
Développement d'un modèle thermomécanique du comportement sous agressions thermiques de matériaux cellulosiques : Application à un essai de résistance au feu d'un bloc-porte en bois.

Cueff Guillaume¹

¹ Efectis France / I2M, Bât. Manager St-Jean 19/23 Quai de Paludate, 33800 Bordeaux, guillaume.cueff@efectis.com

Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert »

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 normalisés. En particulier, des critères de température doivent être satisfaits sur la face non-exposée du produit et une attention particulière doit être apportée à la déformation hors-plan du produit. Afin de pallier aux contraintes techniques ou économiques liées à la réalisation de ces essais, un programme de recherche a été lancé dont l'objectif principal est de développer un outil numérique pour simuler un essai de résistance au feu sur un bloc-porte en bois et matériaux à base de bois (panneaux de particules). En se basant sur le champ de température simulé et l'estimation des déformations globales de la porte coupe-feu, des études paramétriques peuvent être réalisées pour déterminer le comportement du produit lors d'un essai de résistance au feu et ainsi réduire le nombre d'essais réels. Un modèle numérique de dégradation thermomécanique de produits cellulosiques prenant en compte la variation des propriétés du matériau est développé. Des simulations du transfert thermique et du comportement thermomécanique du produit sont ensuite effectuées. Les résultats numériques sont comparés à des données expérimentales issues d'un essai au feu à grande échelle.

ABSTRACT. In the context of fire safety, industrial products used in the building construction market have to satisfy to a standard fire resistance test. In particular, a temperature criterion must be satisfied on the unexposed side of the product and attention should be given to the deformation of the product during fire. These fire tests are restrictive and costly. In this context, a research program was initiated whose main objective is to develop a numerical thermo-mechanical model for simulating a fire resistance test on a doorset composed of wood and wood-based materials (particles and fibres boards). Based on simulated temperature field and estimation of the global bending of the fire door, the model allows carrying out parametrical studies in order to determinate the behaviour of the product under a real fire resistance test, which will lead to reduce the number of high-cost real fire tests. A numerical model for fire degradation of wood-based products is developed by taking into account temperature dependence of thermo-mechanical properties. Simulations of thermal transfer and thermomechanical behaviour of a doorset exposed to fire are performed. The numerical results are compared to experimental data.

MOTS-CLÉS : Bois, Feu, Pyrolyse, Panneau de particules, Transfert de chaleur, Thermomécanique.

KEY WORDS: Wood, Fire Resistance, Pyrolysis, Particleboard, Heat Transfer, Thermomechanical.

1. Introduction

La sécurité incendie est une préoccupation majeure dans le domaine de la sécurité des personnes et notamment en ce qui concerne la construction de bâtiments. Elle est basée 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 [NFE 00]. Ces produits industriels doivent ainsi satisfaire des agréments techniques, comprenant entre autre des essais de résistance au feu, qui sont réalisés dans des fours de laboratoire agréés [NFE 00]. Ce processus de validation de la résistance au feu d'un produit est complexe et peut être un frein à l'innovation des industriels.

Dans ce contexte, l'utilisation d'outils de simulation peut offrir un complément aux essais de résistance à feu, pour vérifier le comportement au feu d'un produit. Le concept de « four virtuel » est ainsi développé [CAY 11] afin de modéliser un essai de résistance au feu. Ce concept est basé sur la simulation couplée de la phase gazeuse à l'intérieur du four d'une part (utilisation d'un logiciel de mécanique des fluides avec modèle de combustion) et le comportement thermique et/ou thermomécanique du solide d'autre part (le plus souvent effectuée avec des solveurs par éléments finis). L'objectif d'un tel outil est de reproduire numériquement le comportement thermomécanique du produit testé lorsqu'il est exposé à un feu standard dans un four d'essai. L'utilisation d'un « four virtuel » permet ainsi, sur la base d'un essai de référence, d'évaluer un plus grand nombre de variantes qu'elles soient dimensionnelles, conceptuelles ou techniques.

Les travaux présentés ici s'inscrivent dans cette démarche de mise en place d'un outil numérique de « four virtuel ». Ils ont fait 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). Nous présentons ici les résultats de simulations thermomécaniques d'un panneau d'aggloméré de lin et leur confrontation à des données expérimentales issues d'un essai à grande échelle réalisé dans un four de résistance au feu. Nous présentons en premier lieu le modèle numérique. Ce modèle comprend un modèle de conduction de la chaleur couplé à un modèle thermo-élastique. Les réactions de vaporisation et de pyrolyse du matériau sont modélisées par des lois d'Arrhenius et leurs impacts thermiques respectifs sont pris en compte par l'ajout de sources de chaleur. Nous présentons ensuite l'essai au feu à grand échelle puis une comparaison des résultats numériques et des données expérimentales. Pour les besoins du modèle développé, des essais de caractérisation thermiques et mécaniques ont aussi été réalisés. Les résultats de ces essais ne sont pas présentés ici mais les propriétés thermo-mécaniques utilisées en sont directement issues.

2. Modèle numérique

Le modèle numérique a été développé sur le logiciel de calcul par éléments finis CAST3M [CAS 09]. En particulier, des procédures spécifiques ont été développées afin de prendre en compte les transformations de phase (vaporisation de l'eau), la dégradation thermique du matériau à haute température (pyrolyse) et la combustion des gaz de pyrolyse. Le modèle numérique est divisé en deux parties : le modèle de conduction de la chaleur et le modèle thermo-élastique.

2.1. Modèle thermique

2.1.1. Équation de la chaleur

Le transfert de chaleur par conduction au sein du solide est résolu à l'aide d'une loi de Fourier [1] dans laquelle des sources d'énergie volumiques Q_* sont ajoutées pour prendre en compte l'impact des réactions thermiquement activées. Q_* comprend ainsi les sources d'énergie associées à la vaporisation de l'eau du matériau, aux réactions de pyrolyse (cellulose, hémicellulose, lignine) et à la combustion des gaz de pyrolyse.

$$\rho_s c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + Q_* \quad [1]$$

Un modèle multi-réactionnel composé de six réactions indépendantes est utilisé pour décrire la dégradation thermique du matériau cellulosique. Ces réactions sont chacune gouvernées par des lois d'Arrhenius qui sont présentées dans la partie 2.1.2.

2.1.2. Sources d'énergie

Étant donné que la vaporisation de l'eau et les réactions de pyrolyse du matériau sont des réactions thermiquement activées, il a été proposé de les simuler en utilisant des lois d'Arrhenius [DIB 08]. Pour chaque

loi, un degré d'avancement χ_i est lié à la variation de l'avancement de la réaction en fonction du temps $d\chi_i/dt$ selon l'équation [2]. Le schéma réactionnel est représenté sur la Figure 1.

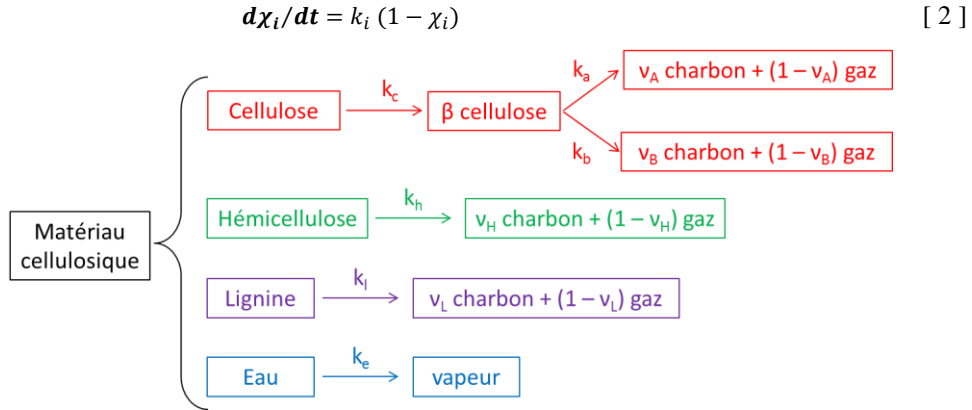


Figure 1. Schéma multi-réactionnel permettant de décrire la dégradation thermique d'un matériau cellulosique [DIB 08].

Dans l'équation [2], k_i représente la cinétique de réaction qui est dépendante de la température d'après l'équation [3].

$$k_i = A_i \exp(-E_i/RT) \quad [3]$$

À chaque pas de temps t_i , les cinétiques des réactions sont calculées à chaque nœud du maillage en fonction du champ de température au pas de temps précédent t_{i-1} .

Finalement, les sources d'énergie composant Q_* sont liées aux vitesses des réactions de vaporisation et de pyrolyse suivant l'équation [4].

$$Q_i = d\chi_i/dt * \rho_i * Hr_i \quad [4]$$

Où ρ_i est la masse volumique du composant et Hr_i l'énergie de réaction associée à la vaporisation et aux réactions de pyrolyse.

Les sources d'énergie associées à la combustion des gaz de chaque réaction de pyrolyse (cellulose, hémicellulose, lignine) sont calculées selon l'équation [5].

$$Q_{c_i} = (\chi_{s_n} - \chi_{s_{n-1}}) * (\rho_{s_{ini}}/dt) * Hr_{c_i} * (\%c/100) \quad [5]$$

Où $\rho_{s_{ini}}$ est la masse volumique initiale du solide, Hr_{c_i} est la chaleur de combustion des différentes réactions de pyrolyse et $\%c$ est le pourcentage de gaz combustible formé lors des réactions de pyrolyse. Nous faisons comme hypothèse que les gaz combustibles émis dans l'épaisseur du matériau sont instantanément transmis au niveau de la face exposée. Les sources de combustion sont donc appliquées au niveau de la face exposée du matériau sur une épaisseur réduite à quelques mailles.

2.1.3. Variation des propriétés thermiques

L'exposition à la chaleur du bois massif [JAN 04] et des produits dérivés du bois [CUE 14] entraîne une modification des propriétés thermiques. La variation des propriétés thermiques en fonction de la température a un impact non négligeable sur la simulation d'un transfert thermique. Dans le but de prendre en compte la variation des propriétés thermiques de l'aggloméré de lin étudié, une loi des mélanges a été développée. La conductivité thermique et la masse volumique sont calculées en fonction des fractions massiques des trois phases suivantes : l'aggloméré de lin sec, l'eau et le charbon de bois conformément aux équations [6] et [7]. La variation de la chaleur spécifique dépend des fractions volumiques de ces trois phases selon l'équation [8]. À chaque pas de temps de simulation, la fraction massique et volumique de chaque phase est déduite des lois d'Arrhenius présentées dans la section 2.1.2.

Les équations [6] à [8] prennent en compte les degrés d'avancement de la vaporisation de l'eau (χ_{ke}) et de la pyrolyse de la cellulose (χ_{kc}). La formation de charbon de bois est prise en compte grâce au taux de production γ (exprimé en fraction massique de l'aggloméré de lin sec). La teneur en eau initiale du matériau est prise en compte à l'aide du coefficient β .

$$\lambda_{tot} = (1 - \chi_{kc}) \cdot \lambda_s + \frac{\rho_s}{\rho_{char}} \cdot \gamma \cdot \chi_{kc} \cdot \lambda_{char} + \frac{\rho_{se}}{\rho_e} \cdot \beta \cdot (1 - \chi_{ke}) \cdot \lambda_e \quad [6]$$

$$\rho_{tot} = \rho_s \cdot [1 + \chi_{kc} (\gamma - 1) + \beta(1 - \chi_e)] \quad [7]$$

$$Cp_{tot} = \frac{(1 - \chi_{kc}) \cdot Cp_s + \gamma \cdot \chi_{kc} \cdot Cp_{char} + \beta(1 - \chi_{ke}) \cdot Cp_e}{[1 + \chi_{kc} (\gamma - 1) + \beta(1 - \chi_{ke})]} \quad [8]$$

2.2. Modèle thermo-élastique

Un modèle mécanique élastique orthotrope a été utilisé dans cette étude. La modification des constantes élastiques est pilotée par l'avancement de la réaction de pyrolyse χ_{kc} .

Le module d'élasticité dans le plan du panneau $E_{x,y}^T$ est calculé à chaque pas de temps d'après l'équation [9] où $E_{x,y}^0$ est le module d'élasticité mesuré à 20 °C et χ_{kc} est le degré d'avancement de la réaction de pyrolyse. Selon [CUE 14] et [NAJ 05], le module d'élasticité des panneaux de particules est très dépendant des directions d'orthotropie. Il apparaît généralement que le module hors-plan est ainsi 80 à 90 % plus faible que le module dans le plan du panneau. L'équation [10] est utilisée pour déterminer le module d'élasticité hors-plan E_z^T . Les coefficients de Poisson sont calculés selon les équations [11] et [12]. Les valeurs des constantes élastiques mesurées à 20 °C sont présentées dans la section 4.2

$$E_{x,y}^T = E_{x,y}^0 \cdot (1 - \chi_{kc}) \quad [9]$$

$$E_z^T = E_z^0 \cdot (1 - \chi_{kc}) \quad [10]$$

$$\nu_{xy}^T = \nu_{xy}^0 \cdot (1 - \chi_{kc}) \quad [11]$$

$$\nu_{yz}^T = \nu_{xz}^T = \nu_{xz,yz}^0 \cdot (1 - \chi_{kc}) \quad [12]$$

Peu de données sont disponibles concernant les modules de cisaillement de l'aggloméré de lin. L'équation [13] est retenue pour déterminer le module de cisaillement G_{xy} . Les modules G_{yz} et G_{xz} sont quant à eux issus des travaux de Najafi [NAJ 05] (équation [14]).

$$G_{xy}^T = \frac{E_{x,y}^T}{2(1 + \nu_{xy}^T)} \quad [13]$$

$$G_{xz}^T = G_{yz}^T = \frac{E_{x,y}^T}{8} \quad [14]$$

Les coefficients de dilatation thermique $\alpha_{x,y,z}$ de l'aggloméré de lin utilisés dans les simulations sont ceux mesurés en laboratoire et présentés dans la section 4.2. Il apparaît en particulier que le coefficient de dilatation thermique dans la direction perpendiculaire à la fibre du bois est 5 à 10 fois plus important que celui dans la direction longitudinale de la fibre. Il s'agit également d'un résultat généralement admis pour le bois massif.

3. Essai à échelle réelle sur un four de résistance au feu

Pour estimer la pertinence du modèle numérique développé dans des conditions d'incendie, un essai sur un four de résistance au feu a été réalisé sur des maquettes de blocs-portes composés de produits dérivés du bois. Cet essai a été réalisé au laboratoire EFECTIS France. Les maquettes (dimensions 1000 mm x 465 mm x épaisseurs) ont été exposées au chargement thermique conventionnel EN-1363-1 [NFE 00], jusqu'à leur ruine complète.

Les températures et déplacements de six panneaux de produits dérivés du bois (Figure 2 (a)) ont été mesurés. Le travail présenté ici se concentre exclusivement sur les deux panneaux d'aggloméré de lin testés lors de l'essai et plus particulièrement sur celui fixé sur trois paumelles en acier inoxydable (dimensions des paumelles : 60 x 50 mm²) (Figure 2 b). Les dimensions du panneau d'aggloméré de lin sont 1000 x 465 x 33,5 mm³.

L'instrumentation de l'échantillon a consisté en 17 thermocouples de type K placés sur la face non-exposée et dans l'épaisseur du matériau (à 8 mm, 16,5 mm et 25 mm de la face exposée). Les déplacements hors-plan ont été mesurés en utilisant un capteur filaire placé au centre de la face non-exposée du panneau (précision de l'ordre du millimètre).

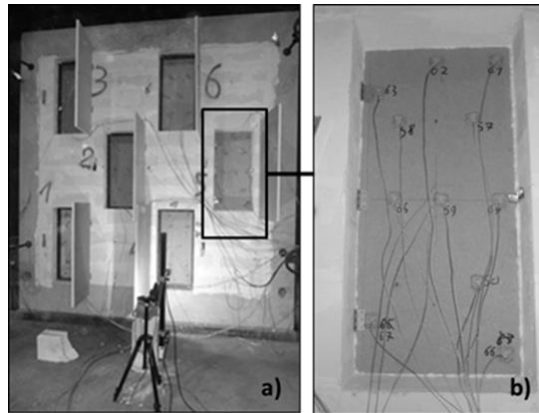


Figure 2. a) Face non-exposée du four d'essai avec les six panneaux à base de produits dérivés du bois, b) panneau d'aggloméré de lin fixé sur trois paumelles en acier (à gauche sur la photo) et avec une cornière métallique reproduisant la serrure (à droite sur la photo).

4. Résultats

4.1. Simulation du transfert thermique

Comme décrit au § 3, un panneau d'aggloméré de lin a été exposé au chargement conventionnel EN-1363-1 [NFE 00] sur un four de résistance au feu. Nous présentons ici les températures mesurées dans le panneau lors de l'essai que nous comparons aux températures simulées. La simulation est réalisée à partir d'un maillage 2D (éléments quadratiques à 4 nœuds) représentatif de l'épaisseur du panneau (Figure 3). Une condition aux limites de type mixte (convection et rayonnement) est retenue pour la face exposée et non-exposée du panneau. Les coefficients d'échange convectif H sont respectivement de 25 et de 4 $W/m^2.K$ pour la face exposée et non-exposée. Les coefficients d'échange radiatif ϵ sont égaux à 0,9 pour les deux faces du panneau. La teneur en eau β du panneau est de 10 % et le pourcentage de gaz combustibles issu des réactions de pyrolyse $\%c$ est de 20 % [COU 08]. Du fait de la faible épaisseur du panneau et de la forte agression thermique au niveau de la face exposée, le transfert thermique étudié est majoritairement unidirectionnel suivant l'épaisseur du panneau. De plus, certains phénomènes complexes tels que la fissuration et la réduction de l'épaisseur du matériau lors de sa dégradation thermique ne sont pas pris en compte dans les simulations. Nous considérons donc que l'épaisseur du matériau demeure constante lors du transfert thermique.

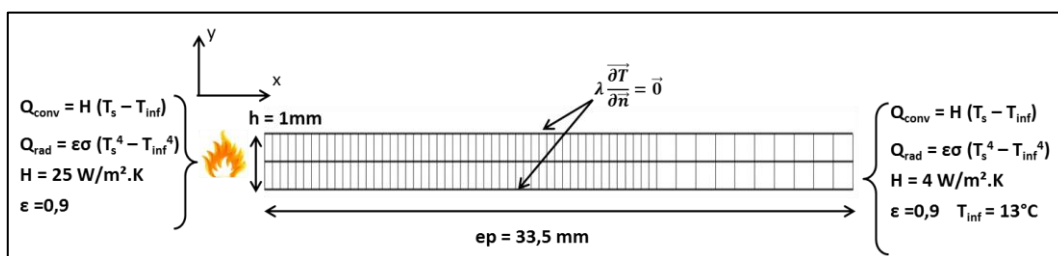


Figure 3. Maillage et conditions aux limites thermiques utilisées pour la simulation du transfert thermique de l'aggloméré de lin.

Les propriétés thermiques et les paramètres des différentes lois d'Arrhenius utilisées pour la simulation sont présentés dans le Tableau 1 et le Tableau 2.

Tableau 1. Propriétés thermiques utilisées pour les différents composants.

	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg.K)	λ (W/m.K)
Aggloméré de lin	373	1636	T = 20 °C : 0,123 ; T = 500 °C : 0,29

Charbon de bois	93	1150	T = 20 °C : 0,08 ; T = 900 °C : 0,25
Eau	1000	4286	0,658

Tableau 2. Constantes cinétiques des différentes lois d'Arrhenius.

	kc	ka	kb	kh	kl	ke
A_i (s)	4,71 ^{E31}	1,30 ^{E10}	3,20 ^{E14}	5,78 ^{E13}	5,09 ^{E5}	1,0 ^{E19}
E_i (J/mol)	3,33 ^{E5}	1,51 ^{E5}	1,96 ^{E5}	1,04 ^{E5}	1,64 ^{E5}	1,62 ^{E5}
Hr_i (kJ/kg)	0	418	418	1 080	79	-2 260
Hc_i (kJ/kg)	0	14 000	14 000	10 000	13 000	-

Les températures simulées au niveau de la face non-exposée et dans l'épaisseur du matériau (à 8 mm, 16,5 mm et 25 mm de la face exposée) sont comparées aux résultats expérimentaux sur la Figure 4. Des plateaux de température autour de 100 °C sont clairement observés sur les courbes expérimentales. Ces plateaux sont associés à la réaction (très endothermique) de vaporisation de l'eau contenue dans le matériau. De plus, nous notons que la durée des plateaux de vaporisation augmente à mesure que l'on s'éloigne de la face exposée : la durée du plateau est d'environ 4 min à 8 mm de la face exposée et d'environ 20 min au niveau de la face non-exposée (33,5 mm). Cela peut s'expliquer d'une part par une cinétique de réaction plus lente dans des zones éloignées de la face exposée (apport d'énergie plus lent) et d'autre part par une probable augmentation de la concentration d'humidité dans les zones éloignées de la face exposée (du fait du transport d'humidité dans la direction opposée au feu).

Concernant les résultats numériques, nous observons que le transfert thermique est bien simulé en dessous de 100 °C. La prise en compte d'une consommation de chaleur associée à la réaction de vaporisation de l'eau permet d'obtenir une stabilisation de la température sous forme de plateaux autour de 100 °C. Cependant, la sortie de la phase de vaporisation a lieu plus tôt dans le temps dans le cas des simulations. Ces écarts tendent à se réduire lorsque l'on se rapproche de la face non-exposée du panneau.

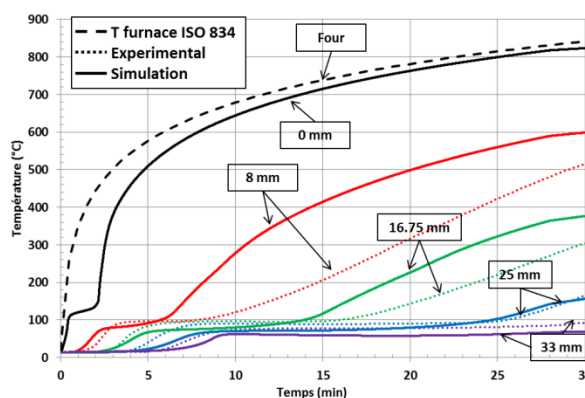


Figure 4. Températures prédites et mesurées pour le panneau d'aggloméré de lin lors de l'essai sur un four de résistance au feu.

4.2. Simulation du comportement thermomécanique

La simulation thermomécanique est réalisée sur un maillage 3D à l'échelle 1:1 (éléments finis cubiques à 8 nœuds) du panneau testé (Figure 5). Les conditions aux limites mécaniques utilisées consistent à bloquer les déplacements du panneau au niveau des paumelles et de la serrure. Les propriétés thermiques et mécaniques des éléments en acier (paumelles et serrure) sont issues de la norme EN-1993-1-1 [NFE 93].

Les propriétés mécaniques initiales utilisées pour la simulation sont présentées dans le Tableau 3. Leurs valeurs en fonction de la température sont calculées comme présenté dans la section 2.2. Les coefficients de dilatation thermique sont présentés sur la Figure 6.

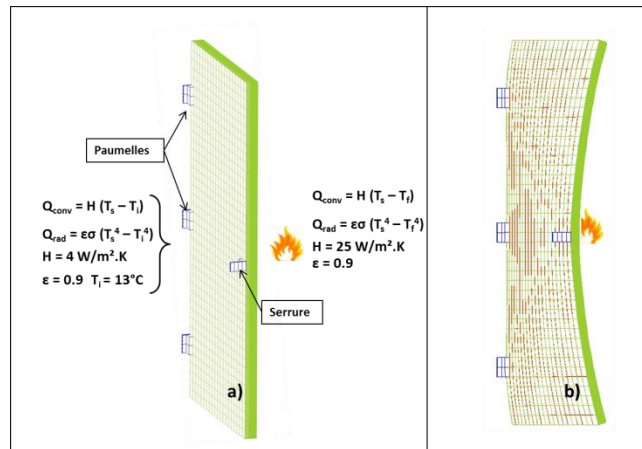


Figure 5. Maillage 3D et conditions aux limites thermiques utilisés pour la simulation thermomécanique du panneau d'aggloméré de lin fixé sur trois paumelles en acier. A droite, visualisation de la déformée du panneau soumis au feu.

Tableau 3. Propriétés élastiques initiales (20 °C) dans le plan et hors-plan du panneau.

Dans le plan		Hors-plan	
$E_{x,y}^0$ (MPa)	658	E_z^0 (MPa)	22
ν_{xy}	0,24	$\nu_{xz,yz}$	0,019

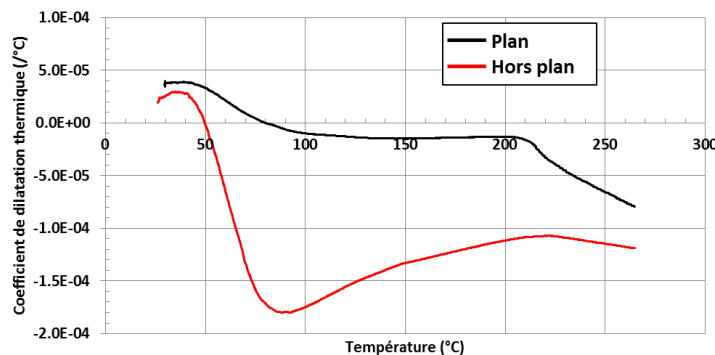


Figure 6. Coefficients de dilatation thermique utilisés pour la simulation thermomécanique.

La comparaison des déplacements expérimentaux et numériques au centre du panneau d'aggloméré de lin, au niveau de la face non-exposée, est présentée sur la Figure 7.

Concernant les déplacements expérimentaux, nous remarquons que le centre du panneau se déplace continuellement dans la direction opposée au four d'essai (déplacement hors-plan). Le déplacement maximal est de 18 mm à 28 min de feu. Ce déplacement est la conséquence du gradient thermique au sein du panneau et du retrait dans le plan (coefficient de dilatation négatif, voir Figure 6) en face exposée.

Les déplacements simulés au centre du panneau sont proches des déplacements expérimentaux sur la première partie de l'essai (15 min). À 15 min, le déplacement simulé est de 4,4 mm contre 4,6 mm lors de l'essai. Sur la seconde partie de l'essai, les écarts entre les résultats expérimentaux et numériques tendent à augmenter. Les déplacements simulés sont ainsi plus faibles avec un déplacement en fin de simulation de 5,5 mm à 28 min contre 18 mm lors de l'essai.

En premier lieu, cet écart peut s'expliquer par des différences de transfert thermique expérimental et simulé au sein du matériau (§ 4.1). Le champ de température n'est effectivement pas parfaitement retranscrit sur la première moitié de l'épaisseur du matériau, particulièrement au-delà de 100 °C. Or selon les mesures présentées à la Figure 6, des écarts de température aux alentours de 100 °C peuvent entraîner des écarts importants de déformation thermique. Deuxièmement, il a été montré dans [CUE 14] que la dilatation thermique du matériau est fortement dépendante de la teneur en eau du matériau. Nous avons retenu pour les simulations les courbes de

dilatation mesurées sur un panneau à 8 % de teneur en eau. Or il est possible que la teneur en eau des panneaux testés au feu ait été supérieure (c'est une donnée manquante à l'étude). Enfin, il est important de noter que seul un panneau d'aggloméré de lin a été testé au feu (il est en effet assez complexe et onéreux de répéter des essais au feu d'une telle échelle). Par conséquent, les mesures ne sont pas répétées et l'incertitude de mesure des déplacements n'est donc pas quantifiée.

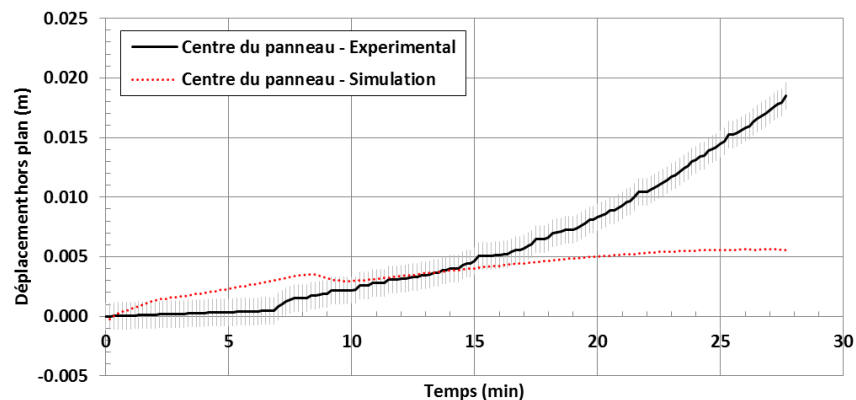


Figure 7. Comparaison des déplacements expérimentaux et numériques hors-plan au centre du panneau d'aggloméré de lin (le déplacement est compté positif dans la direction opposée au feu).

5. Conclusion

Dans ce document, un modèle de pyrolyse de matériaux celluloseux a été développé et utilisé pour simuler le comportement thermomécanique d'une porte lors d'un essai de résistance au feu. Le modèle thermique est basé sur une loi de Fourier qui prend en compte des sources de chaleur associées aux réactions chimiques prenant place au sein du matériau lors d'une exposition à un feu : vaporisation de l'eau, pyrolyse des constituants du bois et combustion des gaz de pyrolyse. Ces réactions sont simulées par l'intermédiaire de lois d'Arrhenius. Les différentes cinétiques de réaction pilotent de plus l'évolution des propriétés thermiques d'une part (via une loi des mélanges) et mécaniques d'autre part (modèle élastique orthotrope).

Le modèle thermique permet d'obtenir de bonnes tendances du transfert de chaleur et la prise en compte de la réaction de vaporisation permet de retranscrire les plateaux de température observés autour de 100 °C lors de l'expérience. Une description plus détaillée des phénomènes entrant en jeu lors du transfert thermique et notamment la prise en compte d'un modèle de transfert de masse nous permettrait sans doute de mieux simuler la durée de ces plateaux de vaporisation.

Le modèle thermo-élastique orthotrope développé nous permet de déterminer l'impact des réactions de dégradation sur les propriétés mécaniques du matériau celluloseux et donc sur les déformations du panneau. Les résultats de déplacement sont encourageants. Les ordres de grandeur sont retrouvés même si les déplacements ne sont pas parfaitement retranscrits sur la durée totale de l'essai. Il nous semble que l'amélioration du modèle thermique d'une part, et une meilleure prise en compte de la dépendance des coefficients de dilatation du matériau avec la teneur en eau d'autre part, permettrait d'améliorer les résultats numériques. Un nombre plus important d'essais au feu apparaît également nécessaire.

6. Bibliographie

- [CAS 09] CAST3M-2009, *Finite element software*, CEA, www-cast3m.cea.fr, 2009
- [CAY 11] CAYLA F., LEBORGNE H., JOYEUX D., « Application of a virtual resistance furnace: fire resistance test simulation on a plasterboard membrane », *Application of Structural Fire Engineering, COST Action TU0604*, 2011
- [COU 08] COUHERT C., *Pyrolyse flash à haute température de la biomasse ligno-celluloseux et de ses composés - production de gaz de synthèse*, Thèse de doctorat, École des Mines de Paris, 2008.
- [CUE 14] CUEFF G., *Développement d'un modèle thermomécanique du comportement sous agressions thermiques de matériaux celluloseux : Application à l'étude de résistance au feu de panneaux de bloc-porte en aggloméré de bois*, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, 2014.
- [DIB 08] DI BLASI C., « Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis », *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 34, 2008, p. 47 – 90.

- [JAN 04] JANSSON R., Measurement of thermal properties at elevated temperatures, Brandforsk project 328-031, rapport de recherché, 2004, SP Swedish National Testing and Research Institute
- [NAJ 05] NAJAFI S., BUCUR V. et EBRAHIMI G., « Elastic constants of particleboard with ultrasonic technique », *Materials Letters*, vol. 59, 2005, p. 2039 – 2042.
- [NFE 93] NF-EN-1993-1-2, *Eurocode 3, calcul des structures en acier, partie 1-2 : règles générales_calcul du comportement au feu*, 2005
- [NFE 00] NF-EN-1363-1, *Fire resistance tests, Part1: General requirements*, AFNOR, 2000