

21^e Congrès Français de Mécanique 2013

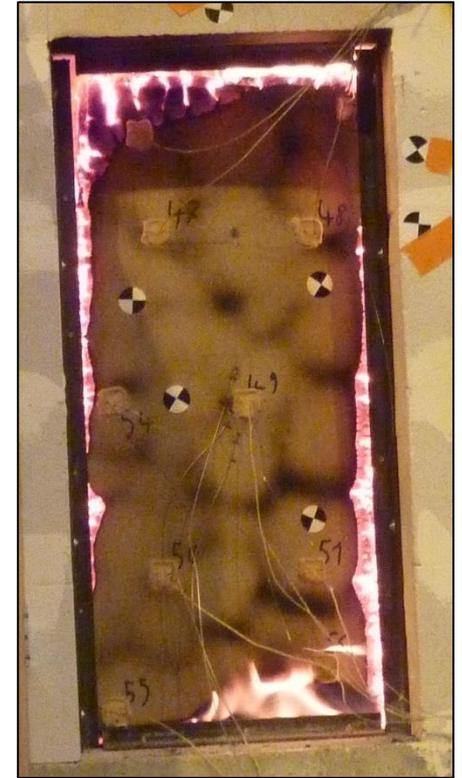
COMPORTEMENT THERMOMÉCANIQUE ET RÉSISTANCE AU FEU D'UN BLOC-PORTE EN BOIS.

(26 - 30 AOUT 2013)

Guillaume Cueff
Jean-Christophe Mindeguia
Virginie Drean
Denys Breyse
Gildas Auguin

PLAN DE LA PRÉSENTATION

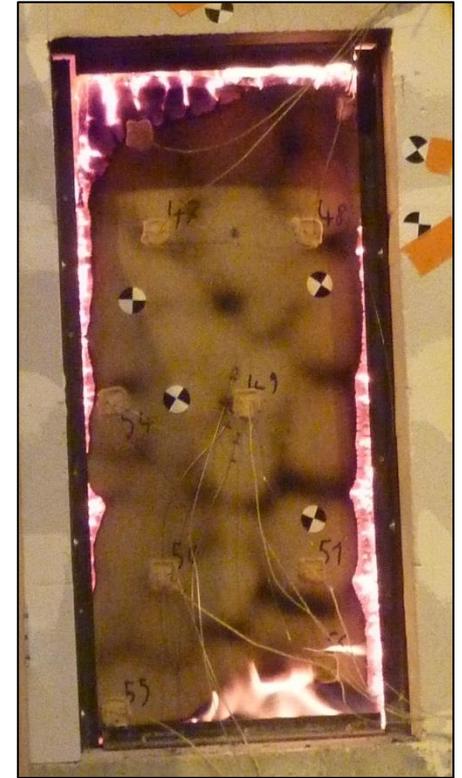
1. Contexte de l'étude
2. Données expérimentales
 1. Essais de caractérisation
 2. Essais de comportement au feu
3. Modèles de comportement
 1. Modèle thermophysique
 2. Modèle mécanique
4. Cas d'un panneau d'aggloméré de lin
5. Cas d'un panneau d'aggloméré de bois standard
6. Synthèse et perspectives



Vue de la face non-exposée d'un panneau d'aggloméré de bois lors d'un essai au feu.

PLAN DE LA PRÉSENTATION

1. Contexte de l'étude
2. Données expérimentales
 1. Essais de caractérisation
 2. Essais de comportement au feu
3. Modèles de comportement
 1. Modèle thermophysique
 2. Modèle mécanique
4. Cas d'un panneau d'aggloméré de lin
5. Cas d'un panneau d'aggloméré de bois standard
6. Synthèse et perspectives



Vue de la face non-exposée d'un panneau d'aggloméré de bois lors d'un essai au feu.

○ Sujet de thèse (2011 - 2014)

« Etude du comportement thermomécanique de matériaux composites celluloseux, application à un essai de résistance au feu d'un bloc-porte en bois ».

○ Partenaires

- Efectis France, laboratoire de résistance au feu et d'ingénierie de sécurité incendie, www.effectis.com
- I2M - GCE, Université de Bordeaux 1, Institut de Mécanique et d'Ingénierie / Département Génie Civil et Environnement, UMR CNRS 5295



○ Cadre des travaux => développement d'un four virtuel

- Projet VIRGILE II : comportement thermomécanique de matériaux combustibles
- Logiciel: CASTEM (CEA), code éléments finis (calculs thermomécaniques)



○ Objectif

- **Simuler un essai de résistance au feu d'un bloc-porte en bois**
 - Reproduire le transfert thermique au sein du matériau
 - Retrouver les déplacements mesurés
- Proposer aux industriels un outil numérique d'optimisation de leurs produits vis-à-vis du feu.

- Problématiques liées à la simulation thermomécanique
 - Prise en compte de processus thermiquement activés
 - Séchage
 - Pyrolyse
 - Combustion
 - Évolution des propriétés thermiques avec la température (couplées à la pyrolyse)
 - Évolution des propriétés mécaniques avec la températures (E , ν , σ_{\max} , α)
 - Prise en compte des interactions entre solides (jeux de fonctionnement du bloc-porte)

○ Problématiques liées à la simulation thermomécanique

- Prise en compte de processus thermiquement activés
 - Séchage
 - Pyrolyse
 - Combustion
- Évolution des propriétés thermiques avec la température (couplées à la pyrolyse)
- Évolution des propriétés mécaniques avec la températures (E , ν , σ_{\max} , α)
- Prise en compte des interactions entre solides (jeux de fonctionnement du bloc-porte)

○ Etat de l'art

- Peu de données disponibles
 - Seul le bois massif est documenté à hautes températures
 - En particulier peu ou pas d'information sur le coefficient de dilatation thermique
- Modèles de transfert thermique et de transfert de masse
 - Souvent complexes (gradient de pression, transfert de vapeur)
 - Nombre de paramètres élevé
 - Données d'entrées nécessaires inconnues et difficilement mesurables

PLAN DE LA PRÉSENTATION

1. Contexte de l'étude
- 2. Données expérimentales**
 1. Essais de caractérisation
 2. Essais de comportement au feu
3. Modèles de comportement
 1. Modèle thermophysique
 2. Modèle mécanique
4. Cas d'un panneau d'aggloméré de lin
5. Cas d'un panneau d'aggloméré de bois standard
6. Synthèse et perspectives



Vue de la face non-exposée d'un panneau d'aggloméré de bois lors d'un essai au feu.

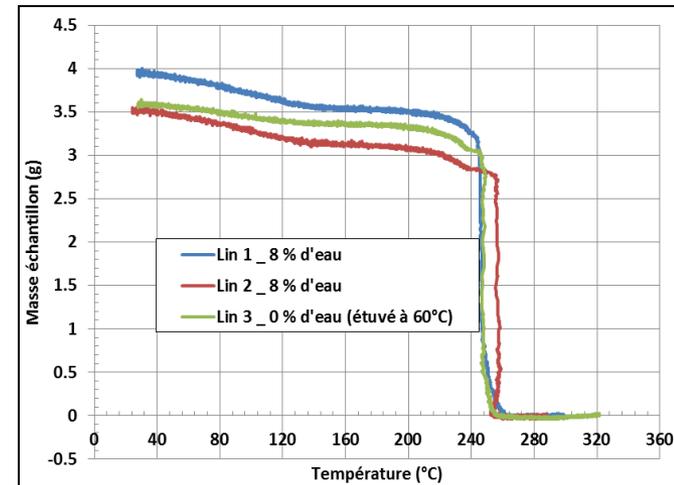
DONNÉES EXPÉRIMENTALES

○ Essais de caractérisation (I2M, SIAME)

- Caractériser les matériaux composant un bloc-porte
- Thermique
 - Conductivité thermique / Chaleur spécifique / Perte de masse (ATG)
- Mécanique (mesure à hautes températures)
 - Module d'élasticité / Contrainte à la rupture / Dilatation thermique

○ Essai de comportement au feu (Efectis France)

- 4 matériaux testés
 - Bois massif / MDF / Aggloméré de bois / Aggloméré de lin
 - Généralement mis en œuvre dans les blocs-portes
- Base de données contrôlée
 - Conditions aux limites (thermique et mécanique) connues
 - Mesure des températures
 - Mesures des déplacements



Mesure de la perte de masse d'aggloméré de lin,
 $v = 3^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

Objectif  Enrichir et valider les modèles développés !

○ Instrumentation

- 90 thermocouples
- 14 fleximètres en face non-exposée
- 1 système de stéréo-corrélation d'image
 - Panneau d'aggloméré de bois standard
- 1 caméra dans le four

○ Panneaux étudiés numériquement

- Aggloméré de lin
 - Monté sur trois paumelles en acier inox
 - Bloc-porte simplifié
 - Serrure via un morceau de cornière
 - Masse volumique = 390 kg/m^3
- Aggloméré de bois standard
 - Vissé sur cornière
 - Masse volumique = 630 kg/m^3
- Teneur en eau $\approx 8\% - 12\%$



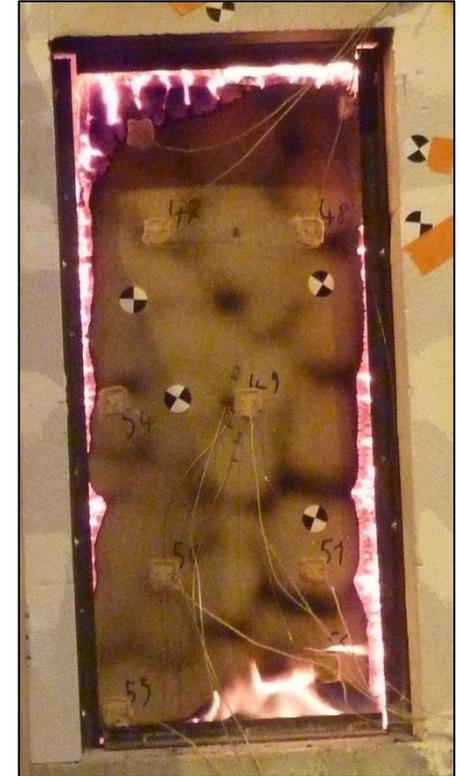
Vue de la face non-exposé du four d'essai.



Vue de l'essai à l'intérieur du four.

PLAN DE LA PRÉSENTATION

1. Contexte de l'étude
2. Données expérimentales
 1. Essais de caractérisation
 2. Essais de comportement au feu
3. **Modèles de comportement**
 1. **Modèle thermophysique**
 2. **Modèle mécanique**
4. Cas d'un panneau d'aggloméré de lin
5. Cas d'un panneau d'aggloméré de bois standard
6. Synthèse et perspectives



Vue de la face non-exposée d'un panneau d'aggloméré de bois lors d'un essai au feu.

Modèle Thermophysique

○ Réactions de dégradation thermique prises en compte

- Evaporation de l'eau k_e à 100 °C, Q_e
- Pyrolyse du bois k_b (entre 250 °C - 350 °C), Q_b

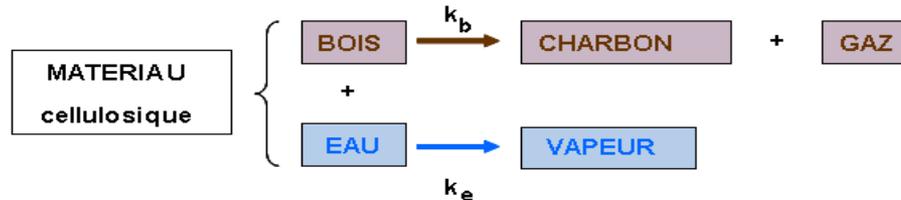


Schéma simplifié de la décomposition thermique d'un matériau cellulosique.

○ Cinétiques de réaction : deux lois d'Arrhenius

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

○ Equation de la chaleur avec les sources de chaleur volumique associées

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

MODÈLE DE COMPORTEMENT

Modèle Thermophysique

- Loi de comportement  Thermique isotrope
- Hypothèses
 - Le volume reste constant
 - $\rho_{e, b, c} = f(T)$ connues
- Propriétés thermiques via une loi des mélanges

Etape 1:

Calcul des fractions de masse volumique

$$X_b(T) = \frac{\rho_b}{\rho_{initiale\ bois}}$$

$$X_e(T) = \frac{\rho_e}{\rho_{initiale\ eau}} * \% \text{ eau}$$

$$X_c(T) = \frac{\rho_c}{\rho_{initiale\ bois}} * \% \text{ charbon final}$$

X_b, X_e et X_c
connues en
fonction de la T.



Etape 2:

Calcul des propriétés thermiques en fonction de T.

$$\rho_{tot} = \frac{\rho_b * X_b + \rho_e * X_e + \rho_c * X_c}{\sum \rho_i}$$

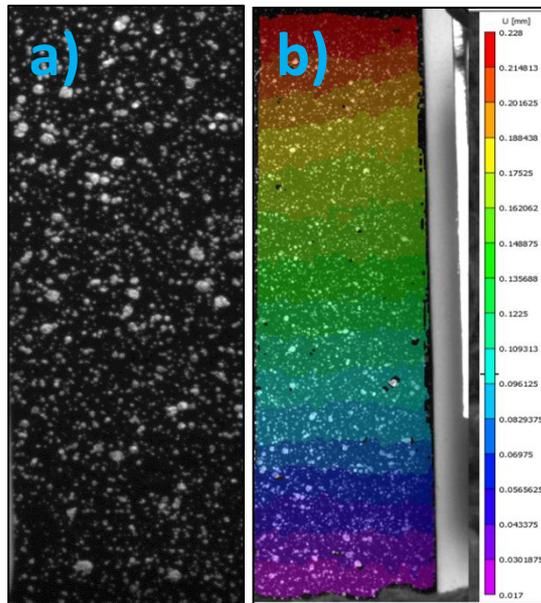
$$C_{tot} = \frac{Cp_b * X_b + Cp_e * X_e + Cp_c * X_c}{\sum Cp_i}$$

$$\lambda_{tot} = \frac{\lambda_b * X_b + \lambda_e * X_e + \lambda_c * X_c}{\sum \lambda_i}$$

MODÈLE DE COMPORTEMENT

Modèle Mécanique

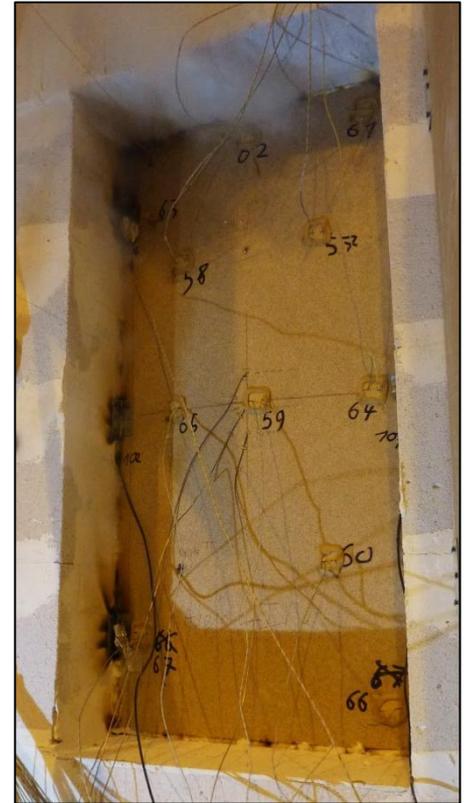
- Loi de comportement → Elastique isotrope
- Propriétés évoluant en fonction de T
 - Module d'élasticité et coefficient de Poisson mesurés (Stéréo corrélation d'images)
 - Coefficient de dilatation thermique bibliographique (Tabaddor 2008) et mesures



Mesure de déformation par stéréo corrélation d'images: mouchetis (a) et champ de déformation verticale sur de l'aggloméré de Lin (b).

PLAN DE LA PRÉSENTATION

1. Contexte de l'étude
2. Données expérimentales
 1. Essais de caractérisation
 2. Essais de comportement au feu
3. Modèles de comportement
 1. Modèle thermophysique
 2. Modèle mécanique
4. **Cas d'un panneau d'aggloméré de lin**
5. Cas d'un panneau d'aggloméré de bois standard
6. Synthèse et perspectives



Vue de la face non-exposée d'un panneau d'aggloméré de lin monté sur paumelles.

AGGLOMÉRÉ DE LIN

○ Panneau simulé

- Dimension : **1000 x 450 x 33,5 mm³**
- Montage : **3 paumelles et 1 serrure**

○ Conditions aux limites

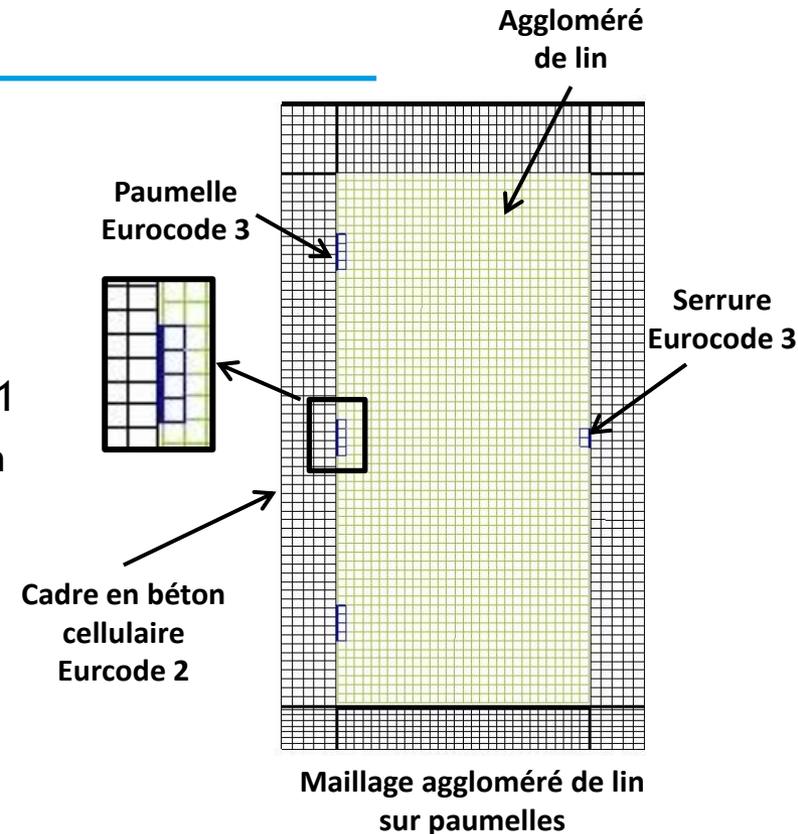
- Agression thermique : feu normalisé EN 1363-1
- Déplacements bloqués : pourtour du cadre béton
- Liaisons parfaites
 - paumelles/béton et paumelles/panneau

○ Loi des mélanges

- Masse volumique initiale = 390 kg/m³
- Teneur en eau = 12 %
- Masse finale de charbon = 15 % (58,5 kg/m³)

○ Propriétés des lois d'Arrhenius utilisées

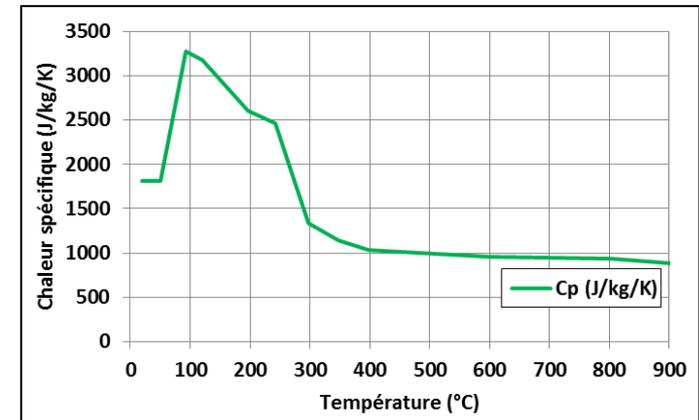
	A (/S)	Hr (J/kg)	Ei (J/mol)	T réaction (°C)
Evaporation	75	2,256.10⁶	5.10 ⁴	100
Pyrolyse	8,83.10 ⁶	1,4.10⁶	1.10 ⁵	250



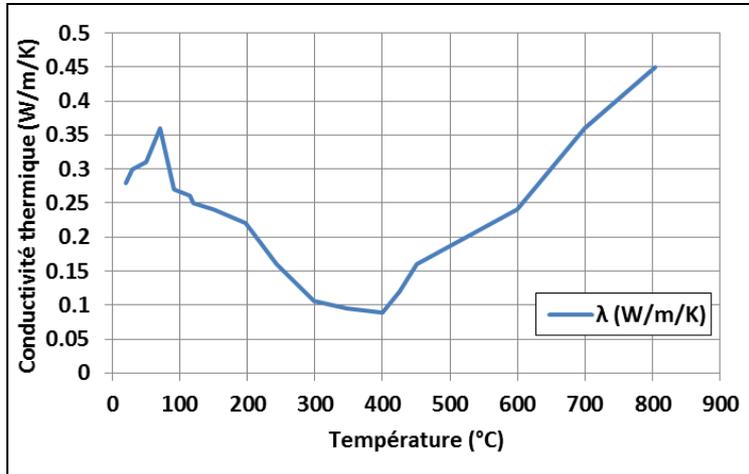
AGGLOMÉRÉ DE LIN

○ Propriétés thermiques utilisées

- Résultats de loi des mélanges
- Calage de la conductivité thermique
 - Augmentation vers 400°C
 - Permet un apport de chaleur
 - Fissuration
 - Combustion



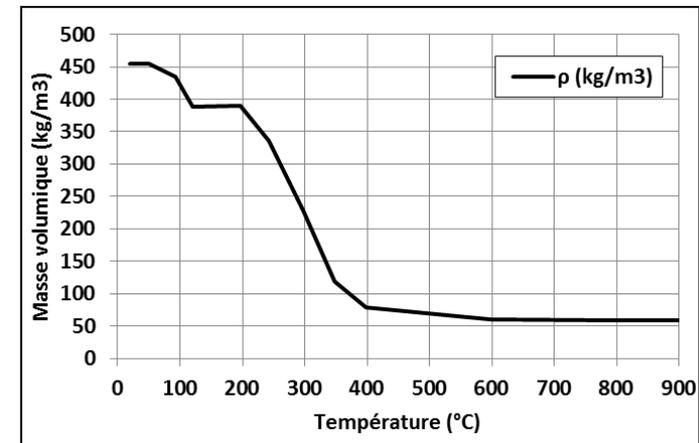
Chaleur spécifique de l'aggloméré de lin.



Conductivité thermique de l'aggloméré de lin.



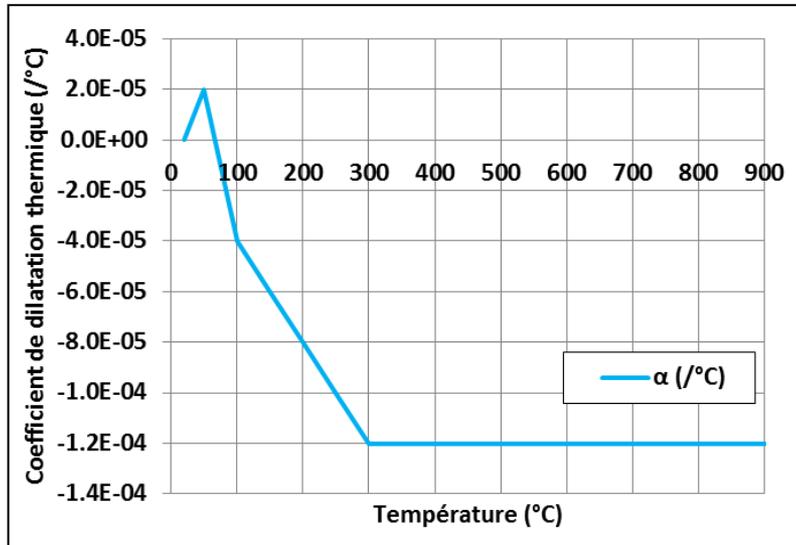
Fissuration de la face exposée au feu dans un four d'essai.



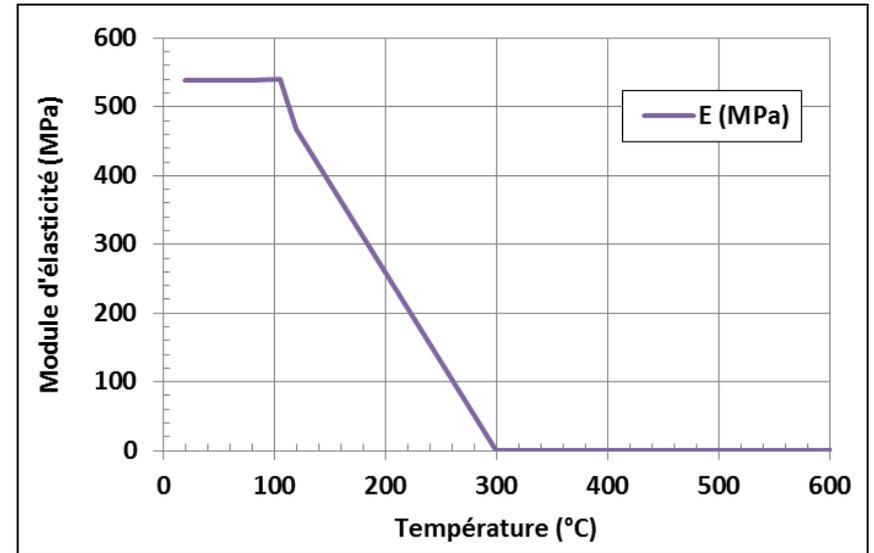
Masse volumique de l'aggloméré de lin.

○ Propriétés thermomécaniques utilisées

- Module d'élasticité
 - Mesure à 20°C
 - Réduction Eurocode 5
- Coefficient de dilatation thermique
 - Étude bibliographique

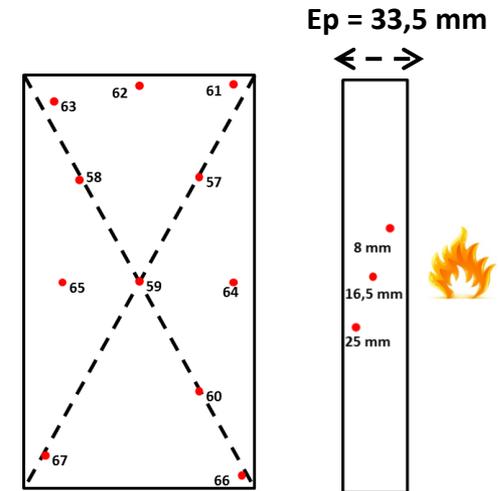
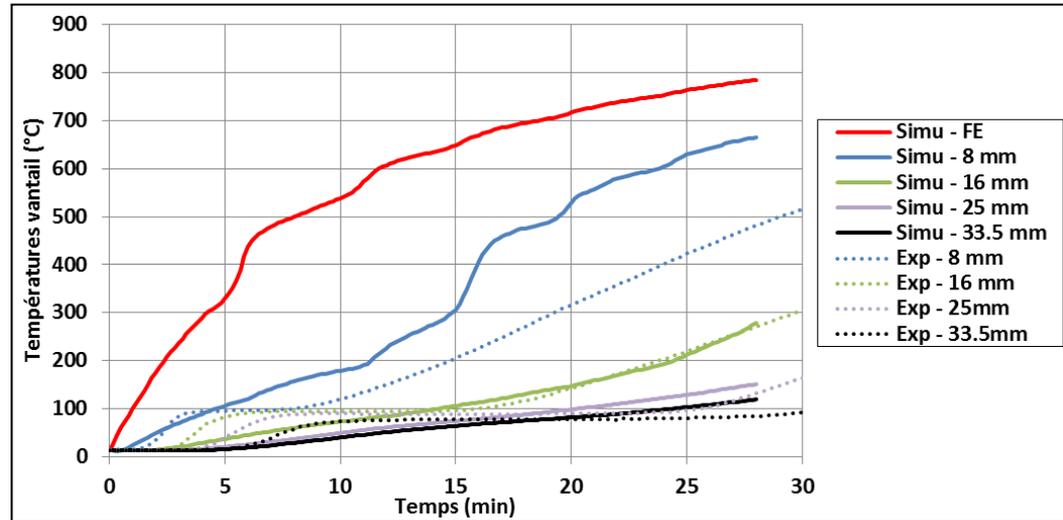


Coefficient de dilatation thermique de l'aggloméré de lin.



Module d'élasticité de l'aggloméré de lin.

○ Températures obtenues



○ Difficultés à simuler un transfert thermique dans un matériau cellulosique

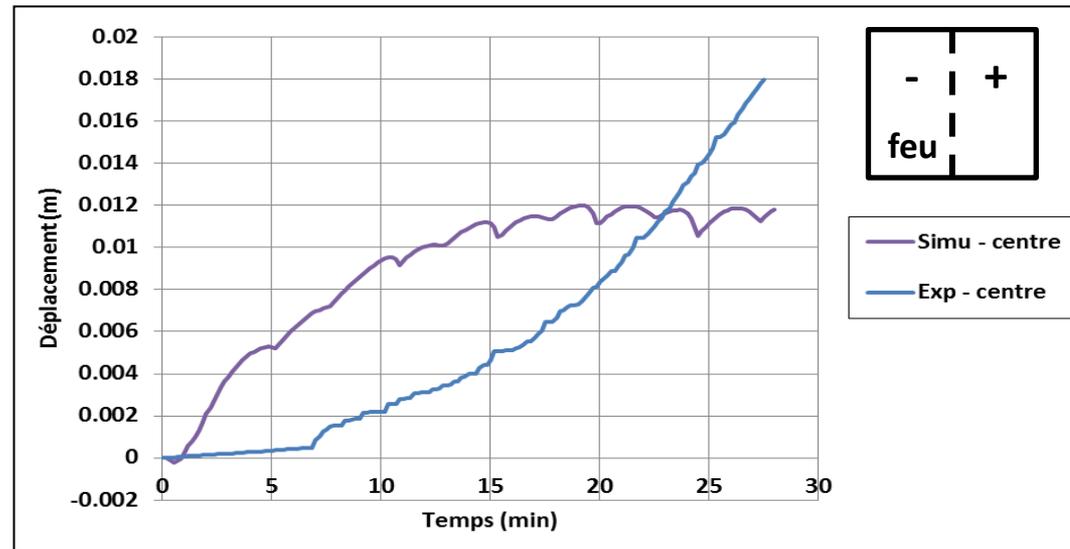
- Problème d'échauffement entre 20°C et 80°C
- Mauvaise retranscription des plateaux d'évaporation vers 100°C

○ Lacunes du modèle thermophysique

- Incertitude sur les données d'entrées
- Transfert de masse non pris en compte (eau chaude et vapeur d'eau)
 - Apport de chaleur via la vapeur d'eau
 - Condensation de la vapeur d'eau

○ Déplacements

- Centre panneau



○ Déplacements mal retranscrits

- Mauvais historique de température
- Incertitude sur
 - Les données d'entrées (coefficient de dilatation thermique)
 - Le modèle mécanique
 - Les conditions aux limites

○ Incertitude sur la mesure expérimentale

PLAN DE LA PRÉSENTATION

1. Contexte de l'étude
2. Données expérimentales
 1. Essais de caractérisation
 2. Essais de comportement au feu
3. Modèles de comportement
 1. Modèle thermophysique
 2. Modèle mécanique
4. Cas d'un panneau d'aggloméré de lin
5. **Cas d'un panneau d'aggloméré de bois standard**
6. Synthèse et perspectives



Vue de la face non-exposée d'un panneau d'aggloméré de bois lors d'un essai au feu.

AGGLOMÉRÉ DE BOIS STANDARD

○ Panneau simulé

- Dimension : **1000 x 450 x 38 mm³**
- Montage : **vis + cornières**

○ Conditions aux limites

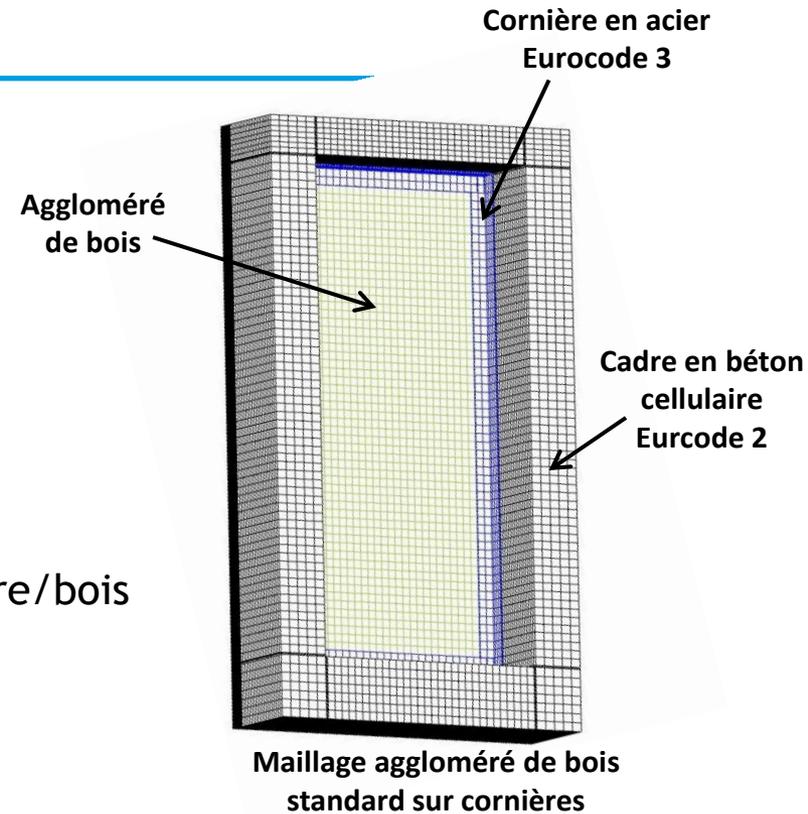
- Agression thermique : feu normalisé EN 1363-1
- Blocages des déplacements
 - Pourtour cadre béton
 - Liaisons parfaites : cornière/béton, cornière/bois

○ Loi des mélanges

- Masse volumique initiale = 630 kg/m³
- Teneur en eau = 12 %
- Masse finale de charbon = 20 % (126 kg/m³)

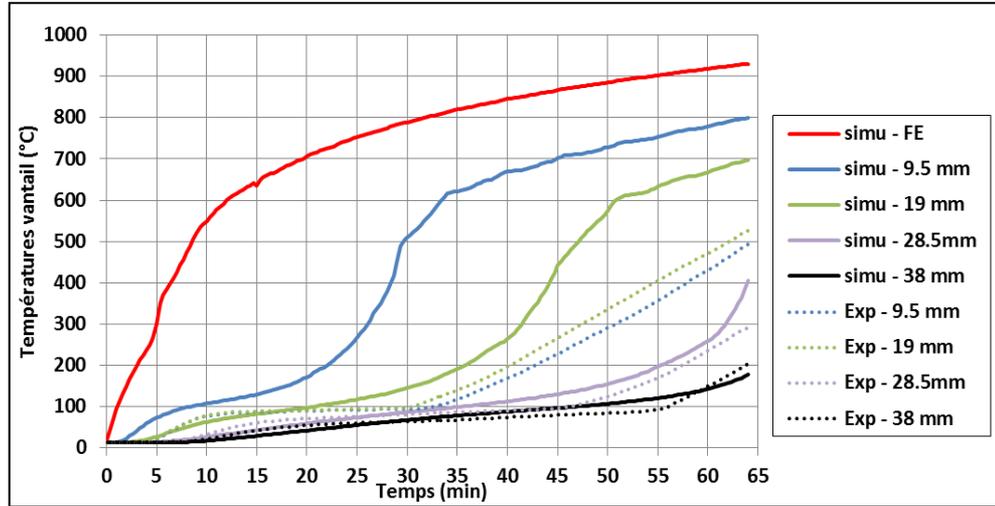
○ Propriétés des lois d'Arrhenius utilisées

	A (/S)	Hr (J/kg)	Ei (J/mol)	T réaction (°C)
Evaporation	100	$2,256 \cdot 10^6$	$4,5 \cdot 10^4$	100
Pyrolyse	$8,83 \cdot 10^6$	$1,4 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^5$	250

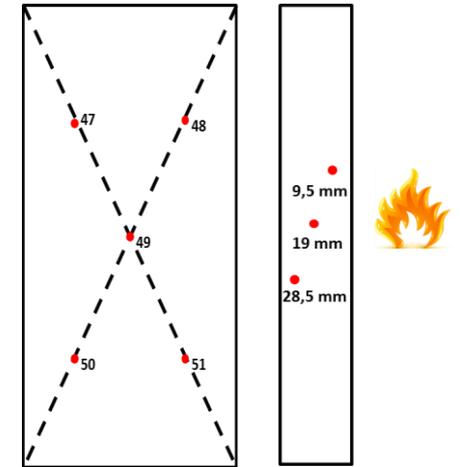


AGGLOMÉRÉ DE BOIS STANDARD

- Températures obtenues => calé sur la face non-exposée au feu

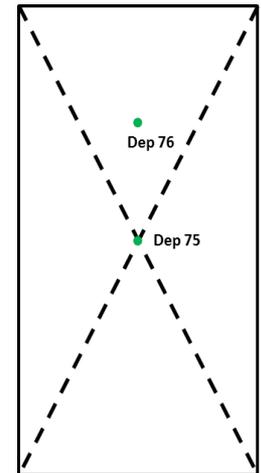
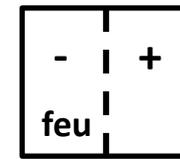
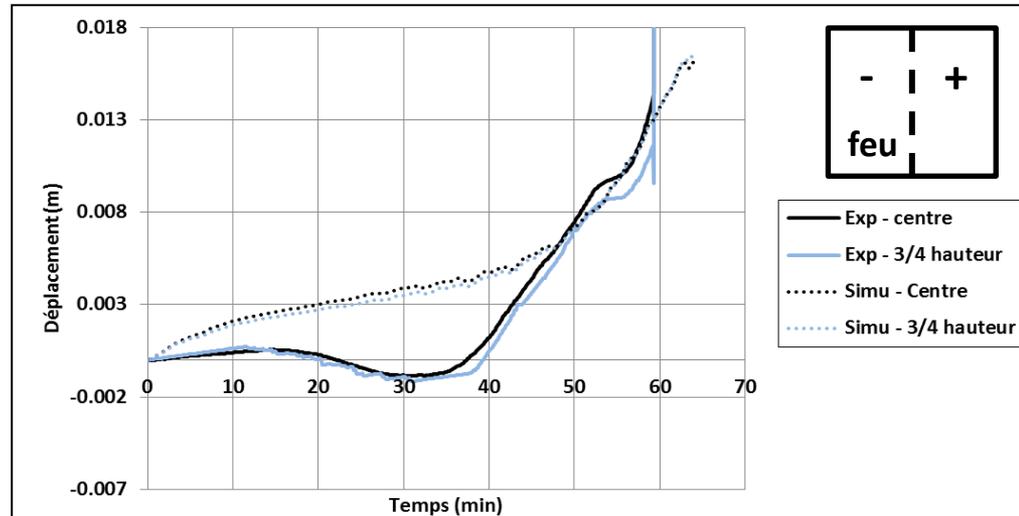


Ep = 38 mm



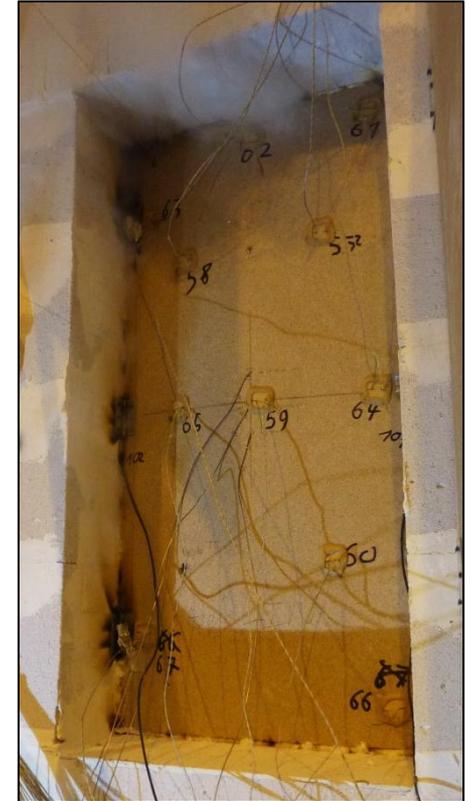
○ Déplacements

- Centre panneau
- 3/4 de la hauteur



PLAN DE LA PRÉSENTATION

1. Contexte de l'étude
2. Données expérimentales
 1. Essais de caractérisation
 2. Essais de comportement au feu
3. Modèles de comportement
 1. Modèle thermophysique
 2. Modèle mécanique
4. Cas d'un panneau d'aggloméré de bois standard
5. Cas d'un panneau d'aggloméré de lin
6. Synthèse et perspectives



Vue de la face non-exposée d'un panneau d'aggloméré de lin monté sur paumelles.

- Difficultés à simuler un transfert thermique dans des matériaux cellulosiques
 - Incertitudes sur les données d'entrées
 - Problème de transfert de masse
- Déformations mal retranscrites
 - Peu d'information sur le coefficient de dilatation thermique
 - Mauvais transfert thermique \Leftrightarrow mauvais déplacements
- Forte problématique due à la mesure expérimentale
- Cas d'étude complexe
 - Multi-physique et multi-échelle (dégradation thermique, comportement mécanique)
 - Matériau idéalisé (non simulation de la colle, hypothèse d'isotropie)

○ Modélisation

- Mieux prendre en compte les phénomènes d'évaporation
- Etudier le transfert de chaleur associé au transfert de masse



Dispositif d'essai de transfert thermique.

○ Expérimentation

- Caractériser les matériaux combustibles à haute température
 - Thermique et mécanique

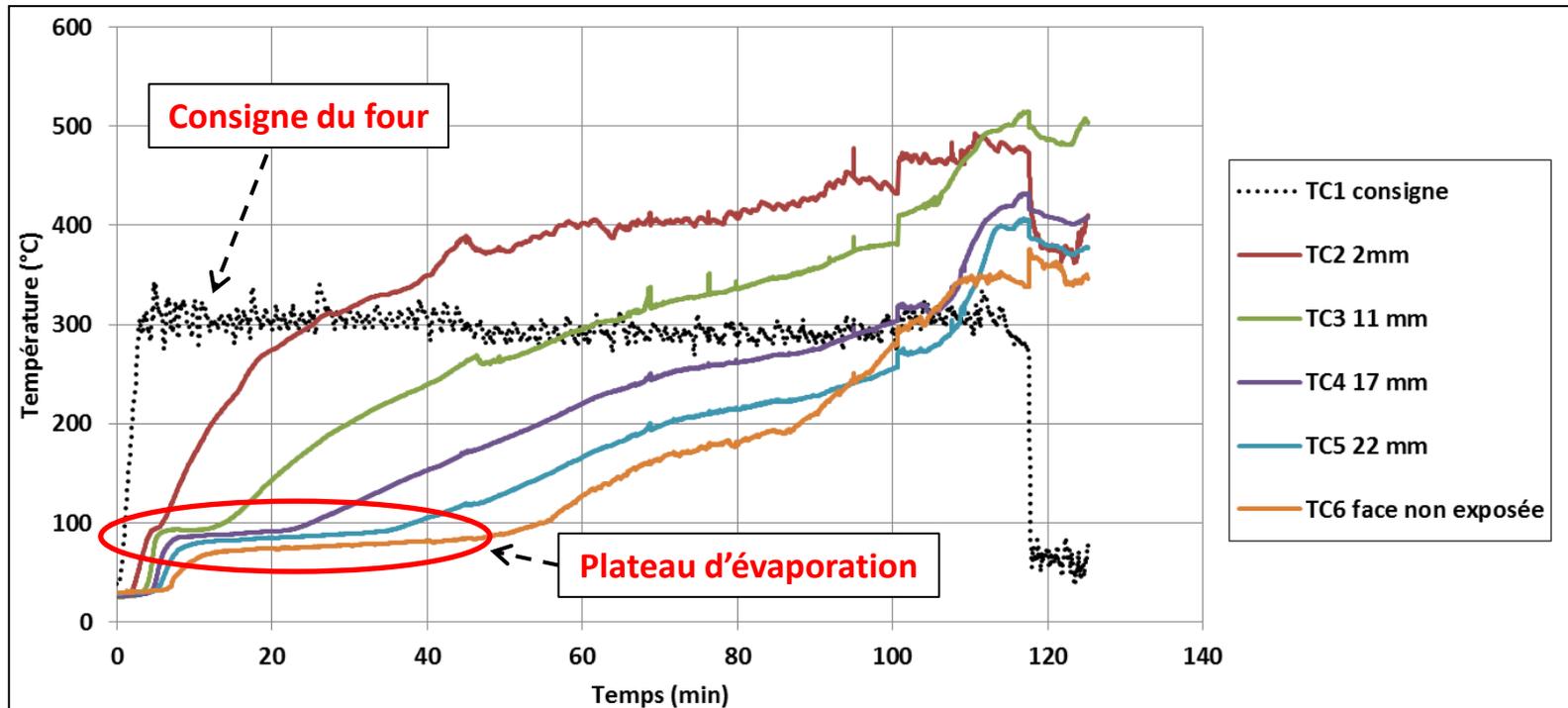
○ Simuler un essai de résistance au feu à l'échelle 1:1

MERCI DE VOTRE ATTENTION.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] SA YOUNG, P CLANCY, Compression mechanical properties of wood at temperatures simulating fire conditions, Fire and materials 25, p 83 - 93, 2001.
- [2] IM VAN ZEELAND, Compressive strength lumber at high temperature, Fire and materials, 29, p 71-90, 2005.
- [3] GLASS S.V., ZELINKA S.L., Wood Handbook, Chapter 04: Moisture Relation and Physical Properties of Wood, 2010.
- [4] KUNDSON, SCHNIEWIND, Performance of structural wood members exposed to fire, Forest product journal, 25, p 23-22, 1975.
- [5] SUTTON M., ORTEU J.J., SCHREIER H.W., Image correlation for shape, motion and deformation measurements: Basic concepts, theory and applications, Springer, 2009.
- [6] DI BLASI, BRANCA , SPARANO, LA MANTIA, Drying characteristics of wood cylinders for conditions pertinent to fixed-bed countercurrent gasification, Biomass and Bioenergy 25, p 45-48, 2003.
- [7] LAPLANCHE, Etude du comportement au feu des assemblages de structures bois : Approche expérimentale et modélisation, rapport de thèse, Université Blaise Pascal, 2006.
- [8] TABADDOR, Thermal and Mechanical Finite Element Modeling of Wood-Floor Assemblies Subjected to Furnace Exposure, Underwriters Laboratories, 2008.
- [9] CASTEM 2009, logiciel de simulation par éléments finis, CEA, www-cast3m.cea.fr

- Mieux prendre en compte les phénomènes d'évaporation



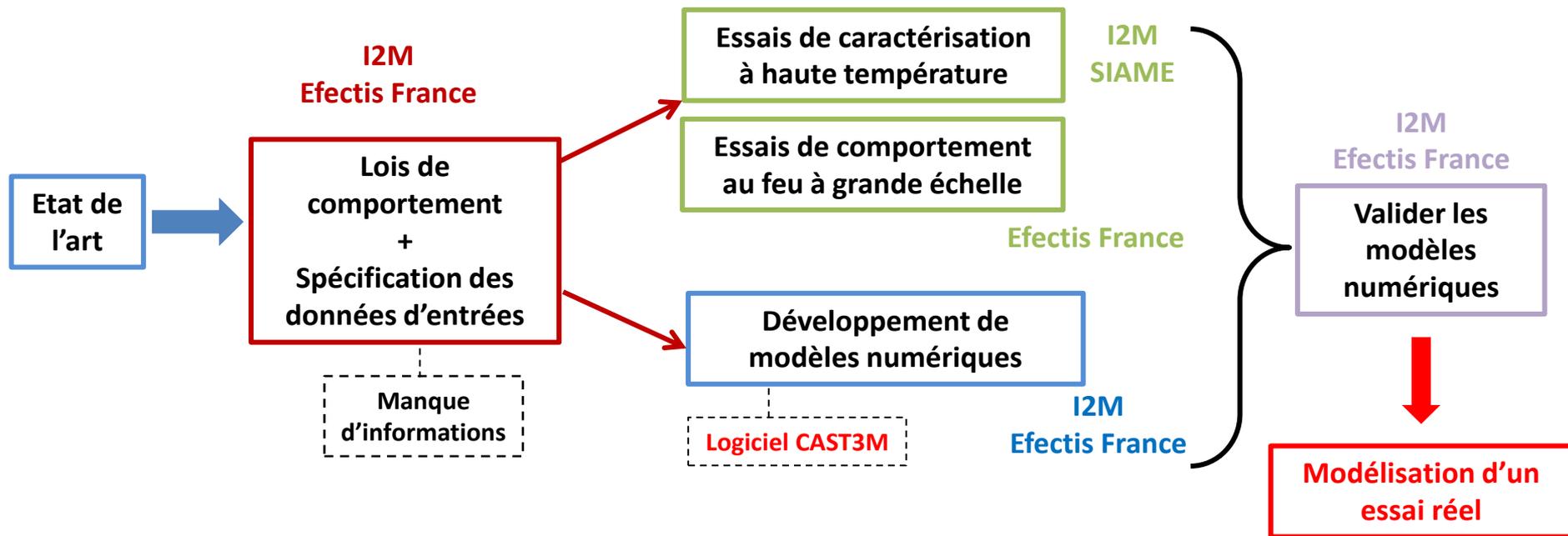
Transfert thermique réalisé en laboratoire sur de l'aggloméré de lin (33,5 mm d'épaisseur).

- Caractériser les matériaux à haute température
- Simuler un essai de résistance au feu à l'échelle 1:1

CONTEXTE

○ Travail effectué dans le cadre du développement d'un four virtuel

- Projet VIRGILE II
- Thermique : Simulation de la dégradation thermique de matériaux combustibles
- Mécanique (thèse) : Simulation du comportement thermomécanique du matériau
- Utilisation de CASTEM (CEA), code éléments finis pour les calculs thermiques et de structure



MÉTHODOLOGIE

