

20^{ième} journées du GDR Feu - Bourges, Janvier 2015

DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE THERMOMÉCANIQUE DU COMPORTEMENT SOUS AGRESSIONS THERMIQUES DE MATÉRIAUX CELLULOSIQUES

Guillaume Cueff

L'évaluation des performances au feu d'un produit est régie en France par l'arrêté du « 22 mars 2004 modifié »

- 4 méthodes d'évaluation : **essais conventionnels**, méthode de calcul, etc.
- Des actions thermiques prédéterminées
 - ISO-834 (NF-EN-1363-1)
- Différents critères de performance au feu

Critères	
Résistance mécanique et stabilité	R
Étanchéité aux gaz et aux flammes	E
Isolation thermique	I
Rayonnement	W

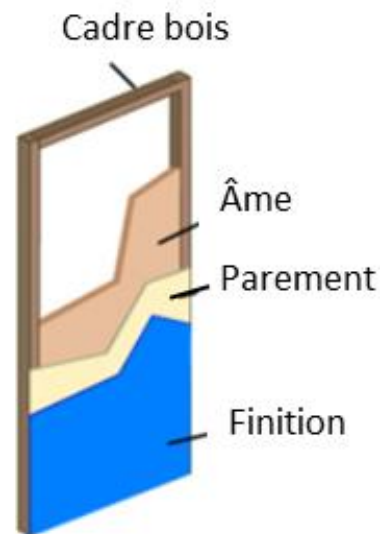
Coût élevé de l'évaluation des performances au feu ⇔ frein à l'innovation des produits

Cas d'étude ➡ Les blocs-portes coupe-feu en matériaux cellulosiques

CONTEXTE : COMPOSITION D'UN BLOC-PORTE EN BOIS

- Composition d'un bloc-porte en bois
- Une huisserie en bois massif, aluminium ou acier
- De la quincaillerie en acier : paumelles/serrure
- Un vantail en bois :
 - Âme en aggloméré de bois ou de lin
- Le panneau d'aggloméré de lin
 - L'âme d'un bloc-porte coupe-feu
 - Bon isolant
 - Faible conductivité thermique du lin
 - Matériau structuré
 - Différentes épaisseurs
 - Propriétés variables

λ_{alu}	237 W/m.K
λ_{air}	0,026 W/m.K
λ_{bois}	0,15 W/m.K
λ_{lin}	0,037 W/m.K



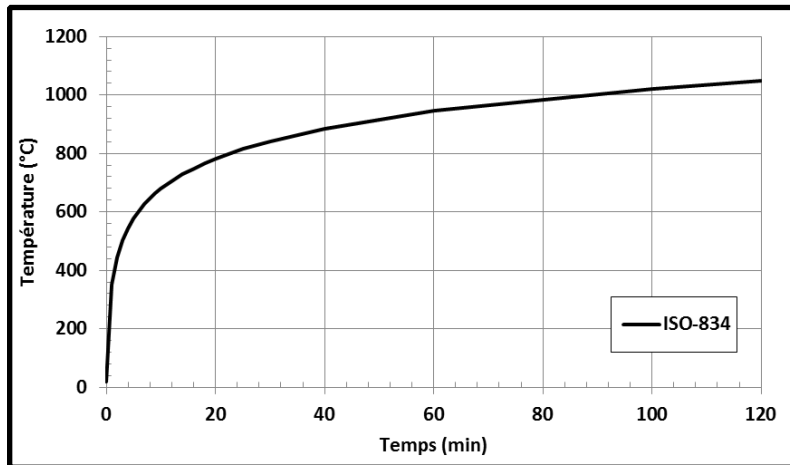
Composition d'un vantail



Échantillon d'aggloméré de lin

CONTEXTE : ESSAI DE RÉSISTANCE AU FEU D'UN BLOC-PORTE

○ Chargement thermique : ISO-834



○ Un four d'essai : face avant de 3 x 3 m²

○ Mesure des températures et des déplacements

○ Critères de performance au feu

- Étanchéité aux gaz et aux flammes (E)
- Isolation thermique (I)
- Rayonnement (W)



Four vertical d'essai - EFECTIS France

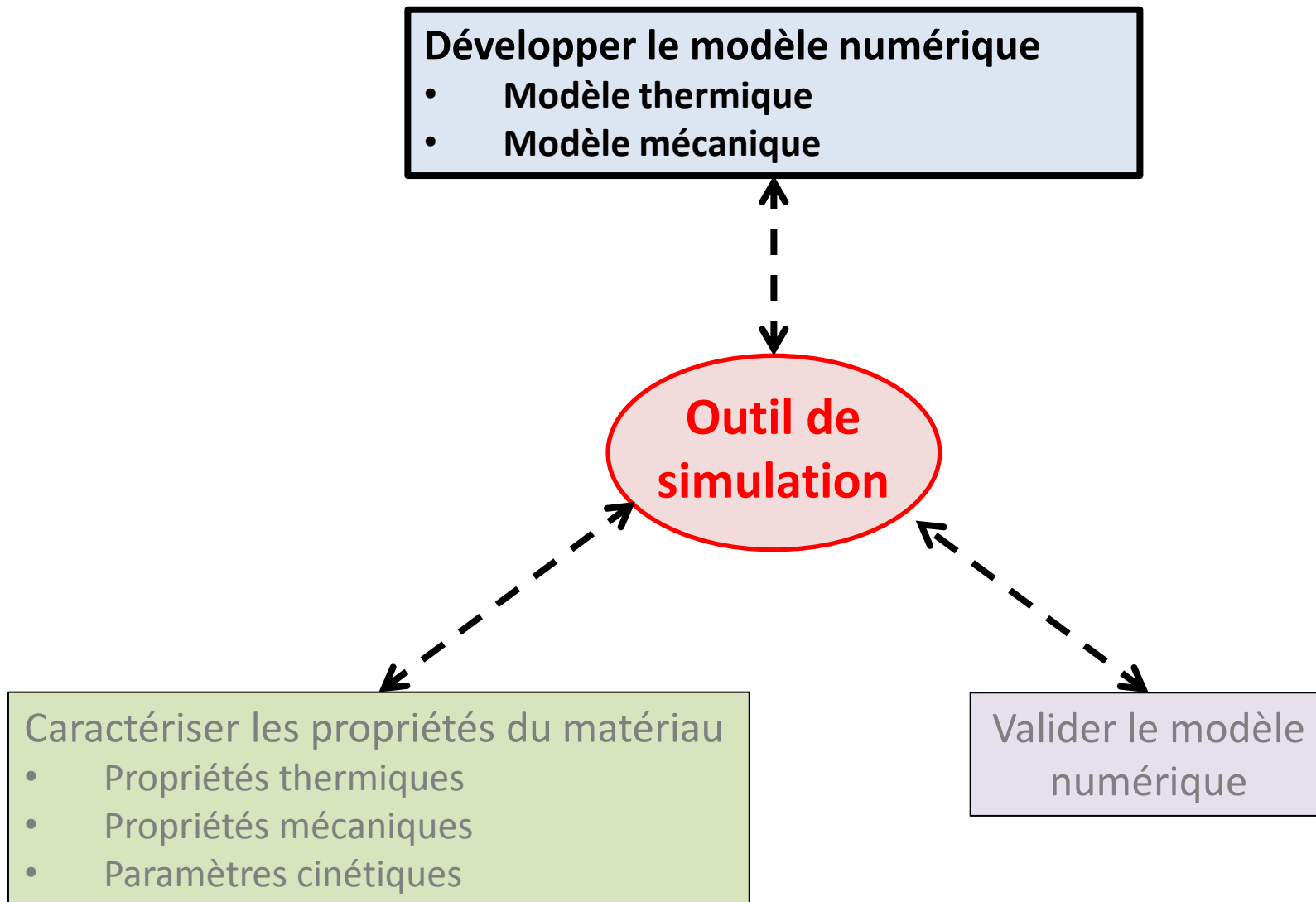
Développer un outil numérique d'évaluation des performances au feu pour les essais de résistance au feu de blocs-portes en bois (projet VIRGILE)

➤ Ce que l'on sait

- Les propriétés thermiques et mécaniques d'un bois massif
- Le matériau subit des transformations de phase avec la température
 - Vaporisation / Pyrolyse / Combustion
- Les transformations de phase implique
 - Des impacts énergétiques sur le transfert thermique
 - Une modification des propriétés du matériau
 - La formation de charbon de bois

➤ Ce qui reste à déterminer

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

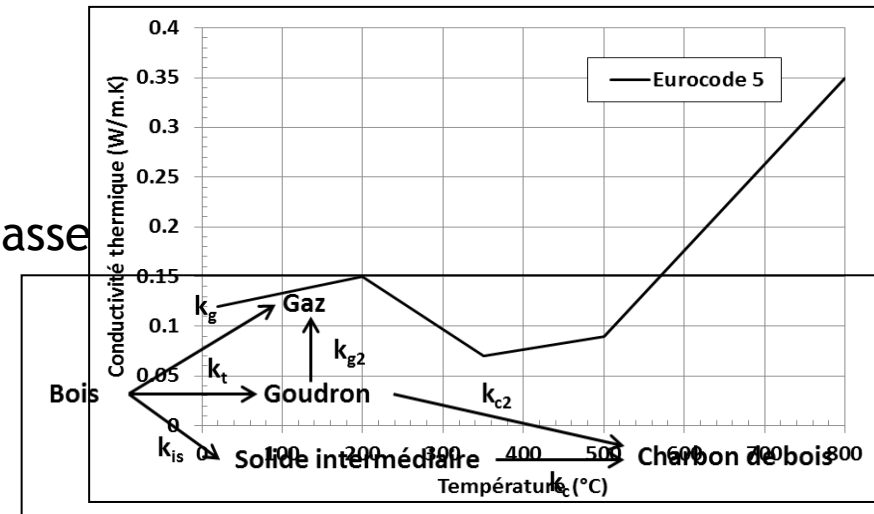


Objectif

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

Modèle thermique possible

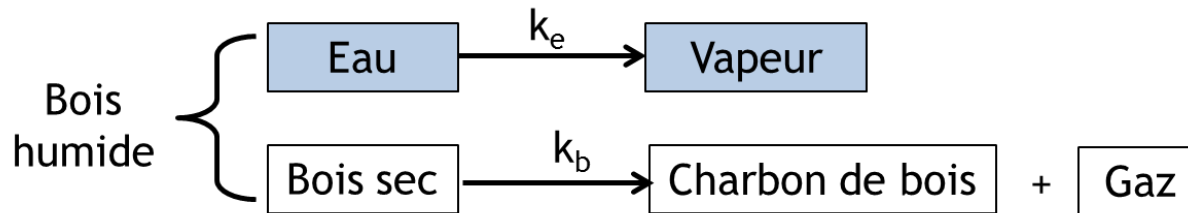
- Modèles simples de type Eurocode 5
 - Variations des propriétés connues en fonction de la température
 - Approches conservatives
 - Applicables dans l'état
- Modèles complexes avec transfert de masse
 - Nombre de données important



Conductivité thermique – Eurocode 5
Modèle thermique de Park (2010)

Modèle développé

- Les réactions de dégradation thermique sont prises en compte
 - Vaporisation de l'eau vers 100 °C (k_e , Q_e)
 - Pyrolyse du bois entre 250 °C et 350 °C (k_b , Q_b)
 - Combustion des gaz de pyrolyse (Q_c)



- Cinétiques des réactions : deux lois d'Arrhenius
 - Cinétiques de vaporisation ou de pyrolyse $k_{e,b}$
 - Facteurs pré-exponentiels $A_{e,b}$
 - Énergies d'activation $Ei_{e,b}$

$$k_{e,b} = A_{e,b} e^{-(Ei_{e,b}/RT)}$$

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

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

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

$$Q_{e,b} = \frac{d\chi_{e,b}}{dt} \cdot \Delta H_{e,b} \cdot \rho(T)_{e,b} \text{ en W/m}^3$$

- Source d'énergie suite à la combustion des gaz de pyrolyse
 - $\gamma = 20 \%$ des gaz de pyrolyse sont estimés combustibles (*Couhert 2007*)
 - Application de la source de chaleur en surface

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

Calcul des propriétés thermiques

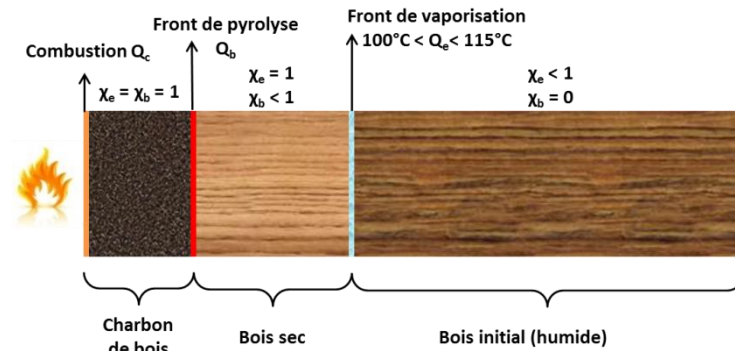
➤ Loi de comportement $\Rightarrow$ modèle thermique isotrope

➤ Hypothèses

- Volume de bois reste constant
- Fractions massiques des composés 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 $\chi_{e,b}$

$k_{e,b} = A_{e,b} e^{-(E_{i,e,b}/RT)}$
$\chi_{e,b} = 1 - e^{-k_{e,b} \cdot t}$

χ_e et χ_b
connus des lois
d'Arrhenius



Étape 2:
Calcul des propriétés thermiques en fonction de $\chi_{e,b}$

$\rho_{tot} = \rho_b \cdot [1 + \chi_b(\gamma - 1) + \beta(1 - \chi_e)]$
$Cp_{tot} = \frac{(1 - \chi_b) \cdot Cp_b + \chi_b \cdot \gamma \cdot Cp_{char} + \beta \cdot (1 - \chi_e) \cdot Cp_e}{[1 + \chi_b \cdot (\gamma - 1) + \beta \cdot (1 - \chi_e)]}$
$\lambda_{tot} = (1 - \chi_b) \cdot \lambda_b + \frac{\rho_b}{\rho_{char}} \cdot \gamma \cdot \chi_b \cdot \lambda_{char} + \frac{\rho_{b\ hum}}{\rho_b} \cdot \beta \cdot (1 - \chi_e) \cdot \lambda_e$

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_b

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

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

Propriétés et paramètres nécessaires aux modèles

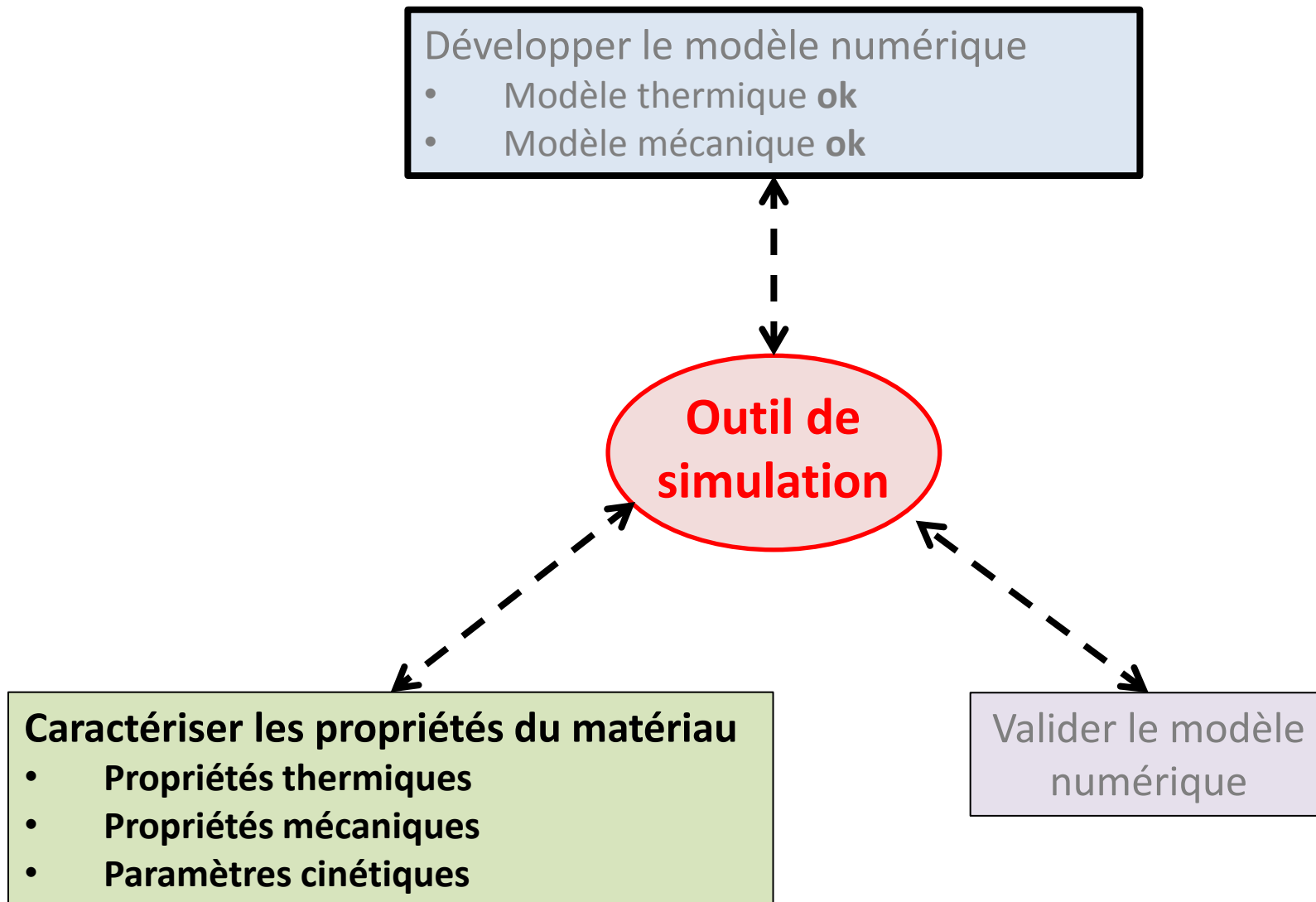
Modèle thermique	Eau	Bois	Charbon de bois
Conductivité thermique (W/m.K)	$\lambda_{\text{eau}}^{20^\circ\text{C}}$	$\lambda_{\text{bois}}^{20^\circ\text{C}}$	$\lambda_{\text{char}}^{300^\circ\text{C}}$
Chaleur spécifique (J/kg.K)	$Cp_{\text{eau}}^{20^\circ\text{C}}$	$Cp_{\text{bois}}^{20^\circ\text{C}}$	$Cp_{\text{char}}^{300^\circ\text{C}}$
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_b et Ei_b	-
Énergie de réaction (J/mol)	Hr_e	$Hr_{b,c}$	-
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 utiliser le modèle numérique

STRATÉGIE DU PROJET



Objectifs des essais

- Caractériser les propriétés de l'aggloméré de lin
 - Thermique : ρ_{bois} , λ_{bois} , $C_{p_{\text{bois}}}$ (20 °C)
 - Mécanique : $E_{x,y,z}$, $\nu_{xy,xz,zy}$ (20 °C)
 - Coefficients de dilatation thermique apparents : $\alpha_{x,y,z}$ (T)

- Déterminer les paramètres cinétiques de la réaction de pyrolyse
 - Facteur pré-exponentiel A_b (/s)
 - Énergie d'activation E_b (kJ/mol)

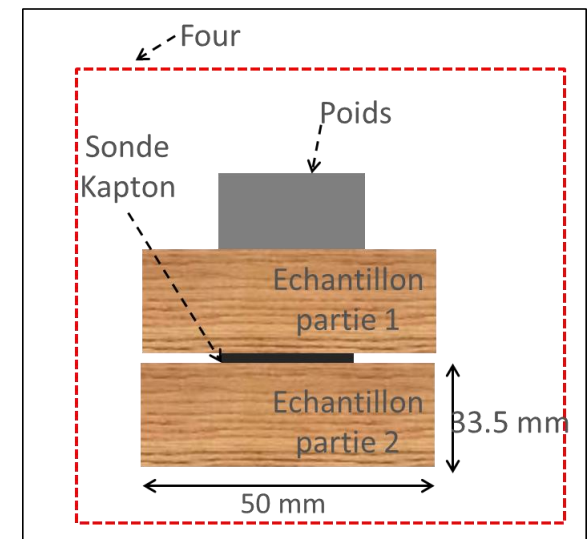
Propriétés thermiques

- Mesure par Source Transitoire Plane (TPS)*
 - Mesurer la résistance électrique et l'élévation de température d'une sonde
 - La résistance électrique est liée aux propriétés thermiques

Résultats

- Mesures en adéquation avec la littérature

	Mesures	Eurocode 5
Température	20 °C	
λ_{bois} (W/m.K)	0,123	0,12
Cp_{bois} (J/kg.K)	1640	1530



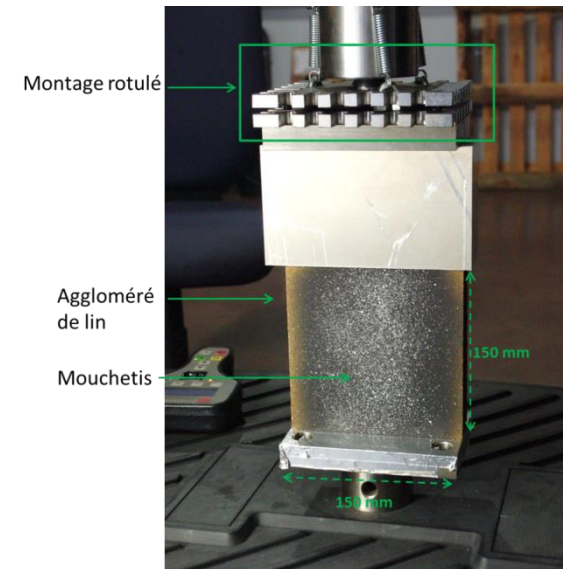
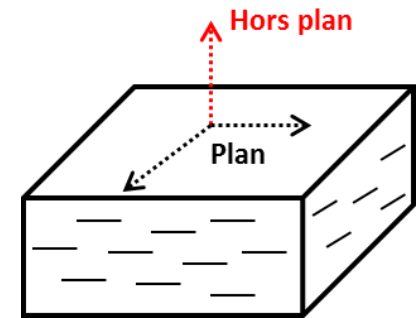
Principe de l'essai TPS

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

Propriétés élastiques

- Mesure par des essais de compression
 - Dans le plan et hors plan
 - Température : 20 °C
- Mesure sans contact
 - stéréovisions
- Résultats

Résultats	20 °C	Écart-type	Orientation
E _{x,y} (MPa)	658	144	Dans le plan
v _{xy} (-)	0,24	0,12	
E _z (MPa)	22,2	2,1	Hors plan
v _{xz,yz} (-)	0,019	0,005	

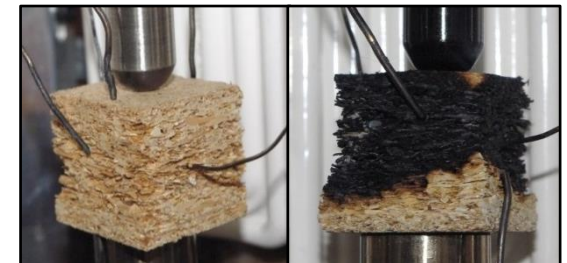
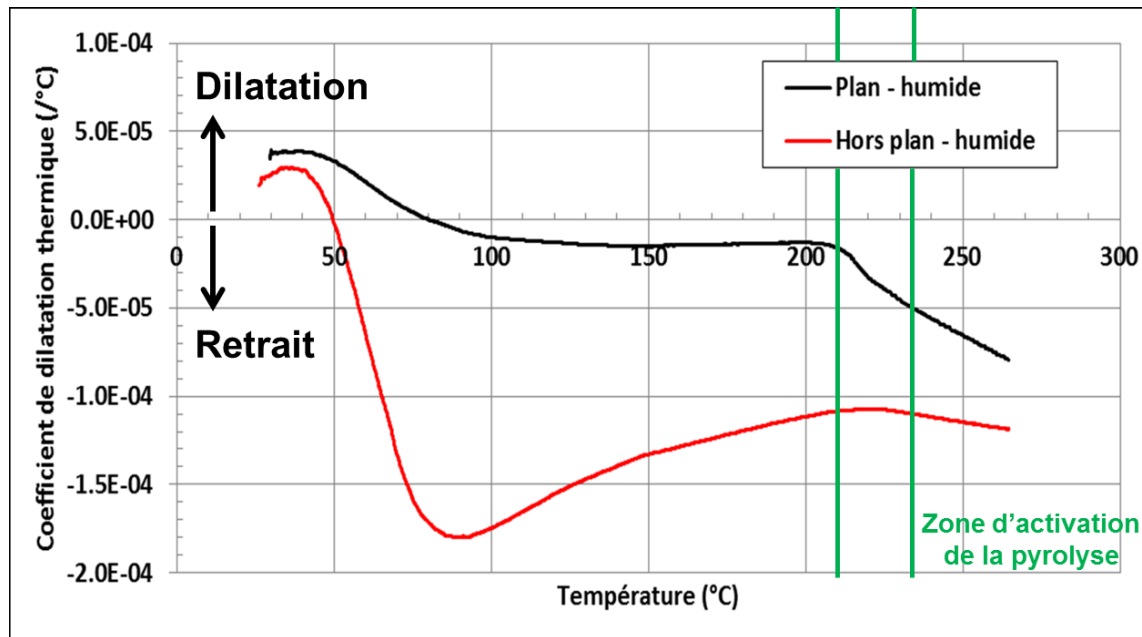


Essai de compression dans le plan

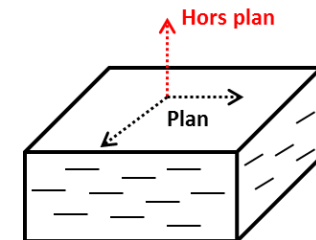
Forte orthotropie du matériau suivant le plan et hors plan du panneau

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*)



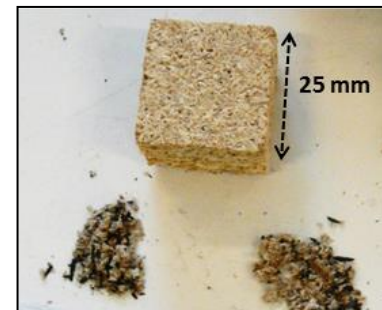
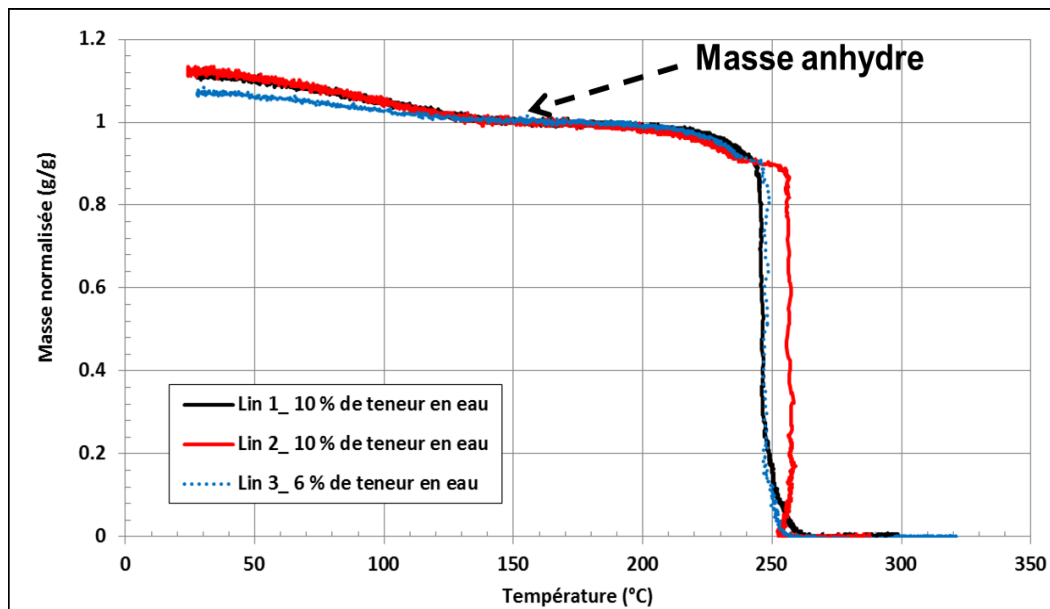
Directions dans le plan et hors plan



Analyse thermogravimétrique (ATG)

Objectif : Déterminer les constantes cinétiques de la réaction de pyrolyse du bois

- Mesure de la variation de perte de masse lors d'une élévation de température ($v_{\text{chauffe}} = 2 \text{ }^{\circ}\text{C/min}$)



Échantillon avant et après un essai ATG

Aggloméré de lin	Valeurs moyennes
E_{ib} (kJ/mol)	333
A_b (/s)	$4,71 \cdot 10^{31}$
T pyrolyse (°C)	250

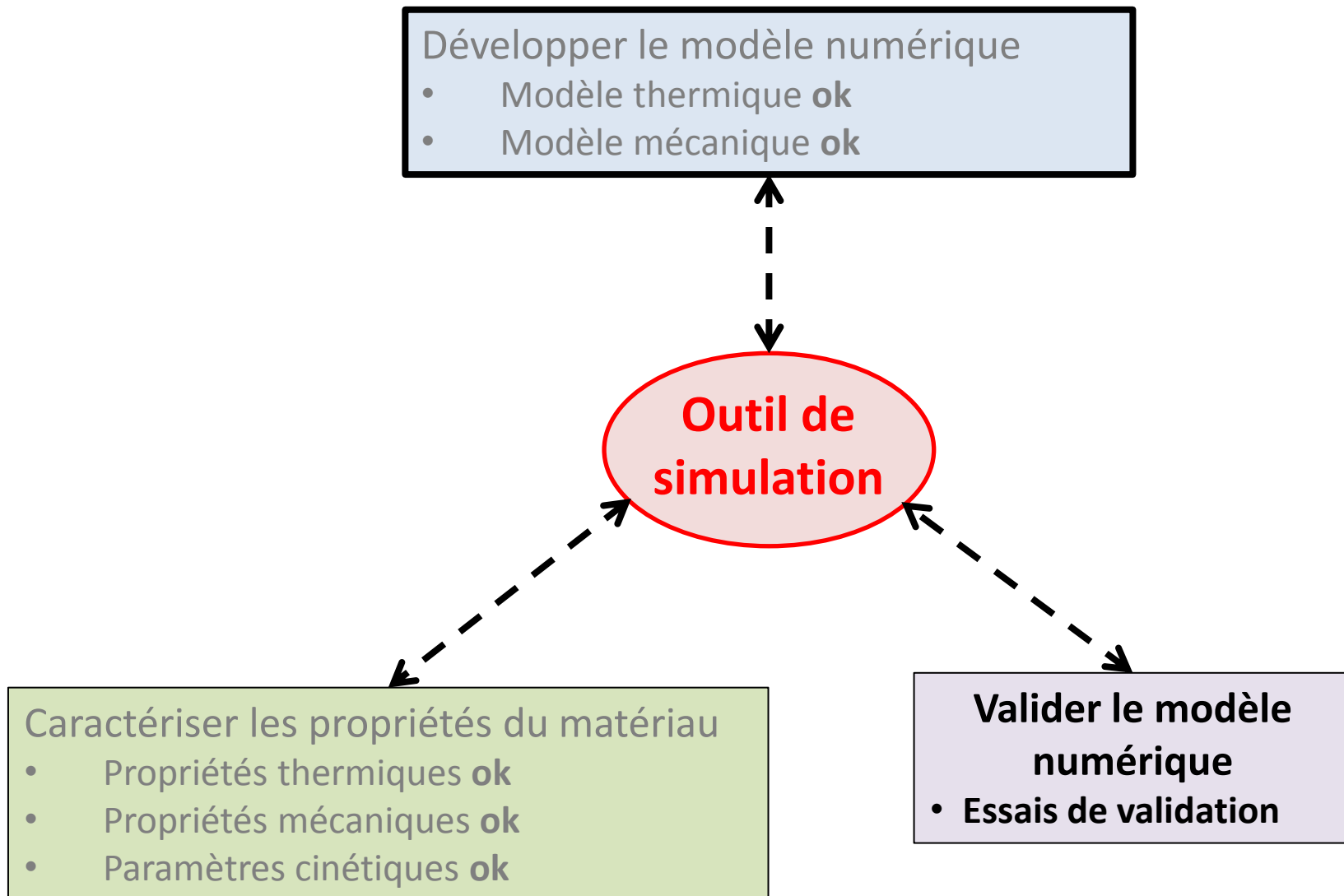
Propriétés et paramètres nécessaires aux modèles

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_b et Ei_b	-
Énergie de réaction (J/mol)	Hr_e	$Hr_{b,c}$	-
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

STRATÉGIE DU PROJET



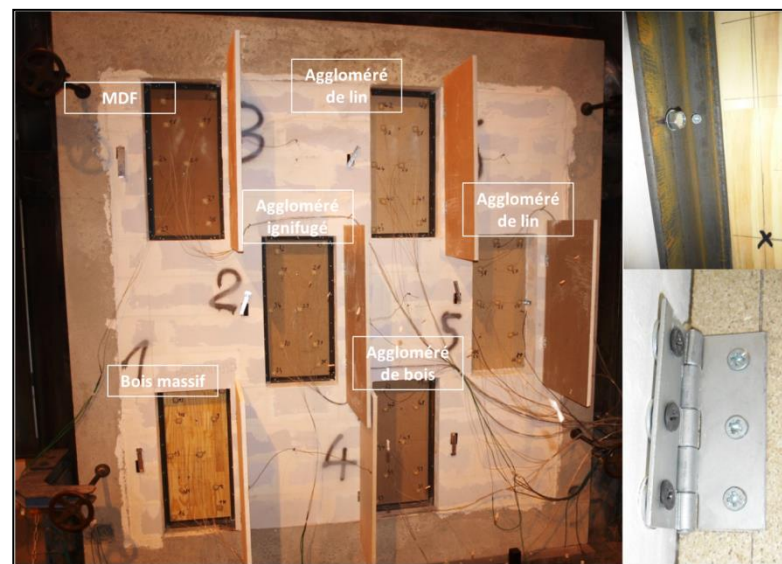
Essai à grande échelle

Objectif

- Mesurer les températures et les déplacements lors d'un essai sur un four de résistance au feu

Protocole

- Façade du four d'essai : 3 x 3 m²
- Échantillons
 - 6 Panneaux de bois (2 de lin)
 - 1000 x 465 x ep mm³
 - Teneur en eau non mesurée
- Conditions aux limites
 - Thermique : ISO-834
 - Mécaniques : cornières ou paumelles

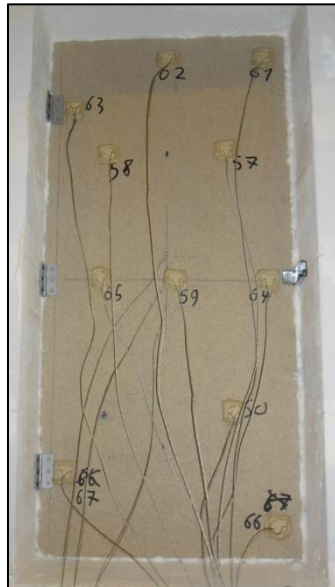


Face non-exposée et conditions aux limites mécaniques de l'essai à grande échelle

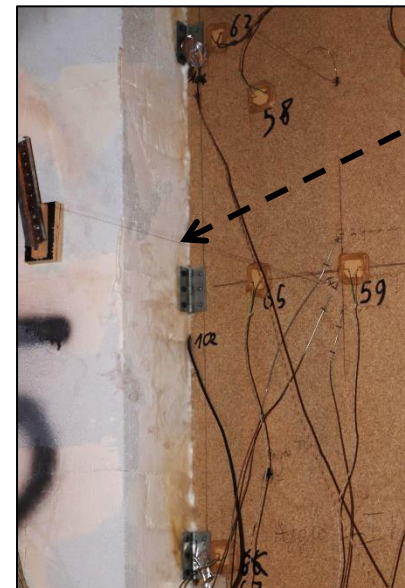
Essai à grande échelle

Instrumentation aggloméré de lin sur paumelles

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



Positionnement des thermocouples sur un panneau d'aggloméré de lin



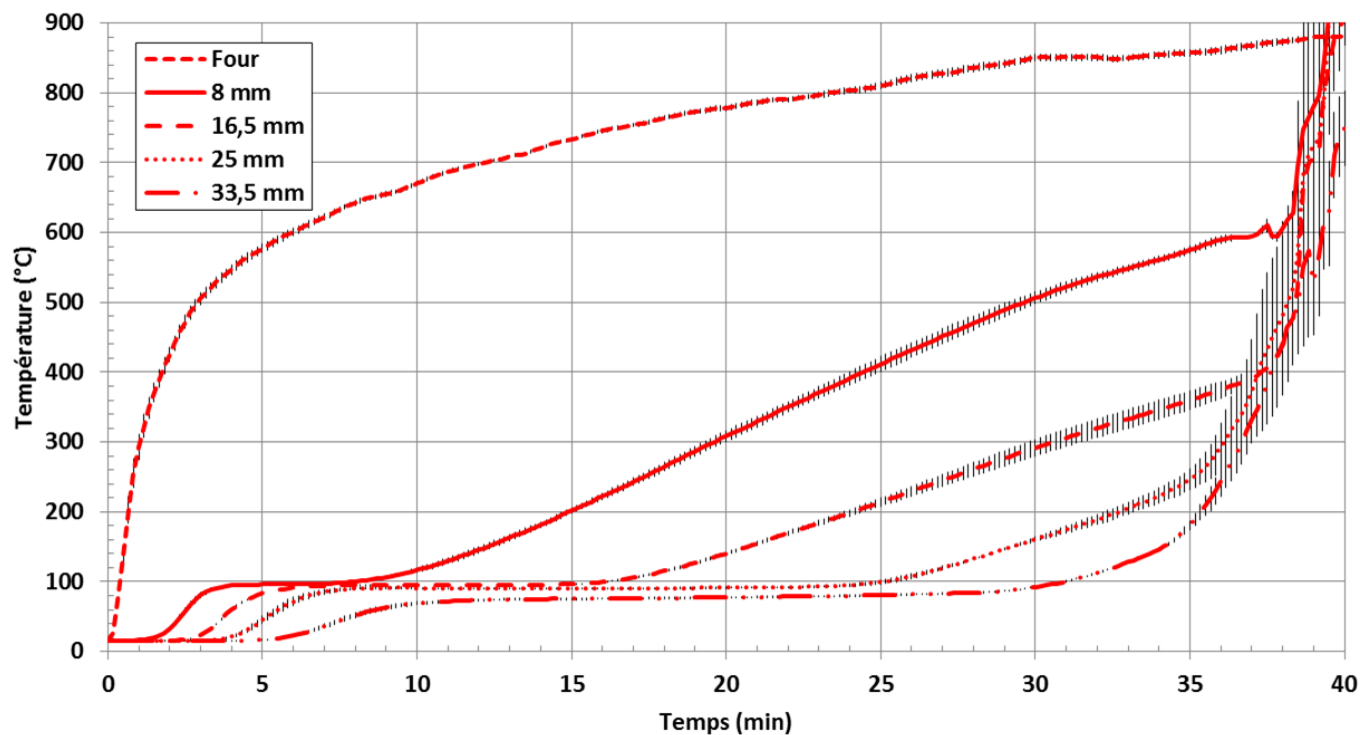
Câble d'un capteur filaire

Capteur de déplacement

Essai à grande échelle

Résultats

- Températures moyennes des panneaux d'aggloméré de lin

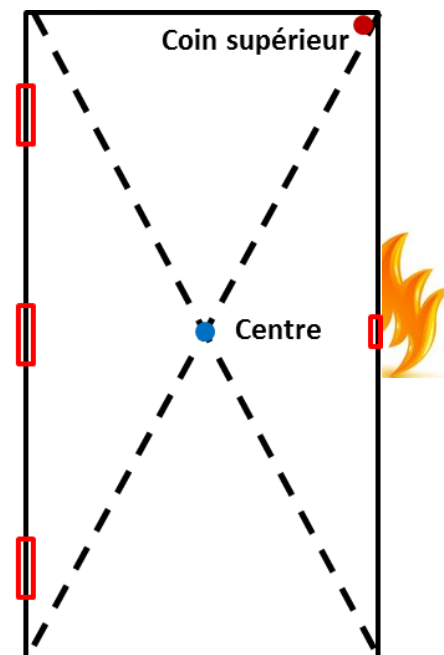
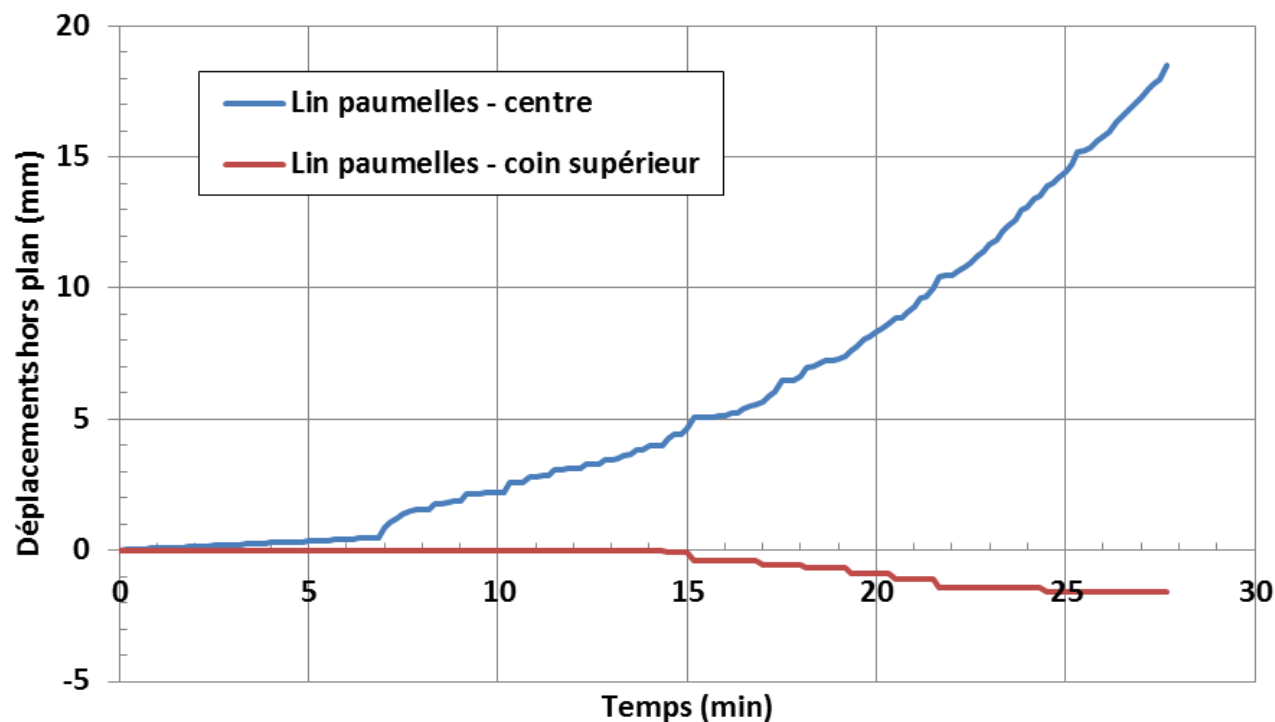


Températures moyennes mesurées sur les panneaux d'aggloméré de lin à différentes épaisseurs

Essai à grande échelle

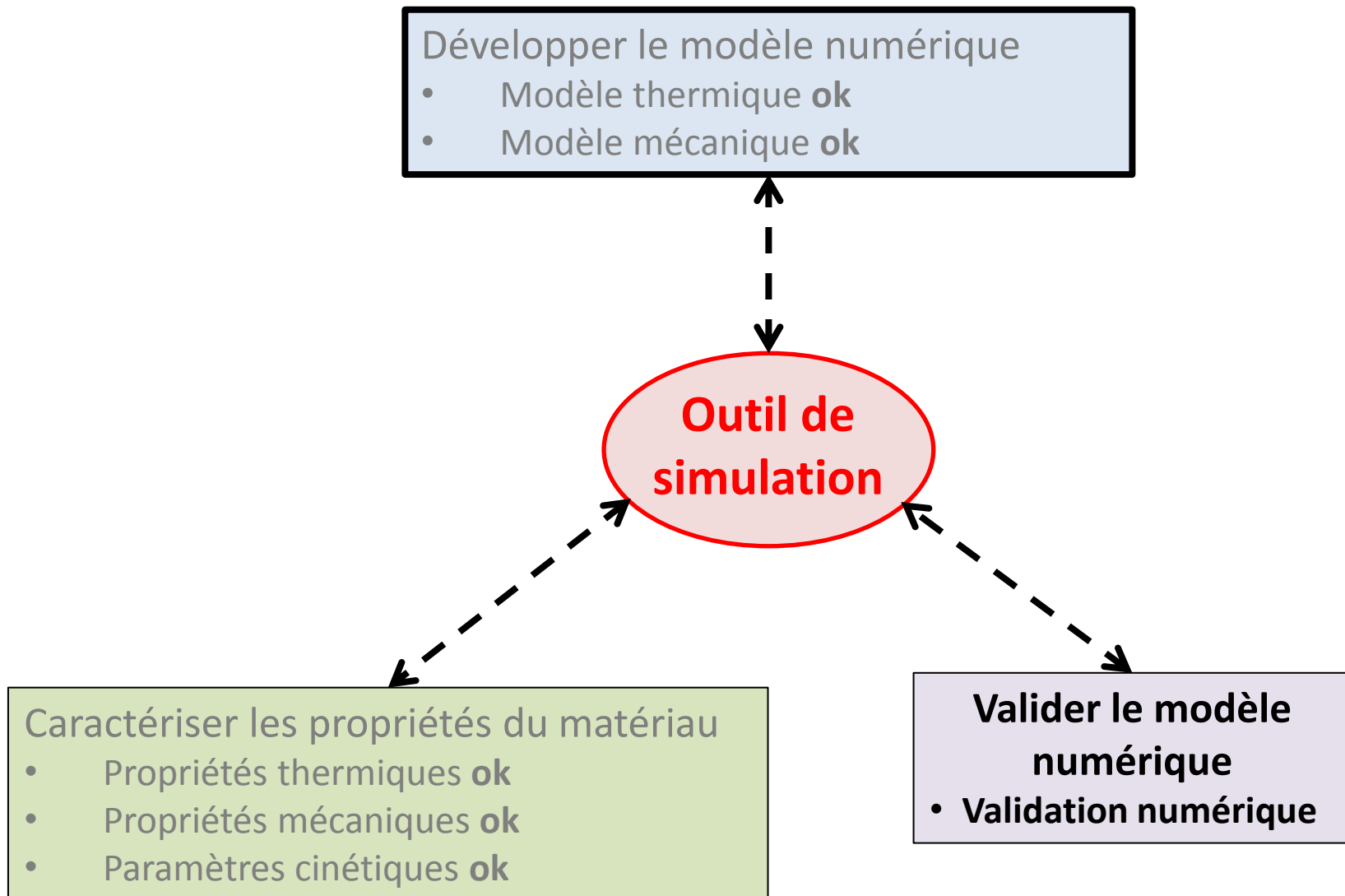
Résultats

- Déplacements du panneau d'aggloméré de lin fixé sur paumelles



Déplacements hors plan moyens mesurés sur le panneaux d'aggloméré de lin fixé sur paumelles

STRATÉGIE DU PROJET

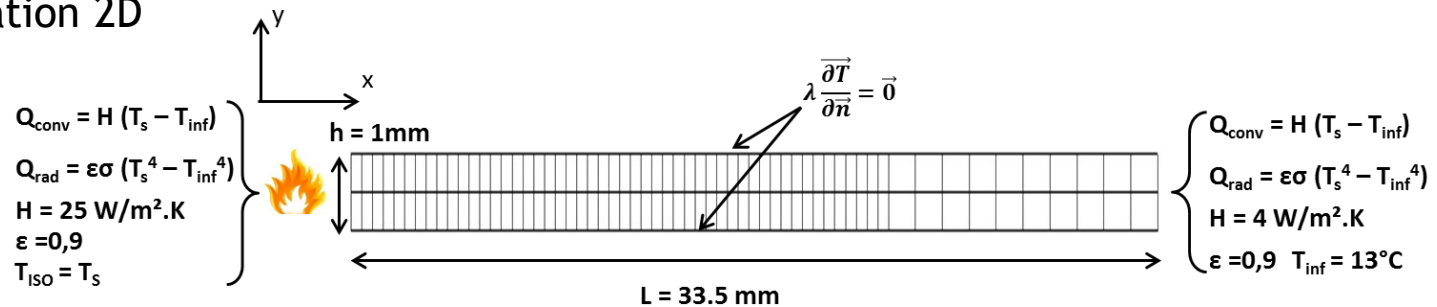


VALIDATION DU MODÈLE THERMIQUE

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

➤ Aggloméré de lin

- Chargement thermique ISO-834 (NF-EN-1363-1 2000)
- Simulation 2D



➤ Propriétés thermiques et paramètres du modèle

- Mesures / Littérature / Réglages itératifs

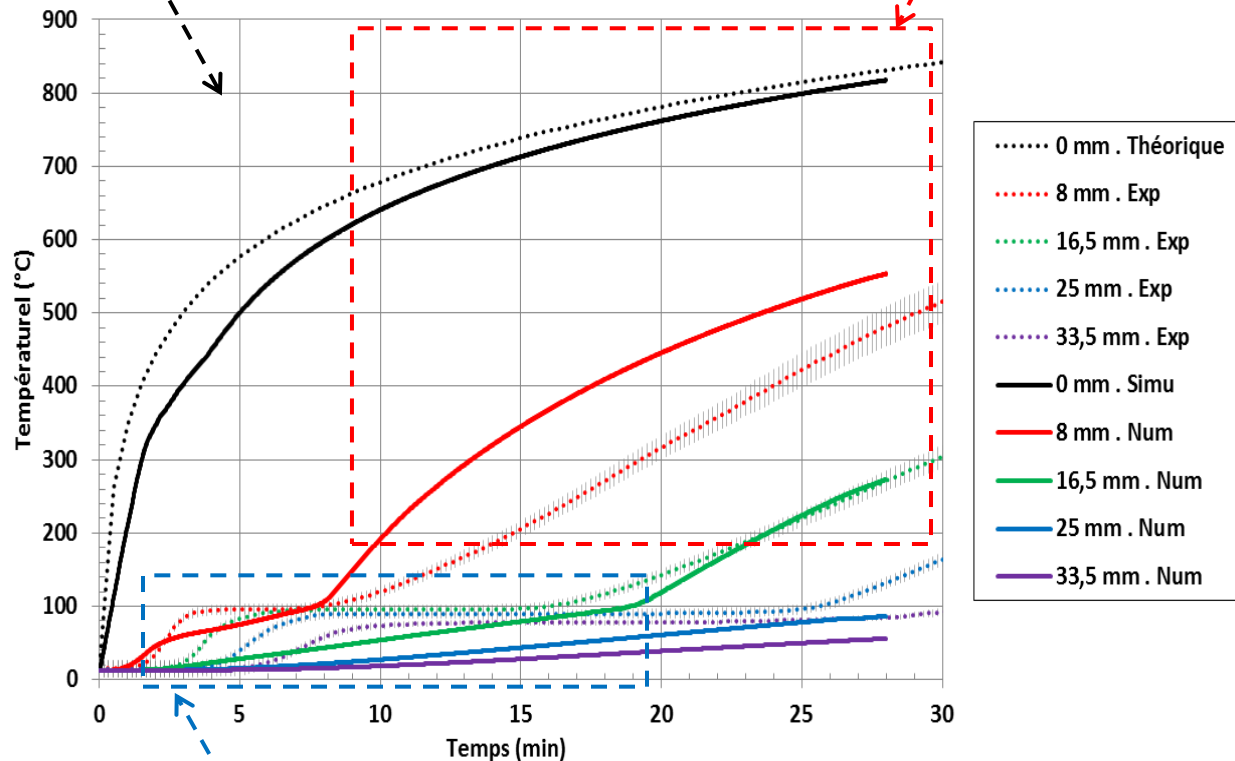
Composés	$\rho_{e,b,c}$ (kg/m^3)	$\lambda_{e,b,c}$ (W/m.K)	$Cp_{e,b,c}$ (J/kg.K)
Aggloméré de lin	373	0,123	1636
Charbon de bois	93 ($\Leftrightarrow \gamma = 0,25$)	0,125	1150
Eau	1000	0,658	4286

Paramètres	Vaporisation	Pyrolyse	Combustion
$Ei_{e,b}$ (J/mol)	$1,60 \cdot 10^5$	$3,33 \cdot 10^5$	-
$A_{e,b}$ (/s)	$1,00 \cdot 10^{19}$	$4,71 \cdot 10^{31}$	-
$Hr_{e,b}$ (J/kg)	$-1,20 \cdot 10^7$	$2,00 \cdot 10^6$	$1,70 \cdot 10^7$

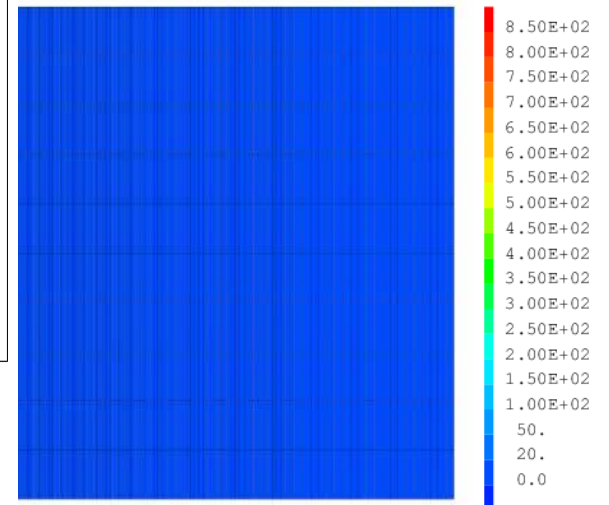
Simulation de l'essai à grande échelle

➤ Résultats thermiques

Bonnes tendances générales du transfert thermique



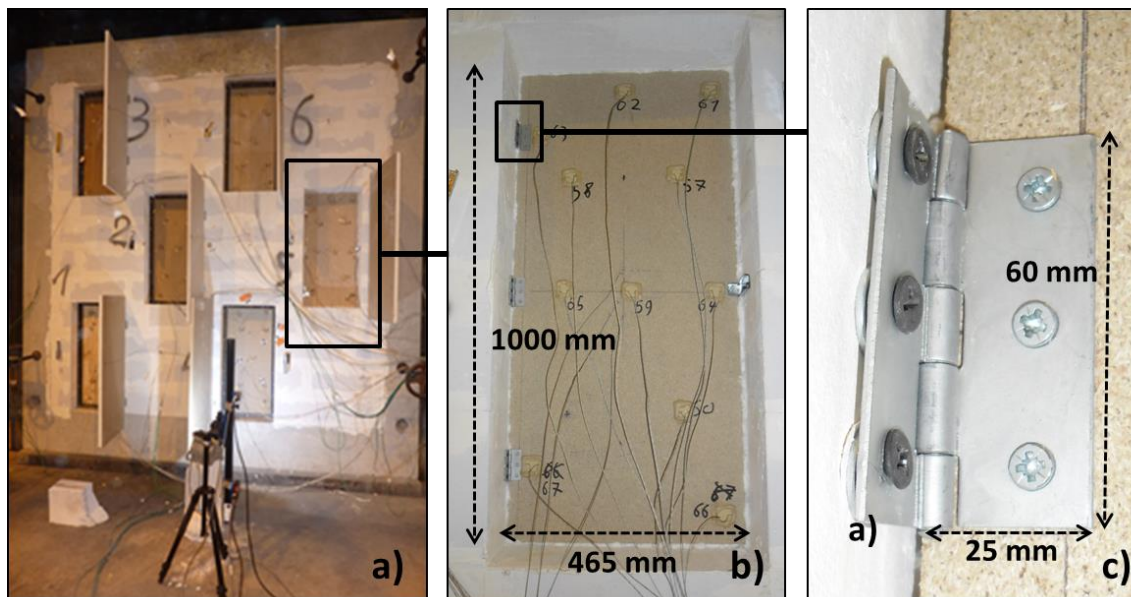
$T > 100\text{ °C}$
bien approchées



Difficultés à simuler l'amorçage et la vaporisation

Essai à grande échelle sur un four de résistance au feu

- Panneau d'aggloméré de lin monté sur paumelles
 - Maquette d'un vantail de bloc-porte
 - Éléments simulés : panneau / paumelles / serrure
 - Dimensions : 1000 x 465 x 33,5 mm³



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

SIMULATION DE L'ESSAI À GRANDE ÉCHELLE

➤ Maillage

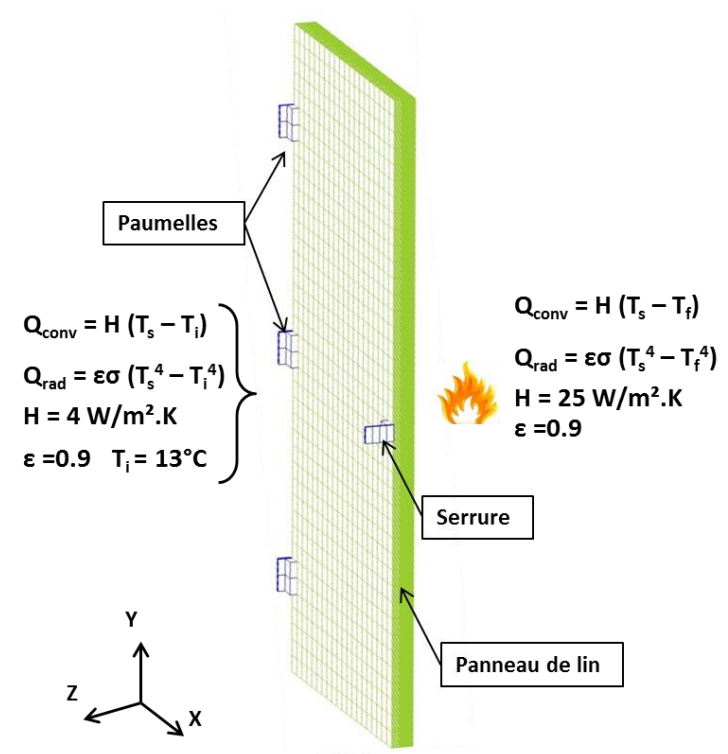
- Éléments prismatiques à 8 nœuds (CUB8)
- Dimensions des éléments
 - 0,22 mm à 0,56 mm dans l'épaisseur
 - 25 x 25 mm² dans le plan

➤ Modèle thermique

- Similaire au précédent modèle thermique

➤ Conditions aux limites

- Thermique : ISO-834
- Mécaniques
 - Liaisons parfaites acier - vantail
 - Rotation des paumelles autour de l'axe Y
 - Déplacements bloqués (paumelles et serrure)
 - Uniquement les surfaces extérieures

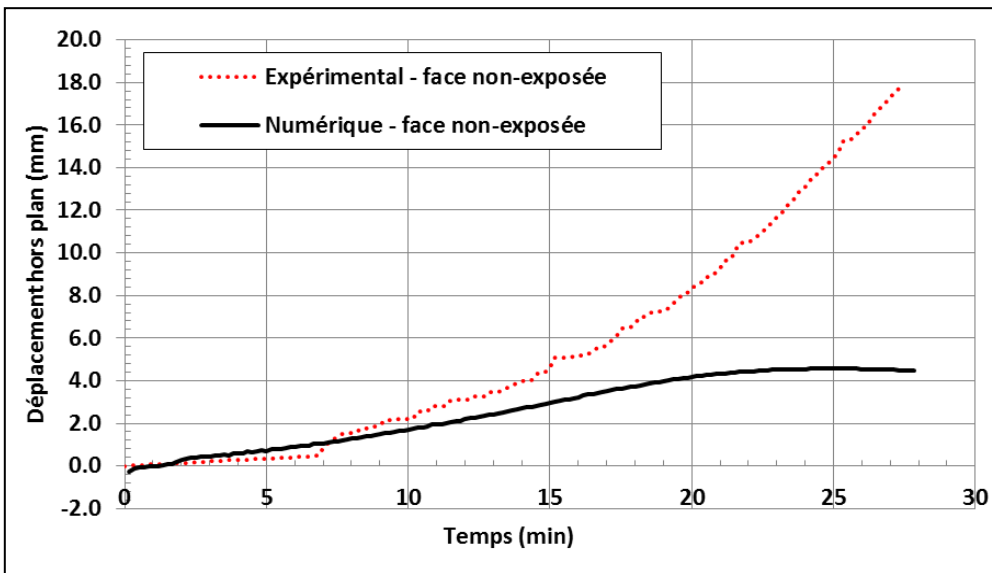


Maillage 3D et conditions aux limites thermiques

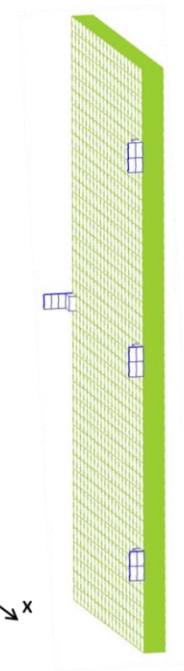
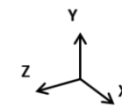
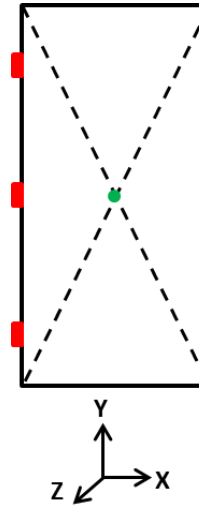
SIMULATION DE L'ESSAI À GRANDE ÉCHELLE

Résultats : déplacements au centre du panneau

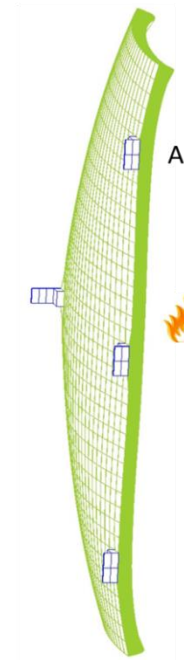
- Ordre de grandeur respecté
- Historique des déplacements retranscrit sur 15 min



Déplacement en fonction du temps



t = 0 min



t = 28 min

Amplitude x 1,5

- Développement d'un modèle thermomécanique pour les matériaux cellulosiques
 - Caractérisation expérimentale du matériau (développement d'outils)
 - Modélisation (pyrolyse, transfert thermique, lois de comportement, contact,...)
 - Confrontation essais/simulations
- Bilan
 - Méthodologie VIRGILE avec approche multi-échelle et multi-physique pertinente
 - Confirmation après les travaux sur plaque de plâtre cartonée
 - Pistes d'amélioration
 - lacunes dans le modèle thermomécanique
 - Couplage avec un code CFD pour le calcul de la contribution de la combustion
 - Essais complémentaires à grande échelle
 - Reproduire un essai de résistance au feu d'un bloc-porte coupe-feu
- Objectifs
 - Outil d'évaluation les performances au feu de produit de la construction
 - Maquette numérique pour l'évaluation de variation des configuration

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