

# Approche expérimentale et modélisation du comportement mécanique de poutres mixtes acier-bois fléchies

Antoine Bereyziat<sup>1</sup>, Maxime Audebert<sup>2</sup>, Sébastien Durif<sup>3</sup>, Abdelhamid Bouchaïr<sup>3</sup>

<sup>1</sup> CSTB, 84 avenue Jean Jaurès, Champs-sur-Marne, 77447 Marne-la-Vallée Cedex 2, France

<sup>2</sup> Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS), Université de Lyon, Ecole Nationale d'Ingénieur de Saint-Etienne, 58 rue Jean Parot, 42100 Saint-Etienne, France

<sup>3</sup> Université Clermont Auvergne, INP Clermont Auvergne, CNRS, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand, France

**RESUME** Le comportement mécanique d'éléments de structure hybrides acier-bois est étudié par une approche couplant essais à échelle réelle et modélisation numérique. Les éléments considérés sont constitués de poutrelles métalliques IPE 270 assemblées à des membrures en bois lamellé-collé. Deux configurations sont étudiées : une configuration partiellement encapsulée (les membrures en bois sont insérées entre les semelles du profilé métallique) et une configuration totalement encapsulée (le bois recouvre la totalité du profilé). Les poutres ainsi assemblées sont testées en flexion 4 points. Des essais sont également réalisés sur les profilés métalliques et les membrures en bois isolés afin d'analyser la contribution respective de chaque matériau dans le comportement de l'élément mixte. L'analyse des résultats d'essais permet de mettre en évidence un effet « composite » non anticipé, qui se traduit par une capacité résistante de la poutre mixte supérieure à la somme de celles de ses composants. Un modèle numérique des éléments testés est réalisé. Les résultats obtenus sont comparés aux données expérimentales mais ne permettent pas de reproduire l'effet composite observé. Le modèle est alors utilisé pour effectuer une analyse de sensibilité des paramètres du modèle afin de mieux comprendre les phénomènes à l'origine de ce gain de résistance.

**Mots-clefs** Poutres mixtes acier-bois, essais de flexion, comportement mécanique, modélisation numérique

## I. INTRODUCTION

Malgré le récent essor du bois dans la construction de bâtiments multiétagés, la mixité acier-bois reste peu fréquente dans les constructions actuelles. Celle-ci est souvent limitée à l'association du bois avec des éléments métalliques de type tige ou gousset dans les zones d'assemblage des ossatures bois. Concernant la mixité acier-bois à l'échelle de l'élément de structure, de nombreuses solutions existent telles que les poutres sous-tendues, les poutres treillis ou les poutres mixtes en I associant des membrures en bois avec des diagonales ou des tôles métalliques. Néanmoins, ces solutions, si elles peuvent notamment présenter des intérêts économiques, ou liés à leur légèreté, restent peu répandues. Les éléments de structure mixtes en acier et en bois pourraient pourtant

présenter un fort potentiel de développement. En effet, les profilés métalliques de type laminés à chaud présentent deux principales faiblesses : un élancement important, causant une sensibilité accrue de ces éléments aux instabilités, et une très faible résistance au feu liée à la conductivité thermique élevée de l'acier. Les composants mixtes acier-bois, constitués de poutrelles métalliques encapsulées dans des membrures en bois, permettent de renforcer l'acier vis-à-vis de ces deux faiblesses. D'une part, en participant à la rigidité des éléments et en assurant un maintien latéral des pièces métalliques, le bois peut limiter la sensibilité des barres aux instabilités et augmenter leur capacité résistante. D'autre part, le bois, matériau isolant présentant un fort gradient thermique, peut jouer le rôle d'une protection au feu des profilés métalliques. La présente étude se focalise sur l'analyse du comportement mécanique à froid de ce type de solutions, désignées par la suite sous l'acronyme STC (pour Steel-Timber Composite).

Plusieurs études suggèrent que les éléments STC permettent un renforcement mécanique mutuel des composants en acier et en bois :

- Fujita et Iwata [1] ont étudié des poutres STC d'une portée de 2,0 m soumises à une flexion quatre points. Les composants en bois et en acier étaient reliés par différents moyens : boulons et/ou adhésifs et/ou contact. Cette étude a permis de mettre en évidence 3 phénomènes. Premièrement, la rigidité et la résistance initiales des poutres STC sont approximativement égales à celles cumulées de leurs composants. Deuxièmement, les auteurs soulignent que le déversement ne se produit pas pour les poutres STC, contrairement au profilé métallique pris isolément. Troisièmement, la ductilité des poutres STC est mise en évidence, car elles conservent environ 60% de leur capacité de charge après l'apparition de la première fissure dans le bois.

- Winter et al. [2] ont testé en flexion différents profilés métalliques en I formés à froid assemblés à des poutres en bois. Ils observent que "les pièces de bois ont permis d'éviter à la fois le voilement local de l'âme en acier et le possible déversement de la poutre entière". Pour de nombreux spécimens testés, la charge maximale est atteinte après une première rupture de traction dans le bois. Les auteurs ont également étudié la rentabilité des poutres STC : ils insistent sur la simplicité de l'usinage et de l'assemblage pour atteindre la faisabilité économique.

- Duan et al [3] ont comparé les performances en flexion d'un profilé laminé à chaud avec celles d'une poutre STC constituée du même profilé métallique, mais dont les espaces entre les semelles étaient remplis de membrures en lamellé-collé. Ils ont constaté que la poutre STC est 1,95 fois plus résistante que le profilé en acier seul.

- Jurkiewicz et al [4] ont adopté la même approche comparant expérimentalement le comportement en flexion d'un profilé métallique seul ou assemblé à des membrures en bois assemblées entre les semelles. Ils n'observent aucun gain de résistance ou de rigidité de la poutre STC mais notent que la ruine par instabilité est retardée. En effet, la déflexion à mi-portée à la rupture de la poutre STC est environ 1,5 fois plus grande que celle du profilé métallique seul.

Cette revue de littérature confirme l'intérêt des solutions STC mais se révèle insuffisante pour appréhender correctement le comportement mécanique de ce type d'éléments. De nouveaux essais sont donc nécessaires pour mieux comprendre le rôle de chacun des composants au sein des poutres STC, ainsi que les interactions entre ces composants (y compris dans le domaine non-linéaire). Cette étude vise à observer le comportement mécanique en flexion de 2 configurations de poutres STC, différant par la section des membrures en bois associées au profilé métallique. Dans une première

partie, les configurations testées, leur géométrie, et les propriétés des matériaux constitutifs sont présentés. Le protocole expérimental, ainsi que le programme d'essai réalisé sont également donnés. Dans une seconde partie, le jeu de données relatif au modèle numérique développé pour simuler le comportement des poutres testées est exposé et justifié. Enfin, la troisième partie expose les résultats obtenus. Les résultats de la campagne d'essais sont analysés. Les résultats du modèle numérique sont comparés aux données expérimentales et les écarts observés sont discutés.

## II. PROGRAMME EXPERIMENTAL

Le programme expérimental réalisé consiste à tester en flexion quatre points deux configurations de poutres STC différentes : une première configuration STC1 qualifiée de « partiellement encapsulée », et une seconde configuration STC2 qualifiée de « totalement encapsulée ». Les composants constitutifs de ces poutres STC sont également testés isolément en flexion pour déterminer leurs capacités respectives.

### A. Configurations testées

Les essais de flexion réalisés concernent deux configurations de poutres mixtes (STC1 et STC2) de 4,6 m de longueur, les configurations « bois seul » qui leur sont associées (T1 et T2), et la configuration acier seul (S) qui est commune aux deux configurations mixtes. La Fig. 1 présente les sections droites des 5 configurations testées, ainsi que leurs dimensions.

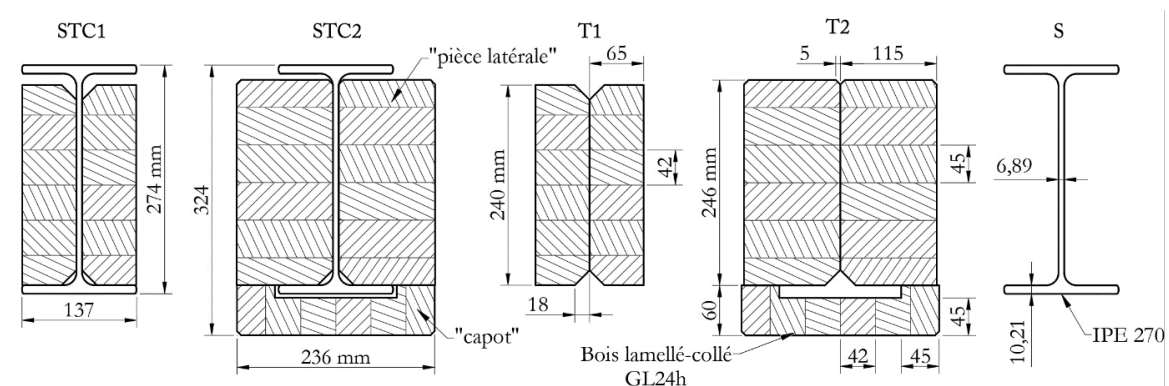


FIGURE 1. Configurations testées

La configuration STC1 est une poutre composite acier-bois constituée d'un profilé IPE 270 assemblé à deux poutres en bois insérées entre les semelles. L'épaisseur des éléments en bois (65 mm) est telle que leur face extérieure est alignée avec le bord des semelles du profilé. Les éléments en acier et en bois sont maintenus ensemble à l'aide de 4 vis Ø6 de 100 mm de long passant par des perçages Ø20 dans l'âme du profilé. Les perçages et les vis sont tels qu'aucune charge de cisaillement ne peut être transférée : l'acier et le bois interagissent mécaniquement par simple contact. Un jeu d'assemblage est créé entre le bois et la semelle supérieure du profilé afin de permettre la mise en place de plaques d'acier aux niveaux des points de chargement afin de transférer les charges de l'acier au bois. Trois spécimens STC1 sont testés : STC1.1, STC1.2 et STC1.3.

La configuration STC2 est une poutre mixte acier-bois constituée d'un profilé IPE 270 identique à celui utilisé pour la configuration STC1. Ce profilé est ici associé à des pièces latérales en bois plus

épaisses (115 mm). L'aile inférieure de STC2 est également recouverte d'un élément en bois en forme de U qui sert de protection thermique à la semelle inférieure. Cet élément en bois est relié aux pièces de bois latérales à l'aide de 20 vis Ø6 de 70 mm de long. Les vis passent à travers des perçages de Ø14 réalisés dans la semelle inférieure de l'IPE et ne peuvent donc pas transmettre de charges de cisaillement. Trois spécimens STC2 sont testés : STC2.1, STC2.2 et STC2.3.

La configuration S est constituée du profilé IPE 270 utilisé pour les éprouvettes mixtes. Quatre trous Ø20 sont percés au milieu de l'âme. Deux rangées de 10 trous Ø14 sont percées dans la semelle inférieure en respectant un espacement longitudinal de 478 mm. Une seule éprouvette S est testée.

Les configurations T1 et T2 correspondent aux éléments en bois des configurations mixtes. Trois spécimens sont testés pour chaque configuration de bois : T1.1, T1.2, T1.3, T2.1, T2.2 et T2.3.

### B. Protocole expérimental

Pour la réalisation des essais de flexion quatre points, le chargement est appliqué au moyen d'un vérin hydraulique et d'un chevron de chargement. Les points de chargement sont espacés de 1,0 m. Les appuis des poutres sont espacés de 4,3 m. Quatre maintiens latéraux empêchent le déversement de la poutre. La Fig. 2 présente le dispositif expérimental utilisé.

Au total, 13 essais de flexion sont effectués (S, T1.1, T1.2, T1.3, T2.1, T2.2, T2.3, STC1.1, STC1.2, STC1.3, STC2.1, STC2.2, STC2.3). Les mesures réalisées sont :

- Déplacement vertical à mi-portée (face inférieure ou supérieure selon la configuration).
- Déplacements verticaux aux points de chargement (face inférieure ou supérieure selon la configuration).
- Déplacements verticaux aux appuis (face supérieure).
- Déplacement latéral à mi-portée (environ à mi-hauteur à l'état non plié).
- Contraintes (déformations) axiales sur les faces inférieures et/ou supérieures des profilés en acier à mi-portée (2 - 4 jauges).

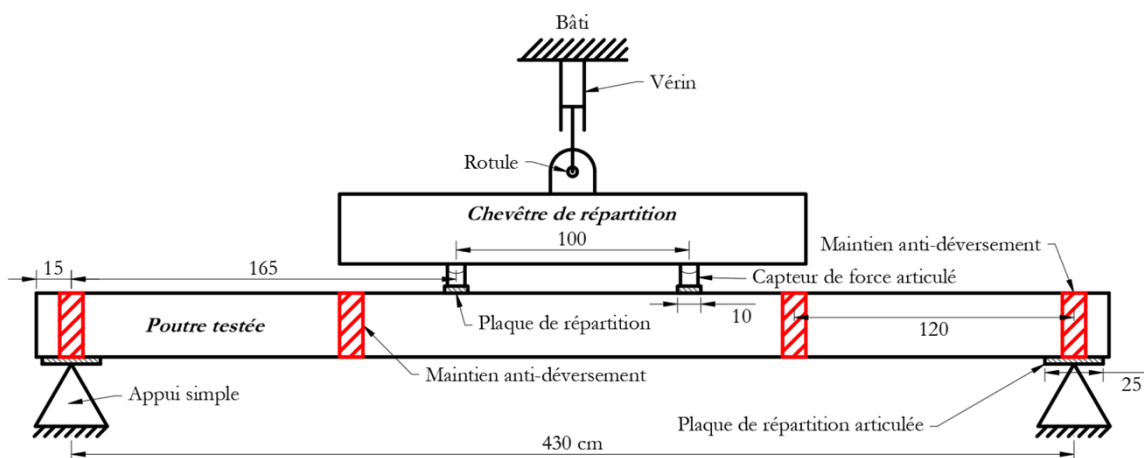


FIGURE 2. Schéma du montage adopté pour les essais de flexion

### C. Propriétés des matériaux

Les profilés métalliques testés sont en acier S275. Sept essais de traction (ISO 6892-1) sur des échantillons d'acier prélevés sur les profilés IPE ont permis de déterminer une valeur moyenne de la limite d'élasticité égale à 310,7 MPa (CV = 1,8%).

Les éléments de bois sont en épicea GL 24h. Les propriétés mécaniques indiquées dans le tableau 1 sont déduites des essais de flexion réalisés sur les poutres en bois de 4,6 m de longueur, selon la méthode proposée dans la norme EN 408. En complément, 26 essais de compression sur des échantillons réduits (conformes à la norme EN 408) ont permis d'établir une valeur moyenne du module d'Young perpendiculaire au fil ( $E_{c,90}$ ) égale à 400 MPa (CV = 20,5%), et une résistance moyenne à la compression transversale ( $f_{c,90}$ ) égale à 3,23 MPa (CV = 10,5%).

**TABLEAU 1. Modules d'Young (parallèle au fil) et résistances en flexion du bois**

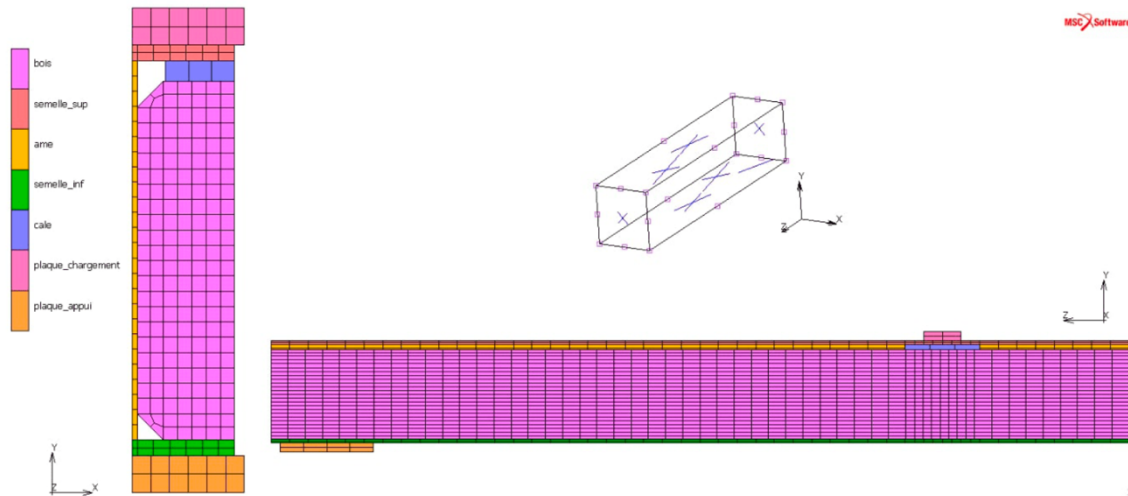
Eprouvette	$E_{m,g}$ [MPa]	$f_m$ [MPa]
T1.1	10026	27,1
T1.2	9736	34,1
T1.3	8738	26,4
T2.1	11138	39,3
T2.2	Erreur de mesure	
T2.3	10956	33,6
T1 Valeur moyenne / CV	9500 / 7,1%	29,2 / 14,6%
T2 Valeur moyenne / CV	11047 / 1,2%	36,5 / 11,2%

### III. MODELISATION NUMERIQUE

Une simulation numérique des poutres mixtes acier-bois testées en flexion est ici réalisée. L'enjeu est d'utiliser le modèle développé pour tenter de comprendre les phénomènes observés lors des essais, et en particulier les phénomènes non-linéaires, qui sont difficiles à appréhender analytiquement. La modélisation est effectuée à l'aide du logiciel MSC Marc 2014.2.0 et de l'interface graphique Mentat [5].

#### A. Géométrie et maillage

Les poutres testées étant sollicitées en flexion pure et les instabilités géométriques étant bloquées par des maintiens anti-déversement, seul un quart de la poutre est modélisé. Le maillage 3D est réalisé à l'aide d'éléments quadratiques hexaédriques à 20 nœuds. Une étude de sensibilité réalisée sur la densité de maillage nous permet de choisir des éléments d'une longueur maximale de 50 mm et de section 10 x 10 mm environ. Le maillage est affiné au droit du point d'application des charges afin de mieux représenter les gradients de déformation dans cette zone d'intérêt. Le maillage réalisé pour la configuration STC1 est présenté en Fig. 3.



**FIGURE 3.** Maillage de la configuration STC1

### B. Matériaux

L'acier est modélisé comme un matériau homogène isotrope de masse volumique  $\rho$  égale à 7850 kg/m<sup>3</sup>, un coefficient de Poisson  $\nu$  égal à 0,3 et un module d'élasticité  $E$  égal à 210 GPa. La loi de comportement considérée ici est une loi de comportement élastique parfaitement plastique c'est-à-dire représentée par une courbe contrainte-déformation bilinéaire sans écrouissage. Une telle loi se révèle ici suffisante dans la mesure où les déformations dans l'acier ne dépassent pas 2%, c'est-à-dire la limite du palier plastique que l'on a mesurée lors d'essais de caractérisation. Ces mêmes essais ont permis d'établir une limite d'élasticité égale à 310 MPa.

Les propriétés élastiques du bois sont déterminées à partir d'essais de caractérisation réalisés sur le matériau à échelle réelle (modules d'élasticité longitudinal et transversal), ou issues de la littérature. Les propriétés retenues sont présentées dans le tableau 2.

**TABLEAU 2.** Propriétés élastiques du bois

Constante d'élasticité	Valeurs retenues
$E_L$ [MPa]	9500 (STC1 et T1)
	11047 (STC2 et T2)
$E_T$ [MPa]	400
$\nu_{LT}$	0,41
$\nu_{TT}$	0,41
$G_{LT}$ [MPa]	804
$G_{TT}$ [MPa]	84

Le critère de plasticité retenu pour le bois est le critère de Hill, largement utilisé pour la simulation mécanique du bois ([6], [7]). Par simplicité, le matériau est considéré comme élastique parfaitement

plastique et est caractérisé par une courbe contrainte-déformation bilinéaire sans écrouissage. Ce critère est utilisé pour simuler les déformations plastiques en zone comprimée. Le critère de rupture considéré ici est le critère de Hoffman ([6], [7]). La ruine des poutres testées se caractérise essentiellement par une rupture en traction longitudinale. Grâce aux essais de flexion à échelle réelle, on détermine une contrainte limite pour ce type de sollicitation égale à 29 MPa pour les poutres T1 et 39 MPa pour les poutres T2, en considérant un comportement élastique-fragile. Pour les autres sollicitations, on considère une contrainte limite très grande, par exemple 100 MPa, de manière à créer une surface de charge quasi ouverte.

### *C. Conditions aux limites*

Le chargement correspond à un déplacement vertical à vitesse constante, égal à 8 mm/min. La réaction d'appui est simplement modélisée par un blocage des déplacements selon la direction verticale.

Les interactions entre les différents solides constituant le modèle sont de trois types : un collage rigide entre l'âme et les semelles ; un contact avec frottement négligeable entre les pièces en acier et celles en bois ; un contact avec frottement relativement faible entre le profilé métallique et les plaques de chargement d'appui. L'âme du profilé et le bois n'interagissent pas. La valeur du coefficient de frottement entre la poutre et les plaques d'appui et de chargement est déterminée par calibrage du modèle aux résultats d'essais. Une valeur de  $\mu = 0,1$  est retenue pour le contact plaque de chargement/profilé métallique tandis qu'une valeur de  $\mu = 0,01$  est choisie pour le contact acier/bois. Une loi de Coulomb bilinéaire est utilisée pour modéliser le frottement.

## **IV. RESULTATS**

### *A. Résultats expérimentaux*

Les courbes force-déplacement obtenues pour les poutres STC testées et leurs composants en acier et en bois sont données en Fig. 4 et Fig. 5. Les trois éprouvettes considérées pour chaque série T (bois seul) ou STC (poutres mixtes) présentent un comportement cohérent à l'exception de l'éprouvette T2.2 (Fig. 5) qui est moins rigide et moins résistante que les éprouvettes T2.1 et T2.3 en raison d'un défaut d'aboutage dans la zone de traction à mi-portée.

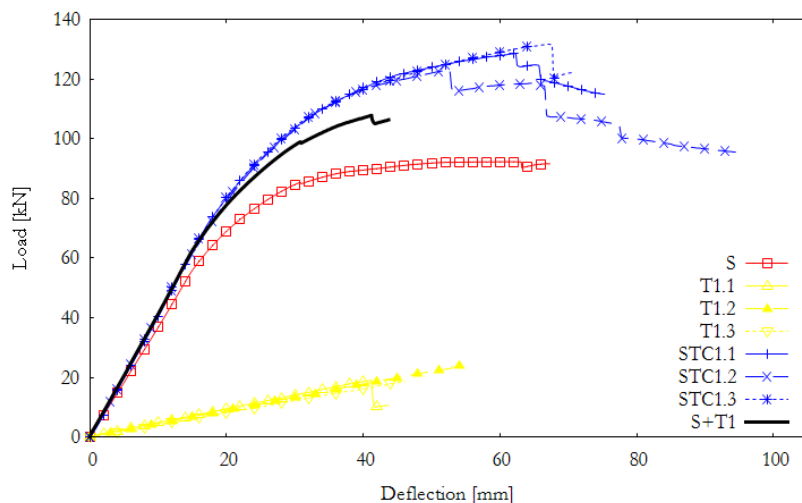
L'éprouvette S présente un comportement élastoplastique cohérent pour un profilé métallique. La ruine se produit par déversement à mi-portée, entre les appuis latéraux.

Les éprouvettes T ont un comportement élastique associé à une rupture fragile en traction longitudinale. Les éprouvettes T2, plus massives, autorisent une redistribution de charge après la première rupture, de telle sorte que la capacité résiduelle est conservée, voire augmentée, après rupture, alors caractérisée par des ruptures successives causées par la propagation des fissures.

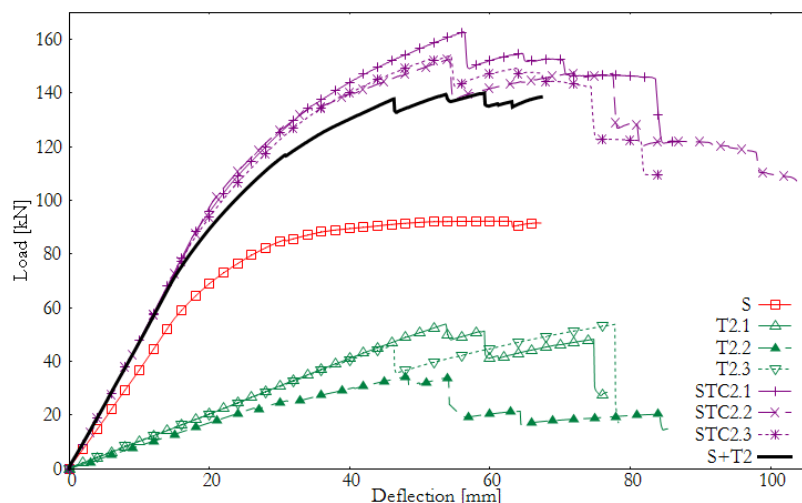
Les spécimens STC présentent un comportement élastoplastique. La charge continue d'augmenter jusqu'à ce que le bois cède en traction longitudinale. L'amplitude de la rupture est limitée car les éléments latéraux du bois sont maintenus entre les semelles. Par conséquent, les spécimens STC conservent une capacité portante, montrant un comportement ductile. Les courbes force-

déplacement mettent en évidence des redistributions de charge se traduisant par des ruptures successives du bois suivies d'augmentations de charge.

Les charges ultimes obtenues sont données dans le tableau 3. Ces valeurs permettent de mettre en évidence le renfort que constitue le bois vis-à-vis du profilé métallique puisque les charges ultimes atteintes par les configurations mixtes STC1 et STC2 sont respectivement 38% et 70% supérieures à celle de l'acier seul.



**FIGURE 4.** Courbes force-déplacement pour les configurations STC1 et leurs composants



**FIGURE 5.** Courbes force-déplacement pour les configurations STC2 et leurs composants

L'analyse des courbes des Fig.4 et Fig.5 montre que dans le domaine élastique, un principe de superposition des raideurs peut être appliqué. En effet, le tracé des courbes S+T1 et S+T2, obtenues par superposition, montre que la raideur des poutres mixtes équivaut à la somme des raideurs des composants qui les constituent. L'écart entre les raideurs des poutres mixtes et les raideurs obtenues par superposition est inférieur à 4%. De plus, l'ajout de bois permet une rigidification significative en flexion du profilé métallique : + 14% pour les poutres STC1 et + 32% pour les poutres STC2.

**TABLEAU 3. Capacités ultimes et flèches maximales**

Eprouvette	Charge ultime [kN]	Flèche à mi-travée [mm]
STC1.1	128,6	62,3
STC1.2	123,2	52,6
STC1.3	131,7	67,1
STC2.1	162,9	56,4
STC2.2	152,5	54,3
STC2.3	154,0	54,5
T1.1	19,1	41,2
T1.2	24,0	54,5
T1.3	18,6	46,1
T2.1	54,1	53,8
T2.2	34,9	49,0
T2.3	46,1	46,2
S	92,3	61,0

En revanche, dès lors que l'acier commence à plastifier, ce principe de superposition ne fonctionne plus. En effet, les charges mesurées lors des essais sur les poutres mixtes dépassent celles dont rendent compte les courbes calculées par superposition. Les Fig.4 et Fig.5 montrent que le rayon de courbure du tronçon de courbe charge-flèche correspondant à la plastification du profilé métallique au sein des poutres mixtes est plus grand que celui obtenu par superposition. Ce phénomène, que nous qualifions « d'effet composite », est à première vue surprenant, puisque les composants partagent quasiment le même centre de gravité, et les poutres sont démunies de tout dispositif capable de transférer un quelconque effort de cisaillement horizontal entre les composants.

#### *B. Résultats de simulation numérique*

Les résultats des simulations étant très satisfaisants pour le comportement en flexion des composants isolés (profilé et membrures en bois), nous nous focaliserons ici sur les résultats des simulations relatives aux poutres mixtes. La comparaison des courbes charge-flèche mesurées et simulées pour les poutres STC1 est proposée en Fig.6. Des résultats similaires sont obtenus pour la configuration STC2. Ces courbes montrent que le modèle développé rend compte du principe de superposition pour les phases élastiques, mais aussi post-élastiques. Le modèle ne permet donc pas de reproduire l'effet composite mesuré lors des essais.

Une étude de sensibilité numérique est alors effectuée sur les paramètres du modèle afin d'essayer de mieux comprendre l'origine de cet effet composite observé expérimentalement. Deux hypothèses sont évoquées : une augmentation de la rigidité de l'acier lors de la plastification de ce dernier par frottement avec le bois, ou une augmentation des propriétés des matériaux constitutifs.

La première hypothèse est mise à l'épreuve en modifiant les paramètres d'interaction entre le bois et l'acier dans le modèle, soit par augmentation du coefficient de frottement, soit par collage du bois sur l'acier. Cette étude montre que l'augmentation du degré de connexion entre le bois et l'acier ne permet pas de reproduire l'effet composite recherché. Cette hypothèse est donc invalidée.

La deuxième hypothèse est explorée en augmentant les propriétés de résistance du bois. Une telle hypothèse est envisageable si on considère la possibilité d'un freinage externe du matériau. En augmentant ainsi la résistance en traction du bois de 50% pour la configuration STC1 et de 25% pour la configuration STC2, on parvient à retarder la ruine de la poutre mixte à des niveaux proches de ceux observés expérimentalement. Néanmoins, cela n'améliore en rien le chargement repris au moment de la plastification de l'acier. La problématique de l'effet composite subsiste donc.

A titre exploratoire, nous observons l'influence d'une augmentation des propriétés de l'acier (limite élastique), même s'il paraît difficile d'envisager que l'association du bois et de l'acier puisse engendrer une augmentation de la valeur de ce paramètre inhérent au matériau. En augmentant de 7% la valeur de la limite élastique de l'acier, on parvient à reproduire correctement le comportement composite observé. Il semble donc que le raidissement du profilé, causé par l'action du bois situé entre ses semelles ait un effet direct sur la manière dont il plastifie. Les ajustements numériques ici opérés n'expliquant en rien les phénomènes physiques observés, cette problématique mérite des investigations supplémentaires et des études sur des profilés en I munis de raidisseurs pourraient être mobilisées pour mieux comprendre ce comportement singulier.

La Fig. 6 présente les résultats d'un modèle numérique « optimisé » afin de reproduire la courbe expérimentale pour la configuration STC1. La résistance du bois en traction longitudinale  $y$  est augmentée de 50% ( $f_{ut,0} = 44\text{MPa}$ ) et celle de l'acier de 7% ( $f_y = 332\text{MPa}$ ).

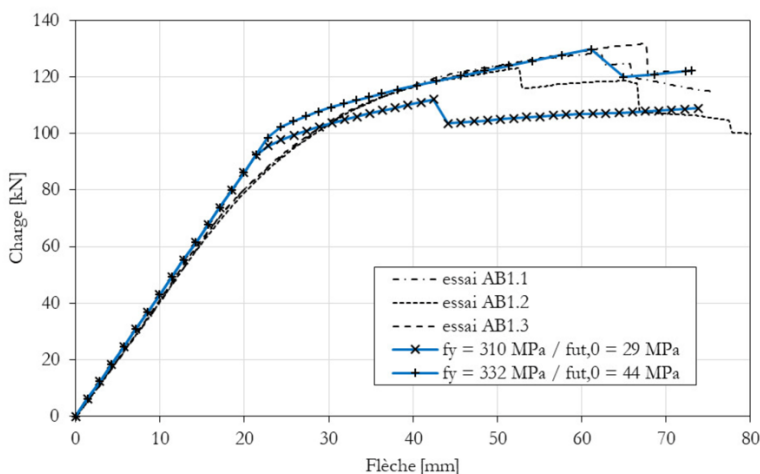


FIGURE 6. Configuration STC – modèle initial versus modèle « optimisé »

## V. CONCLUSIONS

Les essais de flexion quatre points portant sur deux configurations mixtes, ainsi que sur leurs composants en acier et en bois pris isolément, permettent de faire les observations suivantes :

- Le déplacement hors-plan est beaucoup plus faible pour les poutres mixtes que pour un profilé métallique pris seul.
- La ruine des sections hybrides est provoquée par la rupture du bois en traction longitudinale en fibre inférieure.
- La rupture du bois est moins sévère et plus tardive lorsqu'il est associé avec un profilé métallique.

En revanche, un effet composite inattendu est observé lorsque le profilé métallique commence à plastifier : la capacité des poutres mixtes dépasse alors celle obtenue par superposition des capacités de leurs composants. Les configurations testées ne permettent pourtant aucune transmission du cisaillement longitudinal entre les composants en bois et en acier, qui partagent le même axe neutre.

Un modèle numérique est développé pour simuler et comprendre ce phénomène. On parvient finalement à obtenir une concordance essais-simulation satisfaisante par l'augmentation de la résistance du bois en traction longitudinale, et par l'accroissement de la limite d'élasticité de l'acier. Des travaux supplémentaires sont nécessaires pour comprendre les phénomènes physiques qui sous-tendent cet effet composite.

## REFERENCES

- [1] M. Fujita and M. Iwata (2013). Bending test of the composite steel-timber beam. *Appl. Mech. Mater.*, vol. 351–352, pp. 415–421. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.351-352.415.
- [2] W. Winter, K. Tavoussi, F. Riola Parada, and A. Bradley (2016). Timber-Steel Hybrid Beams for Multi-Storey Buildings : Final Report. *World Conf. Timber Eng.*
- [3] Duan, W. Zhou, X. Liu, J. Yuan, and Z. Wang (2021). Experimental Study on the Bending Behavior of Steel-Wood Composite Beams. *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2021, p. 1315849. doi: 10.1155/2021/1315849.
- [4] B. Jurkiewicz, S. Durif, A. Bouchair, and C. Grazide (2022). Experimental and analytical study of hybrid steel-timber beams in bending. *Structures*, vol. 39, pp. 1231–1248. doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.03.055>.
- [5] MSC Software Corporation, Marc 2014.2 - Volume A: Theory and User Information, vol. A. 2015.
- [6] B.-H. Xu, A. Bouchair, M. Taazount, and P. Racher (2013). Numerical simulation of embedding strength of glued laminated timber for dowel-type fasteners. *J. Wood Sci.*, vol. 59, no. 1, pp. 17–23. doi: 10.1007/s10086-012-1296-0.
- [7] M. Audebert, D. Dhima, M. Taazount, and A. Bouchair (2011). Numerical investigations on the thermo-mechanical behavior of steel-to-timber joints exposed to fire. *Eng. Struct.*, vol. 33, no. 12, pp. 3257–3268. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.08.021>.