

APPROCHE MULTI-ÉCHELLE POUR LA CARACTÉRISATION DE LA RÉACTION AU FEU DU BOIS.

T. Rogaume, J. Colombiano, V. Dréan, E. Guillaume, B. Batiot, F. Richard



Transfert de chaleur dans le solide - échauffement

Décomposition thermique
Emissions gazeuses

(Auto)inflammation du mélange gazeux : mélange aéraulique, LII-LSI, énergie, température

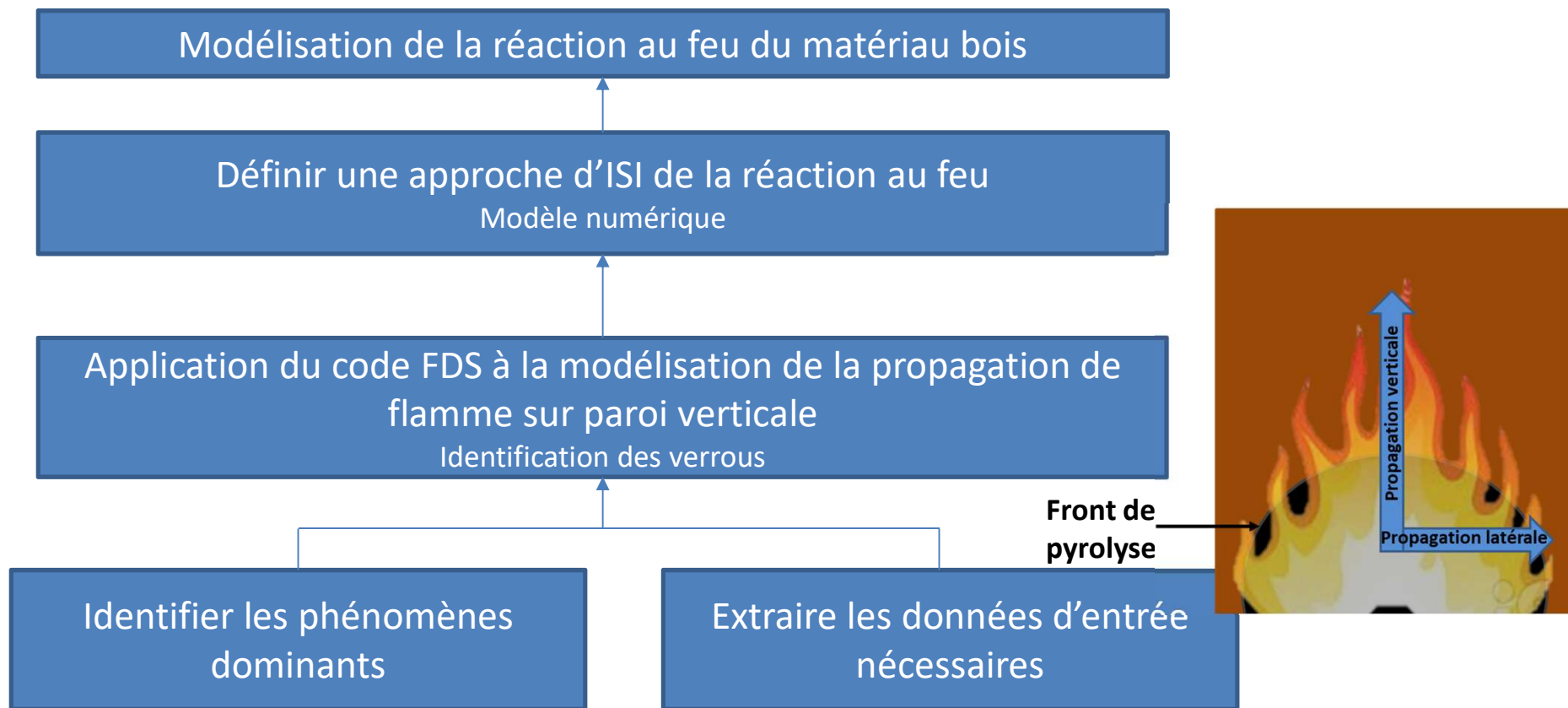
Propagation du front de flamme



Ensemble des processus à décrire

Couplage fort des phases condensée et gazeuse





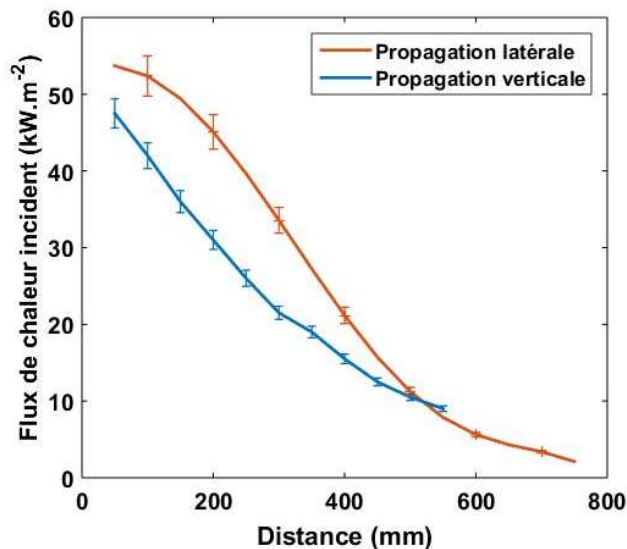
Mise en évidence des processus			Données d'entrée aux modèles		Modélisation de la propagation de flamme		
Latérale	Verticale	2D	Extraction	Validation	Latérale	Verticale	2D

Objectifs

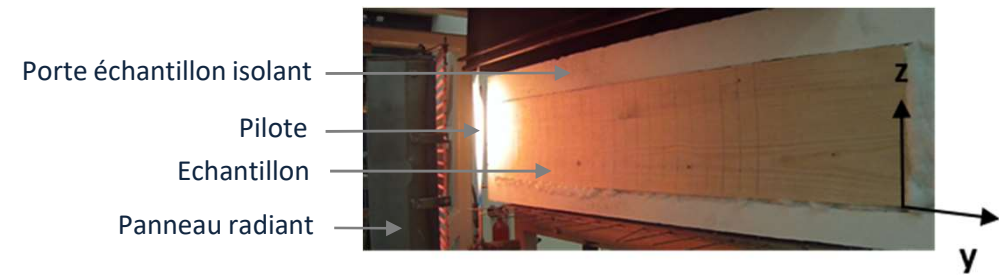
- Evaluer les processus de décomposition thermique et de propagation latérale de flamme

Procédure

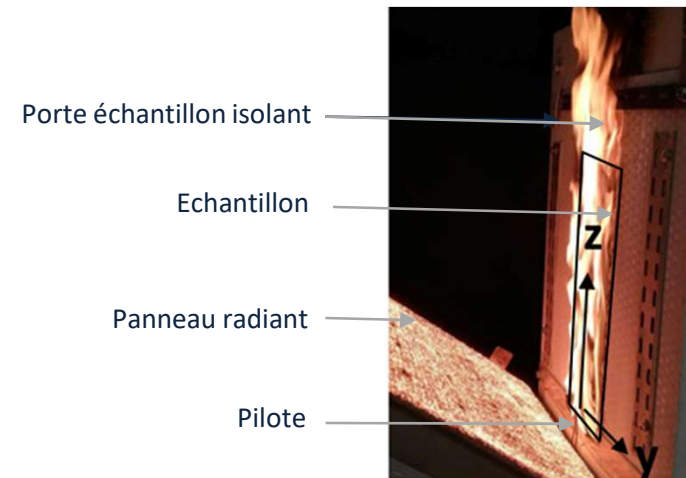
- Propagation latérale
 - ✓ Essais banc IMO-LIFT – NF ISO 5658-2
- Propagation verticale
 - ✓ Banc développé à cet effet
 - ✓ Echantillon : $0,15 \times 0,6 \times 0,018 \text{ m}^3$ (L x h x e)
 - ✓ Gradient de flux thermique selon l'axe z
- Echantillons conditionnés avant chaque essai



Propagation latérale 1D



Propagation verticale 1D



❑ Objectifs

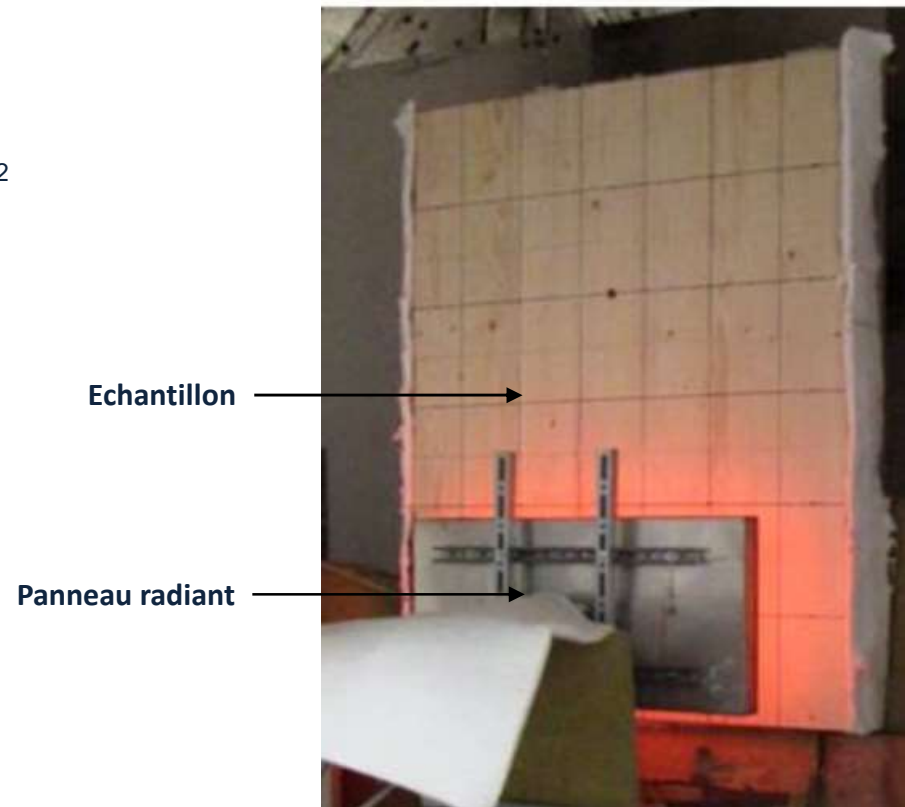
- Evaluer si les phénomènes précédents sont présents à ces échelles
 - ✓ Coupler les deux types de propagation de flamme

❑ Procédure

- Echantillon : $1,4 \times 1,8 \times 0,018 \text{ m}^3$ (L x h x e)
- Source de chaleur : panneau radiant $1,0 \times 0,5 \text{ m}^2$
- Flux reçu directement face au panneau : 50 kW.m^{-2}

❑ Mesures

- Hauteur de flamme
- Températures dans le solide
- Perte de masse de l'échantillon
- Flux de chaleur incident à la paroi
- Taux de dégagement de chaleur



☐ Trois temps caractéristiques

Temps 1 : inflammation et propagation rapide de flamme



100 s d'exposition

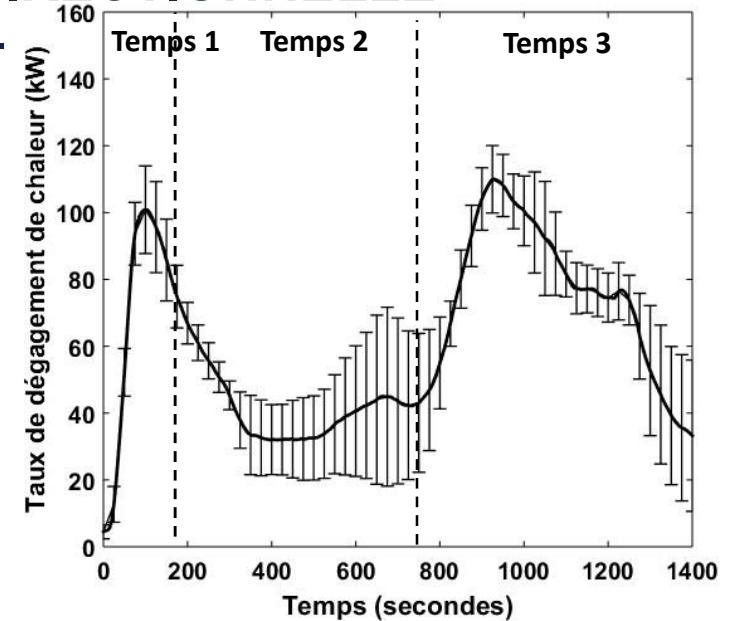
- ✓ Propagation verticale rapide : forte influence de la contribution énergétique de la flamme
- ✓ Faible décomposition thermique en partie haute (partie uniquement impactée par la contribution de la flamme)

Temps 2 : influence de l'épaisseur de char



500 s d'exposition

- ✓ Faible échauffement du sol
Formation de char
- ✓ Diffusion de l'oxygène dans matrice de char^[1]
- ✓ Production de CO (oxydatic char)

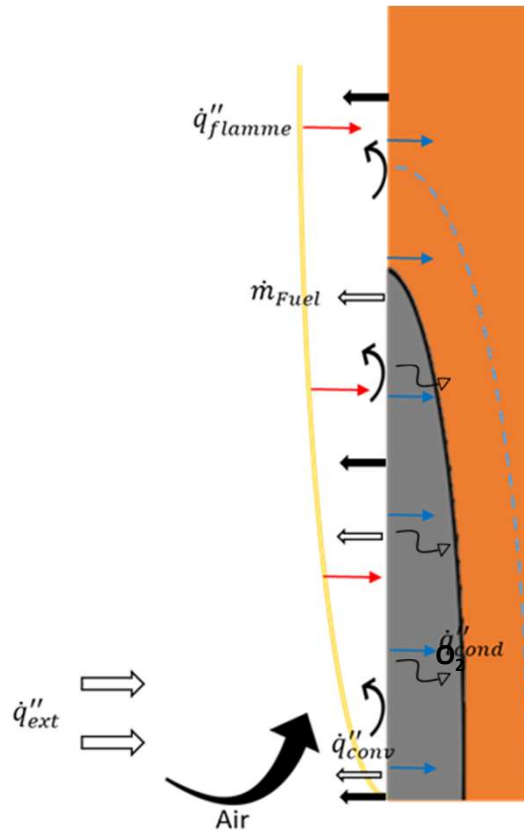


- Temps 3 : influence de la condition en face arrière de l'échantillon



900 s d'exposition

- ✓ Retour thermique en partie basse, survenant lorsque l'eau est totalement évaporée (environ 700 s)
- ✓ Flamme de plus forte intensité, couvrant la totalité du matériau



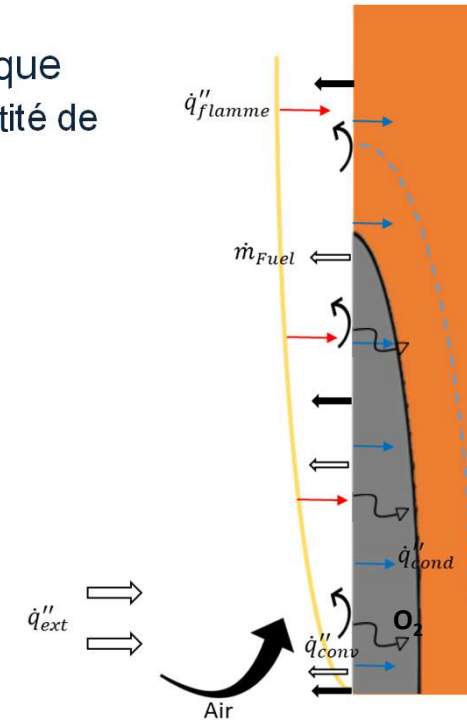
Observations expérimentales	
Phase gaz	Phase solide
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Modèle de combustion : <ul style="list-style-type: none"> • Caractériser la quantité de mouvement • Caractériser le transport d'espèce 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Bien caractériser le bilan à la paroi : <ul style="list-style-type: none"> • Convection • Conduction • Rayonnement
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Modèle de rayonnement 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Equation de transfert thermique 1D
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Critère de front de flamme assimilé à un critère en phase solide 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Diffusion de l'oxygène
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Effets secondaires dominant pour des flux incidents inférieurs à 20 kW.m^{-2} 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Modèle de pyrolyse avec : <ul style="list-style-type: none"> • Prise en compte des réactions d'oxydation • Prise en compte de l'évaporation de l'eau
	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Effets secondaires dominant pour des flux incidents inférieurs à 20 kW.m^{-2}

- ❑ Nécessité de représenter correctement chaque phénomène physique pour prédire le comportement global (Rayonnement, convection, quantité de mouvement, combustion, pyrolyse, etc.)
 - Amélioration des sous modèles

- ❑ Nécessité de déterminer les données d'entrée



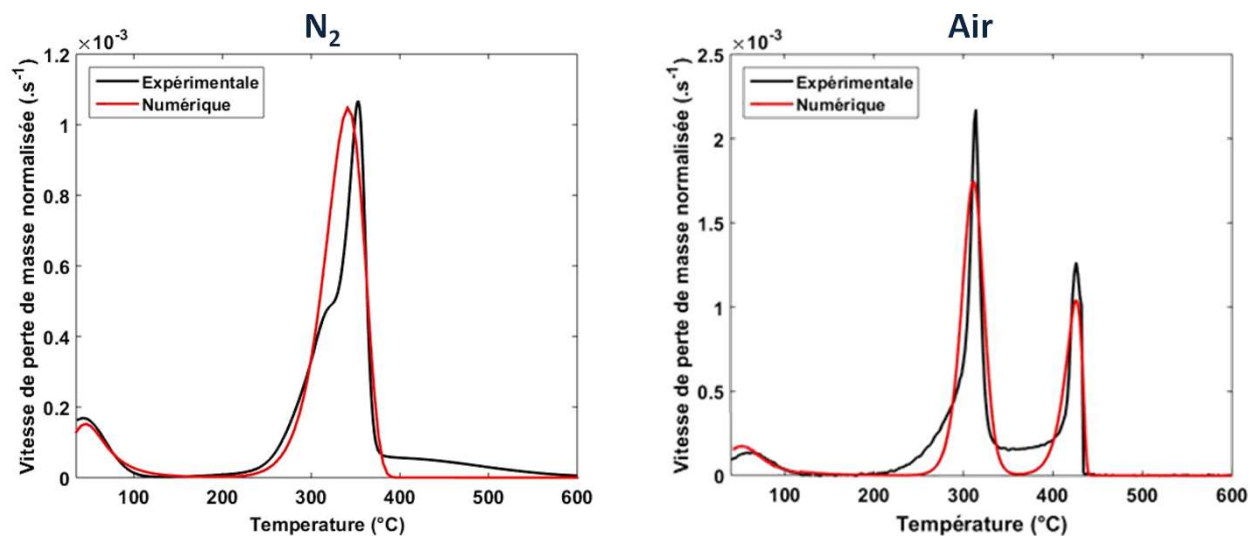
Validation des modèles et des données d'entrée à échelle croissante



Type	Propriétés cinétiques	Propriétés thermiques	Propriétés de combustion
Notation	A, E, ν , n, m	λ , ρ , Cp, ϵ , ΔH	Fuel, ΔH_c , χ_r , ν_{air} , ν_{fuel} , ν_{CO_2} , ν_{CO} , ν_{Soot} et ν_{N_2}
Détermination	ATG	Disque chaud, DSC, mesure, littérature	Cône calorimètre, littérature, FDS (valeurs par défaut)

□ Analyse thermogravimétrique

- Modèle de décomposition thermique



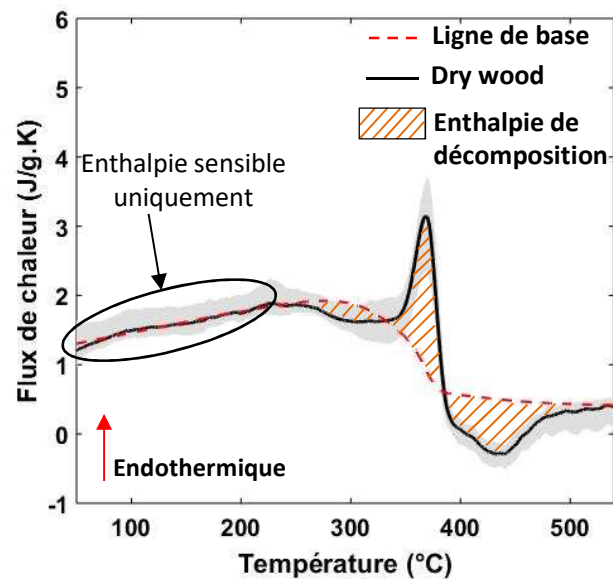
Essais ATG à 5°C.min⁻¹, sous air et sous azote

- Paramètres cinétiques – Optimisation inverse (Particle Swarm Optimisation)

Réaction	Type de réaction	Réactifs	Produits	A (s ⁻¹)	E (kJ.kmol ⁻¹)	n	n _{O₂}	v
1	Evaporation	wet wood	$\xrightarrow{\omega_1} v_1 \text{dry wood} + (1 - v_1) \text{water vapor}$	$4,06 \cdot 10^8$	$6,65 \cdot 10^4$	2,80	0	0,90
2	Pyrolyse	dry wood	$\xrightarrow{\omega_2} v_2 \text{char} + (1 - v_2) \text{pyrolysate}$	$1,59 \cdot 10^9$	$1,37 \cdot 10^5$	0,95	0	0,18
3	Oxydation	dry wood + O ₂	$\xrightarrow{\omega_3} v_3 \text{char} + (1 - v_3) \text{pyrolysate}$	$3,30 \cdot 10^{25}$	$3,00 \cdot 10^5$	1,20	1	0,30
4	Oxydation	char + O ₂	$\xrightarrow{\omega_4} v_4 \text{ash} + (1 - v_4) \text{carbon monoxide}$	$1,86 \cdot 10^{27}$	$3,90 \cdot 10^5$	0,50	1	0,00

☐ Analyse calorimétrique différentielle

- Caractérisation de la capacité thermique et des enthalpies de réaction



- $\Delta H_{vaporisation} = + 2\,410 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (2 257 $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ dans la littérature (7% d'écart))
- Flux de chaleur du bois = Enthalpie sensible + Enthalpie de réaction
 - Définition d'une ligne de base calculée à l'aide de l'avancement de la réaction α

$$\alpha = \frac{m(0) - m(T)}{m(0) - m(\text{end})}$$
 et ligne de base = $(1 - \alpha)Cp_{Dry} - \alpha Cp_{Char}$
- $Cp_{Dry} = 1,16 + 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot T \text{ (J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}\text{)}$ et $Cp_{Char} = 0,47 + 2,10 \cdot 10^{-3} \cdot T \text{ (J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}\text{)}$
- $\Delta H_{décomposition} = -61,84 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

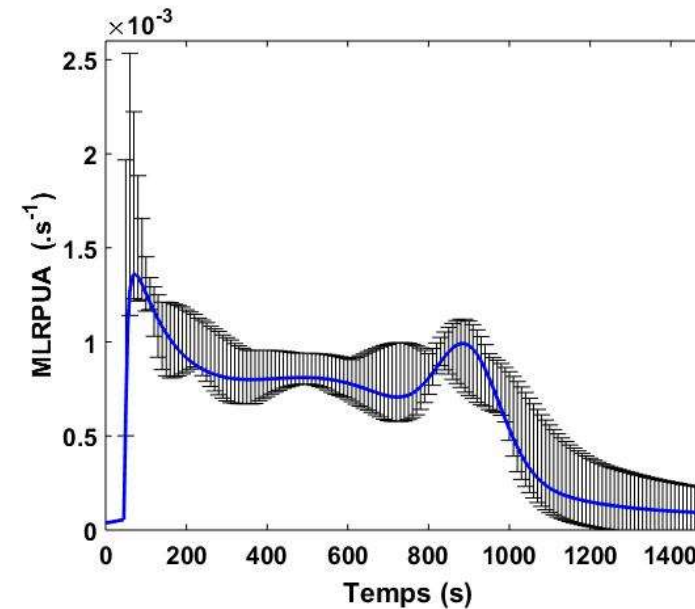
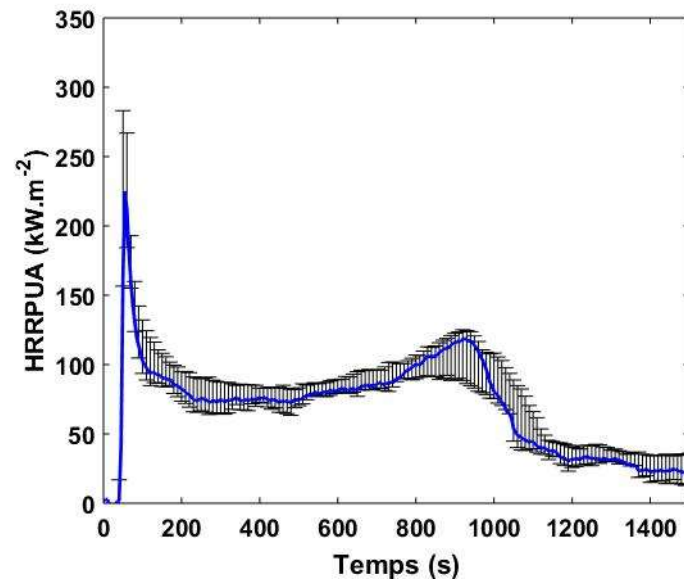
☐ Méthode du disque chaud

- Caractérisation de la conductivité thermique du bois vierge
 - ✓ À 25°C et 100°C
 - $\lambda_{Wood} = 0,126 + 1,45 \cdot 10^{-4} T \text{ (°C)}$

□ Essais au cône calorimètre (ISO 5660-1)

▪ Enthalpie de combustion

✓ $\Delta H_c = 14 \text{ MJ.kg}^{-1}$, obtenue au cône calorimètre (HRR/MLR)



□ Littérature [1-2]

▪ Equation de combustion

✓ $C_{3,4}H_{6,2}O_{2,5} + 13,61air \rightarrow 3,32CO_2 + 3,10H_2O + 0,012CO + 0,08Soot + 13,61N_2$

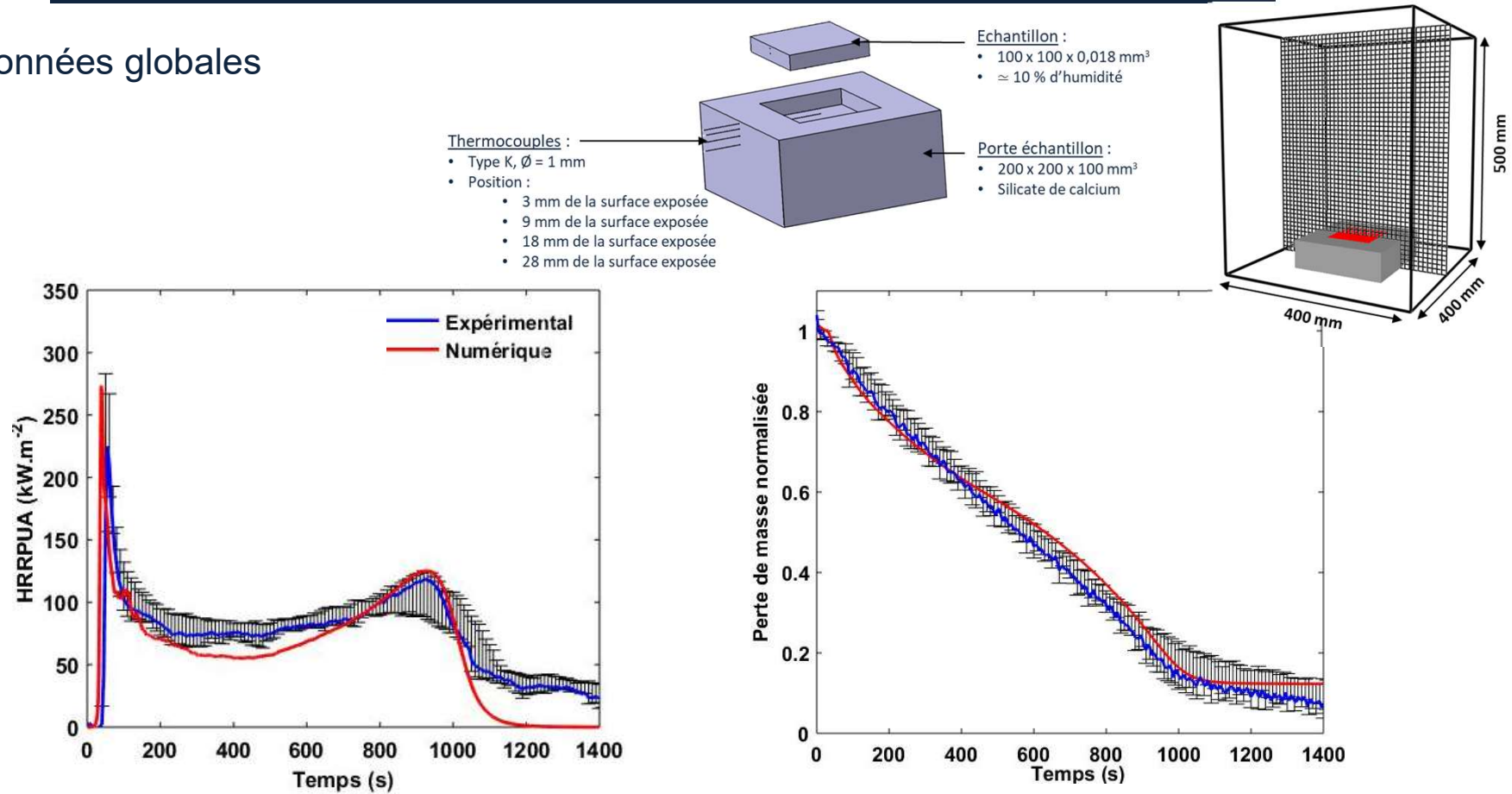
▪ Fraction radiative

✓ $\chi_r = 0,35$

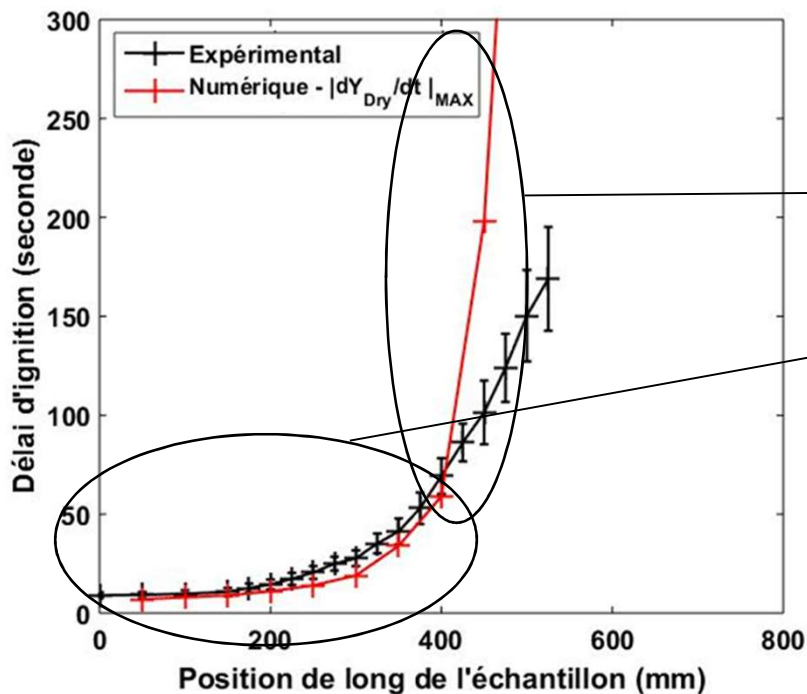
[1] Hostikka, et McGrattan. Large eddy simulation of wood combustion. NIST, 2001.

[2] Tewarson. Generation of heat and chemical compounds in fire. SFPE Handbook, 2002. RESOFEUX

Données globales

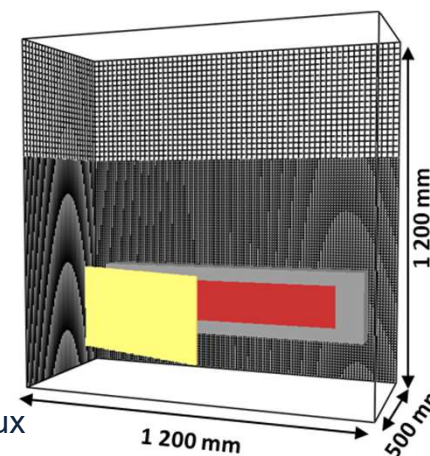


- Dynamique de décomposition thermique correctement captée par le code
- Résidu à l'extinction identique
- Oxydation de char en fin d'essai non représentée (longueur de diffusion de l'oxygène égale à 1 mm)

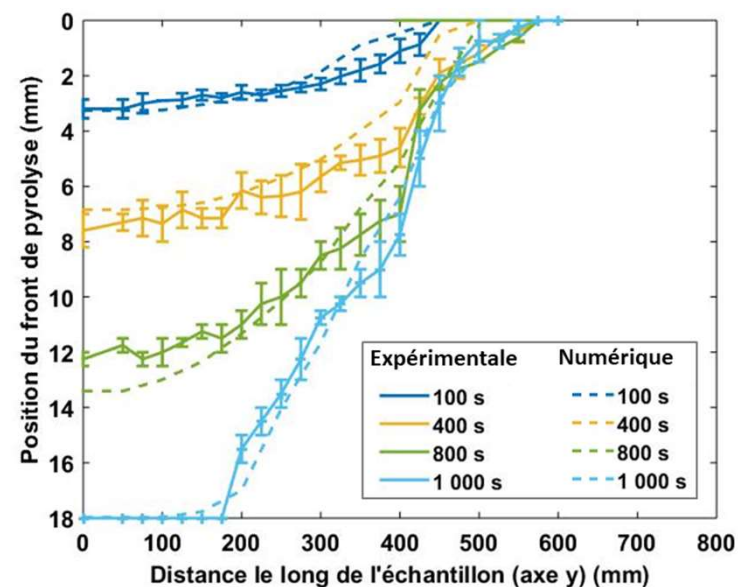


❑ Propagation mal capturée numériquement pour des flux inférieurs à 20 kW.m^{-2}

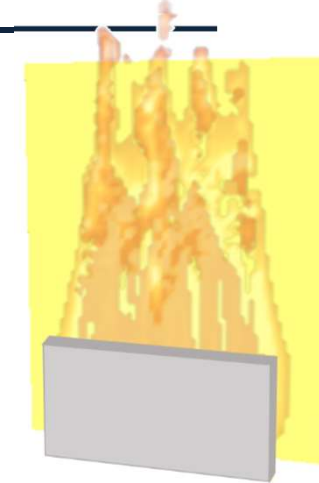
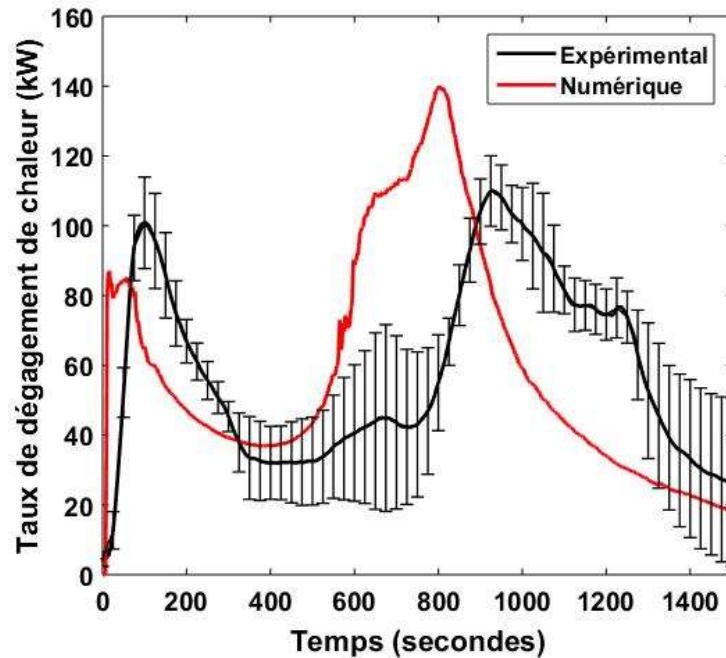
❑ Propagation de flamme correctement prédite pour des flux supérieurs à 20 kW.m^{-2}



❑ Echauffement et décomposition correctement prédits par le modèle



❑ Comparaison Expérimentale - Numérique



- ❑ Dégagement de chaleur à l'instant du retour thermique mal prédit (environ 200 s plus tôt)
- ❑ THR en fin d'essai correctement prédit → Masse combustible émise correctement captée par le code

