



université
de BORDEAUX



ANR10-EQPX-16-Xyloforest



efectis
france



Prix Thèse des Bois - 2015

DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE THERMOMÉCANIQUE DU COMPORTEMENT AU FEU DE MATÉRIAUX CELLULOSIQUES

Guillaume CUEFF
Cestas - 2 juillet 2015

INSTITUT DE MÉCANIQUE ET D'INGÉNIERIE & EFECTIS FRANCE

○ Institut de Mécanique et d'Ingénierie est crée le 01/01/2011

- (UMR UBx (UB, INP) / CNRS / Arts et Métiers ParisTech / USC INRA)
- 6 départements : génie civil, mécanique des fluides et transferts, etc.
 - Effectif de ≈340 personnes dont 133 Enseignants / Chercheurs
 - **GCE : Génie Civil et Environnemental**
- **Actions transverses du département GCE**
 - **Ingénierie du Bois et de ses Composites**
 - **Tenue en service des matériaux et structures**
 - Evaluation/Contrôle Non Destructif
 - Constructions et Energie Durables

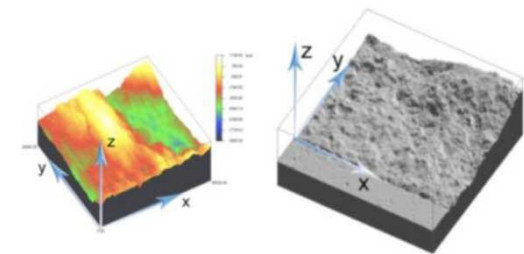
○ EFECTIS France

- Laboratoire agréé en résistance au feu et organisme reconnu en ingénierie de sécurité incendie
 - 8 sites en France
 - Dont 2 laboratoires de résistance au feu

INSTITUT DE MÉCANIQUE ET D'INGÉNIERIE & EFECTIS FRANCE

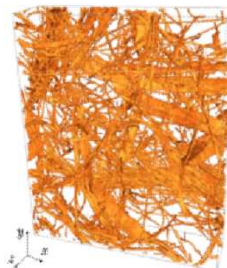
○ Savoir-faire au sein du département GCE - I2M

- Imagerie 3D, stéréo-corrélation d'images
- Matériaux composites, collage du bois, durabilité du bois
- Conception, éco-conception
- Diagnostic des ouvrages (dont anciens)
- Modélisations et calculs scientifiques (mécanique, rupture, etc.)
- Fluage, durée de vie
- Comportement à haut température (incendie)



○ Savoir-faire au sein d'EFECTIS France

- Essais de résistance au feu
- Modélisations incendies (désenfumage, calculs de feu)

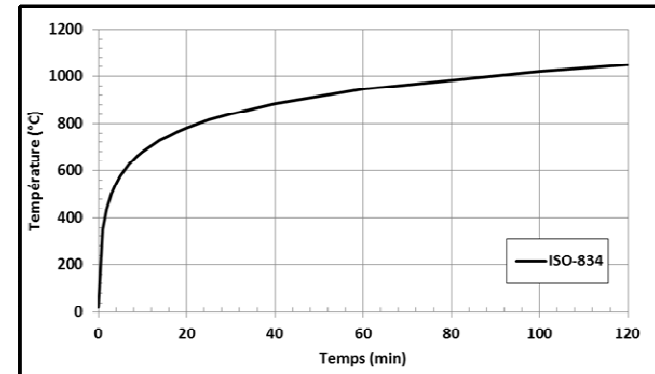


CONTEXTE INDUSTRIEL

- En France, l'évaluation des performances au feu de produits de la construction est prescrit par l'arrêté du « 22 mars 2004 modifié »
 - 4 méthodes d'évaluation : essais standardisés, méthode de calcul, etc.
 - Agression thermique prédéterminée
 - ISO-834 (NF-EN-1363-1)
 - Différents critères au feu à satisfaire



Four d'essai vertical - EFACTIS France



- Four d'essai : dimensions de façade de 3 x 3 m²
- Mesure de la température et des déplacements
- Critères au feu à satisfaire
 - Étanchéité aux gaz et aux flammes (E)
 - Isolation thermique (I)
 - Rayonnement thermique (W)
- Les essais de résistance au feu sont coûteux ⇔ peut ralentir l'amélioration d'un produit

CONTEXTE INDUSTRIEL

- **Objectif** : Développer un modèle numérique pour l'évaluation de la performance au feu d'une porte en bois lors d'un essai de résistance au feu (VIRGILE project)

Calcul d'un feu (FDS)
=> agression
thermique en surface
du produit



Aggression thermique
données d'entrée



Panneaux d'aggloméré
de lin et de bois

Étude du
comportement
thermomécanique du
solide (CAST3M)



- **Cas étudié**

- Bloc-porte composé de matériaux cellulosiques
- Vantail en panneaux d'aggloméré de lin
 - Faible conductivité thermique du lin



Panneau d'aggloméré de lin

CONTEXTE INDUSTRIEL

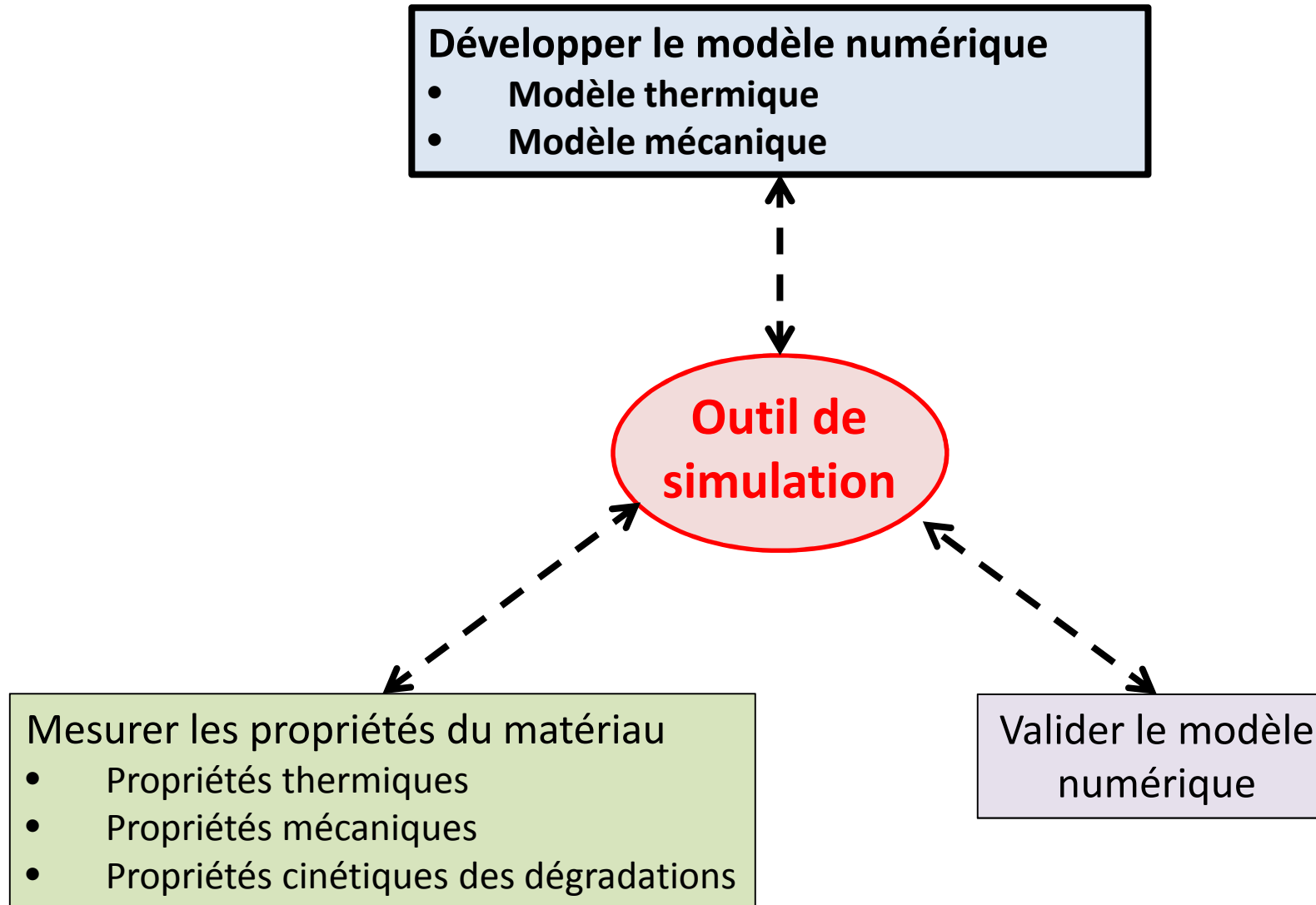
Que sait-on ?

- Les propriétés thermiques et mécaniques du bois massif
- Des transformations de phase ont lieu dans un matériau cellulosique avec l'élévation de température
 - Vaporisation / Pyrolyse / Combustion
- Les transformations de phase induisent
 - Impacts énergétiques sur le transfert thermique
 - Modification des propriétés thermiques et mécaniques
 - Formation de charbon de bois

Que reste-t-il à déterminer ?

- Le modèle thermomécanique à utiliser
- Les propriétés thermiques et mécaniques de l'aggloméré de lin

STRATÉGIE DU PROJET



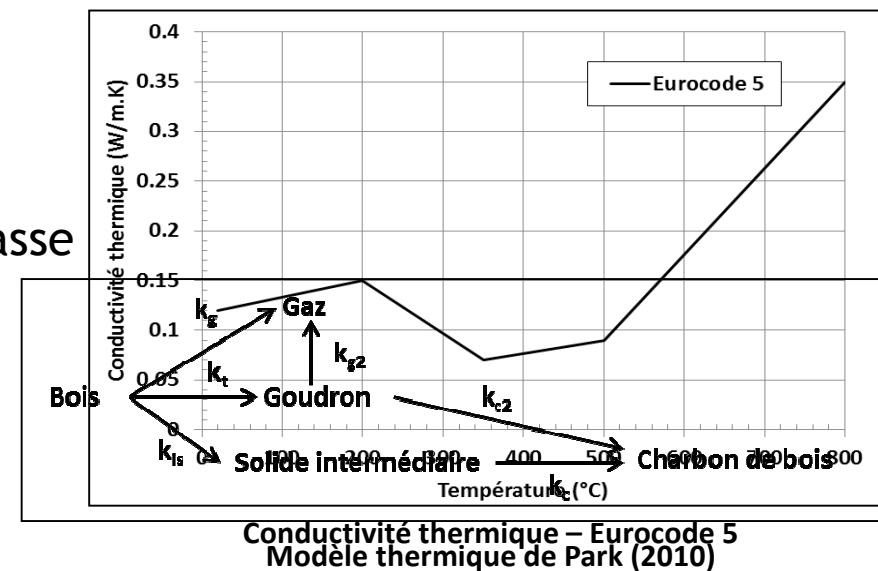
MODÈLE THERMIQUE

Objectif

- Simuler le comportement thermique d'un matériau cellulosique exposé à une sollicitation thermique sévère

Modèle thermique possible

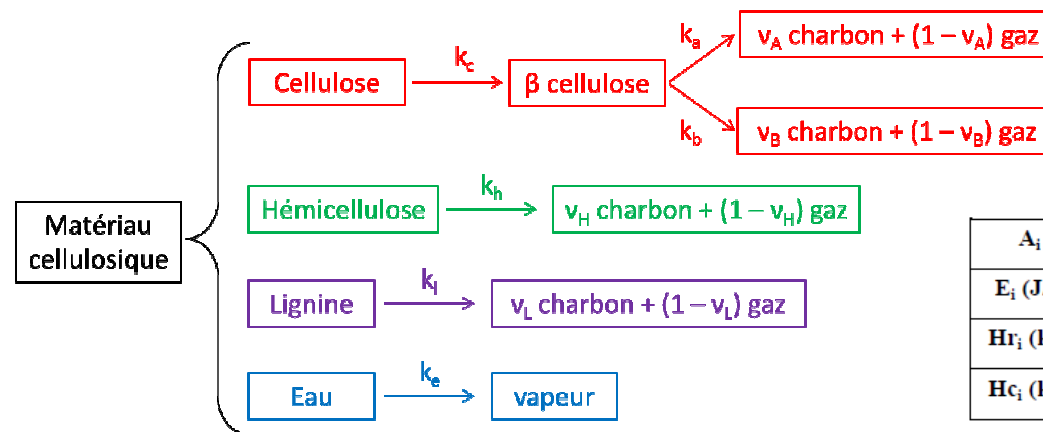
- Modèles simples de type Eurocode 5
 - Variations des propriétés connues en fonction de la température
 - Approches conservatives
 - Applicables dans l'état
- Modèles complexes avec transfert de masse
 - Nombre de paramètres important



MODÈLE THERMIQUE

Modèle développé

- Les réactions de dégradation thermique des différents composés sont prises en compte
 - Vaporisation de l'eau vers 100 °C
 - Pyrolyse du bois entre 250 °C et 350 °C
 - Combustion des gaz de pyrolyse



	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	-

- Cinétiques des réactions : six lois d'Arrhenius

$$k_i = A_i e^{-(E_i/RT)}$$

- Prise en compte uniquement des aspects énergétiques de ces réactions

MODÈLE THERMIQUE

- Ajout des sources de chaleur volumiques à l'équation de la chaleur (loi de Fourier)

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + Q_i + Q_c$$

- Sources d'énergie suite aux réactions de vaporisation et de pyrolyse

$$Q_i = \frac{d\chi_i}{dt} \cdot \Delta H_i \cdot \rho (T)_i \text{ en W/m}^3$$

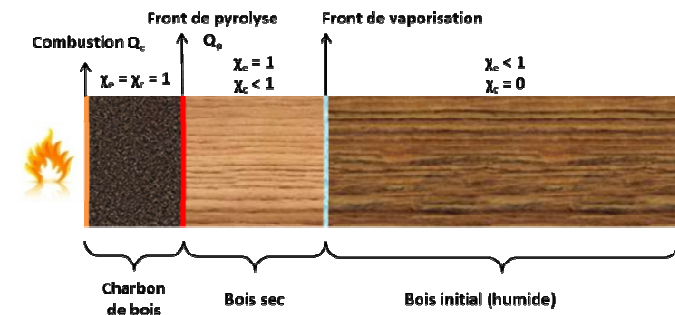
- Source d'énergie suite à la combustion des gaz de pyrolyse
 - Application de la source de chaleur en surface (face exposée)

$$Q_c = (\chi_{b_n} - \chi_{b_{n-1}}) \cdot \frac{\rho_{b_{ini}}}{dt} \cdot \Delta H_c \cdot \%C \text{ en W/m}^3$$

MODÈLE THERMIQUE

○ Hypothèses : Calcul des propriétés thermiques

- Loi de comportement \Rightarrow modèle thermique isotrope
- Volume de bois reste constant
- Fractions massiques des composés à 20 °C connues



○ Utilisation d'une loi des mélanges

- Fonction de l'avancement des réactions et des propriétés à 20 °C

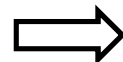
Étape 1:

Calcul de l'avancement des réactions χ_i

$$k_i = A_i e^{-(E_i/RT)}$$

$$\chi_i = 1 - e^{-k_i \cdot t}$$

χ_e et χ_c
connus des lois
d'Arrhenius



Étape 2:

Calcul des propriétés thermiques en fonction de $\chi_{e,c}$

$$\rho_{tot} = \rho_{bois} * [1 + \chi_c(\gamma - 1) + \beta(1 - \chi_e)]$$

$$Cp_{tot} = \frac{(1 - \chi_c) \cdot Cp_{bois} + \chi_c \cdot \gamma \cdot Cp_{char} + \beta \cdot (1 - \chi_e) \cdot Cp_e}{[1 + \chi_c \cdot (\gamma - 1) + \beta \cdot (1 - \chi_e)]}$$

$$\lambda_{tot} = (1 - \chi_c) \cdot \lambda_{bois} + \frac{\rho_{bois}}{\rho_{char}} \cdot \gamma \cdot \chi_c \cdot \lambda_{char} + \frac{\rho_{bois\ hum}}{\rho_b} \cdot \beta \cdot (1 - \chi_e) \cdot \lambda_e$$

MODÈLE MÉCANIQUE

Modèle développé

- Hypothèse : le matériau reste dans le domaine élastique avec prise en compte de la perte de rigidité lors de la réaction de pyrolyse
- Loi de comportement élastique orthotrope
 - Loi de Hooke
 - Directions d'orthotropie : dans le plan et hors plan
- Variation des propriétés élastiques en fonction de l'avancement de la réaction de pyrolyse χ_c

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \end{bmatrix} = \Delta \begin{bmatrix} \frac{1-\nu_{yz}\nu_{zy}}{E_y E_z} & & & & & & \\ \frac{\nu_{yx}+\nu_{yz}\nu_{zx}}{E_y E_z} & \frac{1-\nu_{zx}\nu_{xz}}{E_x E_z} & & & & & \\ \frac{\nu_{zx}+\nu_{zy}\nu_{yx}}{E_y E_z} & \frac{\nu_{zy}+\nu_{xy}\nu_{zx}}{E_x E_z} & \frac{1-\nu_{yx}\nu_{xy}}{E_y E_x} & & & & \\ 0 & 0 & 0 & G_{xy} & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{xz} & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{yz} & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} - \alpha_x \Delta T \\ \varepsilon_{yy} - \alpha_y \Delta T \\ \varepsilon_{zz} - \alpha_z \Delta T \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix}$$

$$\text{avec } \Delta = \frac{E_x E_y E_z}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx} - \nu_{yz}\nu_{zy} - \nu_{xz}\nu_{zx} - 2\nu_{zy}\nu_{xz}\nu_{yx}} \text{ et } \gamma_{ij} = 2\varepsilon_{ij}$$

MODÈLE NUMÉRIQUE

○ Propriétés et paramètres nécessaires aux modèles

Modèle thermique	Eau	Bois	Charbon de bois
Conductivité thermique (W/m.K)	$\lambda_{\text{eau}}^{20^\circ\text{C}}$	$\lambda_{\text{bois}}^{20^\circ\text{C}}$	$\lambda_{\text{char}}^{300^\circ\text{C}}$
Chaleur spécifique (J/kg.K)	$Cp_{\text{eau}}^{20^\circ\text{C}}$	$Cp_{\text{bois}}^{20^\circ\text{C}}$	$Cp_{\text{char}}^{300^\circ\text{C}}$
Masse volumique (kg/m ³)	$\rho_{\text{eau}}^{20^\circ\text{C}}$	$\rho_{\text{bois}}^{20^\circ\text{C}}$	$\rho_{\text{char}}^{300^\circ\text{C}}$
Paramètres cinétiques des réactions	A_e et Ei_e	A_i et Ei_i	-
Énergie de réaction (J/mol)	Hr_e	Hr_i	-
Teneur en eau initiale (%)	β		
Taux de charbon de bois final	γ		

Modèle mécanique			
Propriétés élastiques	$E_{x,y,z}^{20^\circ\text{C}}$	$\nu_{xy,xz,zy}^{20^\circ\text{C}}$	$G_{xy,xz,zy}^{20^\circ\text{C}}$
Coefficient de dilatation thermique	$\alpha_{x,y,z}^{20^\circ\text{C}}$		

* Données issues de la littérature

➡ Manque de données bibliographiques pour alimenter le modèle numérique

CARACTÉRISATION THERMIQUE

Propriétés thermiques

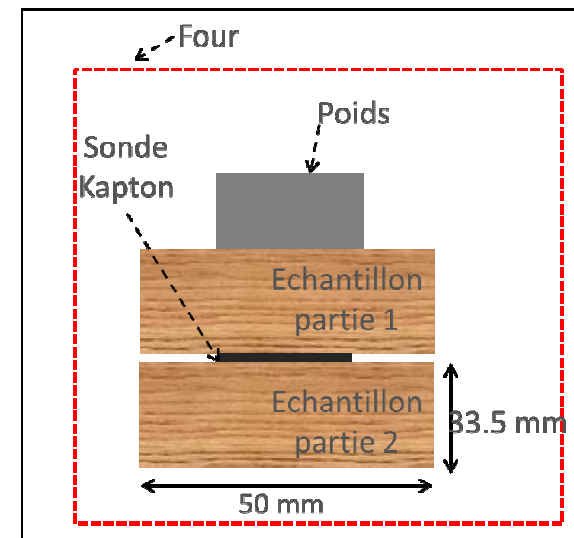
○ Mesure par Source Transitoire Plane (TPS)*

- Mesurer la résistance électrique et l'élévation de température d'une sonde
- La résistance électrique est reliée aux propriétés thermiques

○ Résultats

- Mesures en adéquation avec la littérature

	Mesures	Eurocode 5
Température	20 °C	
λ_{bois} (W/m.K)	0,123	0,120
Cp_{bois} (J/kg.K)	1640	1530



Principe de l'essai TPS

* Essais réalisés à l'Université de Pau et des Pays de l'Adour, laboratoire SIAME (H.CARRE et C. LA BORDERIE)

CARACTÉRISATION MÉCANIQUE

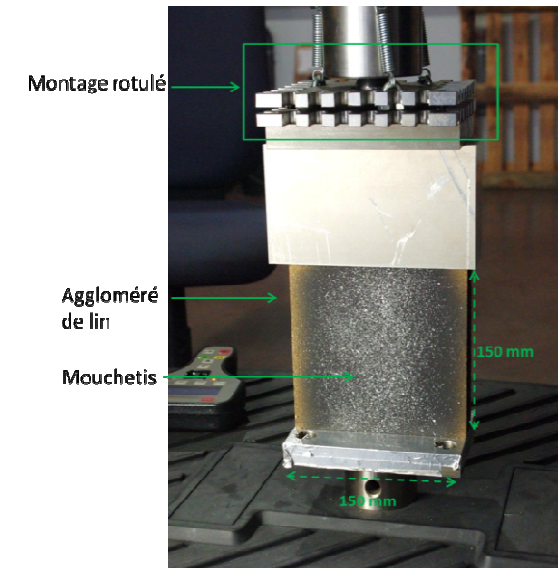
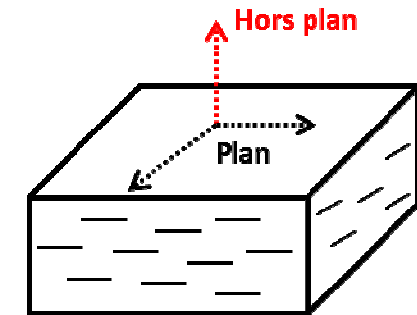
Propriétés élastiques

○ Essais de compression

- Dans le plan et hors plan
- Température : 20 °C
- Mesure sans contact
 - Stéréo-corrélation d'images

○ Résultats

Résultats	20 °C	Écart-type	Orientation
$E_{x,y}$ (MPa)	658	144	Dans le plan
ν_{xy} (-)	0,24	0,12	
E_z (MPa)	22,2	2,1	Hors plan
$\nu_{xz,yz}$ (-)	0,019	0,005	



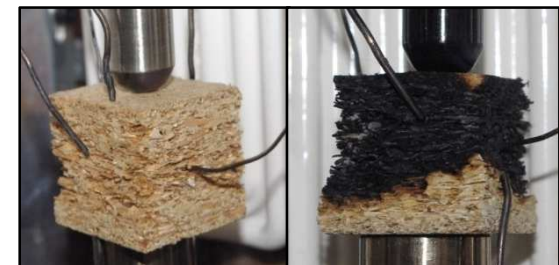
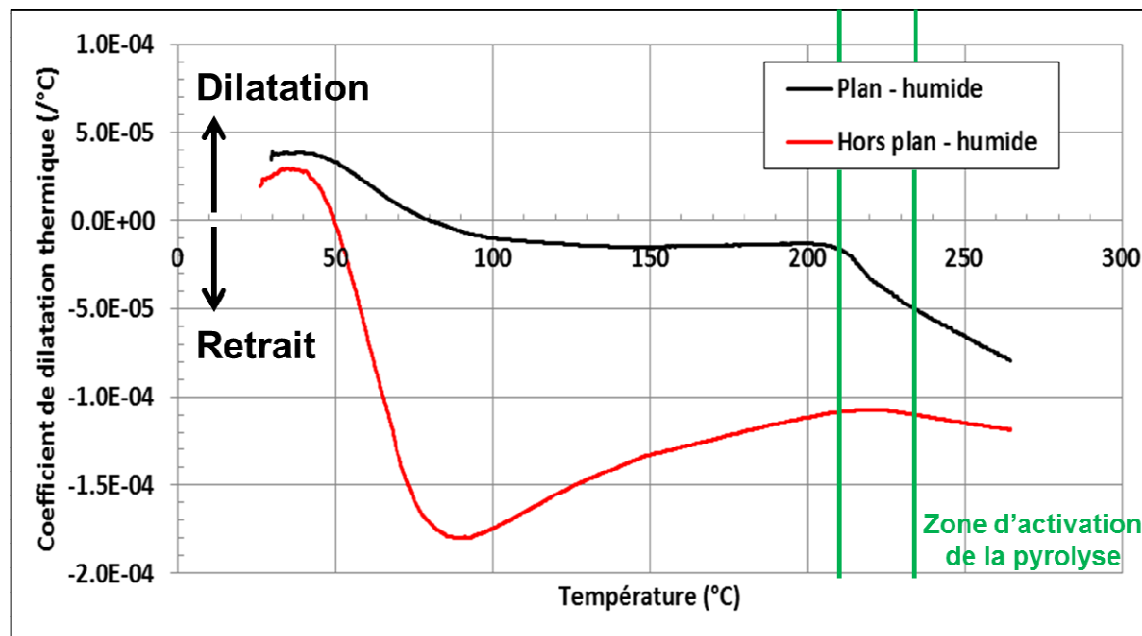
Essai de compression dans le plan

- Différence de rigidité dans le plan et hors plan du panneau
 - Conséquence des différences de compactage dans l'épaisseur

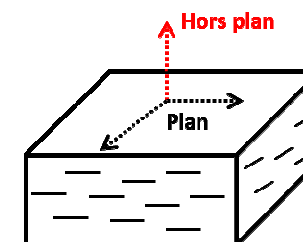
CARACTÉRISATION MÉCANIQUE

○ Coefficients de dilatation thermique apparents

- Mesure de la déformation thermo-hydrigue lors d'une variation de température
- Mesure jusqu'à la pyrolyse du matériau
- Teneur en eau initiale = 8 %
 - Cohérence vis-à-vis des données bibliographiques (Glass 2010)



Directions dans le plan et hors plan



CARACTÉRISATION

○ Propriétés et paramètres nécessaires aux modèles

Modèle thermique	Eau	Bois	Charbon de bois
Conductivité thermique (W/m.K)	$\lambda_{\text{eau}}^{20^\circ\text{C}}$	$\lambda_{\text{bois}}^{20^\circ\text{C}}$	$\lambda_{\text{char}}^{300^\circ\text{C}}$
Chaleur spécifique (J/kg.K)	$Cp_{\text{eau}}^{20^\circ\text{C}}$	$Cp_{\text{bois}}^{20^\circ\text{C}}$	$Cp_{\text{char}}^{300^\circ\text{C}}$
Masse volumique (kg/m ³)	$\rho_{\text{eau}}^{20^\circ\text{C}}$	$\rho_{\text{bois}}^{20^\circ\text{C}}$	$\rho_{\text{char}}^{300^\circ\text{C}}$
Paramètres cinétiques des réactions	A_e et E_{i_e}	A_i et E_{i_i}	-
Énergie de réaction (J/mol)	Hr_e	Hr_i	-
Teneur en eau initiale (%)	β		
Taux de charbon de bois final	γ		

Modèle mécanique			
Propriétés élastiques	$E_{x,y,z}^{20^\circ\text{C}}$	$\nu_{xy,xz,zy}^{20^\circ\text{C}}$	$G_{xy,xz,zy}^{20^\circ\text{C}}$
Coefficient de dilatation thermique	$\alpha_{x,y,z}^{20^\circ\text{C}}$		

* Données issues de la littérature / * Données mesurées / * Données déterminées par calculs itératifs

SIMULATION D'UN ESSAI À GRANDE ÉCHELLE

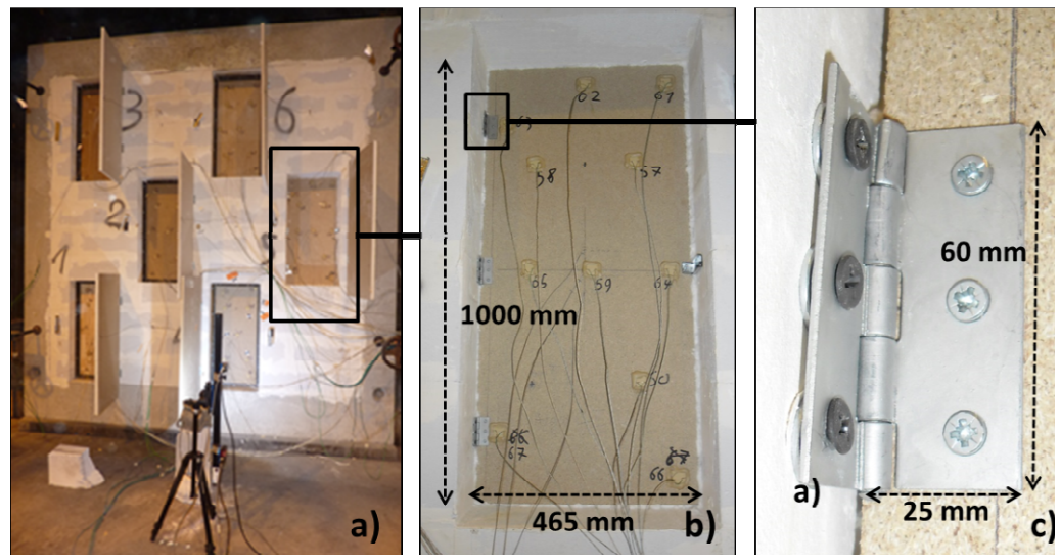
Essai à grande échelle sur un four de résistance au feu

○ Objectif

- Mesurer les températures et les déplacements lors d'un essai sur un four de résistance au feu (Chargement thermique ISO-834)

○ Panneau d'aggloméré de lin monté sur paumelles

- Maquette d'un vantail de bloc-porte : $1000 \times 465 \times 33,5 \text{ mm}^3$
- Éléments simulés : panneau / paumelles / serrure

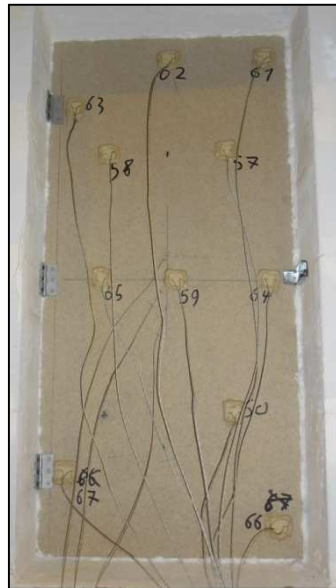


a) Essai à grande échelle, b) panneau d'aggloméré de lin sur paumelles et c) zoom sur une paumelle

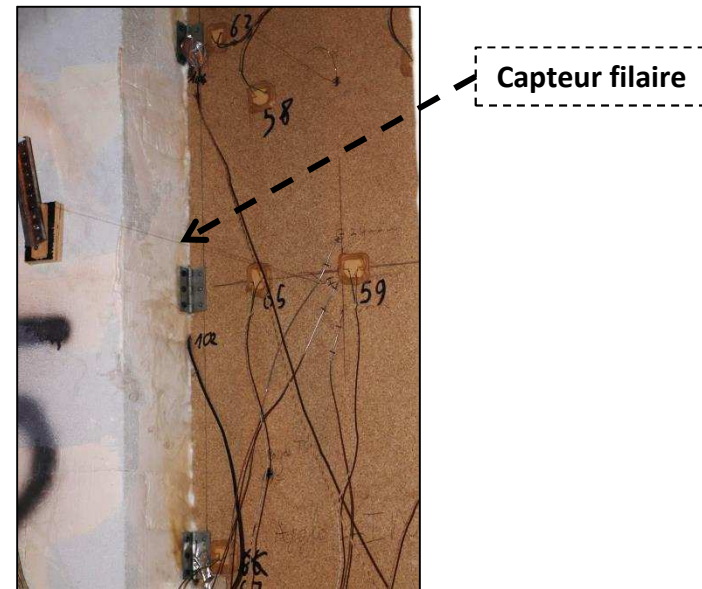
SIMULATION D'UN ESSAI À GRANDE ÉCHELLE

Instrumentation du panneau d'aggloméré de lin sur paumelles

- Thermocouples en face non-exposée et dans l'épaisseur
- Déplacements mesurés par des capteurs filaires



Positionnement des thermocouples sur le panneau d'aggloméré de lin



Capteur de déplacement

SIMULATION D'UN ESSAI À GRANDE ÉCHELLE

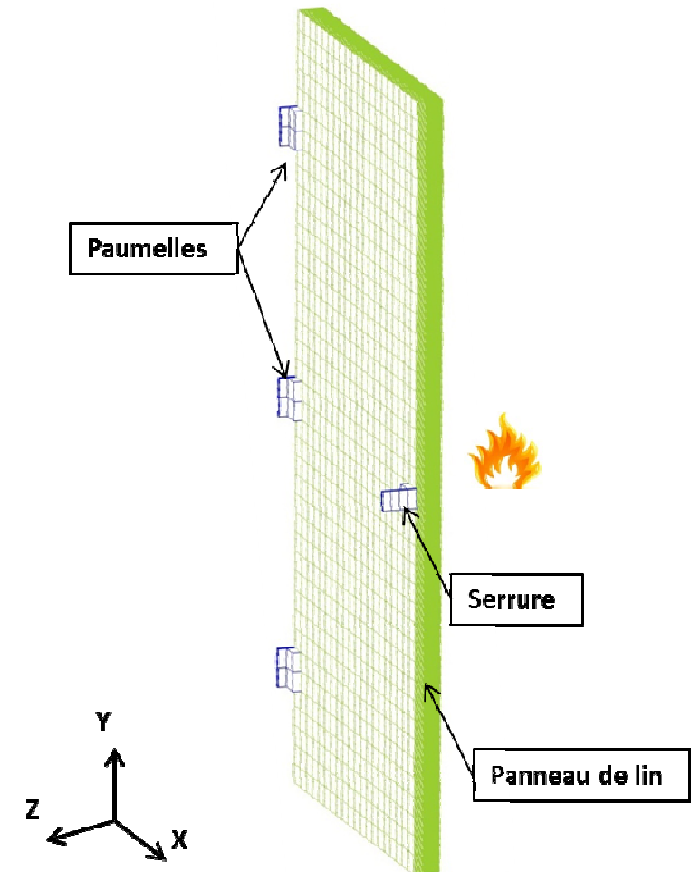
Simulation de l'essai à grande échelle (logiciel : CAST3M®)

○ Maillage

- Éléments prismatiques à 8 nœuds (CUB8)
- Dimensions des éléments
 - 0,22 mm à 0,56 mm dans l'épaisseur
 - 25 x 25 mm² dans le plan

○ Conditions aux limites

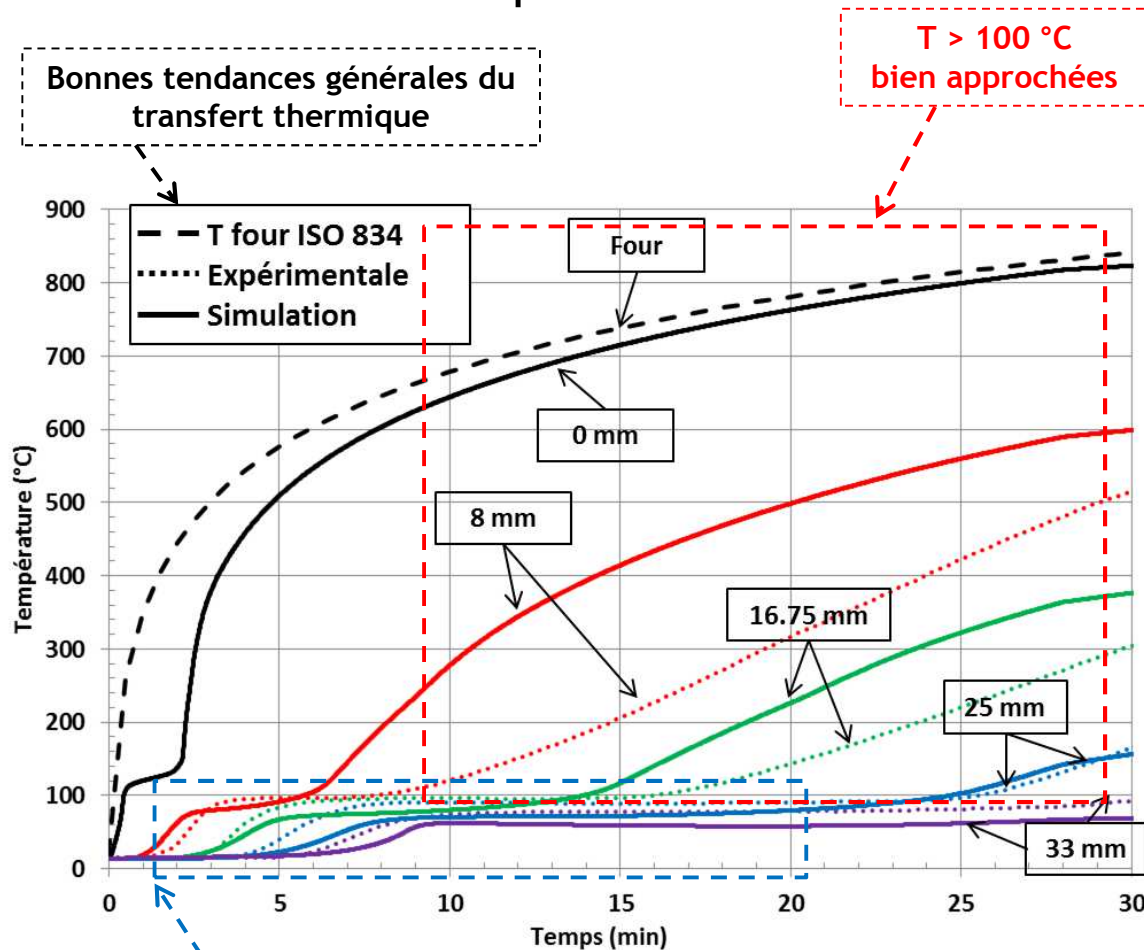
- Thermique : ISO-834 (NF-EN-1363-1 2000)
- Mécaniques
 - Adhérence parfaite acier - vantail
 - Rotation des paumelles autour de l'axe Y
 - Déplacements bloqués (paumelles et serrure)
 - Surfaces en contact avec le cadre béton



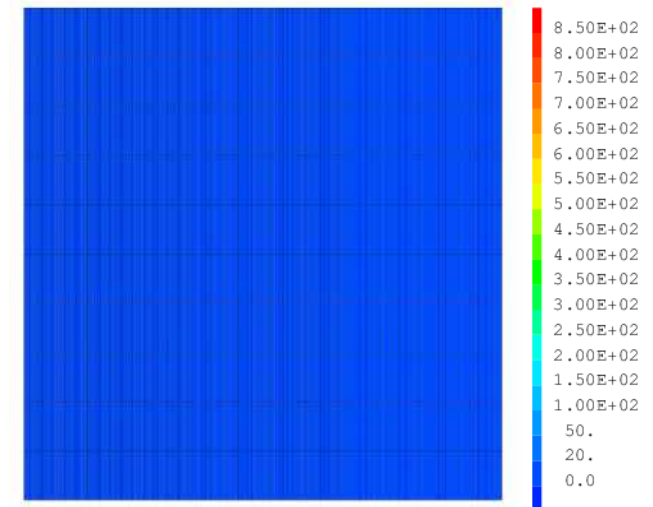
Maillage 3D et conditions aux limites thermiques

SIMULATION D'UN ESSAI À GRANDE ÉCHELLE

○ Résultats thermiques



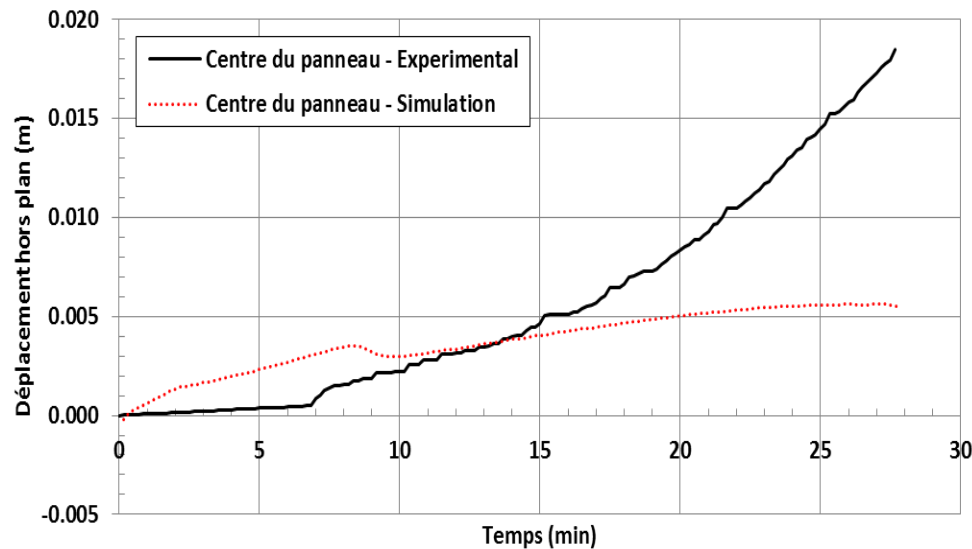
Amorçage du transfert thermique et plateaux de vaporisation simulés



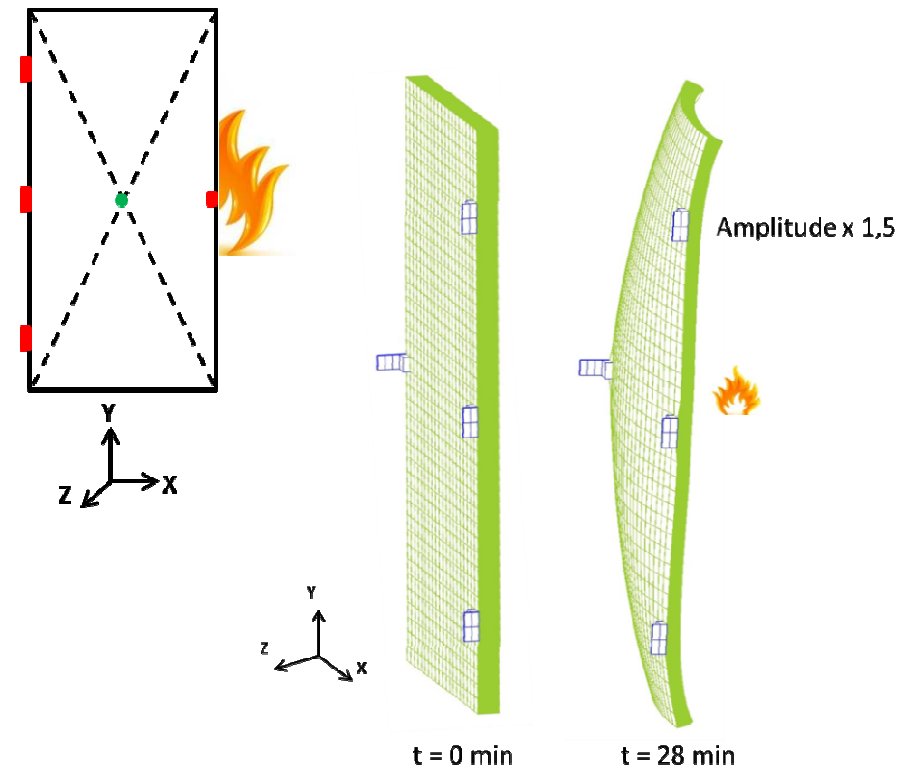
SIMULATION D'UN ESSAI À GRANDE ÉCHELLE

○ Résultats : déplacements au centre du panneau

- Ordre de grandeur respecté
- Difficulté à retranscrire l'historique des déplacements



Déplacements en fonction du temps



CONCLUSION ET PERSPECTIVES

- Un modèle thermomécanique permettant de simuler le comportement au feu d'un matériau cellulosique a été développé
 - Basé sur des caractérisations expérimentales et des simulations numériques
 - Une comparaison entre les essais et les simulations
- Résultats
 - Le transfert thermique est bien retranscrit
 - Le calcul des déplacements doit être amélioré
 - Pistes d'amélioration
 - Adapter les conditions aux limites mécaniques
 - Mieux prendre en compte les déformations hydriques (séchage)
 - Réaliser des essais complémentaires à grande échelle
 - Simuler un essai de résistance au feu sur un bloc-porte échelle 1:1
- Objectif final
 - Appliquer le modèle numérique à l'évaluation des performances au feu de produits de la construction (cas des modifications et extensions de produits)



EFFECTIS France : four vertical 3x3m²



Matériel I2M : four 150x150 mm²



université
de BORDEAUX



MERCI DE VOTRE ATTENTION

REMERCIEMENTS

ENCADRANTS

J-C. MINDEGUIA (UB)
D. BREYSSE (UB)
V. DREAN (EFR)
G. AUGUIN (EFR)

Jury de thèse

C. La Borderie
A. Bouchair
A. Millard
J-M. Franssen