
Évaluation des caractéristiques mécaniques des connexions par entaille et barre d'acier HA fileté dans les poutres mixtes bois-béton

Decroly DJOUBISSIE D.¹, Adamah MESSAN¹, Eric FOURNELY^{2,3},
Abdelhamid BOUCHAÏR^{1,2,3}, François TSOBNANG¹

¹ Laboratoire Eco-Matériaux de Construction (LEMC), Institut International d'ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), 01 BP 594 Ouagadougou 01, Burkina Faso (decroly.djoubissie@2ie-edu.org)

² Clermont Université, Université Blaise Pascal, Institut Pascal, BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand, France

³ CNRS, UMR 6602, Institut Pascal, F-63171 Aubière, France

RÉSUMÉ. Des essais expérimentaux de cisaillement ont été réalisés en vue de déterminer les capacités mécaniques d'une connexion bois-béton par entaille renforcée de tige fileté en termes de résistance, rigidité, ductilité pour une application dans les poutres mixtes bois-béton. Le système de connexion est composé d'une entaille triangulaire dans une poutre en bois dur, complétée par une barre d'acier à haute adhérence fileté de 10 mm de diamètre. La barre est vissée dans le bois après un pré-perçage. Trois systèmes de connexion ont été définis par variation d'angle de fixation de la barre fileté (60°, 90°, 120°) par rapport au sens du fil du bois. Les résultats ont permis d'illustrer le comportement en cisaillement de cette connexion et de comparer les trois solutions testées entre elles en observant la capacité de résistance et le module de glissement.

ABSTRACT. Experimental shear tests were performed to determine the mechanical capacities of a notched connection with threaded rebar in terms of strength and stiffness, ductility for an application in composite wood-concrete beams. The connection system is composed of a triangular notch in a hardwood timber beam reinforced by a threaded rebar with 10 mm in diameter commonly used as reinforcement for concrete. The threaded rebar is screwed in the woods after a pre-drilling. Three connection systems have been defined by the variation of the fixing rod angle (60°, 90°, 120°) relative to the direction of the wood grain. The results allowed illustrating the shear behaviour of the connection and comparing three tested solutions with regard to the strength and the shear slip modulus.

MOTS-CLÉS : Bois-béton, Connexion, Entaille, armature HA, Essais de cisaillement

KEY WORDS: Timber-Concrete, Connection, Notch, Rebar, Push-out shear tests

1. Introduction

La recherche de solutions constructives utilisant des matériaux naturels s'inscrit dans les préoccupations actuelles relatives au développement durable. Il est à présent communément admis que l'utilisation du bois comme source de matériau renouvelable dans la construction contribue à réduire l'impact du changement climatique. En Amérique du Nord et en Europe, la construction en bois bénéficie d'une longue tradition d'applications dans les domaines des maisons individuelles ou de l'habitat collectif. En Afrique, le bois est abondant dans certains pays, mais la construction en bois est quasi inexistante. Les raisons principales sont liées en partie à certaines craintes relatives à la pérennité du matériau bois et aussi à l'absence de filières locales de valorisation du bois dans la construction.

Les structures en béton armé étant les plus courantes dans la construction, l'association du bois et du béton dans des structures mixtes se montre avantageuse vis-à-vis de la valorisation locale du bois, de la préservation des ressources en granulats et de l'optimisation des performances mécaniques de la structure. Le principe étant de faire travailler le béton en compression et le bois en traction, utilisant ainsi au mieux les propriétés mécaniques de chaque matériau [CEC 02][GUR 05][FRA 06]. La clef pour le développement de ces systèmes mixtes bois-béton repose sur le développement de connexions performantes et la maîtrise de leurs comportements au niveau mécanique. De plus, il est important de développer des systèmes de connexions de faible coût, disponibles et faciles à mettre en œuvre dans un contexte local ciblé.

Les premiers connecteurs de cisaillement pour les poutres mixtes bois-béton ont été proposés dans les années 1940 [CEC 02][LUK 09]. Depuis lors, de nombreux types de connecteurs mécaniques ont été décrits, testés et présentés dans des applications concrètes ou dans des publications scientifiques [GUT 04][BRA 09][LEB 10][NEG 10][OUD 13] avec pour but d'augmenter l'efficacité et la fiabilité de ces systèmes constructifs. Bien que ces connexions bois-béton soient connues, elles ne sont quasiment pas utilisées dans le contexte local africain et ceci pour plusieurs raisons telles que le manque de disponibilité des connecteurs localement et l'absence d'entreprises compétentes dans ce domaine. De plus, ces systèmes sont considérés comme étant relativement complexes à construire et coûteux en main-d'œuvre.

Notre étude porte sur des essais expérimentaux de cisaillement push-out d'une connexion liant le bois massif et le béton. Ce système de connexion est relativement facile à mettre en œuvre dans les planchers ou les poutres mixtes. Le système de connexion est composé d'une entaille triangulaire dans le bois complétée par une barre d'acier à haute adhérence filetée de 10 mm de diamètre utilisée couramment comme armature en béton armé. Trois systèmes de connexion ont été définis en variant l'angle d'installation de la barre filetée. L'objectif est de les caractériser mécaniquement en déterminant la capacité résistante et le module de glissement. Une comparaison entre les caractéristiques mécaniques obtenues pour les trois solutions testées est réalisée. Les éprouvettes ont été réalisées avec des matériaux disponibles localement et également testées localement dans le Laboratoire Eco-Matériaux de Construction (LEMC) de l'institut 2iE de Ouagadougou.

2. Matériaux et Méthodes

2.1. Matériaux

2.1.1. Béton

Cinq éprouvettes cylindriques de 10 cm x 20 cm de béton ont été testées en compression à 28 jours d'âge. Le tableau 1 présente les résultats de la résistance en compression ainsi que les masses volumiques. La masse volumique moyenne obtenue est de 2354 kg/m³ et la résistance en compression moyenne à 28 jours est de 15,1 MPa. Les résultats sont homogènes, mais la résistance moyenne est faible. Ce béton a été obtenu avec le dosage suivant par mètre cube :

- Ciment 350 kg
- Gravier 800 litres
- Sable 400 litres
- Eau 190 litres

Cette composition est celle qui est localement retenue pour la confection des bétons destinés aux bâtiments courants.

Tableau 1. Résistance à la compression à 28 jours et masse volumique du béton

Éprouvettes	Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	Masse volumique (kg/m ³)
1	16,17	2394
2	15,62	2336
3	14,70	2344
4	13,86	2336
5	15,19	2363
Moyenne	15,11	2354
Écart-type	0,89	24
CV (%)	5,86	1,04

2.1.2. Bois

Des éprouvettes en bois ont été prélevées afin de déterminer la masse volumique en suivant la norme EN408 [COM 09]. Le bois utilisé est de type tropical assez dense dont la masse volumique moyenne obtenue est de 563,4 kg/m³. Il provient d'un fournisseur implanté localement et correspond au type de bois utilisé (quand c'est le cas) pour la construction. Son essence n'a pas été déterminée à ce jour. Après passage des échantillons prélevés à l'étuve, nous n'avons constaté aucune variation de masse. Ceci s'explique par le fait qu'étant dans un pays désertique, le bois utilisé avait déjà perdu la quasi-totalité de son humidité. Le tableau 2 présente les résultats de la masse volumique du bois utilisé. Les résultats obtenus pour la masse volumique montrent une grande homogénéité.

Tableau 2. Masse volumique du bois

Éprouvettes	<i>a</i> (mm)	<i>b</i> (mm)	<i>h</i> (mm)	Masse (g)	masse volumique (kg/m ³)
1	48,7	49,4	230	311,2	562,0
2	49,4	49,0	232	315,9	561,4
3	49,5	49,4	232	318,6	561,8
4	49,3	48,7	235	319,4	565,7
5	49,1	47,9	236	313,4	564,4
6	49,4	48,0	236	316,0	564,8
moyenne	49,2	48,8	234	315,7	563,35
Écart-type	0,3	0,7	2	3,1	1,82
CV (%)	0,58	1,34	1,07	0,97	0,32

Où *a* et *b* sont les dimensions de la section transversale et *h* la longueur de l'éprouvette

2.1.3. Acier

Des essais de traction directe sur les barres HA ont confirmé une valeur de f_y de 400 MPa.

2.2. Caractéristiques géométriques des éprouvettes de cisaillement et des systèmes de connexion

Les éprouvettes de cisaillement push-out sont composées de bois de section 65 x 160 mm² et de longueur 350 mm, d'une partie en béton de 300 x 350 mm² et de 65 mm d'épaisseur sur fond de coffrage de 20 mm d'épaisseur. La figure 1 présente les caractéristiques géométriques des éprouvettes.

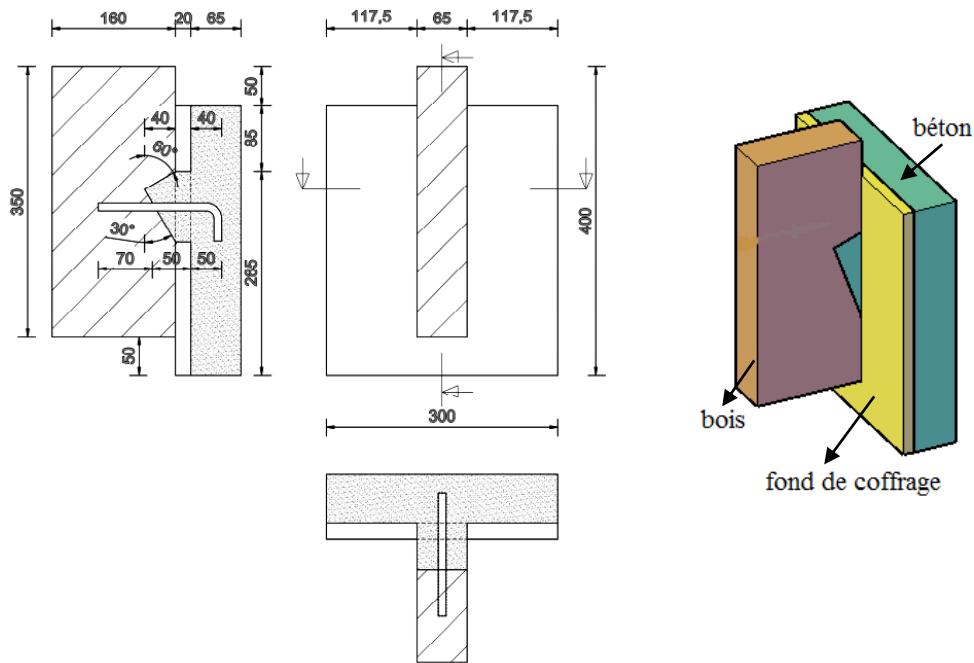


Figure 1. Caractéristiques des éprouvettes de cisaillement push-out (dimensions en millimètres)

Certaines études [YEO 08][GER 10][YEO 10] ont conclu que la connexion par entaille a l'avantage d'avoir une grande rigidité comparée aux connexions mécaniques dans les structures mixtes bois-béton par l'apport de la résistance du béton se trouvant dans l'entaille du bois. L'entaille réalisée dans cette étude est triangulaire pour une facilité de réalisation (par simple sciage) sur une profondeur de 40 mm dans le bois. La barre d'acier à haute adhérence de 10 mm de diamètre largement disponible localement, est filetée à son extrémité et vissée dans le bois après un pré-perçage. Les trous devant recevoir les tiges ont un diamètre de 8 mm. Trois systèmes de connexion ont été définis par variation d'angle de fixation de la barre filetée par rapport au sens du fil du bois :

- Le système D1 avec la barre filetée vissée à 60° d'inclinaison par rapport au sens du fil du bois (figure 2). Trois éprouvettes de ce type de connexion ont été testées : D1.1, D1.2 et D1.3.
- Le système D2 avec la barre filetée vissée à 120° d'inclinaison par rapport au sens du fil du bois (figure 3). Trois éprouvettes de ce type de connexion ont été testées : D2.1, D2.2 et D2.3.
- Le système D3 avec la barre filetée vissée à 90° d'inclinaison par rapport au sens du fil du bois (figure 4). Trois éprouvettes de ce type de connexion ont été testées : D3.1, D3.2 et D3.3.

Ces angles sont définis par rapport au fil du bois qui représente la direction longitudinale de la poutre (direction parallèle à l'interface bois-béton). La partie en béton des éprouvettes contient des barres d'armatures HA6 pour limiter le retrait du béton. Ces armatures sont disposées avec un maillage adapté à la connexion et respectant les normes constructives.

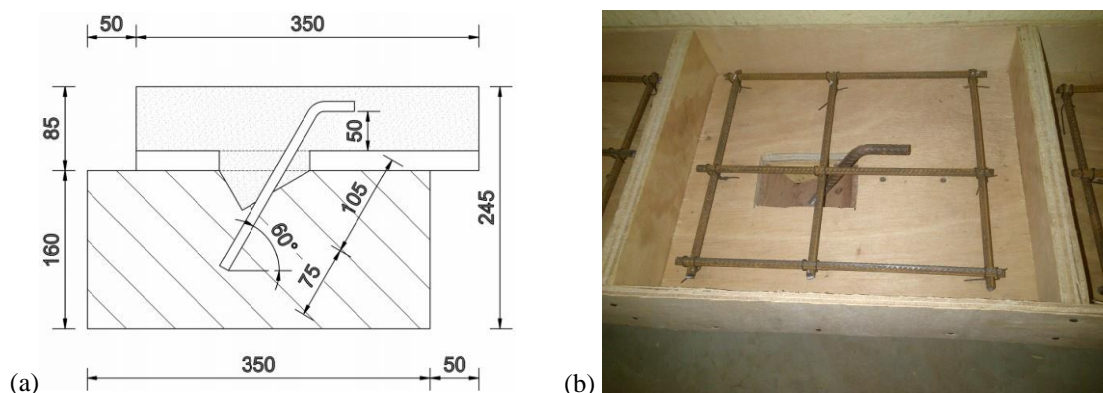


Figure 2. Système de connexion type D1 : entaille triangulaire avec barre filetée vissée à 60° par rapport au fil du bois. (a) Géométrie (Dimensions en millimètres) ; (b) Image avec armatures avant coulage du béton.

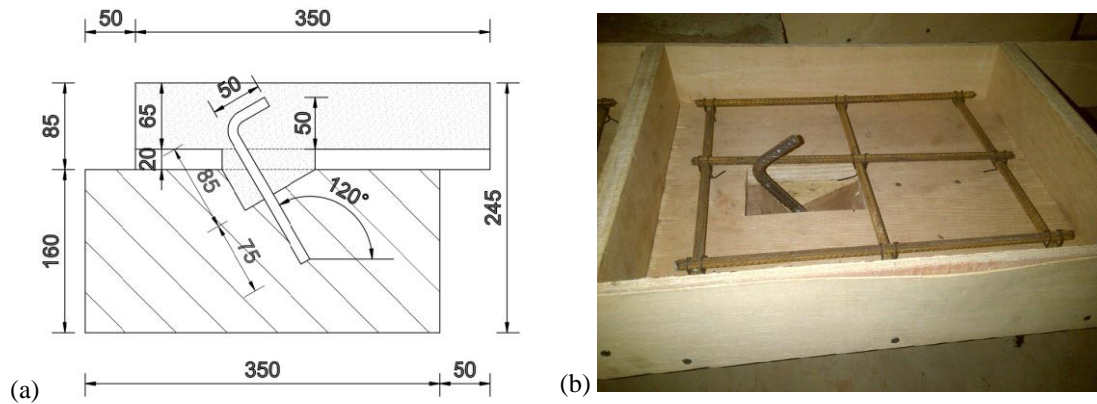


Figure 3. Système de connexion type D2 : entaille triangulaire avec barre filetée vissée à 120° par rapport au fil du bois. (a) Géométrie (Dimensions en millimètres) ; (b) Image avec armatures avant coulage du béton.

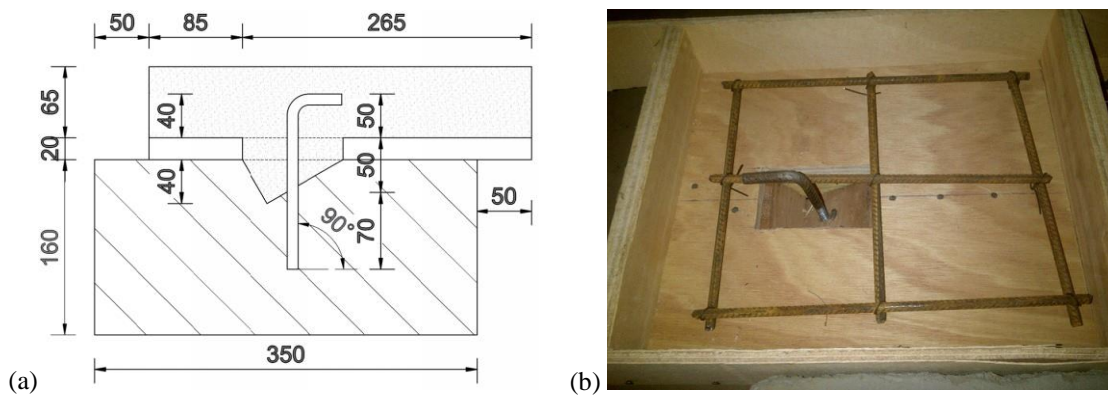


Figure 4. Système de connexion type D3 : entaille triangulaire avec barre filetée vissée à 90° par rapport au fil du bois. (a) Géométrie (Dimensions en millimètres) ; (b) Image avec armatures avant coulage du béton

2.3. Méthodes

Les essais de cisaillement ont été réalisés après 28 jours de cure du béton. Une presse universelle électromécanique d'une capacité de charge 300 kN avec une centrale de pilotage et d'acquisition des données a été utilisée à cet effet. La Figure 5 présente une éprouvette en phase d'essai sur la presse. L'éprouvette est asymétrique. Le chargement en partie basse, côté dalle béton, et en partie haute, côté poutre bois, engendre un couple qui est repris par frottement au droit des plateaux haut et bas de la presse. Le bas est bloqué en rotation, ce qui assure la stabilité de l'éprouvette en phase de mise en place et d'essai. Par contre, le plateau supérieur est rotulé, c'est le contact avec l'extrémité de la poutre bois qui assure son maintien en position. Aucun dispositif de maintien latéral complémentaire n'est mis en œuvre.

Chaque éprouvette est chargée à une vitesse (déplacement de la traverse) de 3 mm/min conformément aux prescriptions de la norme EN 26891 [COM 91]. Ne disposant pas de capteurs de déplacement pour enregistrer le glissement bois-béton, et en tenant compte du niveau modéré de chargement appliqué, nous avons assimilé, dans cette étude, le glissement de la connexion au déplacement de la traverse de la presse. Chaque essai est arrêté lorsqu'on enregistre un déplacement supérieur à 20 mm. Le système d'acquisition de la presse permet d'obtenir la courbe charge-glissement de l'essai. Dans l'évaluation du comportement des connecteurs dans des systèmes mixtes, on utilise le module de glissement K_s défini comme le coefficient angulaire de la courbe charge-glissement.

Le module de glissement en service K_s est calculé à partir de l'expression [1] où F_{max} est la charge maximale de la connexion, et v_{01} et v_{04} sont les glissements à 10% et 40% de la charge maximale respectivement.

$$K_s = \frac{0,4 F_{max}}{\frac{4}{3}(v_{04} - v_{01})} \quad [1]$$

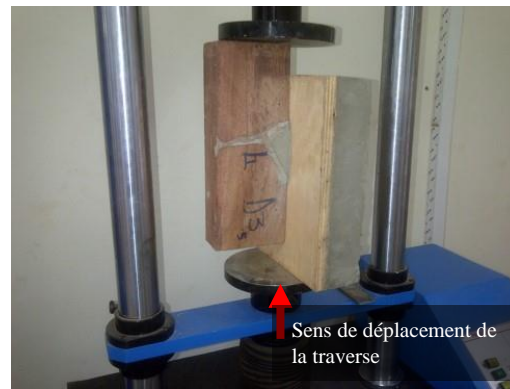


Figure 5. Dispositif d'essai de cisaillement push-out

3. Résultats et discussions

La Figure 6 présente les différentes courbes charge-glissement obtenues après essai.

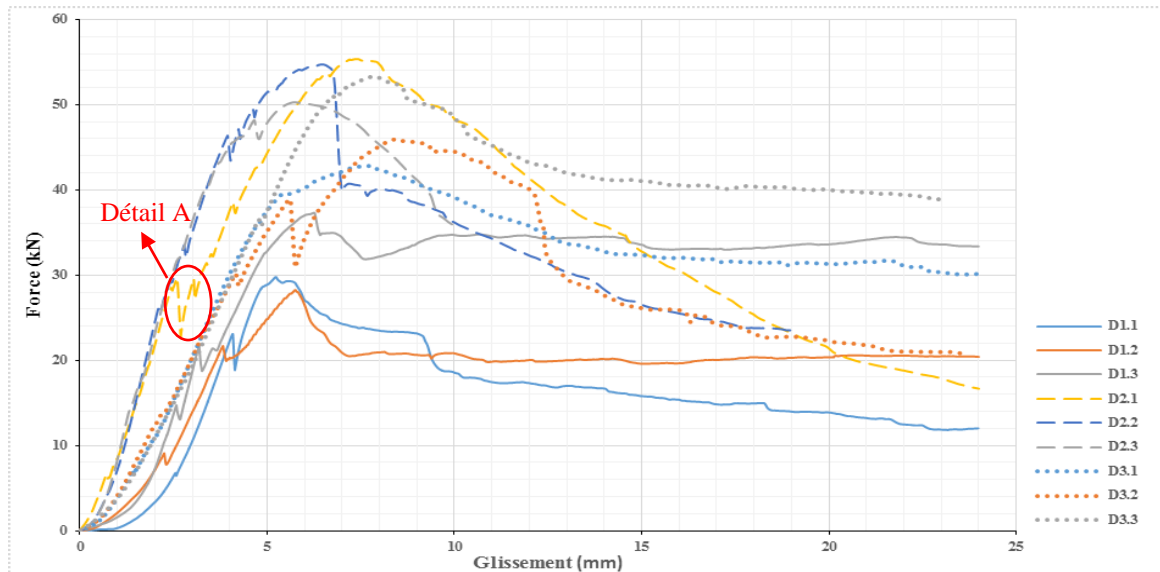


Figure 6. Courbes charge-glissement des différentes éprouvettes

Les valeurs obtenues de capacité de résistance des éprouvettes sont données dans le Tableau 3. On remarque que, des trois systèmes de connexion testés, le système D2 présente une résistance moyenne égale à 53,47 kN et supérieure aux deux autres D1 et D3 qui sont respectivement de 31,79 kN et 47,39 kN. De plus, les valeurs de résistance obtenues pour le type D2 (CV=5,17%) ont moins de dispersion que celles pour les types D1 et D3 (15,23% et 11,37%). Les courbes montrent un comportement qui, sans être très ductile, présente toutefois une résistance résiduelle non négligeable après le pic de résistance

Tableau 3. Valeurs des résistances des systèmes de connexion en kN

Éprouvettes	D1 (60°)	D2 (120°)	D3 (90°)
1	29,79	55,32	42,84
2	28,27	54,79	45,98
3	37,32	50,29	53,34
Moyenne	31,79	53,47	47,39
Écart-type	4,85	2,76	5,39
CV (%)	15,24	5,17	11,37

Tableau 4. Module de glissement des systèmes de connexion en kN/mm

Éprouvettes	D1 (60°)	D2 (120°)	D3 (90°)
1	7,42	11,8	7,94
2	5,52	16,45	7,98
3	9,14	14,47	8,36
Moyenne	7,36	14,24	8,09
Écart-type	1,81	2,33	0,23
CV (%)	24,60	16,39	2,86

Le tableau 4 présente le module de glissement de chaque éprouvette obtenu à partir des courbes charge-glisement en appliquant l'expression [1]. Les systèmes de connexion de type D1 et D3 avec barre HA fileté inclinée à 60° et 90° respectivement montrent une rigidité (7,36 kN et 8,09 kN/mm respectivement) inférieure à celle de D2 qui est de 14,24 kN/mm. Néanmoins, le coefficient de variation entre les valeurs du type D3 (90°) est faible (2,86%) par rapport aux types D1 (60°) et D2 (120°).

Des trois systèmes de connexion testés, on observe une rupture par écrasement du béton se trouvant dans l'entaille du bois (Figure 7(a)). Une perte de charge est observée sur toutes les courbes charge-glisement (par exemple détail A Figure 6). L'observation des différents essais montre que ces pertes locales de résistance des éprouvettes en phase de chargement surviennent au moment de la rupture du béton suivi de ruptures ponctuelles de frottement entre la partie basse de l'éprouvette (dalle béton) et le plateau bas de la presse. Pour le système D2, la Figure 7(b) montre qu'il se produit en plus un arrachement de la barre d'acier de connexion du béton de la dalle. Des rotules plastiques se sont développées dans la barre d'acier suivant le type de système de connexion (Figure 7(c)) : Pour les types D1(60°) et D3(90°), on observe 2 rotules (une rotule au niveau de l'interface entre le béton et le fond de coffrage et une rotule au niveau de l'interface entre le bois et le béton dans l'entaille ; pour le type D2, on observe une rotule plastique au niveau de l'interface entre le béton et le fond de coffrage. De toutes les éprouvettes testées, on ne note quasiment pas de déformation dans la partie bois.

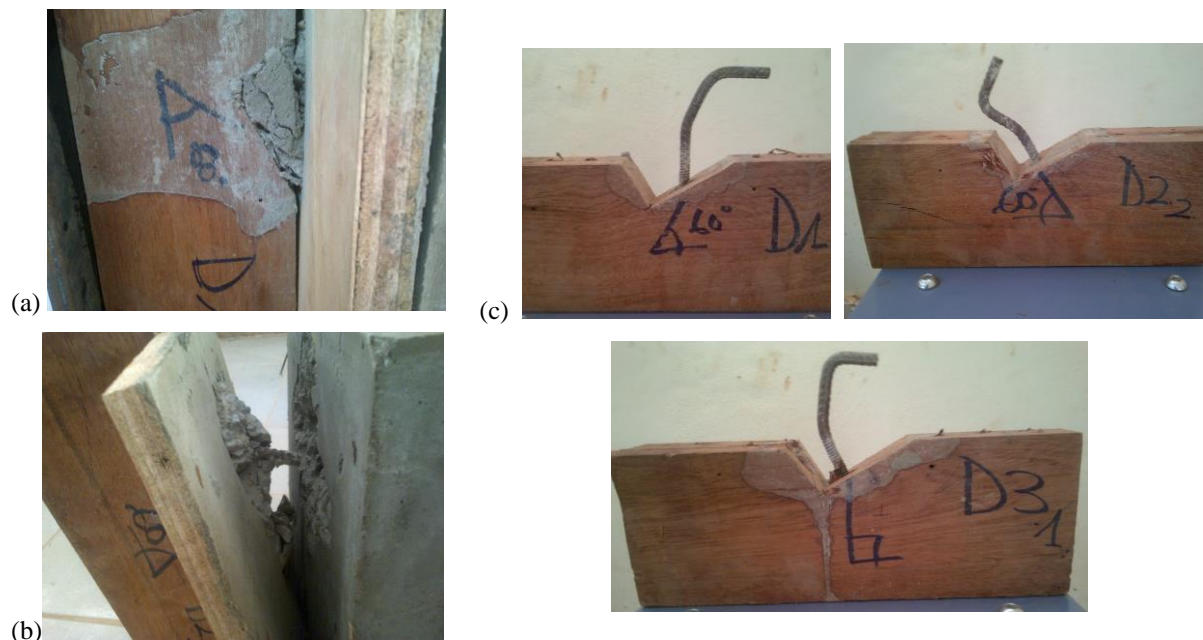


Figure 7. (a) Écrasement du béton dans l'entaille ; (b) Arrachement du béton dans la dalle au droit de la tige ; (c) Rotule plastique observée sur les tiges d'acier des différents systèmes de connexion

4. Conclusion

Dans la présente étude, des systèmes de connexion sont définis. Ils sont caractérisés par la facilité à mettre en œuvre dans un plancher ou une poutre mixte bois-béton tout en utilisant des matériaux disponibles localement. Les essais push-out ont permis de définir la résistance, la rigidité, la résistance résiduelle et une variabilité des caractéristiques physiques et mécaniques des trois configurations de connexion proposées. Les résultats montrent que le système de connexion formé par l'entaille avec barre d'acier de haute adhérence vissée à 120° par rapport aux fibres de bois est plus résistant et plus rigide que les systèmes renforcés par des tiges fixées à 60° et 90°. Néanmoins, des variations notables sont observées dans les valeurs obtenues.

Ces essais constituent une première étape pour tester la pertinence d'une telle technique de plancher ou de poutre mixtes bois-béton et leur faisabilité en contexte local. Des essais de caractérisation du bois utilisé sont en cours (flexion, portance locale, compression). Des essais sur la connexion par entaille seule et par barre d'acier seule sont actuellement en cours de réalisation et programmés pour la suite de l'étude afin d'évaluer l'apport de chacune dans le système combiné et de mieux caractériser ces systèmes de connexion. L'utilisation de capteurs LVDT est également prévue pour ces essais afin d'obtenir des valeurs de rigidité plus précises et valider l'hypothèse utilisée ici pour les mesures de déplacement.

5. Bibliographie

- [BRA 09] BRANCO J. M., CRUZ P. J., AND PIAZZA M., "Experimental analysis of laterally loaded nailed timber-to-concrete connections," *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 1, pp. 400–410, 2009.
- [CEC 02] CECCOTTI A., "Composite concrete-timber structures," *Progress in Structural Engineering and Materials*, vol. 4, no. 3, pp. 264–275, 2002.
- [COM 09] COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, "EN 408-Structures en bois - Bois de structure et bois lamellé collé - détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques," *Brussels (Belgium)*, Février 2009.
- [COM 91] COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, "EN 26891-Structures en bois - Assemblages réalisés avec des éléments mécaniques de fixation - Principes généraux pour la détermination des caractéristiques de résistance et de déformation," *Brussels (Belgium)*, Août 1991.
- [FRA 06] FRAGIACOMO M. AND CECCOTTI A., "Long-term behavior of timber-concrete composite beams. I: finite element modeling and validation," *Journal of structural engineering*, vol. 132, no. 1, pp. 13–22, 2006.
- [GER 10] GERBER C., CREWS K., FOSCOLIANO M., AND AGUS F., "Development of timber concrete composite flooring in Australia and New Zealand," in *Proceedings of the world conference on timber engineering, Trentino*, 2010, pp. 1–8.
- [GUR 05] GURKŠNYS K., KVEDARAS A., AND KAVALIAUSKAS S., "Behaviour evaluation of 'sleeved' connectors in composite timber-concrete floors," *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 11, no. 4, pp. 277–282, 2005.
- [GUT 04] GUTKOWSKI R. M., BROWN K., SHIGIDI A., AND NATTERER J., "Investigation of notched composite wood-concrete connections," *Journal of Structural Engineering*, vol. 130, no. 10, pp. 1553–1561, 2004.
- [LEB 10] LEBORGNE M. R. AND GUTKOWSKI R. M., "Effects of various admixtures and shear keys in wood-concrete composite beams," *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 9, pp. 1730–1738, Sep. 2010.
- [LUK 09] LUKASZEWSKA E., "Development of prefabricated timber-concrete composite floors," PhD Thesis, Lulea University of Technology, Sweden, 2009.
- [OUD 13] OUDJENE M., MEGHLAT E. M., AIT-AIDER H., AND BATOZ J. L., "Non-linear finite element modelling of the structural behaviour of screwed timber-to-concrete composite connections," *Composite Structures*, vol. 102, pp. 20–28, Aug. 2013.
- [NEG 10] NEGRÃO J. H. J. DE O., MAIA DE OLIVEIRA F. M., LEITÃO DE OLIVEIRA C. A., AND CACHIM P. B., "Glued composite timber-concrete beams. II: analysis and tests of beam specimens," *Journal of Structural Engineering*, vol. 136, no. 10, pp. 1246–1254, 2010.
- [YEO 08] YEOH D. E. C., M. FRAGIACOMO, ALDI P., MAZZILLI M., AND KUHLMANN U., "Performance of notched coach screw connection for timber-concrete composite floor system," *NZ Timber Design J*, vol. 17, pp. 4–10, 2008.
- [YEO 10] YEOH D. E. C., "Behaviour and design of timber-concrete composite floor system," PhD Thesis, University of Canterbury, New Zealand, 2010.