

Caractérisation expérimentale et analytique du comportement en flexion d'un plancher innovant mixte bois-béton avec une connexion ductile par encoches

Adham AL RAHIM¹, Piseth HENG¹, Pisey KEO¹, Clémence LEPOURRY-NICOLLET^{1,2}, Franck PALAS³, Hugues SOMJA¹

¹ INSA de Rennes, LGCGM/Structural Engineering Research Group, 20 avenue des Buttes de Coësmes, CS 70839, F-35708 Rennes Cedex 7, France

² INGENOVA, Civil Engineering Office, 5 Rue Louis Jacques Daguerre, 35136 Saint-Jacques-de-la-Lande, France

³ Concept Technique Design R & D, 89 Boulevard de Laval, 35500 Vitré, France

RESUME Un système de plancher mixte bois-béton avec des connecteurs tridimensionnels (3D) par encoches a été proposé. Dans ce système, l'âme de la poutre en bois est incorporée dans des retombées en béton de sorte que la connexion par encoche mobilise trois plans de cisaillement bois-béton, au lieu d'un seul dans les connexions conventionnelles. L'objectif est d'améliorer la résistance au cisaillement du béton et de privilégier la ruine par compression du bois, fournissant ainsi un comportement ductile des connecteurs. La forme trapézoïdale de la connexion crée un blocage géométrique entre le bois et le béton pour résister au soulèvement, de sorte que des éléments mécaniques supplémentaires en acier ne sont pas nécessaires. Cet article présente l'étude du comportement en flexion du plancher. La ruine pour tous les spécimens s'est produite à mi-portée, et est gouvernée par la traction générée par la flexion dans la semelle en bois. Les résultats montrent également que la connexion proposée est efficace pour limiter le glissement et le soulèvement tout au long de la portée du plancher. Enfin, la méthode analytique Gamma, proposée dans l'Eurocode 5, est utilisée pour calculer la rigidité flexionnelle effective du plancher en prenant en compte d'une manière simplifiée la fissuration dans les retombées en béton. Une bonne corrélation entre la méthode analytique et l'expérimentation est obtenue.

Mots-clefs Plancher mixte bois-béton, connexion 3D par encoches, flexion inversée à 6-points, méthode Gamma.

I. INTRODUCTION

En plus d'être une alternative très intéressante pour la construction de bâtiments multiétages, l'association du bois et du béton permet de réduire le poids des planchers tout en respectant les critères de conception et peut être adopté pour la réalisation de planchers neufs ou réhabilités. Et avec les nouvelles réglementations environnementales telles que la RE2020 qui imposent la réduction de l'impact environnemental des constructions, les planchers mixte bois-béton représentent un bon compromis (A. Ceccotti, 2002) et (B. Faggiano et al., 2009). En effet, le bois permet la réduction du bilan carbone des structures, et participe à l'isolation thermique, à la rigidité et à la résistance en traction, alors que le béton apporte la résistance en compression, l'isolation phonique, la masse pour limiter les phénomènes vibratoires, et une meilleure résistance au feu (X. Zhang et al., 2020), (Z. Xie et al., 2020) et (A. Frangi et al., 2009).

Le choix de la connexion dans les planchers mixtes bois-béton est crucial pour rendre le système à la fois structurellement et économiquement compétitif. Divers types de connexions ont été proposés et

étudiés dans la littérature (A. Dias, 2005). Les fixations mécaniques traditionnelles telles que les clous, les vis et les goujons sont couramment utilisées dans les systèmes de connexion mais sont relativement flexibles, tandis que les encoches découpées dans le bois et le collage direct sont plutôt rigides (A. Dias et al., 2011), (A. Ceccotti, 2002) et (M.V.D, Linden, 1999). Les fixations mécaniques en acier et les adhésifs augmentent le coût total, et la complexité de la mise en œuvre. Au contraire, les connexions par encoches ont un coût modéré, parce qu'elles peuvent être réalisées en découpant des rainures dans le bois, généralement à l'aide de machines à commande numérique haute précision (CNC). Bien que les connexions à encoches présentent de bonnes performances en termes de résistance et de rigidité, une faible ductilité est obtenue lorsque la ruine est gouvernée par la rupture en cisaillement du béton (R. Gutkowski, 2008). Des vis en acier insérées dans le bois à l'intérieur des encoches sont parfois ajoutées pour améliorer la ductilité de la connexion, mais l'installation de ces éléments mécaniques augmente à la fois le temps et le coût de la construction.

Dans ce contexte, un nouveau système de plancher mixte bois-béton est proposé. Il se compose de poutrelles en bois en forme de T inversé et d'une dalle de béton (FIGURE 1). L'âme et la semelle de la poutrelle en T sont collés entre elles. Dans ce système, la solive de la poutrelle en bois est insérée dans des retombées en béton et connectée à la dalle via des encoches trapézoïdales réalisées dans le bois et remplies de béton. Cette connexion offre trois plans de cisaillement béton-bois au lieu d'un seul, comme on l'observe généralement dans les connexions conventionnelles. L'objectif est d'améliorer la résistance au cisaillement du béton et de favoriser la ruine en compression du bois, créant ainsi un comportement ductile des connecteurs, ainsi que cela a été montré lors d'essais push-out de la connexion (S.J. Pang, 2021). La forme trapézoïdale de la connexion crée un blocage géométrique entre le bois et le béton pour résister au soulèvement, de sorte que des éléments mécaniques supplémentaires en acier ne sont pas nécessaires.

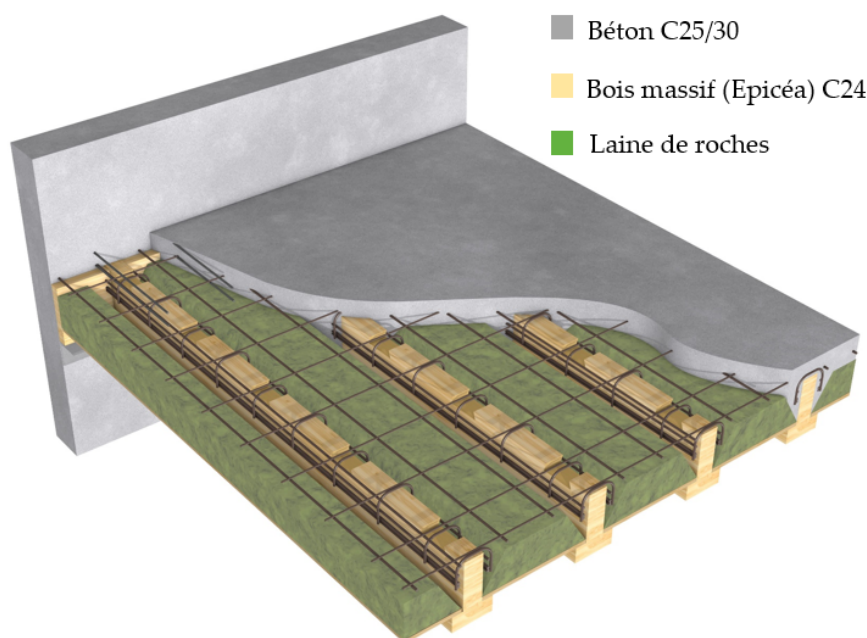


FIGURE 1. Plancher mixte bois-béton.

Cet article a pour objectif d'étudier le comportement en flexion du plancher mixte. Trois essais de flexion 6-points inversés sont réalisés sur des spécimens identiques, avec une portée de 6.55 m. Enfin, la méthode analytique Gamma, proposée dans l'Eurocode 5, est utilisée pour calculer la rigidité flexionnelle effective du plancher en prenant en compte d'une manière simplifiée la fissuration dans les

équivalent à C40/50 et 23,26 MPa (âge de 43 jours), équivalent à C16/20, avec un écart-type de 0,124 MPa, 3,25 MPa et 2,92 MPa pour F_1 , F_2 et F_3 , respectivement. La limite moyenne d'élasticité, la résistance moyenne en traction et le module d'Young moyen des armatures en acier de classe B500B, mesurés sur 6 éprouvettes, s'établissent respectivement à 552,7 MPa, 619,6 MPa et 197,8 GPa, avec des coefficients de variation correspondants de 0,72%, 0,59% et 1,2%.

B. Configuration d'essai et instrumentation

Le dispositif mécanique permettant de réaliser l'essai de flexion 6 points est constitué d'un vérin hydraulique d'une capacité de 1500 kN (a) fixé sur un portique rigide (b), d'un système de guidage (e), de deux systèmes d'appui (f) et d'un système de chargement (c)-(d) (FIGURE 3).

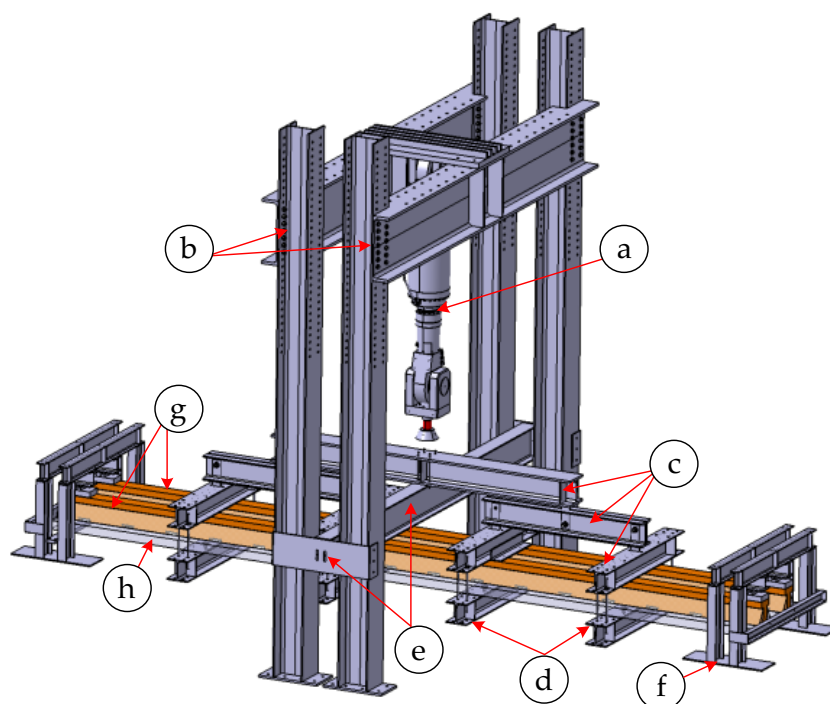


FIGURE 3. (a) Vérin hydraulique, (b) Portique, (c)-(d) Système de chargement, (e) Système de guidage, (f) Système d'appui, (g) Poutrelles en bois, (h) Dalle de béton.

Contrairement à l'essai de flexion conventionnel, un vérin de force vient non pas pousser mais tirer sur le plancher, posé à l'envers dans le dispositif de chargement (FIGURE 4). En effet, si le chargement avait été appliqué vers le bas, le niveau de charge ELS aurait déjà été atteint sous l'effet du poids propre et du poids du dispositif de chargement, ce qui n'aurait pas permis de mesurer les déplacements jusqu'à ce niveau ELS. En tirant sur le spécimen, lorsque la force exercée par le vérin équilibre le poids du spécimen et du dispositif de chargement, cela crée un état de moment très faible dans le plancher. En poursuivant le chargement, cela permet de mesurer les flèches pour des niveaux de charges inférieurs à celui de l'ELS. Inspirée de la norme EN 1994-1-1, la procédure de mise en charge est composée de cinq phases consécutives : (1) Soulèvement du spécimen pour la mise en contact avec les appuis. (2) Cyclage à l'ELS quasi-permanent (5 à 7 cycles). (3) Cyclage à l'ELU (1 cycle). (4) Chargement jusqu'à la ruine. Les charges appliquées à l'ELS et à l'ELU sont déterminées selon l'Eurocode 1.

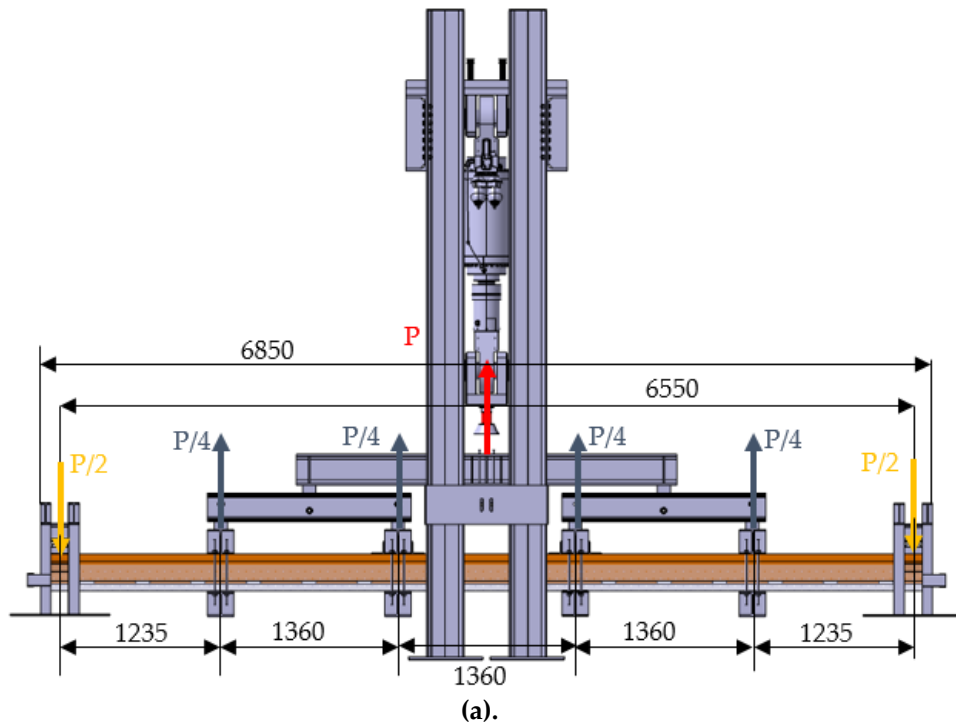


FIGURE 4. Vue 2D de l'essai de flexion. (Dimensions en mm).

Pour mesurer le glissement à l'interface entre le bois et le béton, le spécimen est équipé de 18 capteurs de glissement (LVDTs), dont 9 sont fixés horizontalement sur la face arrière et 9 sur la face avant. Pour le soulèvement, 5 capteurs (LVDTs) sont fixés verticalement sur la face avant et 5 sur la face arrière du spécimen. Il est à noter que le soulèvement signifie la séparation entre le bois et le béton. De plus, 5 LVDTs sont utilisés pour quantifier la flèche du spécimen pendant l'essai.

C. Mode de ruine

Les 3 essais ont montré un comportement quasi-linéaire jusqu'à la ruine. Les charges maximales atteintes étaient de 130,2 kN, 123,5 kN et 128 kN, durant les essais F_1 , F_2 et F_3 , respectivement. La flèche correspondante à mi-portée était de 61 mm, 47,2 mm et 68,6 mm, respectivement (FIGURE 5). La ruine s'est produite à mi-portée et est gouvernée par la traction générée par la flexion dans la semelle en bois. Elle est survenue dans une enture (collage de continuité du bois) ou dans un noeud proche de la mi-portée. Elle était accompagnée par un décollement âme-semelle de la poutrelle en bois (FIGURE 6).

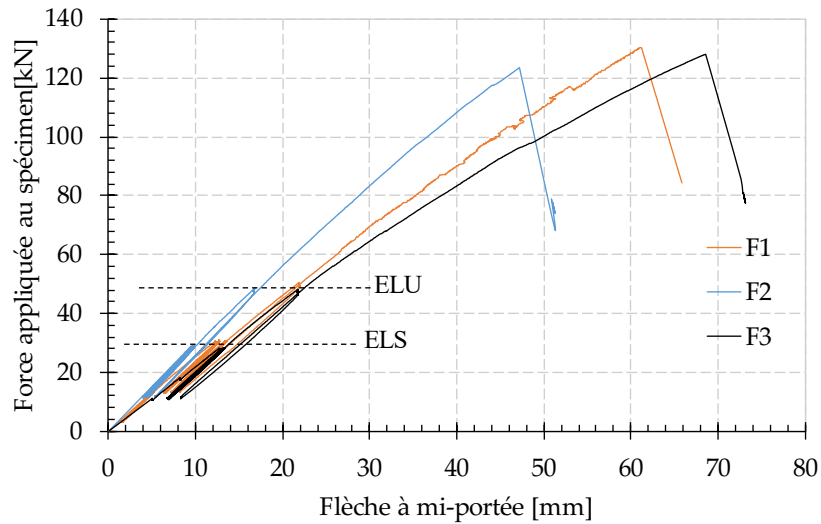


FIGURE 5. Courbes force-flèche des spécimens d'essai.

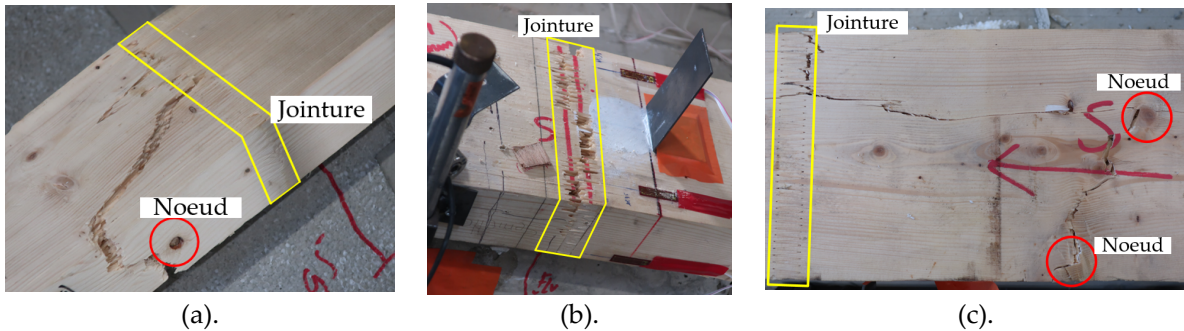


FIGURE 6. Mode de ruine des essais de flexion. (a) Essai F1, (b) Essai F2, (c) Essai F3.

D. Rigidité flexionnelle

La rigidité flexionnelle du plancher mixte est calculée à l'aide de l'équation (1).

$$(EI)_{exp} = \frac{F}{96w} [a(3L^2 - 4a^2) + 3(a+b)L^2 - 4(a+b)^3] \quad (1)$$

où a est la distance entre le premier point de chargement et le support, $a=1235$ mm ; b est la distance entre deux points de chargement consécutifs, $b=1360$ mm ; L est la portée du spécimen d'essai, $L=6550$ mm ; F est la force appliquée au spécimen; w est la flèche du spécimen à mi-portée.

La rigidité flexionnelle expérimentale des spécimens d'essai est calculée et donnée dans le **TABLEAU 1**.

TABLEAU 1. Rigidité flexionnelle et résistance maximale des spécimens d'essai.

Essai	EI_{1-ELS} (10^{13}) Nmm ²	EI_{ELU} (10^{13}) Nmm ²	F_{max} (kN)
F1	1.22	1.15	130.2
F2	1.57	1.49	123.5
F3	1.14	1.13	128

Où, EI_{1-ELS} est la rigidité flexionnelle du plancher au 1^{er} cycle de cyclage à l'ELS, EI_{ELU} est la rigidité flexionnelle à l'ELU et F_{max} est la force maximale à la ruine.

A partir des valeurs obtenues, les spécimens des essais F_1 et F_3 ont montré une rigidité similaire, tandis que celle du spécimen de l'essai F_2 est plus élevée. La résistance du béton en compression de l'essai F_2 , qui est supérieure à celle des essais F_1 et F_3 , en est partiellement la raison.

E. Glissement

Pour les trois essais F_1 , F_2 et F_3 , le glissement relatif mesuré à l'interface entre le bois et le béton au niveau des connecteurs pour différents niveaux de chargement est illustré sur la FIGURE 7(a, b et c). Le glissement maximal mesuré durant les essais F_1 , F_2 et F_3 était de 0,72 mm, 0,92 mm et 1,98 mm, respectivement. Ces valeurs de glissements sont inférieures au glissement moyen correspondant à la force maximale obtenue lors des essais de push-out (2,34 mm) (A. AL RAHIM et al., 2022). Cela indique que, dans tous les essais de flexion, les connecteurs n'ont pas encore atteint la ruine. Cela a été confirmé ultérieurement par les découpes effectuées sur les spécimens testés pour étudier l'état des connecteurs après la ruine des spécimens (FIGURE 7(d)).

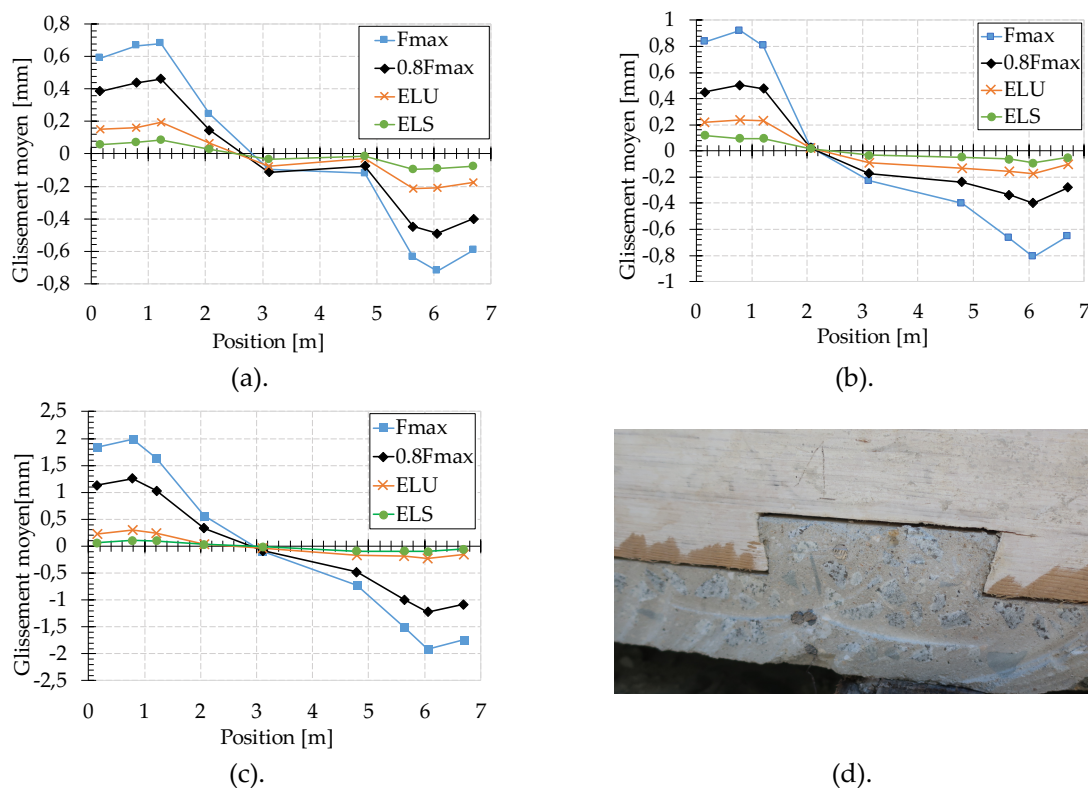


FIGURE 7. Courbes force-glissement. (a) Essai F_1 , (b) essai F_2 , (c) Essai F_3 , (d) Etat des connecteurs après la ruine des spécimens.

F. Soulèvement

Le soulèvement mesuré entre le bois et le béton tout au long de la portée du plancher est présenté sur la FIGURE 8. Le soulèvement maximal enregistré est de 0,29 mm, 0,5 mm et 0,55 mm pour les essais F_1 , F_2 et F_3 , respectivement. Ces 3 essais permettent de valider que le soulèvement entre le bois et le béton est faible. Ceci vérifie l'efficacité de la connexion qui, par sa géométrie, apporte un blocage géométrique entre les deux matériaux.

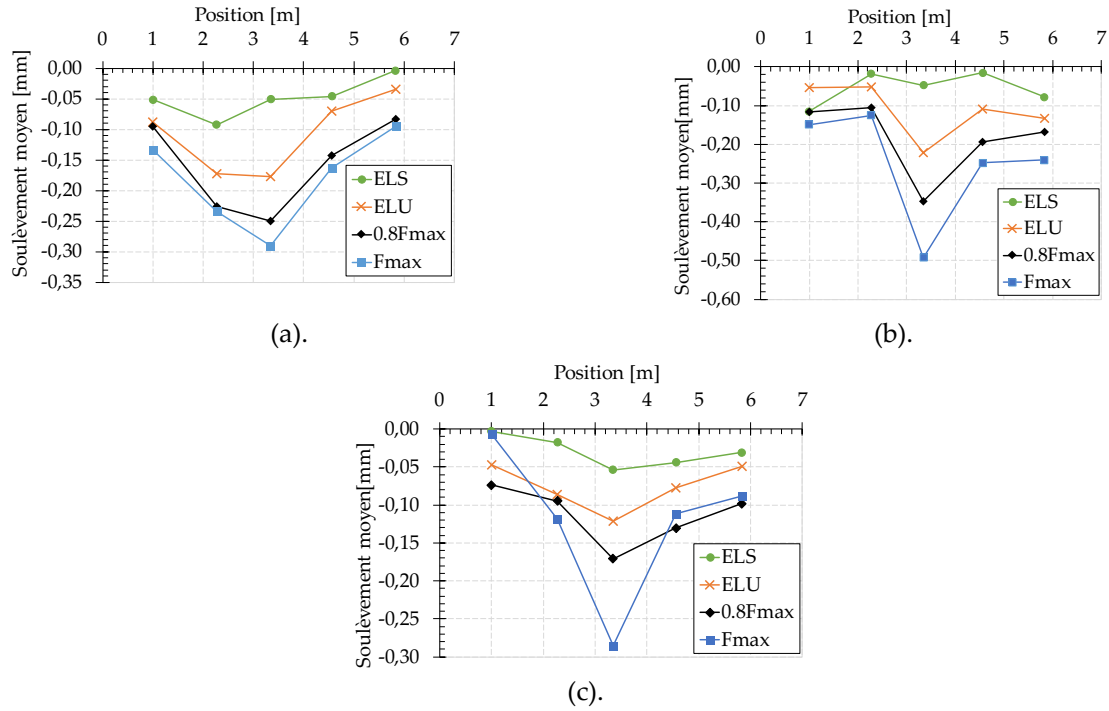


FIGURE 8. Courbes force-soulèvement. (a) Essai F₁, (b) essai F₂, (c) Essai F₃

III. ETUDE ANALYTIQUE

La méthode analytique γ , détaillée dans l'annexe B de l'Eurocode 5, est souvent utilisée pour estimer la rigidité flexionnelle effective du plancher mixte bois-béton (par exemple, (S.J. Pang et al., 2022) et (E. Martín-Gutiérrez et al., 2023)). La rigidité flexionnelle effective $(EI)_{eff}$ est donnée via l'équation suivante :

$$(EI)_{eff} = \sum_{i=1}^2 (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) \quad (2)$$

Dans cette expression, E_i , I_i et A_i désignent le module d'élasticité, le moment quadratique et la section transversale de la dalle de béton ($i=1$) et de la poutrelle en bois ($i=2$) ; a_i représente la distance entre le centre de gravité de l'élément (i) et le centre de gravité de la section mixte (voir FIGURE 9), donnée via les équations suivantes :

$$a_1 = \frac{\gamma_2 E_2 A_2}{\sum \gamma_i E_i A_i} d_{1-2} \quad (3)$$

$$a_2 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1}{\sum \gamma_i E_i A_i} d_{1-2} \quad (4)$$

$$d_{1-2} = z_2 - z_1 \quad (5)$$

où d_{1-2} est la distance entre les centres de gravités des deux éléments, z_1 et z_2 représentent les distances depuis la surface supérieure de la dalle de béton jusqu'au centre de gravité des sections transversales du béton et du bois, respectivement, et γ_i est le facteur qui prend en compte le degré d'action composite, défini dans l'intervalle de 0 (pas d'action composite) à 1 (action composite complète).

En prenant le béton comme référence ($\gamma_1=1$), le facteur γ_2 est défini comme suit :

$$\gamma_2 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 A_2 E_2 s}{K L^2}} \quad (6)$$

où K et s sont la raideur et la distance entre les connecteurs, respectivement, et L est la portée du spécimen. La raideur de la connexion à l'état limite de service et à l'état limite ultime, obtenue à l'aide de l'essai push-out (A. AL RAHIM et al., 2022), est de 184.8 kN/mm et 167.3 kN/mm, respectivement.

La position du centre de gravité de la section mixte z_c (voir FIGURE 9), mesurée par rapport à la surface supérieure de la dalle de béton, est donnée via l'équation suivante :

$$z_c = \frac{\sum_{i=1}^2 (\gamma_i E_i A_i z_i)}{\sum_{i=1}^2 (\gamma_i E_i A_i)} \quad (7)$$

Dans le présent article, pour le calcul analytique, le mécanisme de fissuration est approximé en négligeant la contribution des retombées en béton, en les considérant totalement fissurées. Seules les armatures en acier HA8 sont prises en compte (voir FIGURE 9).

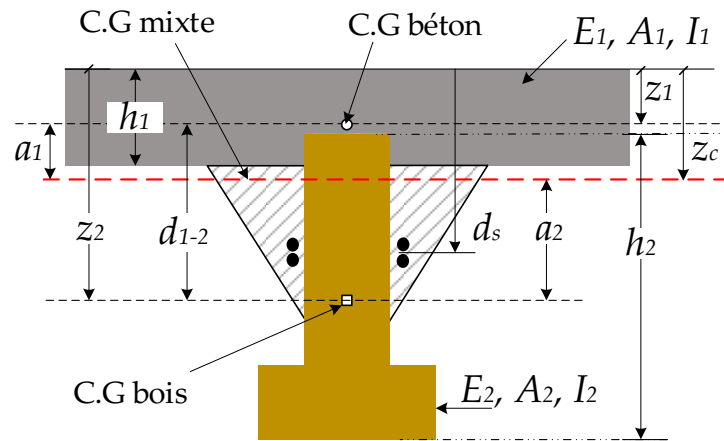


FIGURE 9. Section mixte bois-béton du spécimen d'essai avec les retombées en béton fissurées.

où h_1 et h_2 sont les hauteurs de la dalle de béton et de la poutrelle en bois, respectivement, et d_s est la position des armatures en acier HA8 par rapport à la surface supérieure en béton. Plusieurs études significatives

Les paramètres géométriques indiqués sur la FIGURE 9 sont mesurés pour chaque essai et donnés dans le TABLEAU 2.

TABLEAU 2. Propriétés géométriques des spécimens d'essai.

Elément	Paramètre	F1	F2	F3
Dalle de béton	h_1 [mm]	76	83.5	79.5
	z_1 [mm]	41.5	44.1	43.2
	A_1 [mm ²]	34875	37982	36614
	I_1 [mm ⁴]	33992832	36126620	37700607
	d_s [mm]	155	159	159.5
Poutrelle en bois	h_2 [mm]	236.5	234.5	234.5
	z_2 [mm]	99.5	98.5	99.4
	A_2 [mm ²]	20337	20136	19897
	I_2 [mm ⁴]	103000000	99900000	99700000

Les différents paramètres de la méthode analytique Gamma sont calculés et donnés dans le **TABLEAU 3**.

TABLEAU 3. Rigidité flexionnelle effective des spécimens d'essai de flexion.

Niveau de charge	Paramètre	F ₁	F ₂	F ₃
ELS	$(EI)_{eff}[10^{13}\text{Nmm}^2]$	1.20	1.32	1.20
	$EI_{exp}[10^{13}\text{Nmm}^2]$	1.22	1.57	1.14
	Erreur (%)	1.6	15.9	5
ELU	$(EI)_{eff}[10^{13}\text{Nmm}^2]$	1.19	1.3	1.19
	$EI_{exp}[10^{13}\text{Nmm}^2]$	1.15	1.49	1.13
	Erreur (%)	3.3	12.7	5

Selon les résultats indiqués dans le **TABLEAU 3**, une bonne corrélation entre la méthode analytique et l'expérimentation peut être observée pour les essais F₁ et F₃. En revanche, pour l'essai F₂, la rigidité flexionnelle expérimentale est sous-estimée par la méthode Gamma, tant à l'état limite de service qu'à l'état limite ultime, avec une erreur de 15,9% et 12,7%, respectivement. Ceci peut être dû à une prise en compte inadéquate de la fissuration du béton, négligeant ainsi l'effet bénéfique de la résistance en traction du béton dans l'essai F₂, qui est supérieure à celle des essais F₁ et F₃, sur la formation des fissures.

IV. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cet article présente l'étude expérimentale et analytique du comportement en flexion d'un système de plancher mixte bois-béton avec une connexion innovante par encoches, qui peut être adopté en construction neuve ou en réhabilitation. Afin d'évaluer le mode de ruine, la rigidité flexionnelle, le glissement et le soulèvement, des essais de flexion inversés à six points sont réalisés sur trois spécimens d'une portée réelle de 6.55 m. Le mode de ruine, commun pour les 3 spécimens, est dominé par une rupture fragile en traction-flexion de la semelle de la poutre en bois. Il est à noter qu'après la ruine, aucune défaillance n'a été observée ni dans la dalle de béton ni dans les connecteurs par encoches. L'analyse du glissement et du soulèvement tout au long de la portée a mis en lumière l'efficacité de la connexion par cisaillement, éliminant ainsi le besoin d'éléments mécaniques supplémentaires.

De plus, la méthode analytique proposée dans l'Eurocode 5 est utilisée pour calculer la rigidité flexionnelle effective du plancher. Le mécanisme de fissuration est pris en compte d'une manière simplifiée, en considérant que la totalité des retombées en béton est fissurée. Une bonne corrélation, comparée aux résultats expérimentaux, est atteinte. Actuellement, une nouvelle méthodologie est en cours de développement afin d'affiner la représentation de la fissuration du béton dans le calcul analytique.

Afin d'étudier le comportement à long terme du plancher mixte proposé, une campagne expérimentale est lancée au laboratoire LGCGM, sur le site de l'INSA de Rennes. Elle permettra de suivre l'évolution de déformations et de la flèche du plancher au cours du temps.

REFERENCES

Ceccotti, A., « Composite concrete–timber structures », Prog. Struct. Engng Mater, vol. 4, n° 3, 2002, p. 264–275.

Faggiano, B., Marzo, A., Formisano, A., Mazzolani, F.M., « Innovative steel connections for the retrofit of timber floors in ancient buildings - A numerical investigation ». *Computers and Structures*, vol. 87, n° 1-2, 2009, pp. 1-13.

Zhang, X., Hu, X., Gong, H., Zhang, Lv, J. Z., Hong, W., Experimental study on the impact sound insulation of cross laminated timber and timber-concrete composite floors, *Appl. Acoust.* 161 (2020), 107173.

Xie, Z., Hu X., Du, H., Zhang, X., Vibration behavior of timber-concrete composite floors under human-induced excitation, *Journal of Building Engineering* 32 (2020), 101744.

Frangi, A., Fontana, M., Hugli, E., Jöbstl, R., Experimental analysis of cross-laminated timber panels in fire. *Fire Safety J* 44(8) (2009). <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2009.07.007>.

Dias, A., Mechanical behaviour of timber-concrete joints, PhD thesis, Technische Universiteit Delft, April 2005.

Dias, A.M.P.G., Jorge, L.F.C., The effect of ductile connectors on the behaviour of timber-concrete composite beams, *Eng. Struct.* 33 (11) (2011) 3033–3042, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.05.014>.

Ceccotti, A., Composite concrete-timber structures, *Prog. Struct. Eng. Mat.* 4 (2002) 264–275, <https://doi.org/10.1002/pse.126>.

Linden, M.V.D., Timber-concrete composite beams, *HERON* 44 (3) (1999) 215–239.

Gutkowski, R, Brown, K, Shigidi, A, Natterer, J. Laboratory tests of composite woodconcrete beams. *Constr Build Mater* 2008;22(6):1059–66.

FUENTES, S., Caractérisation expérimentale, en flexion et en traction, des poutres en bois massif, Rapport de laboratoire, Ecole supérieure du Bois, Nantes, Janvier 2022.

Eurocode 4, EN 1994-1-1:2005/Calcul des structures mixtes acier-béton, AFNOR, 2005.

AL RAHIM, A., HENG, P., LEPOURRY, C., GERARD, L., & SOMJA, H. (2022). Caractérisation expérimentale du comportement statique d'une connexion innovante par encoches pour les planchers mixtes bois – béton. *Academic Journal of Civil Engineering*, 40(1), 157-161. <https://doi.org/10.26168/ajce.40.1.39>

Pang, S.J., Ahn, K.S., Jeong, S.m., Lee, G.C., Kim, H.S., Oh, J.K., Prediction of bending performance for a separable CLT-concrete composite slab connected by notch connectors. *Journal of Building Engineering* 49 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103900>.

Martín-Gutiérrez, E., Estévez-Cimadevila, J., Suárez-Riestra, F., Otero-Chans, D., Flexural behaviour of a new timber-concrete composite structural flooring system. Full scale testing. *Building Engineering* 64 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105606>.