

# Comportement Mécanique en Torsion des Structures Multi-matériaux et instabilité de déversement. Application aux Structures Mixtes Acier-Bois et Composites-bois.

DARWICH Hassan

*Laboratoire des matériaux composites EA 7427, Université Claude Bernard Lyon 1, France*

**RESUME** Dans la construction, les structures multi-matériaux peuvent être une solution très efficace sur le plan mécanique. En effet, l'hybridation permet de renforcer les profilés ouverts (en I, en C ..., en acier ou en GFRP), face aux instabilités structurelles comme le déversement. Cette étude examine le comportement en flexion à court terme et jusqu'à rupture, des poutres hybrides acier-bois et composite-bois. Plusieurs configurations ont été étudiées avec une connexion par boulonnage. Les résultats des essais ont montré un gain remarquable de la capacité portante apporté par les poutres en bois non classé, par retard de déversement des profilés (GFRP ou acier). Des simulations numériques par éléments finis volumiques ont été effectuées pour évaluer le comportement à la ruine de ces structures hybrides, en introduisant la non-linéarité géométrique des éléments. Une très bonne prédiction de la charge de ruine par déversement est obtenue avec des écarts faibles (de l'ordre de 4%). Des différences plus importantes peuvent être relevées sur les flèches (de l'ordre de 20%) du fait de la variabilité et de l'hétérogénéité du bois non prises en compte dans le modèle. Une étude paramétrique a montré l'influence des propriétés du bois et de la disposition des boulons sur le comportement des poutres hybrides. Cette étude ouvre la voie à une nouvelle hybridation des matériaux de construction afin d'optimiser leur utilisation dans le secteur de la construction.

**Mots-clefs** Profilés GFRP, Poutre Bois, Poutre Hybride, Expérimentations, Modélisations non-linéaires par Eléments Finis.

## I. INTRODUCTION

Dans le domaine de la construction, l'acier est largement utilisé mais son exploitation est limitée par les instabilités. Les matériaux innovants tels que les profilés pultrudés en fibre de verre (GFRP) offrent des avantages mécaniques tels que la résistance à la flexion élevée, la légèreté et la résistance à la corrosion (Z. Jin Yang et al 2012). Cependant, l'utilisation des sections composées de ces matériaux peut également subir des instabilités telles que le déversement. Ces instabilités peuvent compromettre la sécurité des structures et réduire leur durabilité à long terme (F. Aydin, M. Saribiyik. 2013).

L'association des éléments en acier ou en GFRP avec des matériaux traditionnels de la construction comme le bois permet de pallier ces instabilités mais aussi certains inconvénients mécaniques du composite comme ses faibles modules d'élasticité et de cisaillement (F. Aydin, M.

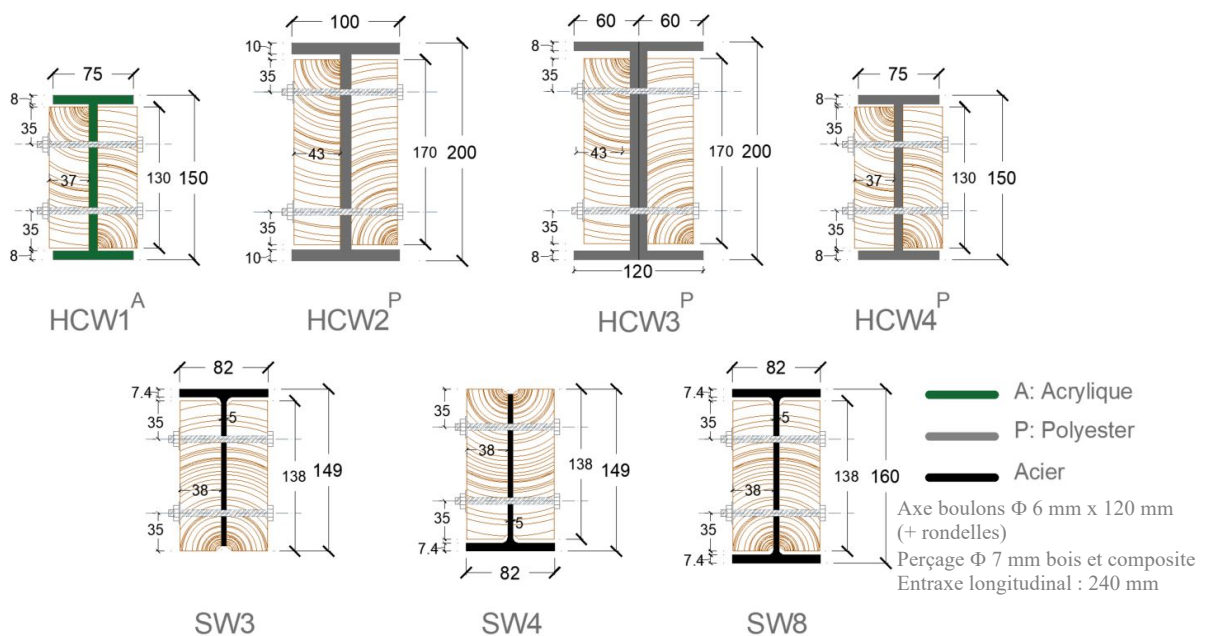
Saribiyik. 2013). Pour relever ce défi, à l’instar des structures mixtes acier-bois, plusieurs études ont proposé d’utiliser des poutres hybrides qui combinent les avantages des matériaux GFRP et traditionnels comme les dalles en béton armé (A. Koaik et al 2017) (J. Correia et al 2007).

Le bois de structure, avec ses avantages tels que sa résistance mécanique élevée, sa légèreté et sa durabilité, s’avère être un matériau idéal pour une bonne hybridation. Ce matériau a été utilisé dans plusieurs formes d’hybridation telles que l’association avec des planchers en béton (E. Augéard et al 2019), ou comme la première génération des « Fitch beams » qui est un assemblage boulonné d’une plaque d’acier au milieu de deux lamelles de bois (M.T. Tsai et T. Le 2018), ou des poutres GFRP-bois (M. Corradi et A. Borri 2007). Dans les deux dernier cas, l’acier ou le GFRP viennent en complément pour renforcer le bois.

Dans le cadre de la présente recherche, le bois de structure non classé sera associé par boulonnage à des poutres en section ouverte (profilés en I d’acier ou de GFRP), pour obtenir une structure hybride innovante. Les poutres en bois servant de renfort aux poutres acier ou GFRP. Les intérêts sont ainsi de conserver la légèreté et d’optimiser les performances mécaniques de ces structures retardant les phénomènes d’instabilité par déversement.

## II. Constitution des poutres hybrides

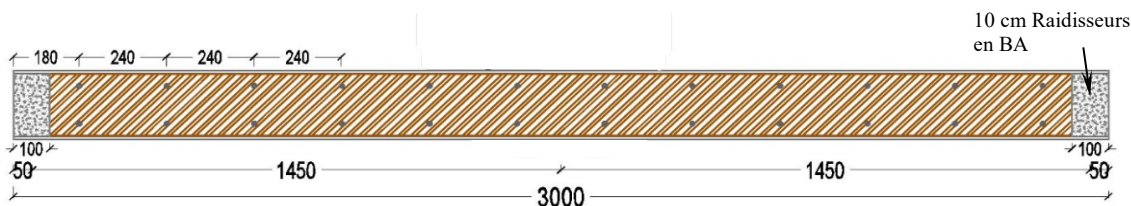
### A. Géométrie



**FIGURE 1.** Configurations des poutres hybrides étudiées (Cotes en mm)

Quatre configurations de poutres hybrides GFRP-bois (10 spécimens) et trois de poutre acier-bois (6 spécimens) ont été étudiées. Avec 3 m de longueur, la géométrie de la section et la nature du profilé - composite (polyester ou acrylique), acier (profilé en I ou en T), sont les principales variables. Chaque profilé est connecté au niveau de l’âme par 12 paires de boulons de diamètre 6

mm (couple de serrage de 8 N.m) espacées de 24 cm, avec deux poutres en bois (Douglas non classé) de section rectangulaire. Des raidisseurs en béton armé de 10 cm de largeur ont été coulés aux deux extrémités pour éviter une rupture prématurée aux appuis. Les configurations des poutres hybrides testées sont présentées sur les figures 1 et 2.



**FIGURE 2.** Configurations longitudinales des poutres hybrides étudiées (Cotes en mm)

### B. Matériaux utilisés et méthodes de caractérisation

Pour constituer ces poutres hybrides, des profilés IPE 160 en acier standard ont été utilisés, avec un module d'élasticité  $f_y=330$  MPa déterminé par des essais de traction jusqu'à rupture des éprouvettes prélevées dans les semelles et âme des profilés (B. Jurkiewicz et al 2018). De plus, des essais de traction ont été menés sur des échantillons pris dans des profilés GFRP qui nous ont permis d'estimer le module d'élasticité longitudinal, le coefficient de Poisson et la contrainte à rupture en traction ( $E_L= 32000$  MPa  $\pm 9\%$ ,  $\nu=0.24$  et  $f_u=420$  MPa). Le bois a été également testé à petite échelle en flexion 4 points avec des échantillons sans et avec défaut, selon la norme française **NF EN 408 +A1** et **B51-008**. Les valeurs du module d'élasticité longitudinal et de la contrainte limite de rupture en flexion ont été obtenues ( $E_L= 5000$  à  $11000$  MPa,  $\sigma_m=21$  à  $60$  MPa) et on remarque une très grande variabilité (de l'ordre de 200% pour le module d'élasticité).

Comme le module de cisaillement peut jouer un rôle important dans le calcul de déversement, et face aux difficultés de le mesurer avec des échantillons à petite échelle et à la grande hétérogénéité présente dans le bois non classé, des essais d'analyse inverse par flexion et torsion (H. Darwich et al 2022) ont été effectués sur les composants des poutres hybrides dans le but d'obtenir le module d'élasticité longitudinal et le module de cisaillement. Les valeurs trouvées pour  $E_L$  correspondent à celles trouvées à petite échelle, celles obtenues pour  $G_{LT}$  sont conformes à la littérature (D. Guitard et F. El Amri 1987).

## III. Programme expérimental

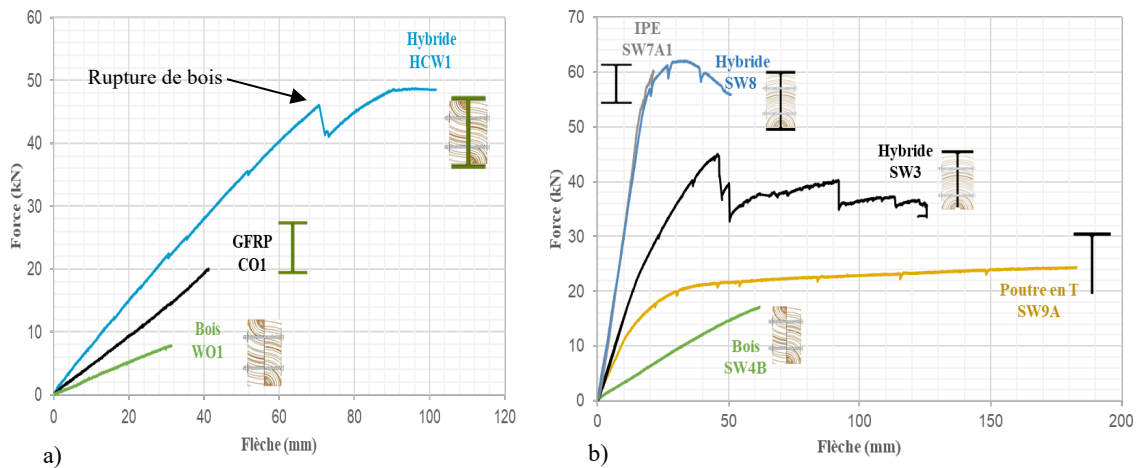
### A. Dispositif de test

Les poutres hybrides ainsi que leurs composants ont été testés en flexion 4 points jusqu'à la rupture, avec une vitesse de déplacement imposé de 4 mm/min. Durant l'essai, différents paramètres ont été mesurés à savoir les déplacements (horizontaux et verticaux) à l'aide des capteurs LVDT (Linear Variable Differential Transformer), les déformations à mi-travée avec des jauges de déformation, ainsi que les rotations (dans le plan et hors plan de flexion) à mi-travée par des inclinomètres. Les détails sont montrés sur la figure 3.



**FIGURE 3.** Dispositif de test de flexion des poutres hybrides

*B. Résultats expérimentaux*



**FIGURE 4.** Comportement de la poutre hybride : a) GFRP-bois, b) acier-bois

Les essais de flexion des poutres hybrides GFRP-Bois présentent un comportement linéaire jusqu'à la ruine qui se produit par déversement généralisé, accompagné par un endommagement par compression de la semelle supérieure du profilé, précédé par la rupture partielle des poutres en bois (sauts sur la courbe HCW1). Pour les poutres hybrides acier-bois, la comparaison avec le comportement de l'IPE seul tend à montrer que pour le comportement en phase élastique, l'amorce du déversement et le mode de ruine ne sont quasiment pas modifiés par la présence du bois (Figure 4.). La charge de ruine est légèrement plus élevée dans le cas des poutres mixtes (environ 5 %). En revanche, pour les poutres hybrides en T, la limite élastique de l'acier a été dépassée et la ruine a eu lieu par la rupture des poutres en bois sans aucun signe d'instabilité. Ceci renforce l'hypothèse que les dimensions de la section sont les facteurs qui influencent le plus ces structures hybrides. Le Tableau 1 montre les charges de ruine des poutres hybrides et leurs composants, ainsi que les gains de capacité portante apportés par le bois sur les profilés GFRP ou acier seul.

**TABLEAU 1.** Charges de ruine des poutres hybrides et de leurs composants et gains apportés par le bois

Poutres Hybrides		HCW1.1	HCW1.2	HCW1.3	HCW2.1	HCW2.2	HCW2.3	HCW3.1	HCW4.1	HCW4.2	SW3	SW4	SW8
Charge de ruine (kN)	Bois (Contrainte de flexion)	7,87 (24 MPa)			29,80 (45 MPa)	33,25 (50 MPa)		20,8 (31 MPa)	7,87 (24 MPa)		17,2 (53,4 MPa)		
	GFRP	20,3			37,1			58,1	18,5		24,5	19,4	60,3
	Hybrides	48,5	46,2	41,5	58,5	67,1	78,8	73,9	38,6	35,5	45,1	36,3	62,1
Gains Hybrides/GFRP		139 %	128 %	104 %	58 %	81 %	112 %	27 %	109 %	92 %	84 %	87 %	3 %

Remarque : les valeurs de charge de ruine et de contrainte à rupture du bois ont été déterminées par des essais effectués sur des éléments du même lot.

#### IV. Modélisation numérique MEF

##### A. Maillage et conditions aux limites

Pour prédire le comportement mécanique instantané de ces structures en flexion et en torsion, un modèle élément finis 3D a été créé sur Cast3m avec des éléments de maillage CUB8 (hexaèdre à 8 nœuds avec interpolation linéaire). La taille des éléments varie entre 2 et 6 mm le long de la poutre. Pour simplifier le maillage et réduire le temps de calcul, les connexions par boulons ont été représentées par des cubes de 6x6x1 mm<sup>3</sup> avec les mêmes propriétés mécaniques que les connecteurs réels. Cette approche simplifiée ne permet pas de modéliser précisément la réponse locale autour des boulons, mais elle est suffisante pour représenter le comportement global et jusqu'à l'instabilité. Certaines propriétés élastiques du GFRP et du bois ( $E_L$  et  $G_{LT}$ ) ont été déterminées par analyse inverse d'essais de flexion 3 points et de torsion selon une procédure décrite par (Almir Barros & Henriette, 2007) (D. Guitard et F. El Amri 1987).

**FIGURE 5.** Détail du maillage des poutres hybrides et conditions aux limites

La figure 5 montre le maillage de la poutre et de la connexion ainsi que les conditions aux limites de modèle de flexion. Le modèle de torsion a été montré par (H. Darwich et al 2022). Le chargement a été appliqué par une pression suiveuse. Pour les appuis, les déplacements verticaux (selon z) ont été bloqués sur une ligne en face inférieure de la semelle inférieure (section A de la figure 3). Pour les points de chargement sur les semelles supérieures, les déplacements horizontaux (selon y) des nœuds des deux surfaces de contact ont été bloqués. La modélisation de

l'instabilité de déversement nécessite la création d'une déformée initiale de la poutre en utilisant la procédure Flamb.

### B. Résultats numériques

Toutes les mesures ont été comparées aux résultats MEF. La figure 6 montre les résultats des déplacements horizontaux et de rotation pour la configuration HCW4.2. Les tendances sont similaires et les écarts restent modérés. Il est important de noter sur la figure 6.a que le capteur de déplacement a été retiré à 30 kN pour éviter de l'endommager, ce qui explique l'absence de variation de force sur la courbe au-delà de 30 kN. La figure 6.b montre clairement l'augmentation croissante de la rotation de torsion à partir de 33kN jusqu'à rupture, annonçant le déversement. Le modèle proposé décrit cet aspect assez précisément. Le tableau 2 montre les écarts entre les charges de ruine numériques et expérimentales. Ces écarts s'expliquent par des ruptures prématurées de certaines poutres en bois, la non-linéarité matérielle et l'endommagement n'étant pas prise en compte dans ces simulations.

**FIGURE 6.** Comparaison MEF/Essai à mi-travée (a) Déplacement horizontal, (b) Rotation pour la poutre HCW4.2

**TABLEAU 2.** Ecart entre charges de ruine des poutres hybrides MEF / Essais

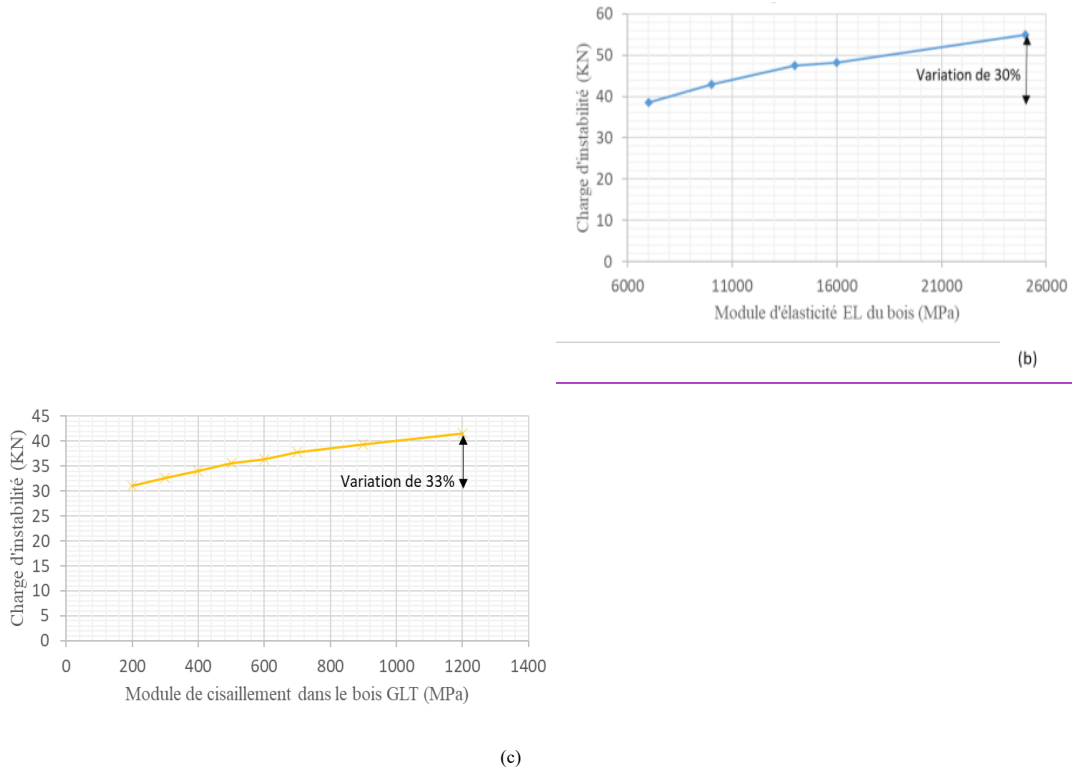
<i>Poutres Hybrides</i>	HCW1.3	HCW2.2	HCW2.3	HCW4.1	HCW4.2	SW3	SW8
<i>Ecart MEF / Exp</i>	11,11 %	10,77 %	1,5 %	0,69 %	0,39 %	2,19 %	2,5 %

La charge de ruine numérique du tableau correspond à la charge maximale où la convergence de calcul n'est plus possible. Ceci est due à l'instabilité géométrique.

### C. Etude paramétrique

Une étude paramétrique a été menée pour examiner la sensibilité de certains paramètres de calcul comme les propriétés des matériaux par exemple (Module d'élasticité longitudinal du bois, module de cisaillement  $G_{LT}$  du bois) mais également pour permettre une optimisation des sections hybrides. La première étape de cette analyse, montrée sur la figure 7.a, consistait à faire varier le nombre de boulons dans la configuration HCW41 entre 6 et 64 paires (12 paires de boulons ont été testées en réalité). Les résultats ont montré qu'une multiplication par 10 du nombre de boulons

entraînait une augmentation de 33 % de la charge de ruine (instabilité). Au-delà de 24 paires de boulons, les valeurs de charge de ruine étaient presque constantes et proches de la charge de ruine si la connexion entre le bois et le composite était parfaite, comme dans le cas d'un collage.



**FIGURE 7. Etude paramétrique menée sur la poutre hybride HCW41**

Le module d'élasticité longitudinal  $E_L$  a été augmenté entre 6000 et 25000 MPa, ce qui a eu pour conséquence une augmentation de 30 % de la charge de ruine (figure 7.b). Le module de cisaillement  $G_{LT}$  a été également augmenté entre 200 et 1200 MPa ce qui a impliqué 33 % d'augmentation de la charge de ruine (figure 7.c). Enfin, nous avons fait varier la largeur de bois entre 10 et 120 mm (figure 7.d) et les résultats montrent qu'une largeur importante permet de multiplier par plus de 4 la charge de ruine, le mode de ruine n'étant plus l'instabilité mais la rupture des matériaux GFRP.

## V. Conclusion

Plusieurs conclusions peuvent être tirées de cette étude :

- L'efficacité de l'association composite-bois et acier-bois conduit à l'augmentation de la capacité portante des poutres hybrides par retardement du déversement.
- Le modèle MEF a été validé et l'étude paramétrique menée permet de mieux comprendre l'influence des propriétés / des dimensions des éléments bois ou du nombre de boulons sur le comportement et la charge de ruine des poutres hybrides.

- Le modèle MEF prédit de façon correcte la charge de ruine et le comportement non-linéaire de ces structures hybrides.

De nombreux points sur le comportement de ces structures restent à approfondir et nécessitent des travaux supplémentaires : essais avec d'autres géométries et prise en compte dans le modèle numérique de la non-linéarité matérielle du bois et de critères de ruine pour le bois et le composite.

## REFERENCE

Z. Jin Yang; Z. Guang You; C. Yun He; L. Shi Zhen. (2012). Experimental Study on the Flexural Property of GFRP I-Beam. *Advanced Materials Research*; 594–597. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.594-597.757>

F. Aydin, M. Saribiyik. (2013). Investigation of flexural behaviors of hybrid beams formed with GFRP box section and concrete. *Construction and Building Materials*; 563–569. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.060>

A. Koaik, S. Bel, B. Jurkiewicz. (2017). Experimental Tests and Analytical Model of Concrete-GFRP Hybrid Beams under flexure. *Composite Structures*, 180, 192-210. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.07.059>

J. Correia, F. A. Branco, J. G. Ferreira (2007). Flexural behavior of GFRP- concrete hybrid beams with interconnection slip. *Composite Structures*, 77 (1), 66-78.

E. Augeard, L. Michel, E. Ferrier (2019). Composite Wood-Concrete Panels - Effect of Cyclic Loading and Creep. *International Interactive Symposium on Ultra-High-Performance Concrete*, 2(1). <https://doi.org/10.21838/uhpc.9735>

M.-T. Tsai et T. Le (2018). Determination of Initial Stiffness of Timber–Steel Composite (TSC) Beams Based on Experiment and Simulation Modeling. *Sustainability*, 10 (4), 1220. <https://doi.org/10.3390/su10041220>.

M. Corradi et A. Borri (2007). Fir and chestnut timber beams reinforced with GFRP pultruded elements, *Compos.Part B Eng* 38 (2), 172-181. <https://doi.org/10.1051/10.1016/j.compositesb.2006.07.003>

H. Darwich, C.Grazide, B.Jurkiewicz (2022). Comportement en flexion des poutres mixtes composites bois. *Academic journal of civil engineering*, 40 (1), 17-20, <https://doi.org/10.26168/ajce.40.1.5>

H. Darwich, C.Grazide, B.Jurkiewicz (2022). Caractérisation en torsion des poutres mixtes Composite-Bois. *Academic journal of civil engineering*, 40 (1), 21-24, <https://doi.org/10.26168/ajce.40.1.6>

D. Guitard et F. El Amri (1987). Modèles prévisionnels de comportement élastique tridimensionnel pour les bois feuillus et les bois résineux, *Ann Sci For* 44 (3), 335-358. <https://doi.org/10.1051/forest:19870305>

A. B. da S. Santos Neto, H. Lebre La Rovere (2007). Flexural Stiffness characterization of fiber reinforced plastic (FRP) pultruded beams. *Composite Structures*, 81 (2), 274-282. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.08.016>