600 x 70
PB6	2610	époxy	600 x 70
PB7	4800	époxy + boulons M10 8.8	600 x 70
PB8	4800	époxy + boulons M12 6.8	600 x 70

**Tableau 2.** Les différentes séries push-out testées

Séries	Dimensions des dalles (Hauteur en mm x Largeur en mm x Epaisseur en mm)	Boulons	Type de colle / surface totale collée (mm <sup>2</sup> )
POPB1	200 x 100 x 200	-	époxy 31 CF / 30000
POPB2	200 x 100 x 200	-	époxy 31 CF / 30000
POPB3	200 x 100 x 200	4 M10 x 80 mm nuance 6.8	-
POPB4	200 x 100 x 100	4 M10 x 80 mm nuance 8.8	-
POPB5	200 x 100 x 100	4 M12 x 80 mm nuance 6.8	-
POPB6	200 x 100 x 100	-	époxy 31 EF / 30000
POPB7	200 x 100 x 100	-	époxy 31 EF / 30000

### 3.1. Essais de caractérisation des matériaux

#### 3.1.1. Le béton

La caractérisation par compression et par fendage a été effectuée : à 28 jours et le jour de l'essai de flexion sur les poutres. Les résultats obtenus montrent que pour le béton de PB1,  $f_c = 42.4 \pm 0.7$  MPa et  $f_t = 3.1 \pm 0.3$  MPa tandis que pour PB2,  $f_c = 33.5 \pm 1.6$  MPa. La résistance du béton des PB3 à PB8 varie entre 48 MPa et 55 MPa.

#### 3.1.2. L'adhésif

L'adhésif utilisé est une colle époxy bi-composante de la marque : SIKADUR 31 CF pour PB1 à PB6 et POPB1 à POPB3 et SIKADUR 31 EF pour PB7 et PB8 et POPB4 à POPB7. Les éprouvettes haltères de l'adhésif ont été réalisées et testées après 60 jours en traction uni-axiale selon ISO 527-2 (2002). La contrainte maximale vaut  $15.6 \pm 2.0$  MPa et  $11.5 \pm 3.4$  MPa pour sikadur CF et sikadur EF respectivement.

#### 3.1.3. Les boulons

Les essais de caractérisation ont été réalisés pour déterminer les contraintes ultimes en traction et en cisaillement de 4 types des boulons. Les résultats sont montrés dans le tableau 3.

#### 3.1.4. Le GFRP

Les profilés pultrudés utilisés sont les mêmes pour toutes les poutres et les séries push-out. Ils présentent une section en I doublement symétrique et sont constitués d'une matrice polyester et des fibres de verre E.

**Tableau 3.** Les différents résultats de caractérisation des boulons

	M10 6.8 (POPB3)	M10 8.8 (POPB4)	M12 6.8 (POPB5)
Contrainte ultime en traction (MPa)	735 ± 18	876 ± 9	705 ± 0
Contrainte ultime en cisaillement (MPa)	425 ± 14	397 (Un seul boulon a été testé)	389 ± 17

L'essai de brûlage (voir tableau 4) est effectué pour analyser la composition du profilé. Il s'agit de brûler le composite à une température supérieure à celle de la fusion de la résine pour séparer les différentes fibres et mats (fibres courtes non tissées multidirectionnelles). D'ailleurs, des essais de traction ont été effectués pour déterminer les caractéristiques mécaniques. On trouve une contrainte moyenne à rupture de 307,3 MPa ( $\pm 42,8$  MPa) pour les éprouvettes découpées dans l'âme et 396,6 MPa ( $\pm 45,8$  MPa) pour celles découpées dans les semelles. Ame et semelles confondues, nous obtenons une contrainte à rupture de 356,0 MPa ( $\pm 62,9$  MPa). Cette différence entre résistance de l'âme et des semelles est largement liée au fait de la différence dans la répartition des fibres longitudinales.

**Tableau 4.** La distribution des fibres dans la section du GFRP

	Section complète		Ame		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	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

### 3.2. Essais de caractérisation de l'interface

Sept séries de tests ont été étudiées au cours de cette étude expérimentale. Les séries sont désignées POPB1 à POPB7, avec 5 spécimens identiques pour chaque série (figure 2). Chaque éprouvette est composée d'une section GFRP I (morceau de profilé) de 200 mm de long reliée à 2 petites dalles de béton non armé. Dans les éprouvettes collées, l'épaisseur de la colle est de l'ordre de 1 mm. Dans les éprouvettes boulonnées, chaque semelle est connectée à une dalle par deux boulons situés sur les deux côtés de l'âme (4 boulons par éprouvettes). Pendant chaque essai, on enregistre la force et le déplacement du vérin (figure 3). En outre, la technique de corrélation d'images a également été utilisée pour évaluer le comportement à l'interface entre le profilé du GFRP et le béton. La contrainte moyenne ultime à l'interface des éprouvettes collées est 8.5 MPa et l'effort moyen par boulon à l'état ultime dans le cas des éprouvettes boulonnées est 28.5 kN. Toutes les éprouvettes collées montraient une rupture par cisaillement du béton à proximité de l'interface. Cependant, les éprouvettes boulonnées montraient deux modes de rupture principaux : rupture cohésive dans le béton (figure 3) et cisaillement des boulons. Il est à noter qu'augmenter le diamètre ou la nuance du boulon augmente la charge ultime et modifie le mode de rupture. Sur la figure 4 on voit une comparaison entre le comportement d'une éprouvette collée et une autre boulonnée avec des modèles existants.

Outre la résistance, ces essais ont permis de déterminer la rigidité linéique de la connexion qui sera utilisée dans la modélisation avec prise en compte du glissement à l'interface.

### 3.3. Essais de flexion

#### 3.3.1. Préparation et instrumentation

Dans le cas des poutres exclusivement boulonnées, le profilé est d'abord muni de boulons. Chaque paire de boulons est espacée de 100 mm selon l'axe longitudinal. Ces boulons sont serrés sur la semelle supérieure du profilé, préalablement percé de telle sorte que la partie supérieure du boulon dépasse de 50 mm de la semelle du profilé. Ensuite, la dalle du béton est coulée sur place après la mise en place des armatures. Cette technique de connexion s'inspire directement du cas habituels des ponts mixtes acier-béton avec goujons.

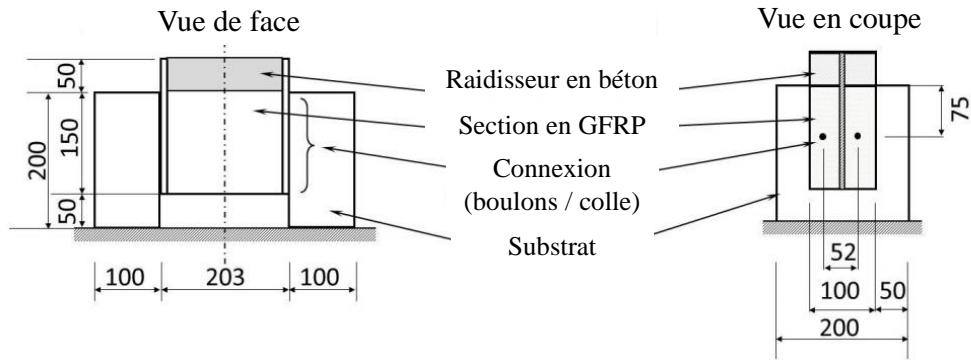


Figure 2. Schéma de l'essai push-out (dimensions en mm)

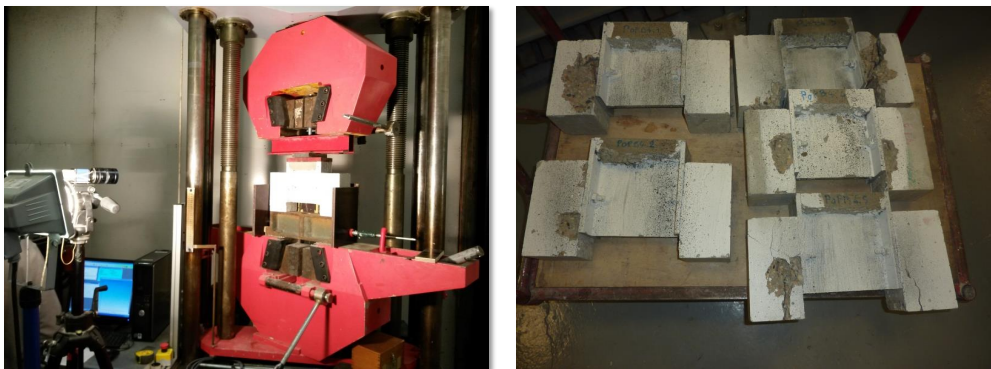


Figure 3. Le dispositif expérimental d'essai push-out (gauche) La rupture des éprouvettes POPB4 (droite)

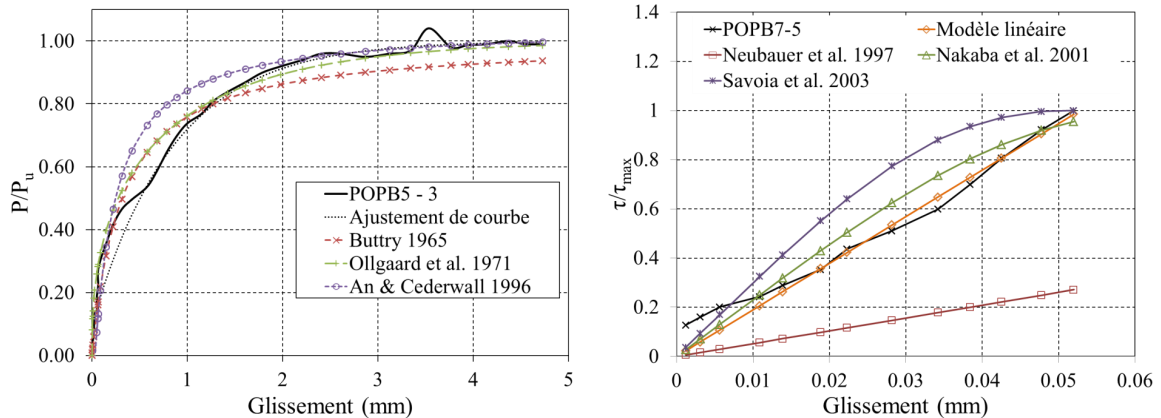


Figure 4. Le comportement d'une éprouvette boulonnée (gauche) et une collée (droite)

La dalle de PB2 était préfabriquée en un seul tronçon et collée directement sur le profilé.

Les dalles de PB4 à PB8 sont constituées de tronçons préfabriqués armés. Cette technique est une optimisation du mode de fabrication. Ces tronçons sont de 3 types différents (T1, T2, T3) qui se différencient principalement par la disposition du ferrailage. Chaque tronçon est ensuite collé sur le profilé composite. Puis, dans une deuxième phase, les zones de jonction entre les tronçons sont bétonnées permettant d'assurer la continuité du ferrailage ainsi que toutes les réservations. Ces dernières réservations sont de forme carrée pour l'emplacement des boulons ou de forme ronde pour le passage des tiges de serrage lors de la phase du collage. Dans le cas de PB4 et PB6 qui

sont exclusivement collées. Les réservations ont été faites pour garder la même surface (1500 mm) comme les autres poutres pour les comparer finalement. Des raidisseurs, en bois ou en béton, ont été mis en place aux extrémités de toutes les poutres. Toutes les poutres ont été munies de jauges de déformation dans la section centrale (au moins deux dans la dalle et 3 dans le profilé). Des capteurs de déplacement LVDT ont été utilisés pour mesurer l'évolution de la flèche à mi travée lors de l'essai. Les poutres PB3 à PB7 ont été munies d'une jauge en plus sur l'acier longitudinal et des jauges comme celles à mi-travée mais dans une section (à 1500 mm de l'extrémité dans le cas de PB3-PB8 sauf PB6). Des LVDTs ont été utilisés pour mesurer le déplacement relatif (glissement) éventuel entre le profilé et la dalle.

### 3.3.2. Résultats

Les courbes force-flèche des différentes poutres sont présentées sur les figures 5 et 6<sup>1</sup>. On observe que les poutres collées montrent une rigidité plus grande que celles boulonnées. Malgré la rupture d'appui de PB1, sa rupture en compression était imminente d'après la déformation du béton mesurée par jauge et enregistrée lors de l'essai. Les poutres collées PB4 et PB6 ont présenté une rupture en cisaillement de l'interface. L'ajout des boulons dans PB5 a permis de retarder la rupture en cisaillement en augmentant la résistance de l'interface. Le changement (augmentation) du diamètre/nuances des boulons dans PB7 dans les connexions mixtes ne modifie pas la rigidité initiale mais change le mode de ruine.

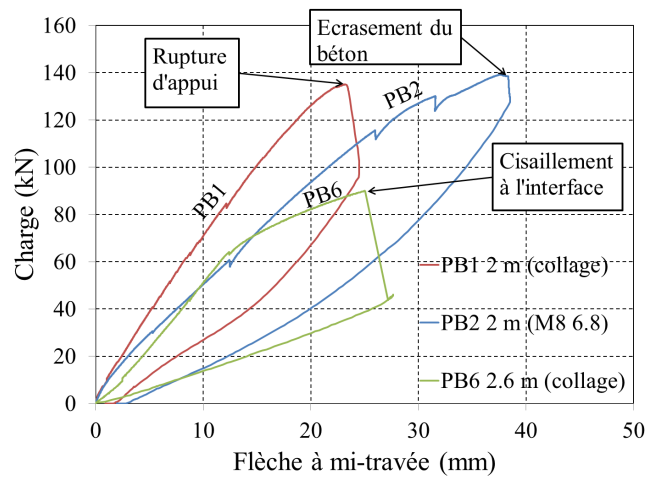


Figure 5. Les courbes force-flèche des poutres PB1, PB2 et PB6

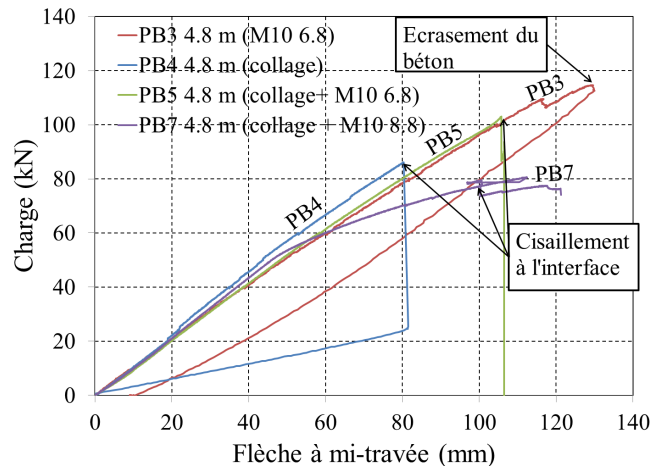
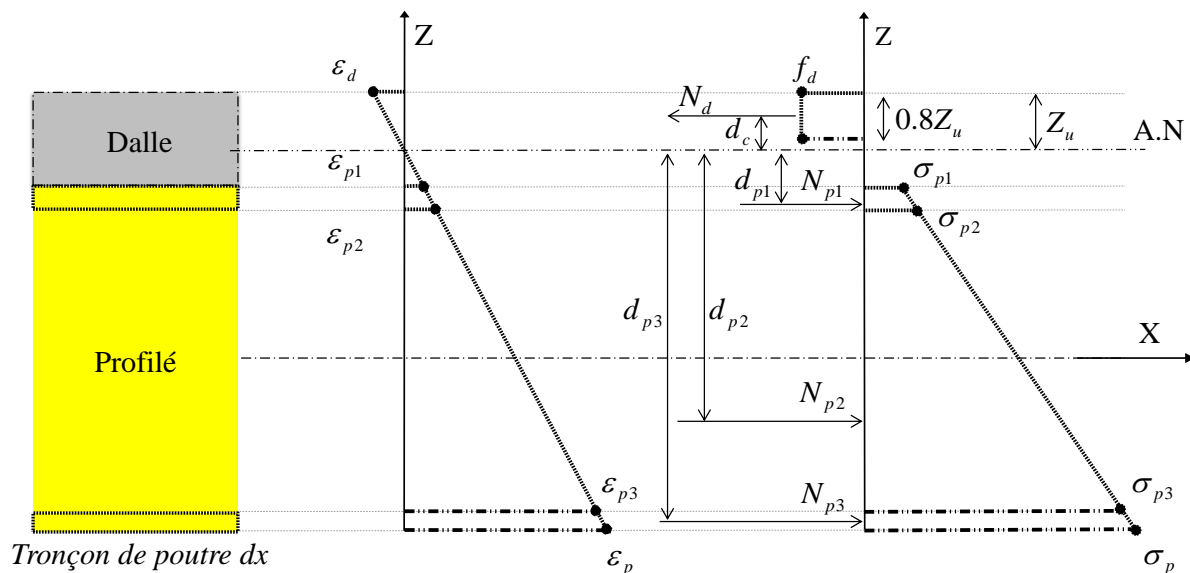


Figure 6. Les courbes force-flèche des poutres PB3, PB4, PB5, PB7 et PB8

1. La courbe de PB8 est confondue avec celle de PB7, elle n'est pas présentée pour des raisons de clarté

La modélisation de ces éléments de structure hétérogènes peut se faire par la théorie des poutres multicouches et en s'inspirant du cas des poutres mixtes acier-béton avec lesquelles ils présentent beaucoup d'analogie. Dans le cas d'une connexion flexible (comme un goujon ou un boulon), de faibles mouvements relatifs à l'interface entre la dalle en béton et le profilé sont possibles et peuvent être pris en compte. Ces approches ont été utilisées pour les poutres mixtes composites – béton, notamment par Correia et al. [COR 07]. La principale adaptation concerne le calcul à la ruine : contrairement à un IPE en acier, un profilé en matériaux composites ne présente pas de possibilité de plastification significative et doit être supposé élastique à la ruine. Toutefois, même si le PRF reste élastique à l'ELU, on parle d'axe neutre plastique pour faire la distinction avec la position à l'ELS (où la dalle est également en phase élastique).

L'absence de codes de calcul des matériaux PRF constitue déjà l'un des facteurs limitant leur application. Cependant, le comportement élastique instantané des matériaux en PRF peut être comparé à celui de l'acier dans les états limites de service. Il se différencie en revanche de l'acier par le fluage qui n'est pas négligeable. En outre, les vérifications d'instabilité effectués sur les éléments PRF-béton à l'état ultime sont les mêmes pour les éléments en acier-béton. D'autre part, les modes de ruine obtenus expérimentalement du fait de la nature orthotrope des matériaux PRF posent des difficultés supplémentaires pour prédire la charge et le mode de ruine. Plusieurs méthodes ont été développées pour modéliser ces structures. Dans [DES 95], un modèle itératif a été utilisé en prenant en compte le comportement non linéaire du béton et les différents modes de ruine possibles de la boîte en GFRP renforcée par CFRP. Cette analyse a d'abord été appliquée par [GEY 68] pour évaluer la participation des matériaux FRP renforçant des poutres en BA. De même, [NGU 13] a développé son modèle en tenant compte du glissement à l'interface d'un joint boulonné et obtenu d'excellents résultats. [FAM 10] a également indiqué un bon accord de ce modèle avec les résultats expérimentaux. Bien que la méthode simplifiée ne soit pas recommandée dans les états limites ultimes en raison de fissuration du béton [HAL 98], une telle méthode simplifiée a conduit à des résultats acceptables avec [COR 07] and [COR 09]. Cette analyse est basée sur l'équilibre de la section, la compatibilité des déformations, les sections planes restant planes et aucune séparation entre les matériaux constitutifs. A partir de là, nous voulions vérifier la précision de cette méthode simplifiée sur les poutres testées en phase élastique et à l'état ultime. La figure 7 montre le schéma pour l'analyse sans glissement à la ruine de PB3. Les tableaux 5 et 6 montrent les résultats pour la poutre PB3 à titre indicatif.



**Figure 7.** Diagramme de contrainte et de déformation dans une section dans le cas sans glissement à la ruine avec l'axe neutre dans la dalle

**Tableau 5.** La confrontation des résultats analytique avec les mesures de PB3 pour une charge de 30 kN

	Sans glissement	Avec glissement	Expérimentale
Flèche (mm)	28.53	30.85	27.7
Déformation (dalle supérieure)	-0,0005	-0,000581	-0,000703
Déformation (dalle inférieure)	0,000268	0,000388	Jauge fissurée
Déformation (profilé supérieure)	0,000377	-0,000119	0,000105
Déformation (profilé milieu)	0,001381	0,001148	0,001557
Déformation (profilé inférieure)	0,002494	0,002553	0,002849

**Tableau 6.** La confrontation des résultats analytique avec les mesures de PB3 à l'état ultime

	Sans glissement	Avec glissement	Expérimentale
Mode de ruine	Compression béton	Compression béton	Compression béton
Effort par boulon (kN)	19.2	17.9	X
Force ultime (kN)	159	155	112
Déformation (dalle supérieure)	0,0035	0,0035	0,003374
Déformation (profilé inférieure)	0,015	0,0149	0,01274
Position de l'axe neutre plastique (mm)	221,33	224,85	233

## 5. Conclusions

Une étude expérimentale et analytique a été effectuée sur 8 poutres hybrides et la connexion a été évaluée par l'essai push-out. Les conclusions suivantes peuvent être retirées :

- La connexion par collage est parfaitement opérationnelle et fiable à l'état limite de service. A l'état ultime, elle peut conduire à une rupture prématurée par cisaillement ce qui induit le dimensionnement.
- L'essai push-out peut être utilisé pour évaluer le comportement à l'interface dans le cas de boulonnage et collage. La comparaison des modèles force-glissement avec des modèles existant donne des résultats cohérents.
- L'essai push-out peut être utilisé pour évaluer la rupture de connexion pour les poutres boulonnées. Cependant, en ce qui concerne les poutres collées dont la travée est longue, les contraintes perpendiculaires à l'interface aux extrémités deviennent significatives et donc un essai de cisaillement-traction combiné serait nécessaire.
- La connexion par boulons permet une exploitation complète de la section et facilite la prédiction du mode de ruine.
- La connexion mixte présente un intérêt d'un point de vue de la préfabrication des dalles. Ce type de connexion présente un comportement plus performant que dans le cas du collage seul mais elle a encore besoin des améliorations.
- Le modèle analytique présenté donne des valeurs acceptables en phase élastique. A l'état ultime, compte tenu des écarts importants entre la mesure et le calcul, certaines des hypothèses du modèle doivent être modifiées pour que ce dernier soit encore plus précis.

## Remerciements

L'équipe remercie E. Cavène et A. Bouchair pour les essais de caractérisation des boulons.



- [AN 96] AN L., CEDERWALL K., « Push-out tests on studs in high strength and normal strength concrete », *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 36, n° 1, p. 15–29, Elsevier, 1996.
- [ARD 97] ARDUINI M., NANNI A., « Behavior of precracked RC beams strengthened with carbon FRP sheets », *Journal of composites for construction*, vol. 1, n° 2, p. 63–70, American Society of Civil Engineers, 1997.
- [BUT 65] BUTTRY K. E., *Behavior of stud shear connectors in lightweight and normal-weight concrete*, 1965.
- [CAN 99] CANNING L., HOLLOWAY L., THORNE A., « An investigation of the composite action of an FRP/concrete prismatic beam », *Construction and Building Materials*, vol. 13, n° 8, p. 417–426, Elsevier, 1999.
- [COR 07] CORREIA J. R., BRANCO F. A., FERREIRA J. G., « Flexural behaviour of GFRP–concrete hybrid beams with interconnection slip », *Composite Structures*, vol. 77, n° 1, p. 66–78, Elsevier, 2007.
- [COR 09] CORREIA J. R., BRANCO F. A., FERREIRA J., « GFRP–concrete hybrid cross-sections for floors of buildings », *Engineering Structures*, vol. 31, n° 6, p. 1331–1343, Elsevier, 2009.
- [DES 95] DESKOVIC N., TRIANTAFILLOU T. C., MEIER U., « Innovative design of FRP combined with concrete : short-term behavior », *Journal of Structural Engineering*, vol. 121, n° 7, p. 1069–1078, American Society of Civil Engineers, 1995.
- [FAM 10] FAM A., HONICKMAN H., « Built-up hybrid composite box girders fabricated and tested in flexure », *Engineering Structures*, vol. 32, n° 4, p. 1028–1037, Elsevier, 2010.
- [GEY 68] GEYMAYER H., « Static tests of reinforced concrete beams : development of iterative analysis procedure and tests of beams reinforced with steel, aluminum, and fiber glass, with and without helical compressive reinforcement », *Waterways Exp Sta Tech Repts, Army Ce*, 1968.
- [HAL 98] HALL J., MOTTRAM J., « Combined FRP reinforcement and permanent formwork for concrete members », *Journal of Composites for Construction*, vol. 2, n° 2, p. 78–86, American Society of Civil Engineers, 1998.
- [MEI 95] MEIER U., « Strengthening of structures using carbon fibre/epoxy composites », *Construction and Building Materials*, vol. 9, n° 6, p. 341–351, Elsevier, 1995.
- [NAK 01] NAKABA K., KANAKUBO T., FURUTA T., YOSHIZAWA H., « Bond behavior between fiber-reinforced polymer laminates and concrete », *Structural Journal*, vol. 98, n° 3, p. 359–367, 2001.
- [NGU 13] NGUYEN H., MUTSUYOSHI H., ZATAR W., « Flexural behavior of hybrid composite beams », *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, , n° 2332, p. 53–63, Transportation Research Board of the National Academies, 2013.
- [OLL 71] OLLGAARD J. G., SLUTTER R. G., FISHER J. W., « Shear strength of stud connectors in lightweight and normal weight concrete », *AISC Engineering Journal*, vol. 8, n° 2, p. 55–64, 1971.
- [RAM 04] RAMOS G., CASAS J., ALARCÓN A., « Repair and strengthening of segmental bridges using carbon fibers », *Engineering structures*, vol. 26, n° 5, p. 609–618, Elsevier, 2004.
- [ROS 97] ROSTASY F., NEUBAUER U., « Bond behaviour of CFRP-laminates for the strengthening of concrete members », *Composite construction-conventional and innovative. International conference*, p. 717–722, 1997.
- [SAV 03] SAVOIA M., FERRACUTI B., MAZZOTTI C., « Nonlinear bond-slip law for FRP-concrete interface », *Proc. of 6th international symposium on FRP reinforcement for concrete structures. Singapore : World Scientific Publications*, p. 163–72, 2003.
- [TRI 92] TRIANTAFILLOU T., PLEVRIS N., « Strengthening of RC beams with epoxy-bonded fibre-composite materials », *Materials and Structures*, vol. 25, n° 4, p. 201–211, Springer, 1992.