

Étude du comportement thermomécanique de matériaux composites cellulósiques : application à la résistance au feu d'un bloc-porte en bois.

G. CUEFF^{a,b}, J.C. MINDEGUIA^b, V. DREAN^a, D. BREYSSE^b, G. AUGUIN^a

a. Efectis France, Espace Technologique, Route de l'Orme des Merisiers, 91193 SAINT-AUBIN, France

b. Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M), Université de Bordeaux1, 351 cours de la Libération, 33400 Talence, France

Résumé :

Dans le cadre de la sécurité incendie, les produits industriels destinés au marché de la construction doivent être soumis à des essais de résistance au feu. En particulier, des critères de températures limites à ne pas dépasser sont à satisfaire en face non-exposée des produits. Ces essais de résistance au feu s'avèrent être contraignants et coûteux pour les industriels. A ce titre, la société Efectis France et le laboratoire I2M de l'Université de Bordeaux 1 mènent des travaux dont l'objectif est de mettre au point un outil de simulation d'essai de résistance au feu appliqué à un bloc-porte en bois et produits dérivés (panneaux de particules et panneau de fibres). Nous présentons ici les premiers résultats de simulations thermiques et thermomécaniques obtenus. Ces résultats sont comparés à un essai au feu de panneaux composites cellulósiques. Le modèle numérique inclue la prise en compte de la dégradation thermique du matériau (pyrolyse) et la mise à jour des propriétés thermomécaniques du bois en fonction de la température.

Abstract:

In fire safety engineering, industrial products used in the construction have to satisfy to a fire resistance test. In particular, temperature criterion must be satisfied on the unexposed side of the product. These fire tests are constraining and costly for manufacturers. In this context, Efectis France and the I2M laboratory from Bordeaux University initiated a research program in order to develop a numerical model for simulating a fire resistance test on a door made of wood and wood-based materials (particles and fibers boards). The first results from thermal and thermomechanical modeling compared to real fire test on wood panels are presented in this paper. The numerical model takes in account the wood thermal degradation (pyrolysis) and the evolution of wood properties as a function of temperature.

Mots clefs : bois, aggloméré de bois, pyrolyse, thermomécanique, incendie, éléments finis.

1 Introduction

La sécurité incendie demeure l'une des préoccupations majeures lors de l'élaboration de produits industriels destinés au marché de la construction. En effet les incendies restent une cause fréquente d'accidents dans les bâtiments.

La sécurité incendie repose principalement sur la combinaison de protections actives et passives, notamment des éléments empêchant ou ralentissant la propagation des fumées ou des flammes, telles que des portes ou trappes dont le degré coupe-feu est prescrit par la réglementation française.

Les fabricants du domaine de la construction développent chaque jour de nouveaux produits qui doivent satisfaire aux procédures d'agréments techniques comprenant notamment des essais de résistance au feu dans des fours d'essai. La validation de la conformité des produits est lourde et coûteuse, et peut constituer un frein à l'innovation. Il est en outre difficile d'explorer des variantes de conception.

Ces raisons justifient de développer des moyens de simulation permettant de constituer un modèle numérique pour retranscrire le comportement d'un produit de la construction lors d'un essai de résistance au feu.

Les travaux présentés ici s'inscrivent dans cette démarche de mise en place d'un outil de simulation capable de reproduire de façon relativement fiable le comportement thermomécanique du produit testé. Ils font l'objet d'une thèse réalisée en collaboration avec Efectis France, laboratoire agréé en résistance au feu, et l'Institut de Mécanique et d'Ingénierie de l'Université de Bordeaux (I2M). Le principal objectif de la thèse est l'élaboration d'un outil intégré pour la modélisation de la résistance au feu de blocs-portes en bois et produits dérivés du bois (panneaux de fibres et de particules).

Dans le but de fournir au futur modèle de simulation les propriétés thermomécaniques à hautes températures des matériaux, des campagnes d'essais thermiques et mécaniques à haute température sont en cours sur des matériaux dérivés du bois. Nous nous intéressons plus particulièrement aux panneaux de fibres de bois à densité moyenne (ou MDF), aux panneaux de particules de bois standard (ou aggloméré de bois) et aux panneaux de particules de lin (ou aggloméré de lin), matériaux composant fréquemment les blocs-portes du marché.

Nous présentons ici les premiers résultats de simulations thermomécaniques appliquées à un essai réalisé dans un four de résistance au feu sur des panneaux de bois massif et de produits dérivés du bois (aggloméré de bois, aggloméré de lin, MDF). Nous nous concentrons plus particulièrement sur la simulation d'un panneau d'aggloméré de lin de dimensions 1000 x 465 x 33,5 mm et de masse volumique 390 kg/m³. L'échantillon était fixé lors de l'essai sur un cadre de béton cellulaire par l'intermédiaire de paumelles métalliques.

2 Présentation des modèles physiques

La simulation d'un essai de résistance au feu doit permettre de retranscrire l'évolution des températures dans le matériau ainsi que le comportement thermomécanique induit par ce transfert thermique (suivi des déplacements). Nous utilisons donc deux modèles distincts lors de nos simulations : un modèle thermique pour simuler le transfert thermique dans le matériau combustible couplé à un modèle thermo-élastique pour calculer les déformations d'origine thermique.

2.1 Modèle thermique

Nous faisons l'hypothèse qu'un matériau de type aggloméré de lin est suffisamment homogène pour utiliser un modèle de simulation thermique isotrope. La résolution de l'équation de diffusion de la chaleur est effectuée par un calcul aux éléments finis (procédure transitoire non linéaire). Le calcul des propriétés thermiques du matériau est basé sur une loi des mélanges qui prend en compte la teneur en eau initiale du matériau et la formation de charbon de bois lors de la dégradation thermique du produit autour de 300°C. En se basant sur l'évolution connue des fractions de masse volumique de chaque composé en fonction de la température (eau, bois, charbon de bois), la loi des mélanges nous permet d'actualiser les propriétés du matériau homogénéisé équivalent en fonction du champ de température atteint dans le solide (Équation 1), propriétés étant calculées à volume constant. Les propriétés thermiques de l'aggloméré de lin calculées par la loi et utilisées pour les simulations sont présentées sur la Figure 1.

$$\overline{\Psi}_{tot}(T(t)) = \frac{X_{bois} \times \Psi_{bois}(T(t)) + X_{eau} \times \Psi_{eau}(T(t)) + X_{char} \times \Psi_{char}(T(t))}{X_{bois} + X_{eau} + X_{char}}$$

avec $X_{bois, eau ou char}$ les fractions de masse volumique.

Équation 1 : Calcul des propriétés thermiques du matériau homogénéisé en fonction de la température et des fractions de masse volumique de chaque composé. Ψ représente soit la masse volumique, la conductivité thermique ou la chaleur spécifique des composées.

En plus de l'actualisation des propriétés thermiques en fonction de la température, les réactions de dégradation du matériau sont prises en compte dans le modèle. Deux réactions indépendantes sont utilisées pour simuler d'une part l'évaporation de l'eau et d'autre part la pyrolyse du bois (Figure 2).

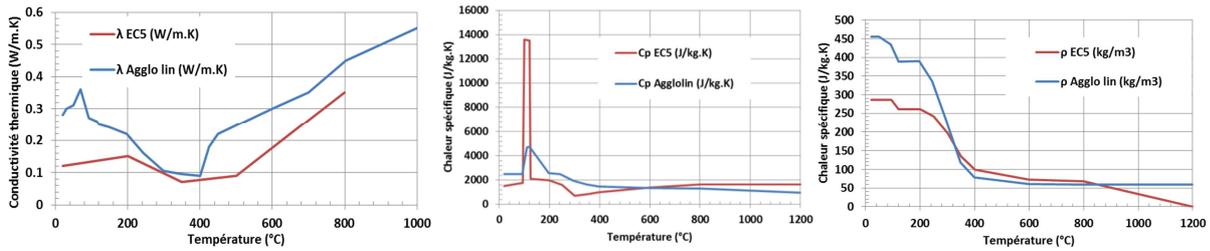


FIG. 1 – Propriétés thermiques calculées pour l’aggloméré de lin à partir d’une loi des mélanges. Les courbes sont comparées à celles données par l’Eurocode 5 [4].

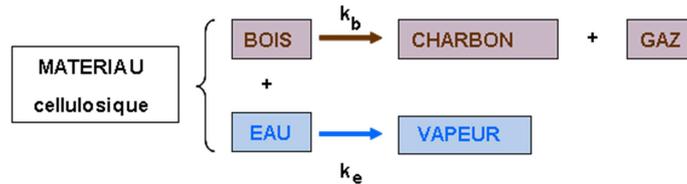


FIG. 2 – Schématisation simplifiée de la décomposition thermique d’un matériau cellulosique.

Ces réactions sont régies par des lois d’Arrhenius thermiquement activées d’ordre 1 (Équation 2). La cinétique de ces réactions permet de calculer des sources de chaleur volumique $Q_{e\text{ ou }b}$ (W/m^3) en fonction du taux d’avancement et de l’enthalpie $\Delta H_{e,b}$ de chaque réaction. Ces sources correspondent à de l’apport d’énergie (pyrolyse) et à de la consommation d’énergie (évaporation de l’eau) au cours du temps. L’Équation 3 présente l’équation de diffusion de la chaleur dans le matériau avec ajout d’une source interne de chaleur associée aux réactions d’évaporation et/ou de pyrolyse. Le rapport $\frac{d\tau_{e\text{ ou }b}}{dt}$ représente la dérivée du degré d’avancement de chaque réaction en fonction du temps.

$$\frac{d\tau_{e\text{ ou }b}}{dt} = A_{e\text{ ou }b} \exp^{-E_{e\text{ ou }b}/RT} \cdot (1 - \tau_{e\text{ ou }b})$$

Équation 2 : Cinétique d’évaporation (e) ou de pyrolyse du bois (b) d’après une loi d’Arrhenius.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + Q_e + Q_b \quad \text{avec} \quad Q_{e\text{ ou }b} = \frac{d\tau_{e\text{ ou }b}}{dt} * \Delta H_{e\text{ ou }b} * \rho(T)_{e\text{ ou }b}$$

Équation 3 : Equation de la chaleur dans le matériau avec ajout d’une source d’une source de chaleur secondaire (W/m^3) pour l’évaporation de l’eau Q_e et la pyrolyse du bois Q_b .

A ce niveau de l’étude, le modèle proposé ne prend pas en compte l’apport d’énergie interne due à la combustion des gaz de pyrolyse. Ce phénomène sera ultérieurement pris en compte de la même façon que pour l’évaporation et la pyrolyse (c’est-à-dire via une loi d’Arrhenius). D’autre part, le transport de masse, et en particulier de la vapeur, n’est pas pris en compte dans notre modèle. Des essais de transfert thermique au sein de matériaux à différents teneurs en eau nous permettront de juger de la nécessité de prendre en compte les échanges de masse (et les transports d’énergie associés) via des modèles de type Darcy et/ou Fick.

2.2 Modèle mécanique

Un modèle thermo-élastique isotrope est utilisé pour décrire le comportement mécanique de l’aggloméré de lin. La courbe de réduction du module d’élasticité du bois massif donnée par l’Eurocode 5 [4] est utilisée afin de prendre en compte la dégradation mécanique du matériau en fonction de la température. Le module d’élasticité initial est de 7,2 GPa. L’évolution avec la température du coefficient de dilatation thermique α ($^{\circ}C^{-1}$) est issue de résultats de la littérature. Il varie de $20 \cdot 10^{-6}/^{\circ}C$ ($50^{\circ}C$) à $-1,2 \cdot 10^{-4}/^{\circ}C$ ($300^{\circ}C$). Le coefficient de poisson est considéré constant et égal à 0,3.

Les propriétés mécaniques du matériau sont celles d’un bois tendre de type pin. Elles seront par la suite remplacées par des valeurs issues de mesures en température lors d’un essai de compression dans le sens de la hauteur du panneau. Les propriétés thermomécaniques du béton cellulaire (support du panneau) et de l’acier inoxydables (paumelles) sont respectivement issues des Eurocode 2 0 et 3.

3 Présentation de l'essai

Dans le but de valider notre modèle, des essais à l'échelle du produit ont été réalisés dans un des fours de résistance au feu d'Efectis France. Nous confrontons ici la simulation du comportement thermomécanique d'un panneau d'aggloméré de lin aux résultats expérimentaux.

3.1 Description de l'essai

L'essai a été réalisé sur six panneaux de bois et de produits dérivés du bois (MDF, aggloméré de bois, aggloméré de lin, pin massif), de dimensions 1000 x 465 mm x ep (ep = épaisseur allant de 22mm à 40 mm) [2]. Les six panneaux étaient insérés dans un voile d'essai en béton cellulaire par vissage sur cadres métalliques ou bien fixés à trois paumelles en acier inoxydable. Nous étudions ici un panneau d'aggloméré de lin d'épaisseur 33,5 mm, fixé sur paumelles (Figure 3). Les jeux de fonctionnement entre les panneaux et le cadre d'essai ont été comblés à l'aide de fibres minérales afin de réduire les échanges thermiques en bord de panneau.

L'élévation de température dans le four satisfait la courbe de chargement thermique conventionnel (norme NF EN 1363-1 [2]). Le panneau d'aggloméré de lin était instrumenté à l'aide de thermocouples en face non-exposée et dans l'épaisseur du matériau (Figure 3.b). Durant l'essai, le déplacement hors plan des panneaux a été mesuré par l'intermédiaire de capteurs à fil tendu. Les déplacements ont été mesurés au centre de chaque panneau, ainsi qu'au niveau d'un coin inférieur (sous l'attache simulant une serrure).

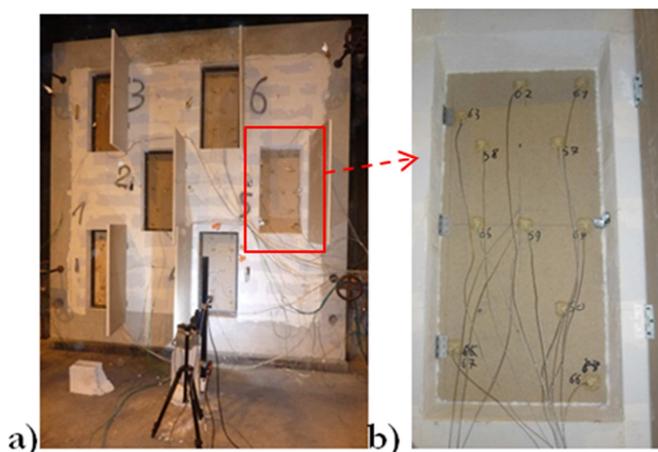


FIG. 3 – a) Vue de la face non-exposée du four d'essai de dimension 3 x 3m, b) Echantillon de lin d'épaisseur 33,5 mm monté sur paumelles.

4 Modélisation de l'essai

Le code de simulation par éléments finis CASTEM [1] a été utilisé pour modéliser l'essai de résistance au feu décrit dans la section 3. Seul le système panneau d'aggloméré en lin + paumelles/serrure, ainsi qu'une partie du cadre d'essai en béton cellulaire d'épaisseur 200 mm autour du panneau ont été modélisés. La fibre minérale utilisée pour combler le jeu de fonctionnement n'est pas prise en compte. En effet, la fibre minérale aura peu d'impact sur le comportement mécanique de l'ensemble panneau + cadre d'essai. Pour le transfert thermique, l'effet de la fibre minérale est également négligé.

4.1 Géométrie et conditions aux limites

Des éléments volumiques cubiques de dimensions 17 x 17 x 3 mm³ ont été utilisés pour simuler l'essai. Le maillage global de l'élément simulé est présenté sur la Figure 4. Il comprend une partie du cadre d'essai (épaisseur 200 mm) et le panneau d'aggloméré de lin.

Côté face exposée du panneau, les échanges thermiques sont régis par une condition aux limites mixte de type convection et rayonnement, en prenant en compte l'évolution de la température des gaz chauds du four. Les échanges par convection et rayonnement en face non-exposée, côté paumelles, se font par rapport à la température (constante) de la halle d'essai (13°C). D'un point de vue mécanique, les déplacements et rotations de la partie du cadre d'essai maillé sont bloqués. Les paumelles sont également maillées en considérant un encastrement parfait à la fois dans le cadre d'essai et dans le panneau d'aggloméré.

Enfin, une procédure numérique a été développée afin de prendre en compte les jeux de fonctionnement (entre le panneau et le cadre d'essai) et les effets que cela peut avoir sur le comportement mécanique global du panneau.

5 Résultats et discussion

Les résultats des 28 premières minutes de simulation thermomécanique du panneau d'aggloméré de lin monté sur paumelles sont présentés sur les figures 4 à 6. Les résultats sont présentés en termes de températures et de déplacements, et sont comparés aux mesures expérimentales. La déformée du maillage et les isothermes obtenus à 28 minutes de simulation (soit le temps de ruine du panneau obtenu lors de l'essai) sont représentés sur la Figure 4.

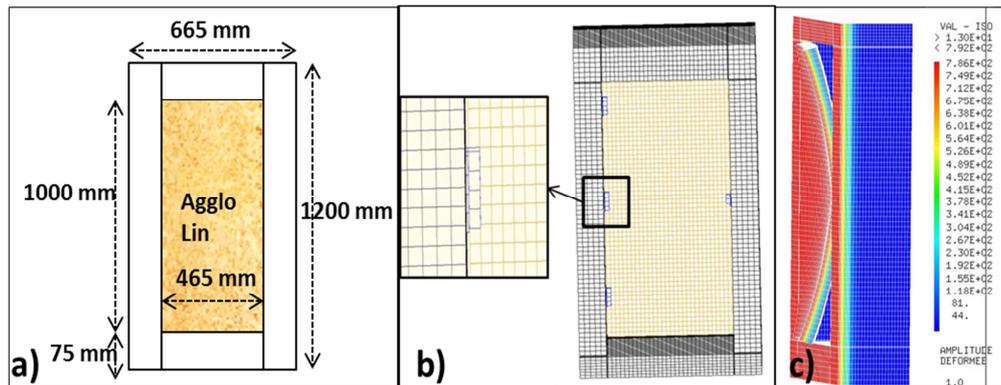


FIG. 4 – a) Dimensions de l'essai simulé, b) Maillage initial du panneau d'aggloméré de lin monté sur paumelles (côté face non-exposée au feu), c) Déformée 3D et isothermes à 28 minutes de simulation du cadre en béton et du panneau d'aggloméré de lin.

La Figure 5 présente une comparaison des températures simulées avec celles mesurées durant l'essai. Sur la base de notre modèle numérique initial, le champ de température au sein du matériau n'est pas correctement reproduit. Tout particulièrement, l'utilisation de propriétés thermiques obtenues à partir d'une loi de mélange, couplée à la prise en compte, via des lois d'Arrhenius, de la consommation d'énergie due à l'évaporation de l'eau, ne suffisent pas à retranscrire le plateau qui est observé entre 90 °C et 100 °C et qui résulte de l'évaporation de l'eau. D'autres simulations thermiques ont alors été menées en calibrant les propriétés thermiques manuellement, en particulier l'évolution avec la température de la conductivité thermique et de la chaleur spécifique du matériau. Nous avons ainsi montré qu'il était nécessaire d'adopter un "pic" de conductivité thermique de $1,5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ entre 20°C et 90°C, et un "pic" de chaleur spécifique de $20 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ à 90°C. Si le pic de chaleur spécifique peut être expliqué par une consommation très importante d'énergie lors de l'évaporation de l'eau, il est difficile de justifier la cinétique d'élévation de température très rapide au début d'essai par un pic « non physique » de conductivité thermique. L'amélioration du modèle thermique est donc menée en ce sens.

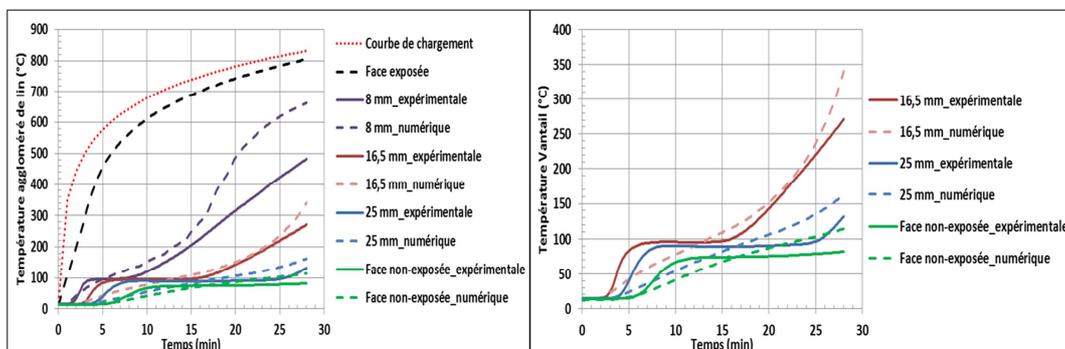


FIG. 5 – Gauche : comparaison des températures expérimentales (traits pleins) et numériques (traits pointillés) à 8mm, 16,5 mm, 25 mm depuis la face exposée du panneau, et en face non-exposée. Droite : zoom sur les températures à 16,5 mm, 25mm et en face non-exposée.

La Figure 6 présente les déplacements relevés au centre et au coin inférieur sous la serrure du panneau d'aggloméré de lin. Après 28 minutes de chauffage, le déplacement mesuré au centre du panneau

d'aggloméré est du même ordre de grandeur que le déplacement simulé, soit 18,5 mm mesurés contre 14,3 mm pour la simulation. Nous observons bien un cintrage de la partie centrale du panneau en direction opposée du feu (visible sur la figure 4.c). En revanche, l'historique des déplacements n'est pas correctement retranscrit. Pour ce qui est du déplacement au coin inférieur du panneau sous le blocage de la serrure, le déplacement est surestimé par la simulation : 14,7 mm simulés, quand il est seulement de 0,6 mm lors de l'essai au feu. Même si la précision des capteurs de déplacement utilisés est de l'ordre du millimètre, les déplacements ne sont pas bien retranscrits par notre modèle actuel. Ces résultats traduisent la forte interaction entre le transfert thermique et le comportement mécanique, le premier étant le moteur du second. Ainsi, une mauvaise prédiction du transfert de chaleur dans le matériau interdit une bonne prédiction des déplacements.

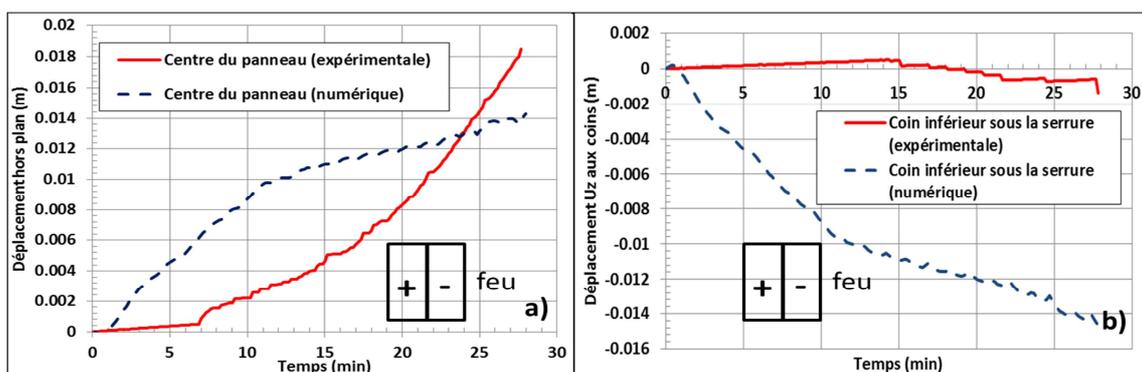


FIG. 6 – Déplacements numériques et expérimentaux : a) au centre du panneau d'aggloméré de lin en face non-exposée, b) au coin inférieur du panneau sous la serrure en face non-exposée.

6 Conclusion

L'étude thermomécanique des produits de la construction est complexe du fait de la dégradation thermique de la matière et les répercussions qu'elle peut induire d'un point de vue thermique et mécaniques (modification des propriétés du matériau). Cela est d'autant plus vrai pour des matériaux ligno-cellulosiques, où l'évaporation de l'eau, la pyrolyse du bois et la dégradation des propriétés physiques et mécaniques en fonction de la température doivent être convenablement prises en compte. Ces phénomènes et leurs caractéristiques sont souvent peu documentés pour les produits dérivés du bois. Les premiers résultats de simulation thermomécaniques présentés ici apparaissent éloignés des mesures faites lors d'un essai en four de résistance au feu. Le modèle thermique proposé doit faire l'objet d'améliorations afin de reproduire convenablement le transfert thermique dans l'ensemble de l'échantillon et non pas uniquement en face non-exposée. Il faut notamment mieux prendre en compte les phénomènes liés à la consommation d'énergie induite par l'évaporation de l'eau. Un des défis de ces travaux consiste à simuler ces phénomènes de manière physique avec un calcul des sources de chaleur en fonction de l'avancement des réactions de dégradation thermique (pyrolyse) qui ont lieu dans le matériau.

D'un point de vue mécanique, les résultats présentés ici ne correspondent pas aux mesures de l'essai. Des simulations doivent être réalisées avec le transfert thermique correctement reproduit afin de prendre en compte une évolution correcte du champ de température au sein du matériau. En complément des travaux numériques, des essais de caractérisation thermique et mécanique des produits dérivés du bois sont en cours au sein du laboratoire I2M à Bordeaux, et permettront de mieux comprendre la rhéologie de ces matériaux sous hautes températures. L'emploi de données mesurées aura certainement un impact direct sur l'amplitude des déformations simulées.

Références

- [1] CASTEM 2009, Logiciel de simulation par éléments finis, CEA, www-cast3m.cea.fr
- [2] Rapport 2013-Efectis-Résultats de l'essai 12-V-767.
- [3] NF EN 1363-1 : 2000, « essais de résistance au feu, partie 1 : exigences générales ».
- [4] EN 1995-1-2:2004, Eurocode 5, design of timber structures, part 1-2: general structural fire design, 2004.
- [5] EN 1992-1-2:2005, Eurocode 2, calcul des structures en béton, partie 1-2: règles générales – calcul du comportement au feu, 2005.