

Modélisation du comportement non-linéaire des poutres hybrides Composites-Bois

DARWICH Hassan, GRAZIDE Cécile, JURKIEWIEZ Bruno

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

RESUME Cet article présente les simulations numériques par éléments finis volumiques du comportement en flexion à court-terme et jusqu'à la rupture, de poutres hybrides innovantes en GFRP-bois. Plusieurs configurations géométriques ont été testées en flexion. Les résultats des essais ont montré un gain remarquable de capacité portante apporté par les poutres en bois qui permettent de retarder le déversement des profilés GFRP. Ce gain dépend principalement des dimensions de la section. Le comportement de ces poutres a été simulé en tenant en compte de la non-linéarité géométrique. Les résultats numériques et les mesures présentent des écarts faibles en termes de charge de rupture, avec une allure de comportement similaire. Les écarts peuvent provenir de la non-linéarité matérielle ou de l'hétérogénéité du bois. Cette étude ouvre la voie à une nouvelle hybridation des matériaux de construction afin d'optimiser leur utilisation dans ce secteur d'activité.

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

I. INTRODUCTION

Les poutres pultrudés en fibres de verre (Glass Fiber Reinforced polymers - GFRP) sont de plus en plus utilisées dans la construction en raison de leur faible poids, leur haute résistance et leur durabilité (Hota et al 2002). Cependant, le comportement en flexion de ces poutres est sujet à l'instabilité de déversement qui peut entraîner leur rupture (F. Aydin, M. Saribiyik. 2013). La simulation numérique par éléments finis MEF est un outil utile pour étudier le comportement des poutres GFRP pultrudées en flexion et prédire leur comportement en cas de déversement. Cependant, il est nécessaire de tenir compte de la non linéarité géométrique de ces poutres pour obtenir des résultats les plus précis possible.

En outre, une synergie remarquable est obtenue lorsque ces profilés pultrudés sont utilisés dans des systèmes hybrides, en particulier, des systèmes structurels combinant des profilés pultrudés en GFRP et des matériaux de construction traditionnels tels que dalles en béton proposés par différents auteurs (A. Koaik et al 2017) (J. Correia et al 2007). Ces systèmes contribuent à

surmonter certains inconvénients mécaniques des profilés de section ouverte, résultant de la combinaison de la torsion et du déplacement horizontal (J.T. Mottram 1992).

Une alternative intéressante à une dalle béton armé pour le renforcement des profilés en I GFRP est l'emploi de poutres en bois connectées au GFRP. Celles-ci peuvent retarder l'instabilité de déversement des poutres GFRP par l'augmentation de l'inertie de torsion et de flexion transversale que le bois apporte.

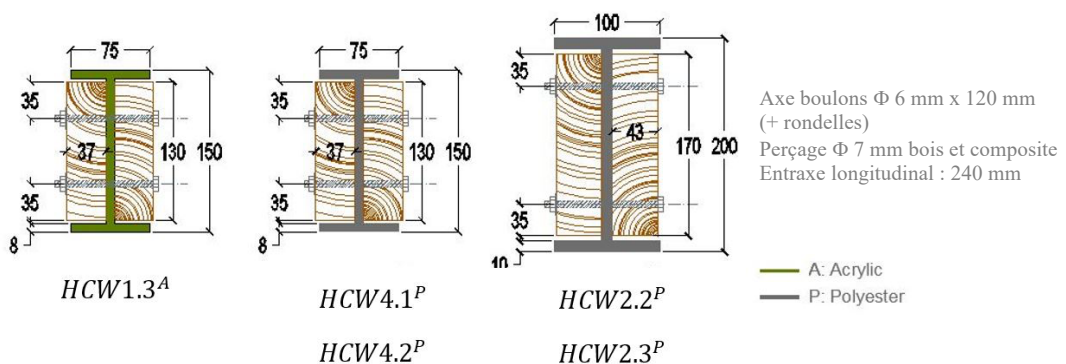
Dans la littérature, l'utilisation des matériaux composites et du bois dans la construction présente un intérêt économique au regard de leurs masses volumiques faibles associées à une résistance élevée.

La plupart des études de poutre hybride GFRP - bois considèrent que les matériaux composites viennent renforcer le bois (M. Corradi et A. Borri 2007).

Dans cet article, nous présentons la simulation numérique par éléments finis du comportement jusqu'à la ruine des poutres GFRP pultrudées en flexion renforcé par des éléments en bois. Le modèle numérique est d'abord décrit et les résultats numériques obtenus pour différentes configurations géométriques sont confrontés aux mesures (le détail de la campagne expérimentale est présenté dans H. Darwich et al 2022). Une étude paramétrique est également proposée.

II. Présentation sommaire de la campagne d'essais

Cinq poutres hybrides GFRP-Bois ont été testées en flexion 4 points avec une portée de 2,9 m. La géométrie de la section et la nature du profilé composite (polyester ou acrylique) sont les principales variables. Chaque composant élémentaire a également été testé au préalable dans le domaine élastique. 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) espacés tous les 24 cm, avec deux poutres en bois (douglas non classé) de section rectangulaire. La constitution et les dimensions des poutres hybrides sont présentées en figure 1 et dans le tableau 1.



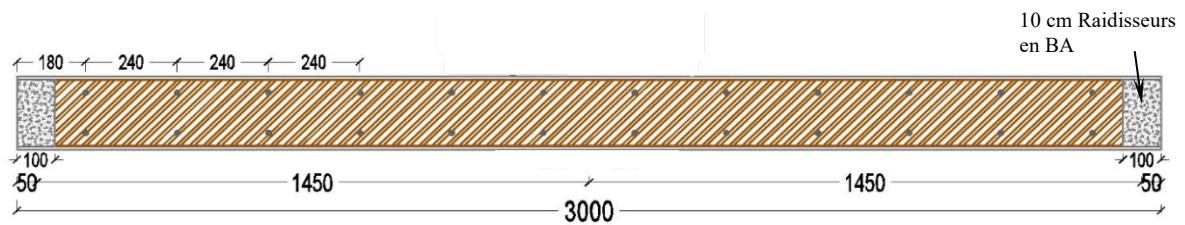


FIGURE 1. Configurations des poutres hybrides testées (cotes en mm)

TABLEAU 1. Composition des poutres hybrides

Poutres Hybrides	HCW1.3 ^A	HCW4.1 ^P	HCW4.2 ^P	HCW2.2 ^P	HCW2.3 ^P
Poutres Bois	15R / 16R	18R / 20R	17R / 19R	1R / 7R	6R / 8R
Profilés GFRP	Co8 ^A	Co9 ^P	Co11 ^P	Co12 ^P	Co13 ^P

Remarque : les appellations 15R, 16R, Co8, Co9 ... sont des dénominations non conventionnelles utilisées au laboratoire. Les éléments de bois utilisés dans cette étude sont des bois douglas non classés issus d'une scierie locale.

Les résultats des essais de flexion ont montré que les poutres hybrides présentent un comportement quasi linéaire jusqu'à la rupture qui se produit par déversement généralisé, accompagné de l'endommagement par compression de la semelle supérieure du profilé pultrudés. Dans certain cas, la rupture globale est précédée par la rupture partielle en traction – cisaillement des poutres en bois. Les gains de charge maximale par rapport aux poutres GFRP seules peuvent atteindre 140 % (H. Darwich et al 2022).

La présente étude a pour objectifs la modélisation numérique par éléments finis MEF du comportement en flexion de ces poutres en tenant en compte de la non linéarité géométriques de ses composants. De plus, pour mieux comprendre l'effet du nombre des boulons, ou des propriétés élastiques du bois sur la capacité portante de ces poutres, une étude paramétrique a été menée.

III. Modélisation MEF

A. Maillage

Pour prédire le comportement mécanique en flexion sous chargement instantané, un modèle 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 mm³ supposées élastique linéaire isotrope. Cette approche simplifiée ne permet pas de modéliser précisément la réponse locale autour des boulons. Des simulations numériques complémentaires ont montré que cette approche est suffisante pour représenter le comportement global jusqu'à l'instabilité. La figure 2 montre les détails du maillage et de la connexion.

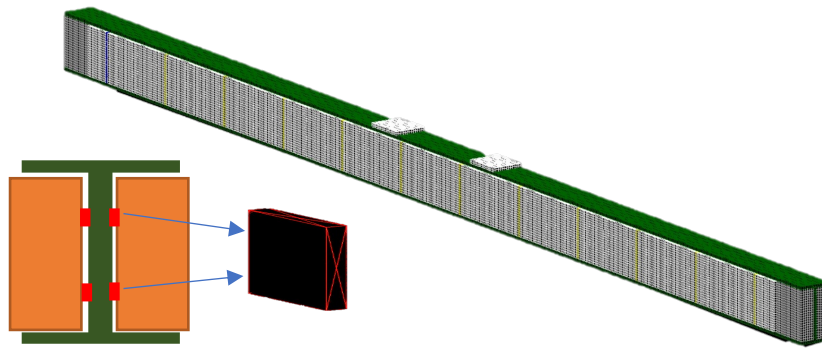


FIGURE 2. Détail du maillage des poutres hybrides et de la connexion des éléments

B. Propriétés des matériaux

Dans cette étude, les matériaux sont supposés élastiques jusqu’à la ruine. Les poutres hybrides sont constituées de poutres en bois Douglas de densité moyenne de 428 kg/m³ et une teneur en humidité de 12,8 %, conforme aux normes EN 1995-1-1 :2004+A1 :2008 (2.3.1.3) pour la plupart des bois résineux. Ces poutres hybrides sont également composées de poutre en I GFRP (verre renforcé de polyester) d’une densité comprise entre 1750 et 1900 kg/m³. 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). Chaque couple de poutres en bois a été choisi pour leurs modules d’élasticité longitudinaux proches de telle sorte à se rapprocher de la symétrie en termes de rigidité flexionnelle. Les autres propriétés élastiques (E_R , E_T , G_{LR} , G_{RT} et les coefficients de Poisson) ont été prises la littérature (D. Guitard et F. El Amri 1987). Ces propriétés, utilisées dans les simulations MEF, sont données dans le tableau 2.

TABLEAU 2. Propriétés élastiques des composants des poutres hybrides

<i>Poutres Bois</i>											<i>Profils pultrudés en GFRP</i>		
<i>poutres</i>	1R	6R	7R	8R	15R	16R	17R	18R	19R	20R	Co8	Co9/ Co11	Co12/ Co13
E_L [MPa]	11215	7750	11740	7370	11480	9970	7200	6750	8890	7310	30360	28900	32840
E_R [MPa]	989	925	599	638	664	856	918	781	529	746	15180	14450	16420
E_T [MPa]	643	602	389	415	432	557	597	508	344	485	15180	14450	16420
G_{LT} [MPa]	635	715	650	770	820	810	715	890	750	770	3280	2580	2390
G_{LR} [MPa]	699	787	715	847	902	891	787	979	825	847	3280	2580	2390
G_{RT} [MPa]	70	79	72	86	91	90	79	99	83	86	1093	860	797
	ν_{LT}			ν_{RT}			ν_{LR}				ν_{LT}	ν_{RT}	ν_{LR}
	0.43			0.51			0.39				0.28	0.28	0.12

- * **E** Module d'élasticité
- * **G** Module de cisaillement
- * **ν** Coefficient de poisson

C. Conditions aux limites

La figure 3 montre les conditions expérimentales au niveau des appuis et de chargement. Pour les appuis, les déplacements verticaux (selon z) ont été bloqués sur une ligne en face inférieure de la semelle inférieure (section A). Pour les points de chargement sur les semelles supérieures, les déplacements horizontaux (selon y) des nœuds des deux surfaces d'appuis ont été bloqués (section B).

Dans notre modélisation MEF de l'essai de flexion sur les poutres hybrides, nous avons simulé le chargement en utilisant une pression suiveuse. Cela signifie que nous avons appliqué une charge uniformément répartie sur les deux surfaces de chargement de la poutre qui leurs est toujours perpendiculaire tout au long de l'essai. La modélisation de l'instabilité de déversement nécessite une déformée initiale de la poutre. Dans Cast3m, celle-ci a été obtenue par la procédure Flamb.

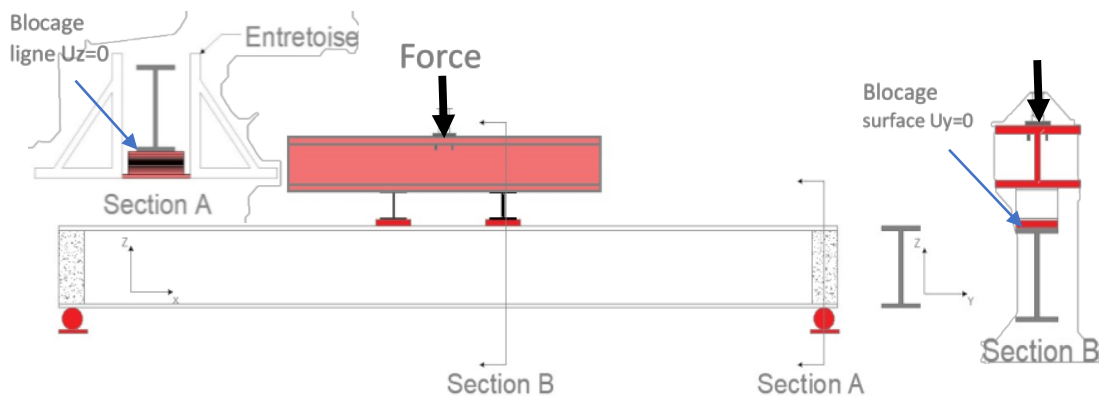


FIGURE 3. Conditions aux limites et blocage des déplacements

IV. Résultats et discussion

La figure 4 illustre les résultats force - flèche à mi-travée pour les poutres hybrides testées. Les écarts MEF / tests sont faibles. Les différences de flèche tout au long de chaque essai varient entre 3.05 % et 9.11 %. Celles relative à la charge de ruine varient entre 0.39 % et 11.11 %. Ces écarts s'expliquent par des ruptures prématurées de certaines poutres en bois, la non-linéarité matérielle n'étant pas prise en compte ces simulations.

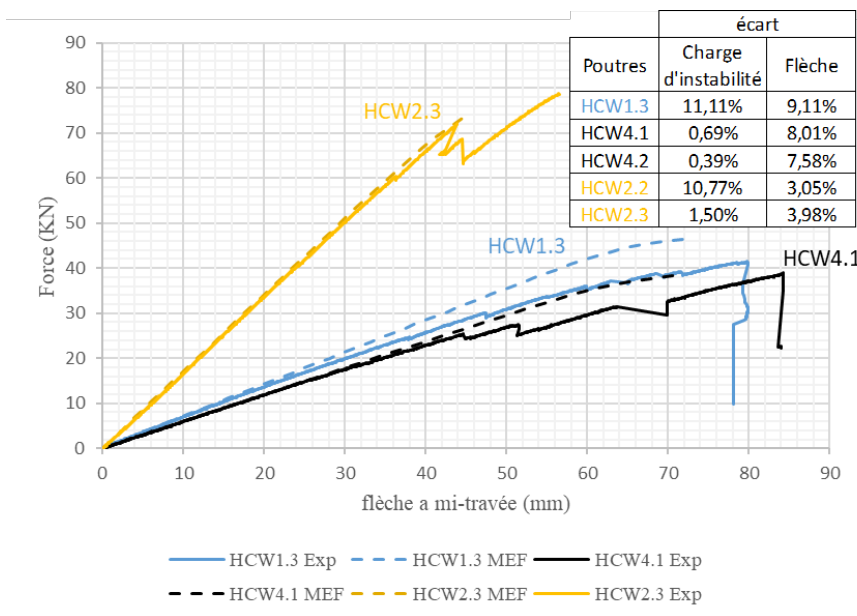


FIGURE 4. Comparaison des flèches MEF / expérimentales pour plusieurs configurations

La figure 5 montre la comparaison entre les déformations calculées et mesurées dans le composite (figure 5.a) et dans le bois (figure 5.b). On remarque une bonne cohérence des allures. Toutefois, des écarts non négligeables existent : ils sont principalement dus à l'apparition d'une fissure de cisaillement dans une des poutres en bois vers 25 kN. Ces écarts s'expliquent aussi par l'hétérogénéité et la présence de nombreux nœuds dans les poutres en bois non classées.

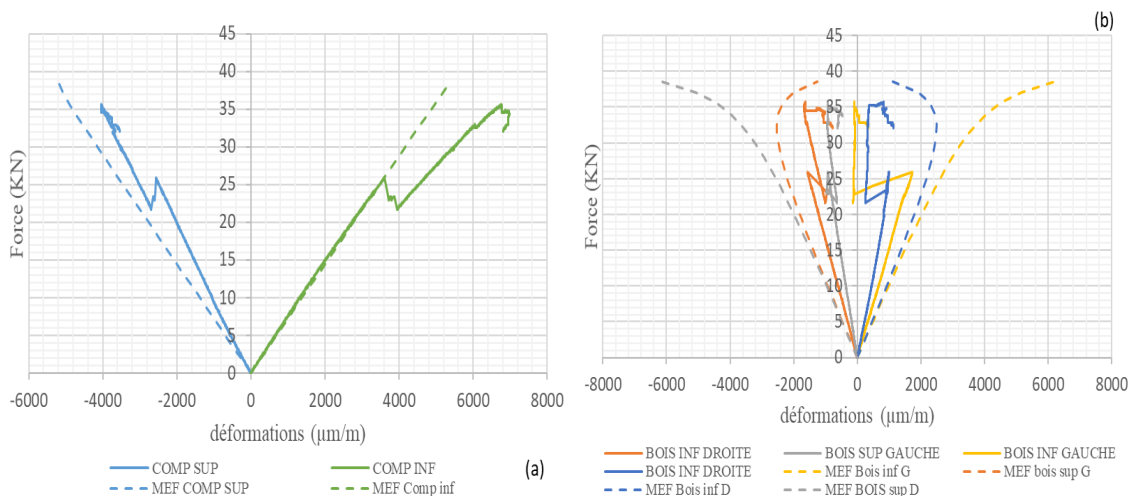


FIGURE 5. Comparaison des déformations MEF / expérimentales pour la poutre HCW4.2 :

(a) dans le GFRP - (b) dans le bois

Les déplacements horizontaux et les rotations autour de l'axe longitudinal de la poutre à mi-travée ont également été comparées sur les figures 6.a et 6.b. Les allures sont similaires et les écarts restent modérés et la différence peut être due au fait que la rupture du bois n'a pas été intégrée dans le modèle. Il est à noter sur la figure 6.a que le capteur de déplacement a été retiré à 30 kN pour ne pas l'endommager ce qui explique l'absence de variation de force sur la courbe au-

delà de 30 kN. La figure 6.b montre de façon évidente l'augmentation de plus en plus rapide de la rotation de torsion à partir de 33kN jusqu'à la ruine, annonçant le déversement. Le modèle proposé décrit cet aspect assez précisément.

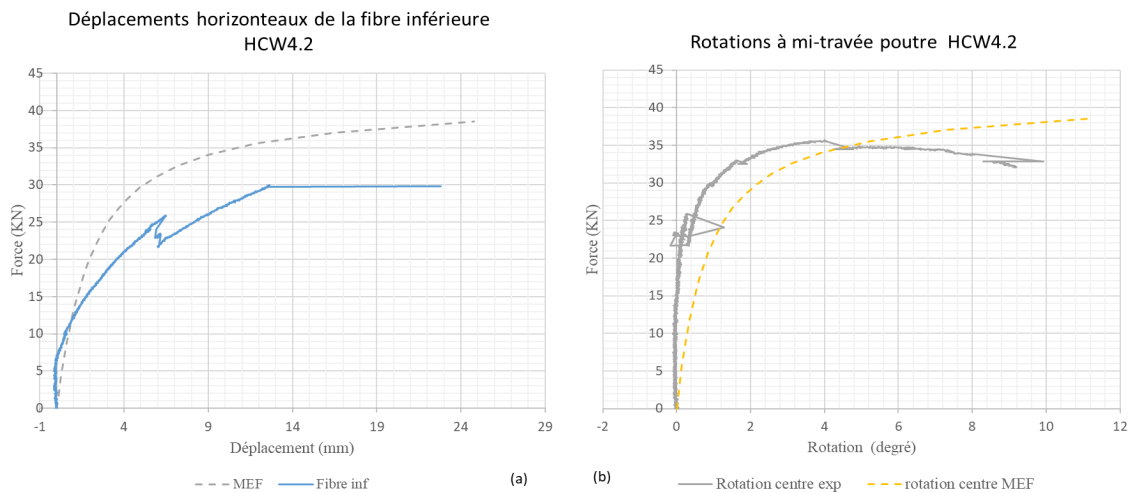
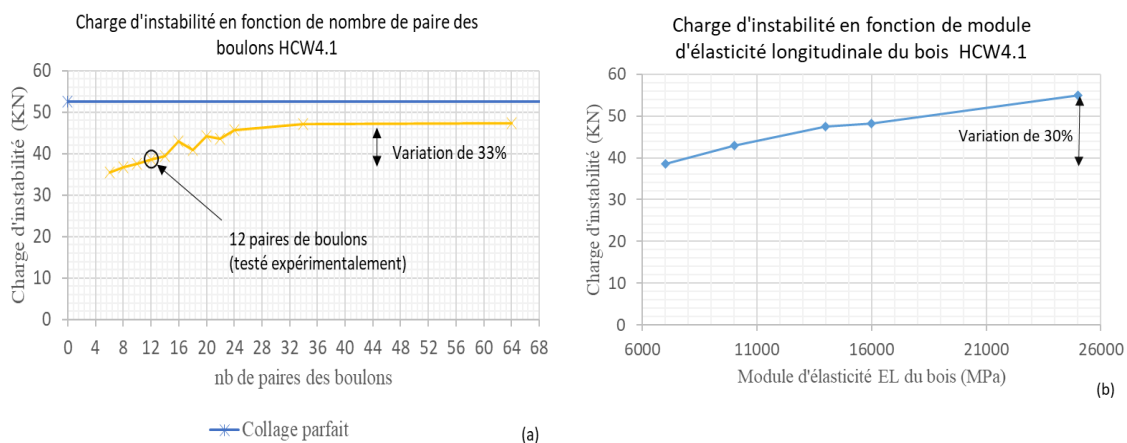


FIGURE 6. Comparaison MEF/Expérimentales à mi-travée (a) Déplacements horizontaux, (b) Rotations pour la poutre HCW4.2

V. Etude paramétrique

Une étude paramétrique a été menée pour examiner la sensibilité de certains paramètres de calcul comme les propriétés des matériaux par exemple mais également pour permettre une optimisation des sections hybrides. La première, illustrée sur la figure 7.a, a consisté à faire varier le nombre de boulons de la configuration HCW41 entre 6 et 64 paires de boulons (12 paires de boulons ayant été testés en réalité). Nous observons que la multiplication par 10 du nombre de boulons entraîne une augmentation de 33 % de la charge de rupture (instabilité). Au-delà de 24 paires de boulons, les valeurs de charge de ruine deviennent presque constantes et proches de la charge de rupture si la connexion entre le bois et le composite était parfaite, comme dans le cas d'un collage.



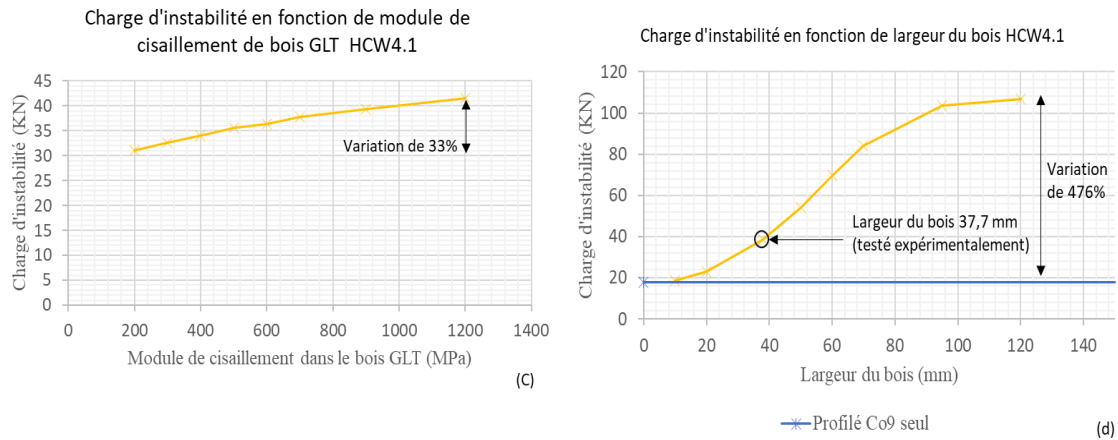


FIGURE 7. Etude paramétrique menée sur la poutre hybride HCW41

Ensuite, le module d'élasticité longitudinal du bois E_L a été augmenté entre 7000 et 25000 MPa. Nous observons (figure 7.b) que la charge d'instabilité augmente d'environ 30 %. Le module de cisaillement G_{LT} du bois a également été augmentée entre 200 et 1200 MPa (figure 7.c) et on constate que cette forte variation de module n'implique qu'une faible variation de la charge de rupture de 33 %.

Enfin, la largeur des poutres bois a été augmentée entre 10 et 120 mm. La figure 7.d montre qu'avec une largeur très petite du bois (10mm), on est très proche de la charge d'instabilité du profilé pultrudé seul (environ 20 kN). Celle-ci peut être multipliée par plus de 4 pour des largeurs de bois supérieures à 90 mm.

Cette étude paramétrique tend à montrer que la géométrie des pièces de bois a plus d'influence sur la charge de ruine que les propriétés des matériaux constitutifs.

VI. Conclusion

Plusieurs conclusions peuvent être tirées de cette étude :

- Le modèle MEF a été validé dans le domaine non linéaire en comparaison avec les mesures avec des écarts faibles sur les flèches comme sur les déformations.
- 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. Elle montre que la largeur des éléments bois est un paramètre très influent sur la charge d'instabilité de ces poutres hybrides.

De nombreux points du comportement de ces structures restent encore en question et nécessitent des travaux supplémentaires. Par exemple, le modèle numérique doit être complété pour intégrer la non-linéarité matérielle du bois ou une rupture prématurée de celui-ci par traction / cisaillement.

REFERENCES

- Hota GVS, Hota SR V. (2002). Advances in fiber-reinforced polymer composite bridge decks. *Progress in Structural Engineering and Materials*; 161–168. <https://doi.org/10.1002/pse.113>
- 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.T. Mottram. (1992). Lateral-torsional buckling of a pultruded I-beam. *Composites*, 23 (2), 81-92. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(92\)90108-7](https://doi.org/10.1016/0010-4361(92)90108-7)
- 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>
- 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>
- 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.
- 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>
- Comité Européen de Normalisation (CEN) (2008). Eurocode 5 : Conception des structures en bois - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments. EN 1995-1-1 :2004+A1 :2008 (2.3.1.3), Bruxelles, Belgique.
- 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>