
Assemblage entre profilé pultrudé GFRP et béton : comparaison entre boulonnage et collage

Koaik A.¹, Bel S.², Jurkiewicz B.³

¹Laboratoire des Matériaux Composites pour la Construction (LMC2), Université Lyon 1, 82 boulevard Niels Bohr, 69622 Villeurbanne, mail : alaa.koaik@univ-lyon1.fr

²Laboratoire des Matériaux Composites pour la Construction (LMC2), Université Lyon 1, 82 boulevard Niels Bohr, 69622 Villeurbanne, mail : sylvain.bel@univ-lyon1.fr

³Laboratoire des Matériaux Composites pour la Construction (LMC2), Université Lyon 1, 82 boulevard Niels Bohr, 69622 Villeurbanne, mail : bruno.jurkiewicz@univ-lyon1.fr

RÉSUMÉ. Les éléments structuraux hybrides GFRP-béton présentent une capacité structurelle remarquable, non seulement à des fins de réhabilitation, mais aussi dans la construction, pour les passerelles piétonnes par exemple. Dans la littérature, des essais ont été réalisés en dynamique, statique et fluage sur des structures de taille moyenne. Il a alors été montré que la connexion entre GFRP et béton transmet principalement un effort de cisaillement. Par conséquent, l'essai de cisaillement est utilisé dans cette étude pour caractériser les assemblages boulonnés et collés. Des profilés pultrudés GFRP sont reliés à des blocs de béton par collage à la colle époxy dans le premier cas et boulonnés dans le deuxième. Les essais sont filmés et la corrélation d'images numérique (DIC) est utilisée pour évaluer le comportement mécanique à l'interface entre GFRP et béton. La corrélation d'images permet un examen minutieux de la déformation autour de l'interface. La rigidité de la connexion et la distribution des déformations autour de la zone d'intérêt sont comparées et peuvent être utilisées pour développer un modèle mécanique qui permettra la simulation d'éléments structuraux GFRP-béton à une plus grande échelle.

ABSTRACT. GFRP-concrete hybrid structural elements present a remarkable structural capacity, not only for rehabilitation purposes but also in construction, for pedestrian bridges or lightweight bridge deck. In the literature, static, dynamic and creep experiments were performed on medium-scale structures. The connection between GFRP and concrete has been shown to be a shear connection since the friction is practically zero. Therefore, the shear connection test is used in this study to characterize both bolted and bonded connections. GFRP pultruded profiles are connected to ordinary concrete by steel bolts in the first set and by epoxy in the second set. The experiments are monitored with a CCD-camera and digital image correlation (DIC) is used to evaluate the mechanical behaviour at the interface between GFRP and concrete. DIC allows a close examination of the deformation around the interface. Stiffness of the connection and distribution of the deformations around the area are compared and may be used to develop a mechanical model that will enable the simulation of GFRP-concrete elements on a larger scale.

MOTS-CLÉS : Essai de cisaillement, comportement en cisaillement, assemblage GFRP-béton, DIC.

KEY WORDS: Shear connection test, shear behaviour, GFRP-concrete connection, DIC.

1. Introduction

Les éléments de structure hybrides, composés de profilés pultrudés GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) associés à du béton, présentent une capacité structurelle intéressante, non seulement pour la réhabilitation, mais aussi dans la construction de tabliers de ponts légers ou pour les passerelles piétonnes. De fait, les profilés GFRP possèdent des propriétés mécaniques intéressantes, avec notamment une résistance mécanique spécifique élevée, ainsi qu'une bonne résistance aux agents chimiques. Ces propriétés font que ces éléments sont adaptés pour des applications structurelles dans le bâtiment et les ponts [MEN 11]. En outre, l'association de profilés GFRP avec des éléments de compression en béton permet une meilleure utilisation des propriétés des deux composants. La partie en béton augmente la capacité structurelle, améliore la rigidité en flexion, réduit les déformations du profilé et prévient le phénomène de déversement.

Les éléments structurels hybrides GFRP-béton ont été étudiés dans la littérature. Des essais en statique, dynamique [COR 07, COR 09a, EL-H 12], et de fluage [GON 14] ont été réalisés sur des structures de taille moyenne. Dans [COR 09b], Correia et al. ont étudié l'assemblage GFRP-béton à l'échelle de l'échantillon. Il a été montré que ce type de connexion reprend essentiellement un effort de cisaillement puisque le frottement entre GFRP et béton est pratiquement nulle. Par conséquent, l'essai en cisaillement appelé « Push-out test » (voir figure 1), similaire à l'essai de cisaillement standardisé [EN 94], est utilisé dans la suite de cette étude.

A partir des mesures force-déplacement sur la machine de traction ainsi que la mesure de champs par corrélation d'images numérique (DIC), l'objectif est de déterminer la rigidité des assemblages boulonnés et collés avec précision.

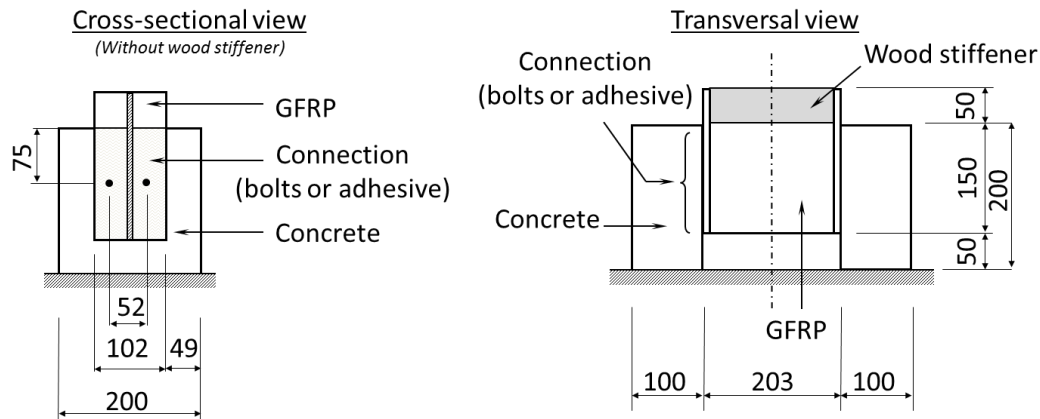


Figure 1. Essai de cisaillement pour la caractérisation de l'assemblage GFRP-béton (unités en mm)

2. Essais Push-out

2.1. Préparation des éprouvettes

Les corps d'épreuve pour les essais de cisaillement sont confectionnés selon les dimensions données figure 1. Dans le cadre de cette étude, deux séries de 5 éprouvettes sont réalisées. La première série POPB2 est réalisée par collage, la seconde, POPB3, par boulonnage. Les dalles en béton sont préparés avec un béton dont la formulation a été contrôlée précédemment. La résistance du béton en compression, sur éprouvette cubique, à la date de réalisation des essais de cisaillement est respectivement de 48,4 MPa ($\pm 3,7$ MPa) et 51,4 MPa ($\pm 0,6$ MPa). Pour les éprouvettes boulonnées, les profilés sont préparés (nettoyés, dégraissés), puis les dalles sont coulées en place successivement (voir figure 2). Les 2 dalles ne viennent donc pas de la même gâchée (7 jours d'intervalle). Pour les éprouvettes collées, l'ensemble des dalles est coulé en une seule fois, puis le collage est effectué après sablage et dépoussiérage de la surface de béton à coller (voir figure 2). L'adhésif utilisé est une colle époxy bi-composant, Sikadur 31 CF. L'épaisseur du joint de colle n'est pas contrôlée, mais estimée à moins d'un millimètre. Pour le boulonnage, on utilise des boulons GFD zingué blanc 6.8 de 10 mm de diamètre et 80 mm de longueur. Quatre boulons sont utilisés pour un corps d'épreuve (deux boulons par semelle). La profondeur d'ancrage est de 50 mm dans le béton, la position des boulons est donnée figure 1.

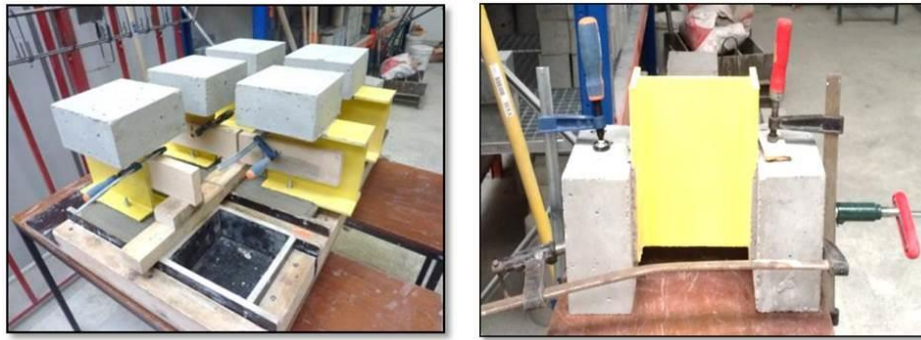


Figure 2. Préparation des éprouvettes (gauche) Coulage des éprouvettes boulonnées en place (droite) Collage des dallettes au profilé

2.2. Réalisation de l'essai

Les essais de cisaillement sont effectués sur une presse de compression Wolpert, sous chargement monotone croissant jusqu'à la ruine. La vitesse de déplacement de la traverse est de 0,6 mm/min. L'effort et le déplacement de la traverse sont enregistrés. Les courbes effort-déplacement pour les dix essais sont données figure 3.

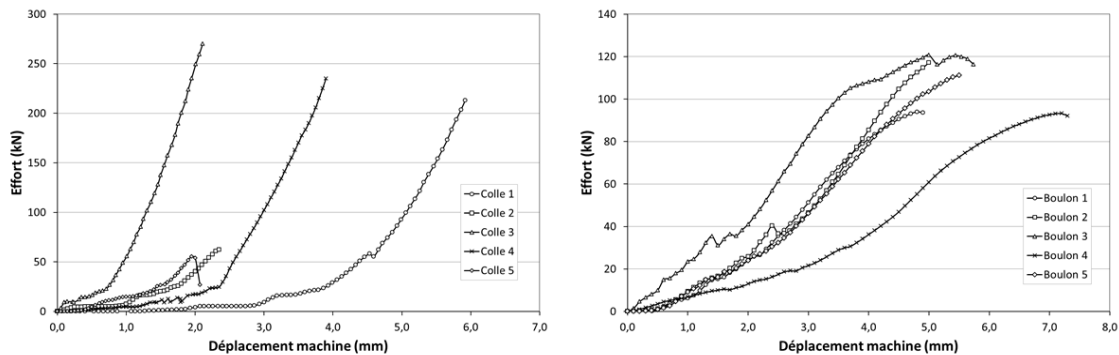


Figure 3. Mesure de l'effort en fonction du déplacement de la traverse (gauche) Eprouvettes collées (droite) Eprouvettes boulonnées

Sur 5 corps d'épreuve, 2 présentent une rupture prématurée, probablement due à une mauvaise manipulation ou un mauvais positionnement de l'éprouvette sur la machine d'essai. Les trois éprouvettes restantes présentent un comportement avec des similitudes. Après une phase de mise en charge, la courbe force-déplacement est quasi-linéaire jusqu'à rupture. La rupture se produit de manière abrupte, par cisaillement dans le béton à proximité de l'interface et parallèlement à son plan (rupture cohésive dans le béton). Pré-rupture, aucune déformation n'est visible à l'œil nu. En ne considérant que les éprouvettes 1, 3 et 4, la contrainte moyenne à rupture est de 7,95 MPa ($\pm 0,9$ MPa).

Le comportement des 5 éprouvettes boulonnées présente des similitudes. A la ruine, les boulons sont fortement inclinés, le glissement entre les dallettes et le profilé est visible. La ruine intervient après la plastification puis la rupture des boulons en flexion. La charge moyenne à rupture est de 26,3 kN ($\pm 3,5$ kN) par boulon.

2.3. Mesures par corrélation d'images

Nous utilisons pour cette étude le logiciel de corrélation d'image Icasoft afin d'effectuer la mesure des champs de déplacement au niveau de la jonction profilé/béton. Les spécifications du matériel optique sont données tableau 1. Les corps d'épreuve sont préparés spécialement pour la corrélation ; un mouchetis noir et blanc est appliqué sur la zone d'intérêt. Le capteur optique est placé à 45° par rapport à l'éprouvette, à une distance d'environ 0,60 m comme indiqué figure 4. Ainsi, les faces visibles du profilé et du bloc béton ne sont pas dans un même plan, cet aspect est pris en compte lors de l'exploitation des résultats.

Les images obtenues, clichés en niveau de gris de 1600 par 1200 pixels, sont comparés dans le logiciel Icasoft en mode séquentiel. Par défaut, les valeurs suivantes sont utilisées pour le calcul de corrélation d'images (i) Pattern size, min = 25, max = 32 (ii) Grid step = 9 (iii) Precision = 1/100 pixel.

Tableau 1. Propriétés du capteur optique et de l'objectif

mvBlueFOX 224G CCD		FUJINON 1 :1.4/16mm HF16SA-1	
Format capteur	CCD, niveaux de gris	Mise au point	Manuelle
Résolution	1600 x 1200 Px	Ouverture	Manuelle
Fréquence maximale	16 Hz	Distance focale	16mm
Format capteur	7,18 x 5,32 mm (1/1.8 ")	Plage d'ouverture	F1.4 – F22
Taille pixels	4,4 x 4,4 µm	Plage de mise au point	0,1 m - ...
Temps d'intégration	30 µs – 10s		
Connexion	USB 2.0		
Fabricant capteur	Sony		
Nom capteur	ICX274AL/AQ		

Suivant le matériel utilisé, et la taille et la distance de l'éprouvette au capteur, la dimension théorique d'un pixel sur la surface de mesure est estimée à environ 165 µm. La différence de distance entre le point de la zone d'intérêt (ZOI) le plus éloigné du capteur et le point le plus proche est estimée à 50 mm, ce qui correspond à une variation de ±4,2% de la distance éprouvette-capteur. Par conséquent, la comparaison des mesures optiques n'est faite qu'entre points suffisamment proches pour être considérés comme appartenant à un plan perpendiculaire à l'axe optique.

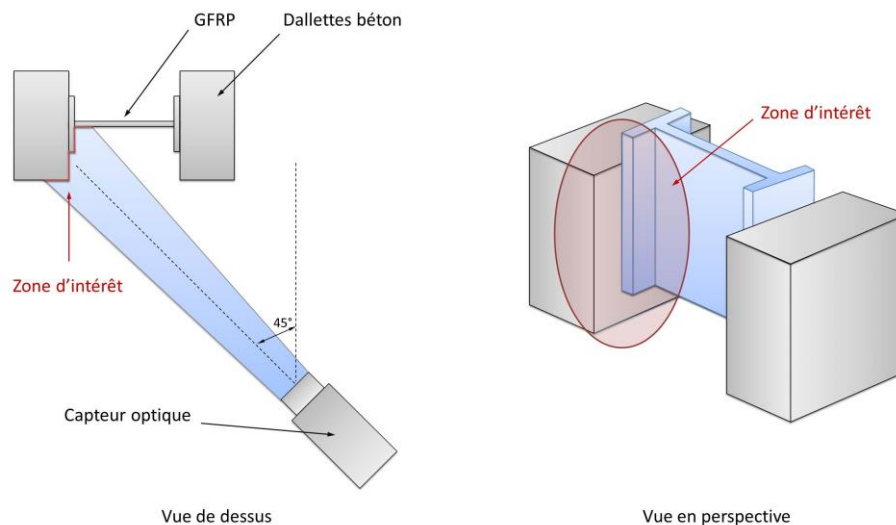


Figure 4. Position de la zone d'intérêt pour la corrélation d'images

3. Exploitation des résultats

3.1. Assemblages collés

Sur les 5 corps d'épreuve de la série POPB2, 2 essais sont inexploitable pour cause de rupture prématurée. Un troisième essai (éprouvette collée 1) est également inexploitable du point de vue de la corrélation d'image pour cause de mauvaise synchronisation entre l'acquisition des photos et des valeurs de déplacement de la traverse. Seules les éprouvettes collées 3 et 4 seront étudiées dans la suite.

Les champs des déplacements verticaux pour l'éprouvette collée 3, pour différentes valeurs de chargement, sont représentés figure 5. On n'observe pas clairement de saut de déplacement entre les 2 parties. Les déplacements verticaux mesurés pour le bloc de béton et le profilé ne sont pas homogènes. La valeur du déplacement dépend de la distance par rapport au capteur optique. Plus un point est éloigné, plus son déplacement mesuré est faible. Cette observation est cohérente, elle indique que la mesure de champs 2D est perturbée lorsque l'objet n'est pas compris dans un plan perpendiculaire à l'axe optique.

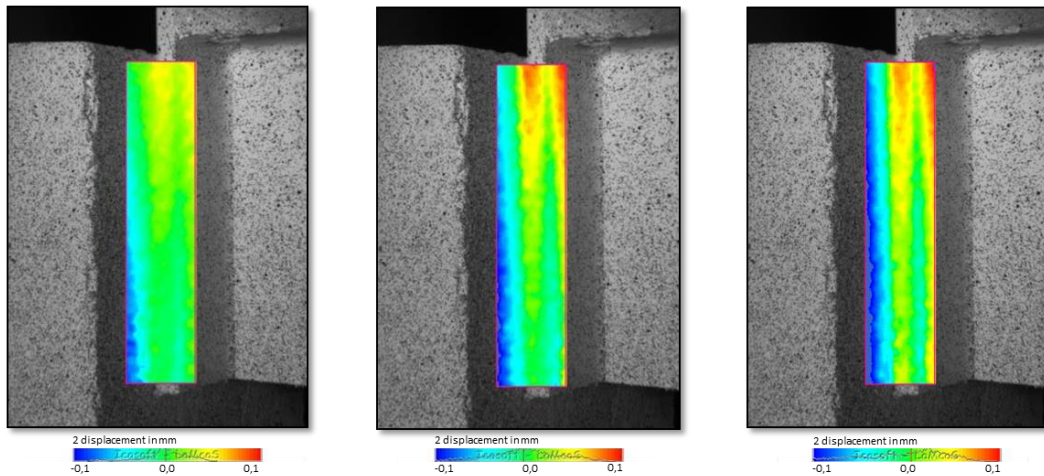


Figure 5. Epreuve collée 3, champs de déplacements verticaux dans la zone d'intérêt pour trois valeurs de chargement (gauche) 13,0 kN (centre) 136,8 kN (droite) 269,3 kN

Cependant cet aspect ne remet pas entièrement en cause les mesures effectuées. Ici les déplacements mesurés, déplacements de corps rigide exclus, sont compris entre -100 et +100 μm , alors que la taille d'un pixel est estimée à 165 μm . Le glissement relatif entre pultrudé et béton, s'il existe, est donc inférieur à 200 μm à rupture, et n'est pas correctement capturé par le matériel optique à disposition. Les mêmes observations sont faites pour l'éprouvette collée 4. Dans une première approche, le comportement à l'interface entre profilé pultrudé GFRP et béton assemblés par collage est donc considéré comme infiniment rigide. On pourra faire l'hypothèse de non-glissement à l'interface avant rupture.

3.2. Assemblages boulonnés

Les 5 corps d'épreuve de la série POPB3 sont exploitables du point de vue de la corrélation d'image. Pour exemple, la zone d'intérêt de l'éprouvette boulonnée 5 en début et fin d'essai (dernier cliché avant rupture) est donnée figure 6. La déformation des boulons est visible à l'œil nue, ils sont fortement inclinés vers le bas.

La caractérisation du glissement est faite en suivant le déplacement des points P1 à P3 et B1 à B3. Comme indiqué figure 6, ces points sont identifiés sur le profilé et le bloc béton, de part et d'autre de la jonction. Le calcul du glissement est fait en comparant les déplacements verticaux des points en vis-à-vis.

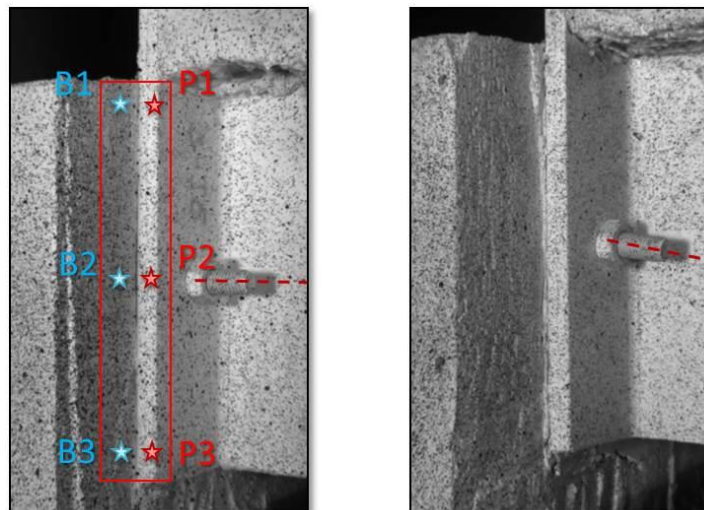


Figure 6. Epreuve boulonnée 5, zone d'intérêt pour l'essai de cisaillement (gauche) début essai (droite) fin essai

La mesure du glissement entre profilé et bloc béton pour l'éprouvette boulonnée 5 est donnée figure 7. Les glissements mesurés sont significatifs. Après une phase de glissement faible, jusqu'à un effort machine de l'ordre de 18 kN, le glissement augmente quasiment linéairement en fonction de l'effort machine. Les glissements mesurés aux points 1, 2 et 3 sont très proches, on a un mouvement d'ensemble entre profilé et bloc béton. De ce fait, le glissement moyen sera utilisé dans la suite.

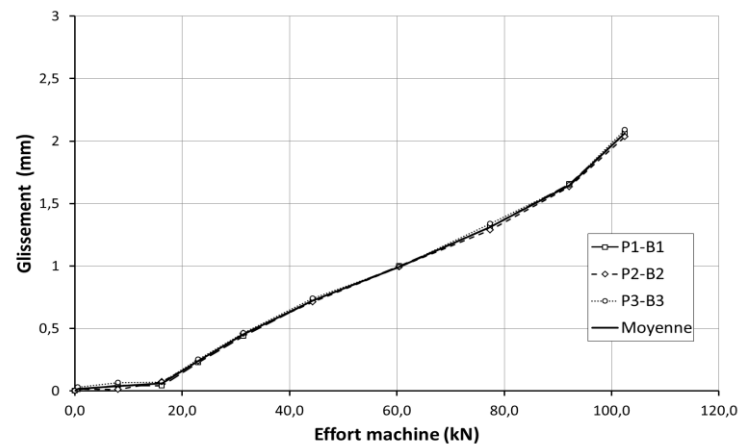


Figure 7. Eprouvette boulonnée 5, mesure du glissement en fonction de l'effort machine

Les champs de déplacements verticaux pour l'éprouvette boulonnée 5, à différents niveaux de chargement, sont représentés figure 8. On observe le déplacement d'ensemble du profilé et du bloc béton. La déformation du corps d'épreuve a majoritairement lieu au niveau de la jonction, par déformation du boulon.

En début d'essai, on observe une différence de déplacement significative entre le haut du profilé et le bas du bloc béton. Figure 8.a, la différence de déplacement est de l'ordre de 3 mm, alors que le glissement mesuré à l'interface est de 0,05 mm. La différence de déplacement est visible jusqu'à un chargement de 15,5 kN. Puis au passage de 15,5 à 18,6 kN, on observe l'apparition d'un saut de déplacement vertical entre profilé et bloc béton. Cela correspond à la fin de la première partie de la courbe, le glissement mesuré est alors de 0,1 mm. Par la suite, on observe très clairement le saut de déplacement vertical entre les 2 parties. La photo 3 (figure 8.c) est la dernière pour laquelle la corrélation d'image peut être faite en utilisant une seule zone d'intérêt. Au-delà, les déplacements à l'interface perturbent trop fortement la mesure par corrélation. Il faut alors utiliser 2 zones d'intérêt.

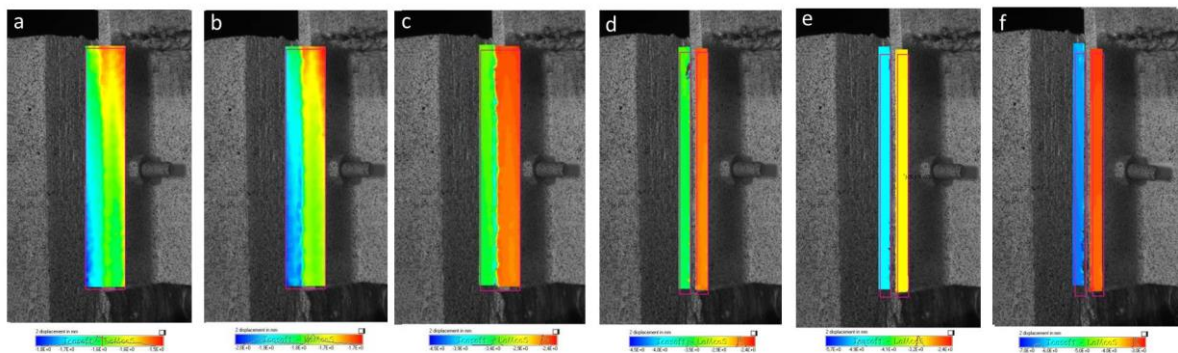


Figure 8. Eprouvette boulonnée 5, mesure du champ des déplacements verticaux pour différents niveaux de chargement (a) 15,5 kN (b) 18,6 kN (c) 46,1 kN (d) 49,3 kN (e) 88,0 kN (f) 111,1 kN

Un comportement de glissement semblable est observé pour l'ensemble des 5 corps d'épreuves. Les glissements moyens pour les 5 éprouvettes sont représentés figure 9. On obtient un glissement maximum de l'ordre de 2,5 à 3,0 mm avant rupture, pour un chargement compris entre 23 et 30 kN par boulon. Le glissement peut être séparé en trois parties. Dans un premier temps le glissement est négligeable, jusqu'à un seuil moyen de 1,8 kN ($\pm 38,4\%$) par boulon. Le bloc de béton et le profilé restent solidaires. La déformation n'est pas localisée, elle a lieu dans l'ensemble de l'éprouvette. Puis dans une deuxième partie, bloc de béton et profilé se désolidarisent. On a alors un saut de glissement, puis une augmentation quasi linéaire du glissement en fonction

de l'effort appliqué (voir figure 9). Ce glissement se traduit par la déformation du boulon. En fin d'essai, le glissement s'accélère. On peut raisonnablement penser que le boulon entre en phase plastique, le glissement augmente rapidement jusqu'à rupture. Ces trois phases de glissement sont visibles pour l'ensemble des essais réalisés, avec des niveaux de chargement légèrement variables.

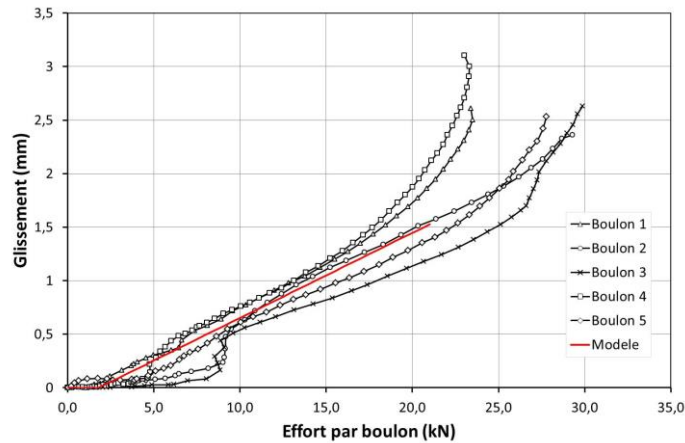


Figure 9. Mesure du glissement en fonction de l'effort par boulon pour assemblages boulonnés

La deuxième partie des courbes (phase quasi-linéaire) peut être utilisée afin de déterminer la rigidité (souplesse) de l'assemblage. Le seuil 1 correspond au début de la phase linéaire, déterminé graphiquement. Le seuil 2 représente la fin de la partie linéaire, il correspond à l'effort par boulon pour un glissement de 1,5 mm. La souplesse est déterminée en utilisant une régression linéaire entre les seuils 1 et 2. Les valeurs numériques sont données tableau 2. On trouve une souplesse moyenne de 0,0795 mm/kN ($\pm 12,3\%$), soit une rigidité moyenne de 12,75 kN/mm ($\pm 13,4\%$). La troisième partie de la courbe (comportement à rupture) n'est pas traitée ici.

Ainsi, le comportement à l'interface entre profilé pultrudé GFRP et béton assemblés par boulonnage est modélisé par une loi bilinéaire. Cette loi de comportement pourra être utilisée pour le calcul d'éléments structuraux hybrides GFRP-béton.

Tableau 2. Définition des paramètres de seuil, souplesse et rigidité pour la modélisation

	Seuil 1 (kN)	Souplesse (mm/kN)	Rigidité (kN/mm)	Seuil 2 (kN)
Boulon 1	1,52	0,0877	11,40	18,5
Boulon 2	1,21	0,0784	12,76	20,3
Boulon 3	1,97	0,0644	15,53	25,1
Boulon 4	1,36	0,0888	11,26	17,7
Boulon 5	2,92	0,0781	12,80	22,7
Moyenne	1,80 ($\pm 38,4\%$)	0,0795 ($\pm 12,3\%$)	12,75 ($\pm 13,4\%$)	20,86 ($\pm 14,6\%$)
Commentaire		Partie linéaire		$\Delta y = 1,5 \text{ mm}$

4. Conclusion

L'étude sur la comparaison des assemblages GFRP-béton par boulonnage et collage a été menée sur un panel représentatif de cinq éprouvettes pour chaque type de connexion. L'approche expérimentale utilisant la corrélation d'images pour mesurer les déplacements relatifs entre les parties montre des résultats prometteurs avec toutefois quelques limitations.

Il en ressort que les assemblages collés présentent un comportement très rigide avec très peu de déplacements enregistrés avant la ruine. Une contrainte moyenne à rupture de 7,95 MPa ($\pm 0,9 \text{ MPa}$) a été mesurée, sans pouvoir déterminer avec précision le glissement correspondant. Le matériel de corrélation utilisé indique un déplacement relatif inférieur à $\pm 100 \mu\text{m}$, mais ne permet pas de définir le glissement plus précisément. Des efforts supplémentaires sont nécessaires pour approfondir ce point. Dans une première approche, le comportement à l'interface entre profilé pultrudé GFRP et béton assemblés par collage est donc considéré comme infiniment rigide. On pourra faire l'hypothèse de non-glissement à l'interface.

Les assemblages boulonnés montrent un glissement important à l'interface en raison de la flexion des boulons. La mesure par corrélation d'images permet de définir le glissement, qui peut être modélisé en trois parties. Une première partie avec glissement nul, une deuxième avec glissement proportionnel au chargement (rigidité moyenne de 12,75 kN/mm ($\pm 13,4\%$)) et une troisième partie avec forte augmentation du glissement avant rupture. De plus, la reproductibilité des mesures sur éprouvettes boulonnées est bonne. Le comportement à l'interface entre profilé pultrudé GFRP et béton assemblés par boulonnage est donc modélisé par une relation de glissement bilinéaire. Ce modèle pourra être utilisé pour le calcul d'éléments structuraux hybrides GFRP-béton.

5. Bibliographie

[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, 2007, p. 66-78.

[COR 09a] 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.

[COR 09b] Correia J., Branco F., Ferreira J. « GFR-concrete hybrid cross-sections for floors of buildings », *Engineering Structures*, vol. 31, 2009, p. 1331-1343.

[El-H 12] 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.

[EN 94] EN, 1994-1-1 :2004, *Eurocode 4: design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings*.

[GON 14] 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.

[MEN 11] 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.