

---

# Analyse numérique du comportement thermique de poutres hybrides acier-bois en situation d'incendie

Antoine Bérezyiat<sup>1</sup>, Maxime Audebert<sup>1</sup>, Abdelhamid Bouchaïr<sup>2</sup>, Sébastien Durif<sup>2</sup>,  
Sylvain Ménard<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Université de Lyon, École Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne (ENISE), 58 rue Jean Parot, 42100 Saint-Etienne, France. antoine.berezyiat@enise.fr ; maxime.audebert@enise.fr

<sup>2</sup> Université Clermont Auvergne, Institut Pascal, BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand, France. CNRS, UMR 6602, Institut Pascal, F-63171 Aubière, France. abdelhamid.bouchaïr@uca.fr ; sebastien.durif@uca.fr

<sup>3</sup> Université du Québec à Chicoutimi 555, boul. de l'Université, Saguenay (Québec) G7H2B1, Canada. sylvain\_menard@uqac.ca

---

**RÉSUMÉ.** Cette étude se base sur des simulations numériques pour évaluer le comportement thermique de poutres hybrides acier-bois en situation d'incendie. Celles-ci sont composées de profilés métalliques en « I » ou en « T » assemblés à différentes pièces de bois qui contribuent à leur fonctionnement mécanique et les protègent en cas d'incendie. D'une part, le bois assure un maintien des parois en acier vis-à-vis des instabilités locales et globales. D'autre part, le bois, par sa faible conductivité thermique et par l'eau qu'il contient, permet de limiter l'échauffement du profilé métallique. En effet, la combustion du bois entraîne la migration d'une partie de son humidité vers le centre de la section où elle s'accumule contre la paroi étanche du profilé métallique, ce qui a pour effet de refroidir ce dernier. Ces phénomènes sont modélisés en faisant varier les propriétés thermo-physiques du bois selon différentes zones dans la section et en fonction de la température. Un critère de température critique est utilisé pour quantifier la performance thermique de différentes configurations. Il a ainsi été montré que la durée nécessaire pour atteindre cette température critique est augmentée de plusieurs dizaines de minutes si l'on considère les profilés hybrides acier-bois étudiés plutôt que des profilés métalliques sans protection.

**ABSTRACT.** This study aims to employ numerical simulations to evaluate the thermal behavior of steel-timber hybrid beams in a fire situation. Those are made of "I" or "T" shaped steel members assembled to different pieces of wood that contribute to their mechanical performance and protect them in case of fire. On the one hand, wood provides some support to steel plates against local and global buckling. On the other hand, wood, by its low thermal conductivity and the water it contains, limits the heating of the metal profile. Indeed, the combustion of wood causes the migration of a portion of its water to the center of the section where it accumulates against the impervious surface of the steel element, which leads to cool it down. These phenomena are modeled by varying the thermo-physical properties of wood depending on different areas in the section and as a function of temperature. A critical temperature criterion is used to quantify the thermal performance of different configurations. It has been shown that the time required to reach this critical temperature is increased by several tens of minutes if one considers the studied steel-timber hybrid beams rather than unprotected steel members.

**MOTS-CLÉS :** poutre hybride acier-bois, résistance au feu, comportement thermo-hydrique.

**KEY WORDS :** steel-timber hybrid beam, fire resistance, thermo-hydric behaviour.

---

## 1. Introduction

Dans le domaine de la construction, la mixité acier-bois est utilisée à différentes échelles. Il existe des systèmes, par exemple des treillis, composé à la fois de membrures en bois et de membrures en métal. À une plus petite échelle, il est possible d'associer le bois et l'acier au sein d'une même membrure pour obtenir un composant élémentaire hybride [PIA 16]. Ce principe peut être utilisé pour diverses raisons : jonction d'une ossature en bois avec une ossature en acier, renforcement mécanique, protection au feu de l'acier par le bois, réduction des dimensions de la section par rapport à une membrure en bois équivalente, renforcement des profilés métalliques vis-à-vis du voilement local, esthétique. Plusieurs solutions existent pour la réalisation, d'éléments hybrides acier-bois, l'une des plus anciennes étant la Flich-beam [ALA 12]. C'est une poutre constituée de deux éléments en bois assemblés de part et d'autre d'une plaque métallique qui rigidifie l'ensemble. Il existe également des Flich-beams comportant deux plaques métalliques et trois pièces de bois. L'assemblage entre l'acier et le bois est généralement assuré par des boulons ou des clous. Ces éléments hybrides sont principalement utilisés pour la construction de structures à ossature légère [DES 07]. Un autre moyen

d'assembler l'acier et le bois dans des éléments hybrides consiste à insérer des armatures métalliques dans des membrures en bois, la liaison étant assurée au moyen d'une résine époxy. Ce principe est aussi bien utilisé pour la réfection d'éléments en bois endommagés, que pour la fabrication industrielle de poutres acier-bois [PIA 16]. Winter *et al.* [WIN 16] ont décrit les multiples avantages que pouvaient présenter des éléments hybrides acier-bois pour la construction de bâtiments de grande hauteur. Leur attention s'est surtout portée sur des profilés métalliques minces formés à froid, assemblés en forme de « I » et encapsulés dans du bois. Ils ont montré que de tels éléments pouvaient être performants sur les points suivants : coût, facilité de montage, dimensions des sections, résistance au séisme, sécurité incendie, comportement mécanique. Sakamoto *et al.* [SAK 03] ont étudié expérimentalement le comportement thermomécanique de profilés H300, encapsulés dans une épaisseur minimale de bois de 60 mm. Ces éléments étaient soumis à une sollicitation thermique pendant une durée d'une heure, puis à une période de refroidissement durant trois heures. Les profilés ont non seulement résisté au feu pendant une heure, mais ils ont également présenté un comportement autoextinguible en phase de refroidissement et une capacité à supporter les charges appliquées, même après l'exposition au feu. Jurkiewicz *et al.* [JUR 17] ont réalisé des essais de flexion trois points sur des poutres acier-bois d'une longueur de 3 mètres, constituées soit d'un IPE 160, soit d'un profilé métallique en « T », ainsi que d'éléments latéraux en bois. Ces derniers étaient assemblés de part et d'autre de l'âme des profilés métalliques au moyen de boulons traversants et de vis traversant les semelles. Cette étude préliminaire a montré que le nombre d'organes d'assemblage n'avait pas d'influence significative sur le comportement des poutres en flexion dans le domaine élastique. La participation du bois à la reprise des efforts de flexion était minime par rapport à celle de l'acier, surtout pour les configurations en « I » choisies. En revanche, les auteurs expliquent que la combinaison du bois et de l'acier retarde l'apparition d'instabilités dans les profilés métalliques. La présente étude s'inscrit dans la continuité des travaux de Jurkiewicz *et al.* et vise à étudier le comportement thermique en cas d'incendie de poutres acier en forme de « I » ou de « T » associées à du bois (Figure 1).

## 2. Modélisation

L'étude s'est initialement basée sur l'approche analytique de l'EN 1993-1-2 [CEN 05a] qui permet de calculer l'échauffement d'un plat en acier complètement protégé du feu par une épaisseur constante de bois. Cette méthode présente néanmoins des limites importantes concernant la géométrie et la prise en compte de la combustion du bois. Cependant elle a aidé à définir des configurations intéressantes pour une analyse numérique, dans l'optique de futures études expérimentales. Ce choix s'est également appuyé sur les références bibliographiques présentées en introduction. Trois configurations hybrides basées sur un profilé en acier IPE 300 ont été retenues (Figure 1). La première est constituée d'un profilé métallique en « I » dit « partiellement encapsulé », la deuxième est similaire mais le profilé métallique est en « T ». La dernière présente un profilé en « I » dit « complètement encapsulé ».

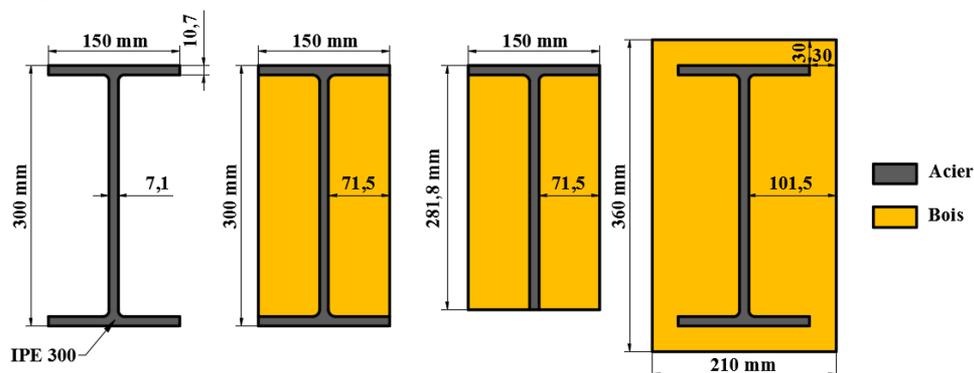


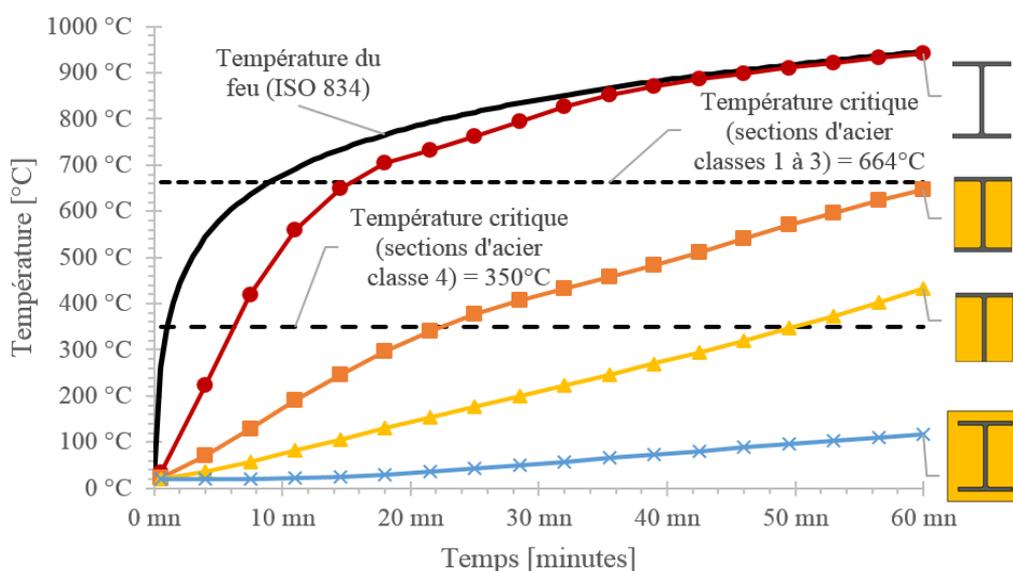
Figure 1 : Géométries modélisées

Le comportement thermique de ces configurations a été étudié sur la base d'une simulation numérique 2D employant la méthode des éléments finis, réalisée à partir du code de calcul MSC MARC [MSC 14]. Les inconnues du problème numérique sont les températures régnant dans la section droite des différentes configurations, seule l'équation de la chaleur est utilisée pour le résoudre. Les propriétés thermo-physiques retenues pour la modélisation de l'acier sont celles proposées par l'EN 1993-1-2 [CEN 05a]. La modélisation du matériau bois s'appuie sur des propriétés issues de la littérature [AUD 12] et tient compte des transferts hydriques qui interviennent dans le bois en cas d'incendie. En effet, la combustion du bois induit l'évaporation de l'eau qu'il contient. Une partie de cette vapeur s'échappe tandis que le reste migre à l'intérieur de la section pour se recondenser en zone froide [SAM 14]. Cette migration conduit à une accumulation d'eau contre la paroi

imperméable du profilé métallique qui est alors refroidi jusqu'à ce que la totalité de cette eau soit évaporée. Ces transferts de masse sont compliqués à modéliser, c'est pourquoi ce phénomène est simulé numériquement dans son état final, après la migration de l'eau qui ne s'est pas échappée et son accumulation contre la paroi du profilé métallique. Pour représenter l'influence thermique de cette eau, le bois jouxtant l'acier sur une épaisseur de 3 millimètres est caractérisé par un important pic de chaleur volumique à 100°C. Cela signifie qu'à cette température, la quantité d'énergie nécessaire pour élever la température d'un volume de bois donné est très importante lorsqu'il contient beaucoup d'eau à évaporer. Cette méthode permet de simuler le refroidissement de l'acier par l'eau contenue dans le bois avec lequel il est en contact. A l'inverse, le bois éloigné de plus de 3 millimètres de l'acier est caractérisé par un faible pic de chaleur volumique à 100°C, car on fait l'hypothèse que l'eau ne fait qu'y transiter, ce qui implique que la quantité d'énergie nécessaire pour évaporer la faible quantité d'eau qu'il contient est peu importante. Les valeurs de ces pics de chaleur volumique sont calibrées pour des assemblages bois-métal présentant des dimensions comparables à celles des configurations modélisées dans la présente étude [AUD 12]. Dans l'analyse numérique, les différentes configurations sont exposées pendant 60 minutes à un feu ISO 834 recommandé par l'EN 1991-1-2 [CEN 03]. L'analyse numérique a été utilisée pour évaluer l'influence de divers facteurs, tels que la géométrie, le nombre de côtés exposés au feu, ou la façon de modéliser les matériaux et les transferts hydriques.

### 3. Résultats

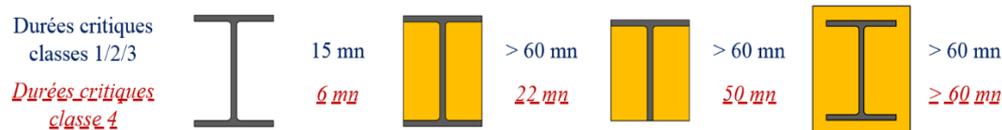
La figure 2 présente les évolutions de la température moyenne de la section d'acier en fonction de la configuration étudiée. Il a été considéré que seule la face inférieure et les faces latérales sont exposées au feu, ce qui peut correspondre à la réalité d'une poutre soutenant un plancher. Les résultats prennent en compte une accumulation d'eau à l'interface acier-bois, provoquée par l'évaporation de l'eau contenue dans le bois sous l'effet du feu. Les propriétés des matériaux sont les mêmes pour toutes les configurations (acier selon [CEN 05a] et bois selon [AUD 12]).



**Figure 2 :** Température moyenne de l'acier en fonction du temps et de la configuration considérée

Les résultats montrent qu'un profilé hybride basé sur un IPE 300 complètement encapsulé dans du bois présente un excellent comportement thermique en cas d'incendie, même si l'épaisseur de bois est faible (30 mm). Les profilés partiellement encapsulés sont moins performants mais permettent de limiter l'échauffement de l'acier puisqu'au bout d'une heure, la différence de température entre un profilé en « I » sans protection et le même profilé partiellement encapsulé dans du bois est de 293 °C.

Dans l'EN 1993-1-2 est présentée la notion de « température critique » qui est définie de la façon suivante : « Pour un niveau de chargement donné, température à laquelle la ruine [d'un élément de construction en acier] est susceptible de se produire [...] pour un champ de température uniforme » [CEN 05a]. Pour les sections d'acier de classe 4, cette température critique vaut 350°C. Pour les autres classes de sections, elle vaut 664°C si l'on considère un taux de chargement de 30% en cas d'incendie. Dans cette étude, les durées nécessaires pour atteindre ces températures critiques ont été utilisées comme critères permettant de quantifier la performance des configurations étudiées (Figure 3).



**Figure 3 :** Durée nécessaire pour atteindre la température critique de l'acier pour chaque configuration

Ces résultats peuvent être nuancés dans la mesure où le concept de température critique défini par l'EN 1993-1-2 est basé sur l'hypothèse selon laquelle la température est uniforme dans le profilé métallique. Or la simulation numérique a montré qu'il peut exister un écart de températures important (jusqu'à 200°C) entre les semelles et l'âme du profilé métallique en « I » partiellement encapsulé. Cependant, même en considérant le critère donné pour les sections de classe 4, qui est le plus sévère, on constate que tous les profilés mixtes acier-bois étudiés présentent un comportement thermique intéressant, si on les compare à un profilé métallique sans protection. En outre, le bois renforce les parois métalliques vis-à-vis des instabilités locales et globales, un reclassement des sections d'acier de classe 4 vers les classes de sections supérieures est alors possible, ce qui permet de considérer une température critique de l'acier plus importante et un comportement thermique amélioré.

#### 4. Conclusion

Cette étude présente des résultats sur le comportement thermique des poutres hybrides acier-bois en situation d'incendie. Elle montre également le potentiel de ces poutres hybrides en termes de résistance au feu. En effet, bien que le bois soit un matériau combustible, une épaisseur de bois suffisante peut être utilisée comme protection anti-feu pour les poutres en acier. L'avantage du bois est sa capacité à fournir à la fois une protection incendie importante et un support mécanique à l'acier vis-à-vis des instabilités, tandis que sa légèreté n'augmente pas significativement le poids de la poutre. De plus, pour une même charge, l'utilisation d'éléments hybrides acier-bois plutôt que d'éléments en bois permet d'optimiser les dimensions de la section transversale de la poutre. Une analyse numérique thermomécanique et une analyse thermique expérimentale sont en cours pour valider et compléter la simulation numérique thermique proposée dans cette étude.

**Remerciements :** Les auteurs remercient le Tremplin Carnot MECD pour son soutien financier (Projet MiBAPro).

#### 5. Bibliographie

- [ALA 12] ALAM P., ANSELL M., SMEDLEY D., « Effects of reinforcement geometry on strength and stiffness in adhesively bonded steel-timber flexural beams », *Buildings*, vol. 2, 2012, p. 231–244.
- [AUD 12] AUDEBERT M., DHIMA D., TAAZOUNT M., BOUCHAÏR A., « Numerical investigations on the thermo-mechanical behavior of steel-to-timber joints exposed to fire », *Engineering Structures*, vol. 33, n° 12, 2011, p. 3257-3268.
- [CEN 03] COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, EN 1991-1-2, *Eurocode 1 - Actions sur les structures - Partie 1-2 : Actions générales - Actions sur les structures exposées au feu*, Bruxelles, Juillet 2003.
- [CEN 05a] COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, EN 1993-1-2, *Eurocode 3 - Calcul des structures en acier - Partie 1-2 : règles générales - calcul du comportement au feu*, Bruxelles, Novembre 2005.
- [CEN 05b] COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, EN 1995-1-2, *Eurocode 5 - Conception et calcul des structures en bois - Partie 1-2 : Généralités - Calcul des structures au feu*, Bruxelles, Septembre 2005.
- [DES 07] DESTEFANO J., « Flitch plate beams: Design guide », *Structure*, Juin 2007, p. 56–57.
- [JUR 17] JURKIEWIEZ B., DURIF S., BOUCHAÏR A., « Behaviour of steel-timber beam in bending », Eurosteel 2017, Copenhague, 13-15 septembre 2017, 9 pages.
- [MSC 14] MSC.SOFTWARE CORPORATION, *MSC MARC, User's Manual, vol. A: theory and user information*, 2014.
- [PIA 16] PIAZZA M., « Optimization process in the use of wood and wood-based materials in hybrid and composite structures », *World Conference on Timber Engineering WCTE 2016*, Vienne (Autriche), 22-25 août 2016, 10 pages.
- [SAK 03] SAKAMOTO I., KAWAI N., OKADA H., YUSA S., Final report of a research and development project on timber-based hybrid building structures, The University of Tokyo, 2003, 6 pages.
- [SAM 14] SAMAKE A., TAAZOUNT M., AUDEBERT P., PALMILI P., « Thermo-hydric transfer within timber connections under fire exposure: Experimental and numerical investigations », *Applied Thermal Engineering*, vol. 63, n° 1, 2014, p. 254-265.
- [WIN 16] WINTER W., TAVOUSSI K., PARADA F.R., BRADLEY A., « Timber-steel hybrid beams for multi-storey buildings: Final report », *World Conference on Timber Engineering WCTE 2016*, Vienne (Autriche), 22-25 août 2016, 10 pages.