



27<sup>e</sup> rencontres du GDR Feux  
13 Février 2020



# Test d'un mécanisme cinétique pour la dégradation de plaques de bois thermiquement fines à l'échelle matériau avec deux conditions limites

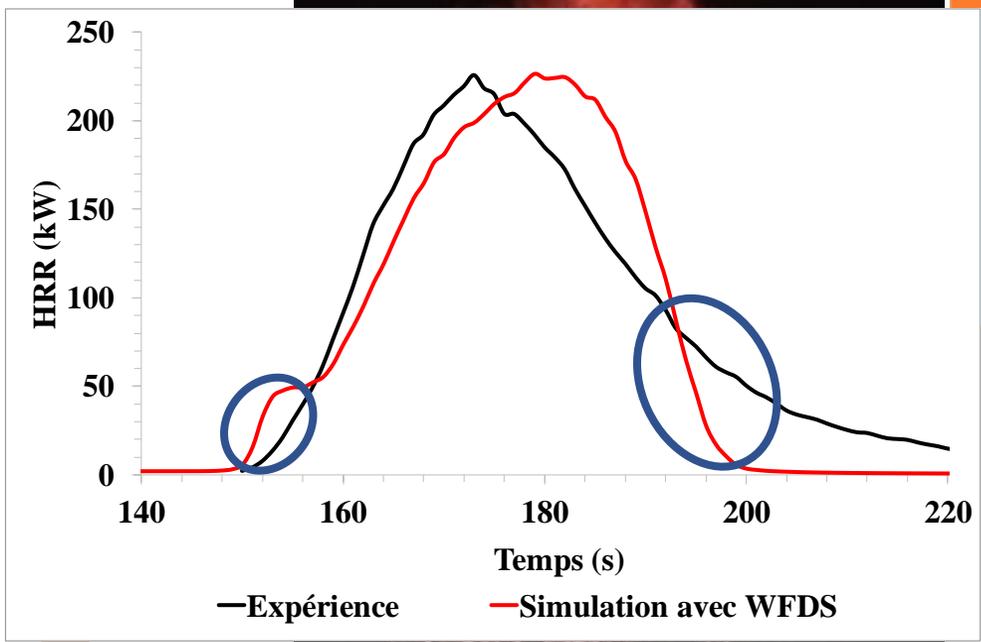
Guillaume GERANDI, Virginie TIHAY-FELICELLI, Paul-Antoine SANTONI  
Laboratoire UMR SPE 6134 CNRS





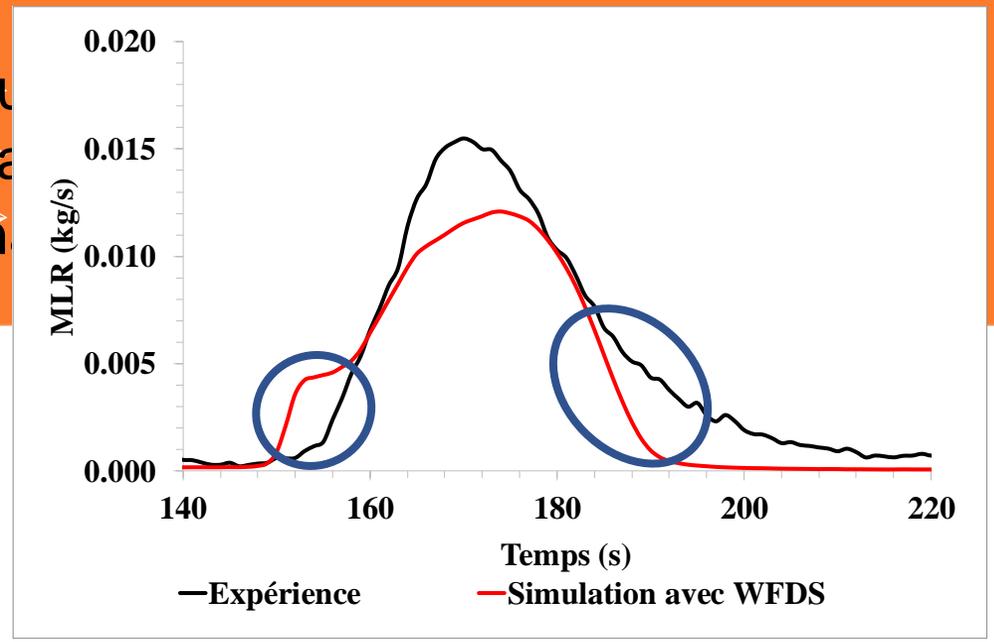
# Contexte de l'étude

Définition des travaux de thèse grâce à de précédentes études réalisées au laboratoire (Morandini et coll., 2019, Fire Safety Journal) :



Mauvaise dynamique

- 
- 



- l'oxydation des résidus carbonneux



**Etude des mécanismes de dégradation**

## Contexte de l'étude

### Objectif de l'étude :

Développer des mécanismes réactionnels qui :

- Représentent efficacement la dégradation thermique du bois ou des végétaux
- Restent assez simples pour une implantation dans les modèles détaillés d'incendie (WFDS, Firestar)

Importance d'évaluer le terme source de masse (MLR) car :

- Il entretient la flamme durant un incendie
- Il contribue à la propagation des feux de végétation

- Détermination des paramètres cinétiques à l'échelle matière (masses de l'ordre du mg)



Conditions non représentatives d'un feu de végétation



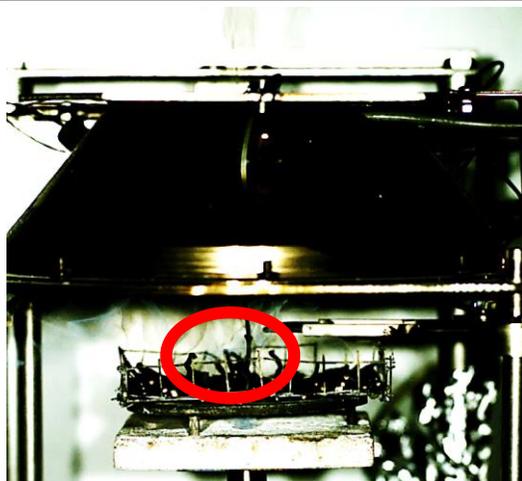
**Utilisation d'une approche multi-échelle pour traiter la problématique du changement d'échelle**

# Contexte de l'étude

Quel type de combustible faut-il étudier ?

## Brindilles et feuilles de végétation :

- Surface d'échange irrégulière
- Superposition des brindilles et feuilles
- Déformation pendant la dégradation thermique



## Plaques de bois thermiquement fines :

- Surface apparente plane et constante
- Epaisseur caractéristique des feuilles et brindilles



(Tihay-Felicelli et coll., 2016, *Fire Technology*)



Choix pour la thèse : **Plaques de bois thermiquement fines**

# Sommaire

---

1. Développement du mécanisme réactionnel à l'échelle matière
2. Etude expérimentale de la dégradation de plaques thermiquement fines à l'échelle matériau
3. Tests d'un mécanisme réactionnel à l'échelle matériau
4. Conclusion et perspectives

# Protocole expérimental à l'échelle matière



- 5 vitesses de chauffe : 2, 5, 10, 20 et 30°C/min
- Rampes de température :
  - 150°C à 650°C pour le chêne
  - 150°C à 750°C pour l'eucalyptus
- 2 atmosphères d'étude : inerte et oxydante
- Bonne maîtrise des conditions expérimentales



Analyseur  
thermogravimétrique

Echelle matière :

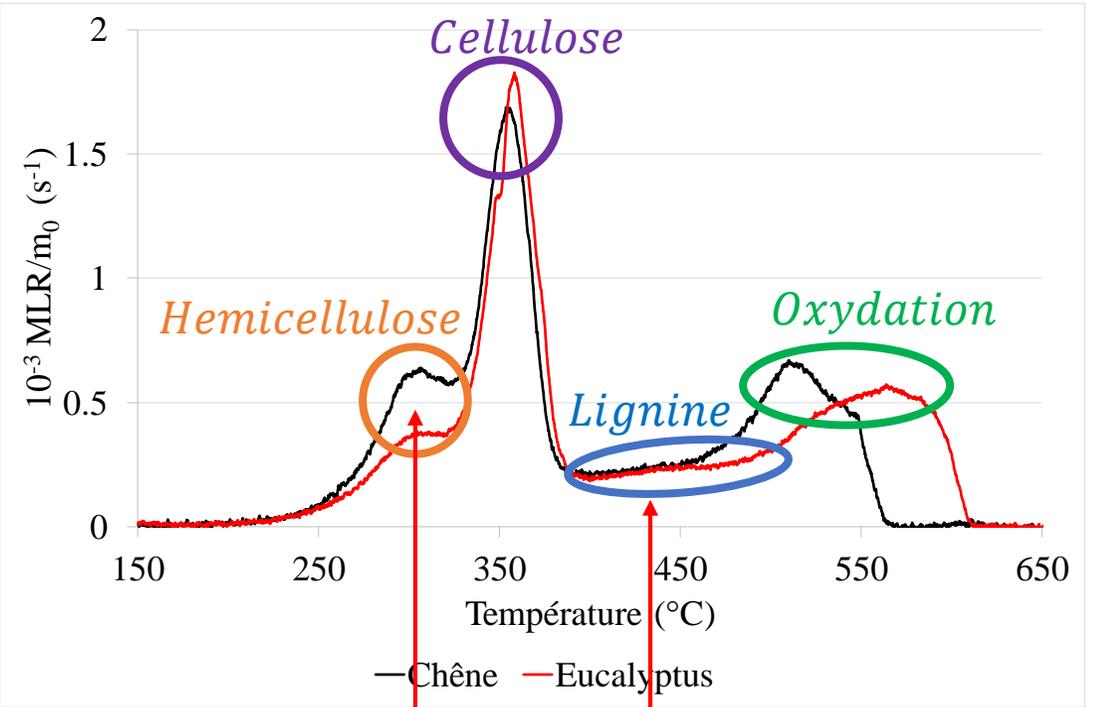
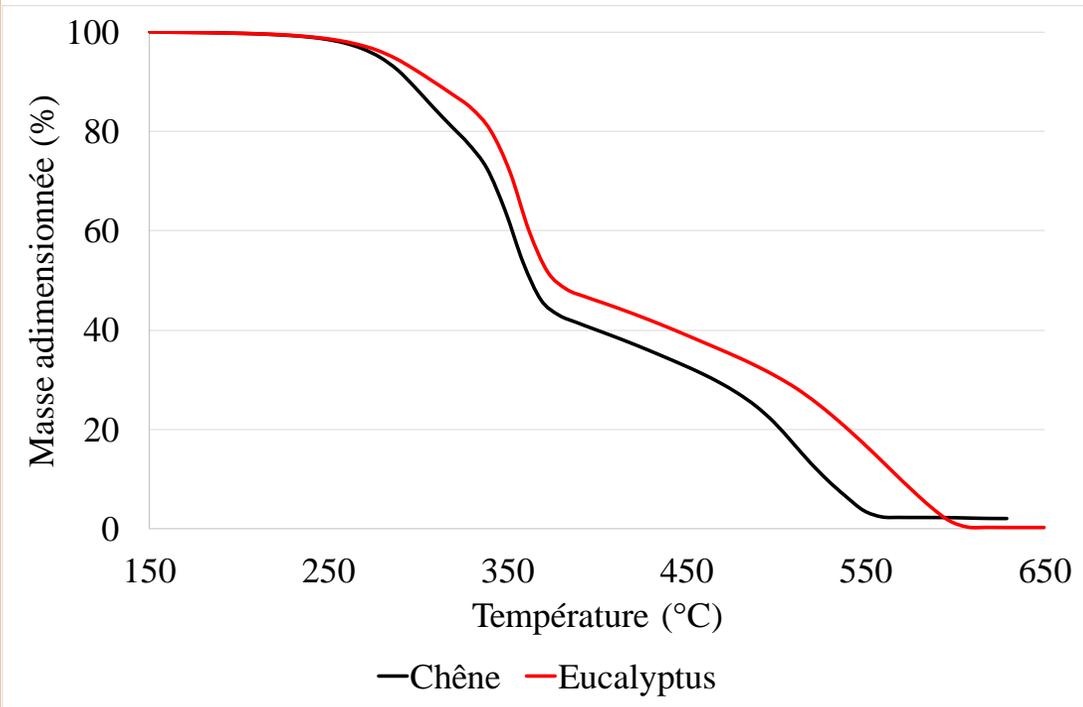
Diamètre : 4 mm

Masse sèche chêne : 4,4 mg ( $\pm$  0,6 mg)

Masse sèche eucalyptus : 6,5 mg ( $\pm$  0,5 mg)



# Résultats expérimentaux à 10°C/min sous atmosphère oxydante



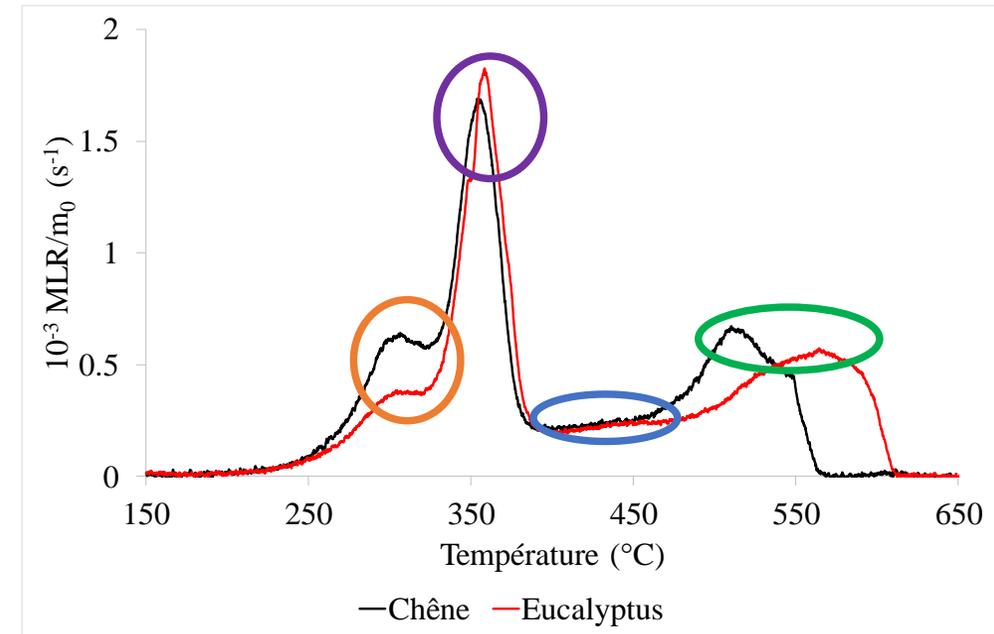
- Même tendance de dégradation pour chaque espèce de bois
- 2 différences majeures sur le MLR :
  - 1<sup>ère</sup> réaction : Moins d'hémicellulose pour l'eucalyptus
  - 3<sup>ème</sup> réaction : Moins de lignine pour le chêne

	Chêne	Eucalyptus
Hémicellulose (%)	28,22	19,47
Cellulose (%)	33,38	41,44
Lignine (%)	26,60	34,95

**Choix de 4 étapes pour modéliser la dégradation thermique sous air**

# Les différents mécanismes réactionnels développés

- $BS = \text{Bois Sec}$
- $BS \xrightarrow{1} \nu_1 BS1 + (1 - \nu_1) \text{Gaz}$
- $BS1 \xrightarrow{2} \nu_2 BS2 + (1 - \nu_2) \text{Gaz}$
- $BS2 \xrightarrow{3} \nu_3 \text{Charbon} + (1 - \nu_3) \text{Gaz}$
- $\text{Charbon} \xrightarrow{4} \nu_4 \text{Cendres} + (1 - \nu_4) \text{Gaz}$



Loi d'Arrhenius :

$$\bullet \frac{d\alpha_1}{dt} = (1 - \alpha_1)^{n_1} A_1 \exp\left(-\frac{E_{a1}}{RT}\right)$$

$$\bullet \frac{d\alpha_i}{dt} = (\alpha_{i-1} - \alpha_i)^{n_i} A_i \exp\left(-\frac{E_{ai}}{RT}\right) \quad \text{pour } 2 \leq i \leq 4$$

$$\alpha = \frac{m_0 - m}{m_0 - m_{\text{cendres}}}$$

# Optimisation des paramètres cinétiques

Paramètres cinétiques optimisés :

- Energies d'activation  $E_{a,i}$
- Facteurs pré-exponentiels  $\ln(A_i)$
- Ordres de réaction  $n_i$
- Coefficients stœchiométriques  $\nu_i$

Algorithme du gradient descendant

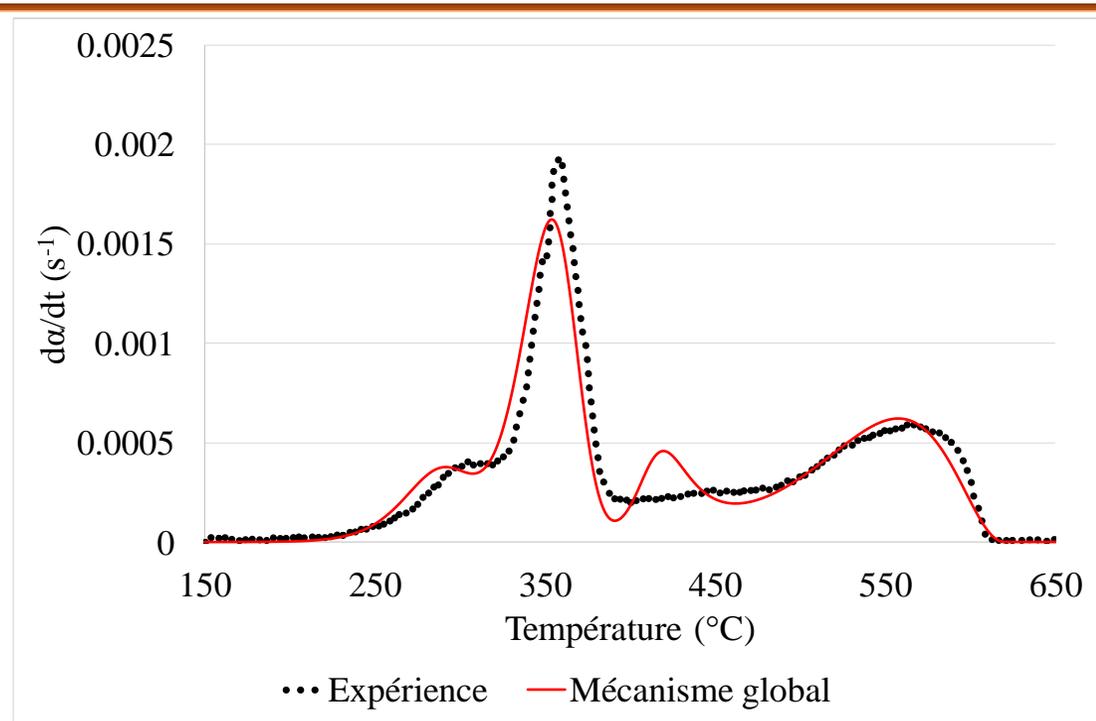
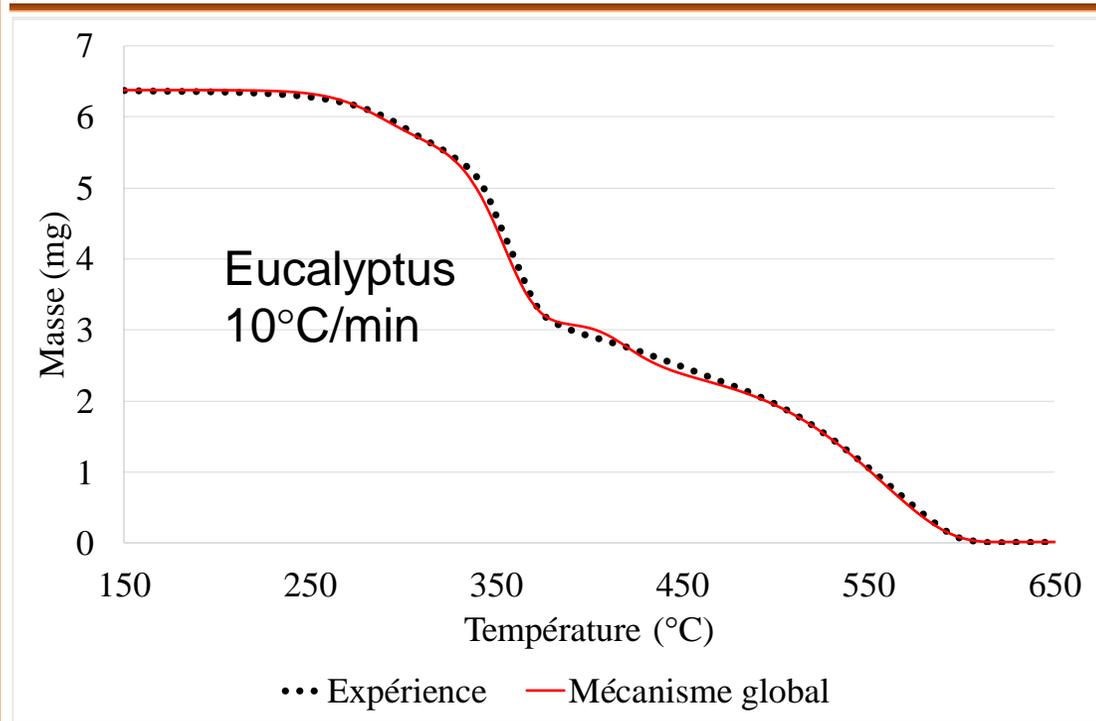


Masse des  
expériences aux  
5 vitesses de chauffe

$$F = \sum_{i=1}^N (\alpha_i^{exp} - \alpha_i^{cal})^2$$



# Optimisation des paramètres cinétiques : Mécanisme global



$n_1 = 1,21$   
 $E_{a1} = 160$  kJ/mol  
 $\ln(A_1) = 30$  s<sup>-1</sup>  
 $v_1 = 0,85$

$n_2 = 1,58$   
 $E_{a2} = 189$  kJ/mol  
 $\ln(A_2) = 32$  s<sup>-1</sup>  
 $v_2 = 0,45$

$n_3 = 1,59$   
 $E_{a3} = 178$  kJ/mol  
 $\ln(A_3) = 24$  s<sup>-1</sup>  
 $v_3 = 0,66$

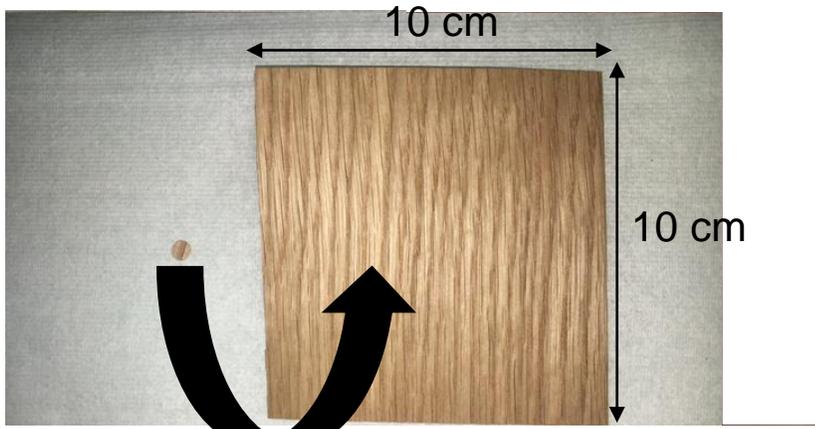
$n_4 = 0,58$   
 $E_{a4} = 118$  kJ/mol  
 $\ln(A_4) = 12$  s<sup>-1</sup>  
 $v_4 = 0,03$

# Sommaire

1. Développement du mécanisme réactionnel à l'échelle matière
2. Etude expérimentale de la dégradation de plaques thermiquement fines à l'échelle matériau
3. Tests d'un mécanisme réactionnel à l'échelle matériau
4. Conclusion et perspectives



Echelle matière  $\longrightarrow$  Echelle matériau



Chêne Eucalyptus

- 2 types de bois :
- Chêne blanc (*Quercus alba*)
  - Eucalyptus commun (*Eucalyptus globulus*)

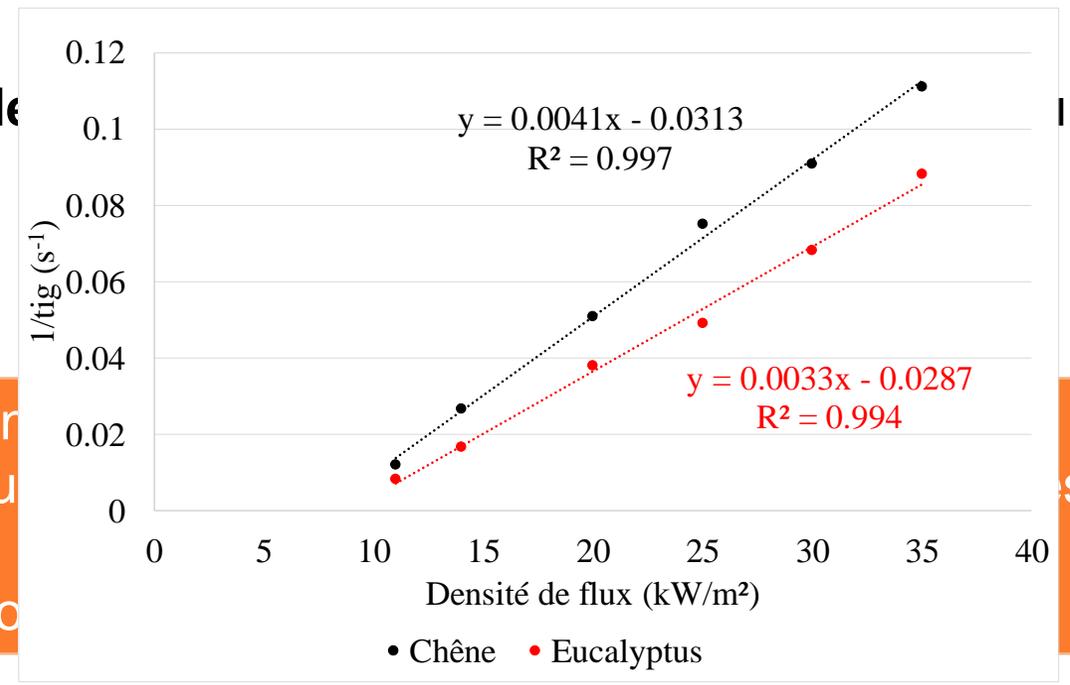
Epaisseur = 0,6 mm  $\longrightarrow$  Plaque thermiquement fine

**Entre les échelles :**  
 Surface caractéristique : 10 cm  
 Masse :  $\times 80$  Masses :  
 Eucalyptus : 3,9 g ( $\pm 0,4$  g)  
 Chêne : 3,2 g ( $\pm 0,4$  g)

Pas de

ir de la

- Eviter la détermination
- Réduire la surface des températures
- Eviter la résolution



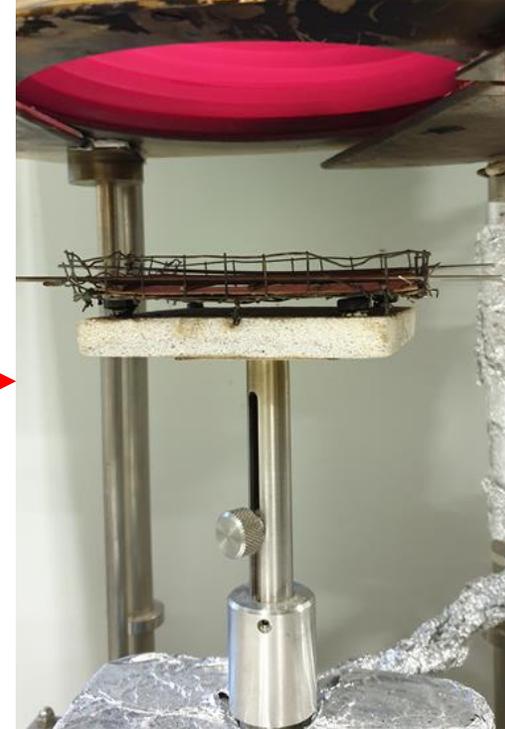
S



# L'échelle matériau



Cône calorimètre



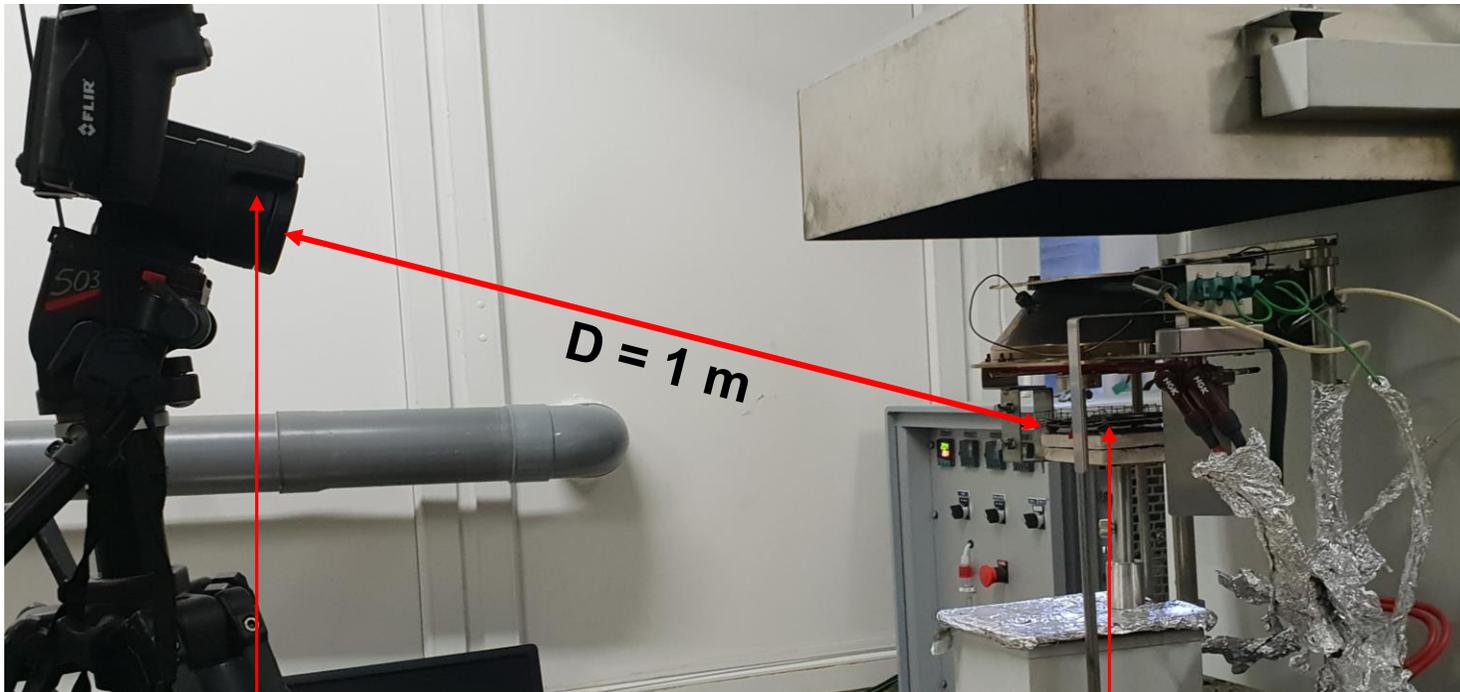
Densités de flux imposées :  
 $18 \leq \overline{\dot{q}}_e'' \text{ (kW/m}^2\text{)} \leq 28,5$



**Eviter l'inflammation de la plaque et la phase de flamme**

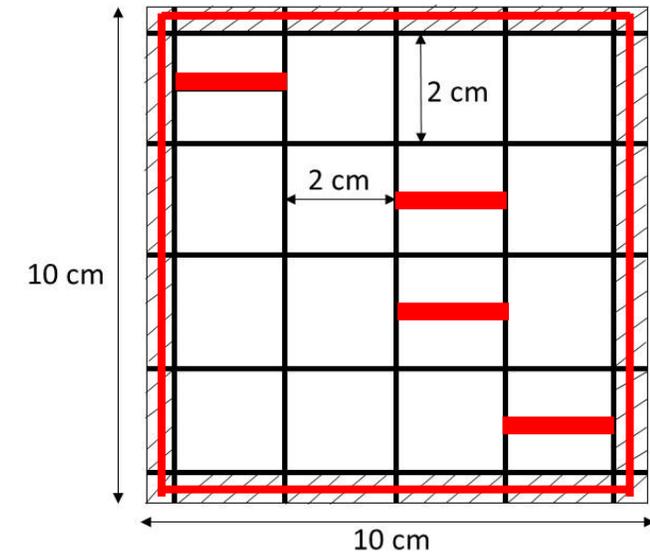
# Relevé de températures par caméra IR

Température relevée par caméra IR sur la face supérieure

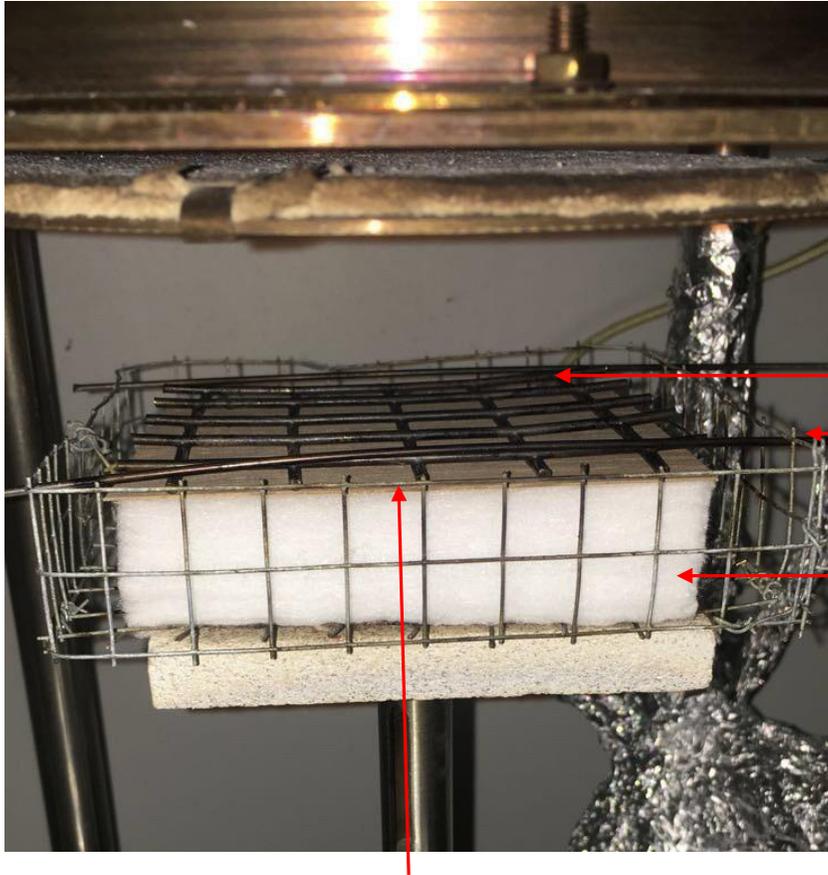


Caméra IR

Echantillon



# Condition aux limites adiabatique sous la face inférieure des plaques de bois



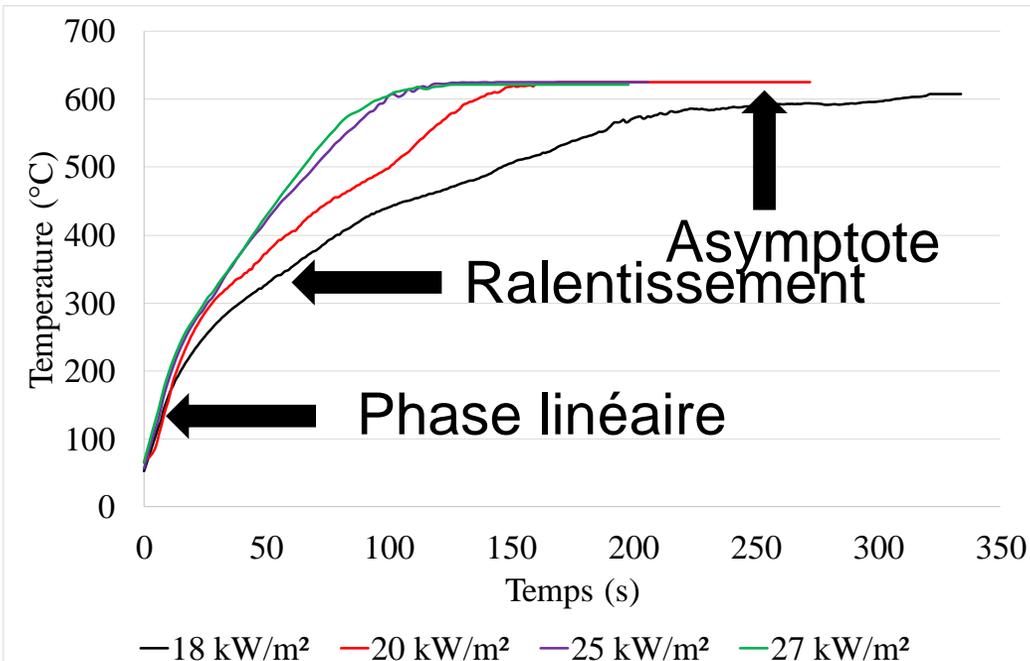
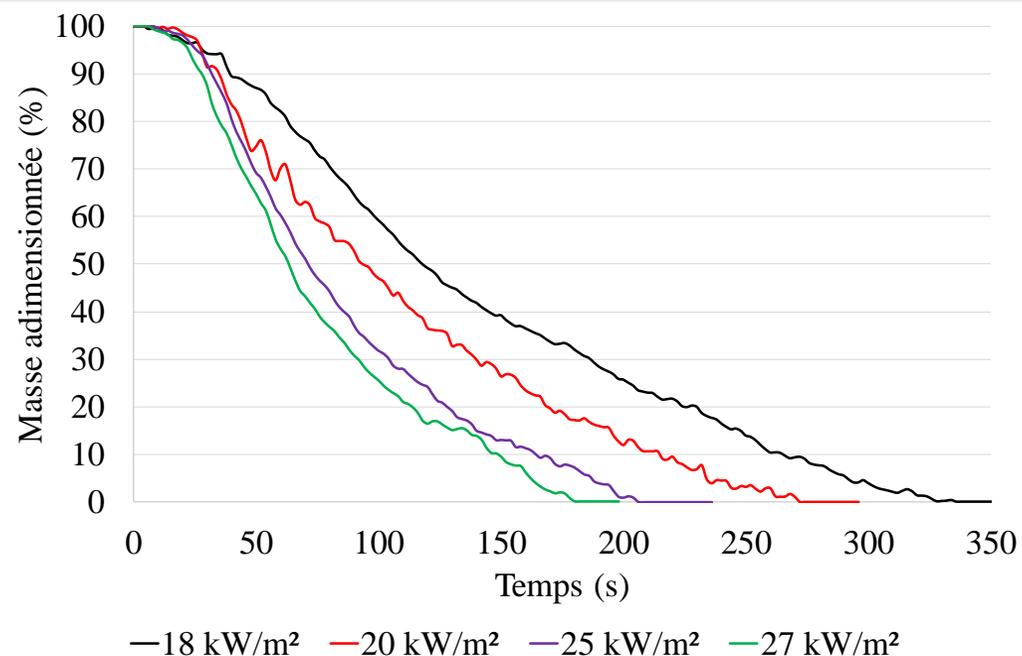
- Bois
- Porte échantillon
- Laine céramique

$$-\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=e} \approx 0$$



# Résultats expérimentaux : Masses et Températures

## Condition limite adiabatique



### Principaux résultats :

- Plus la densité de flux est élevée, plus la perte de masse est rapide
- Température finale aux alentours de 600°C
- Consommation totale des plaques de bois
- Trois phases d'augmentation de la température

# Condition aux limites de convection libre sous la face inférieure des plaques de bois

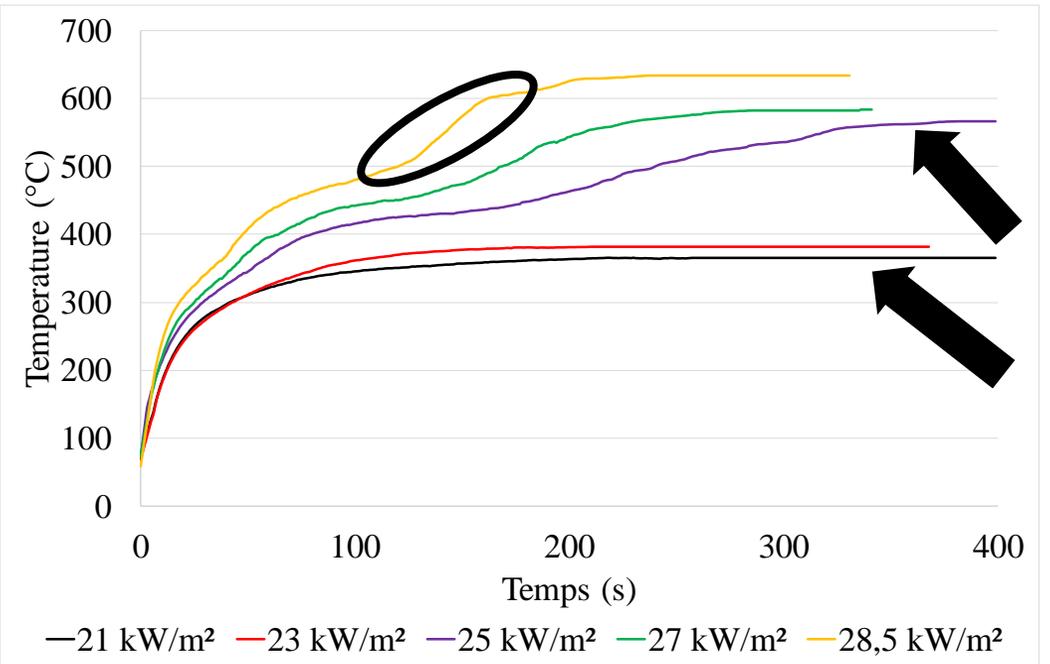
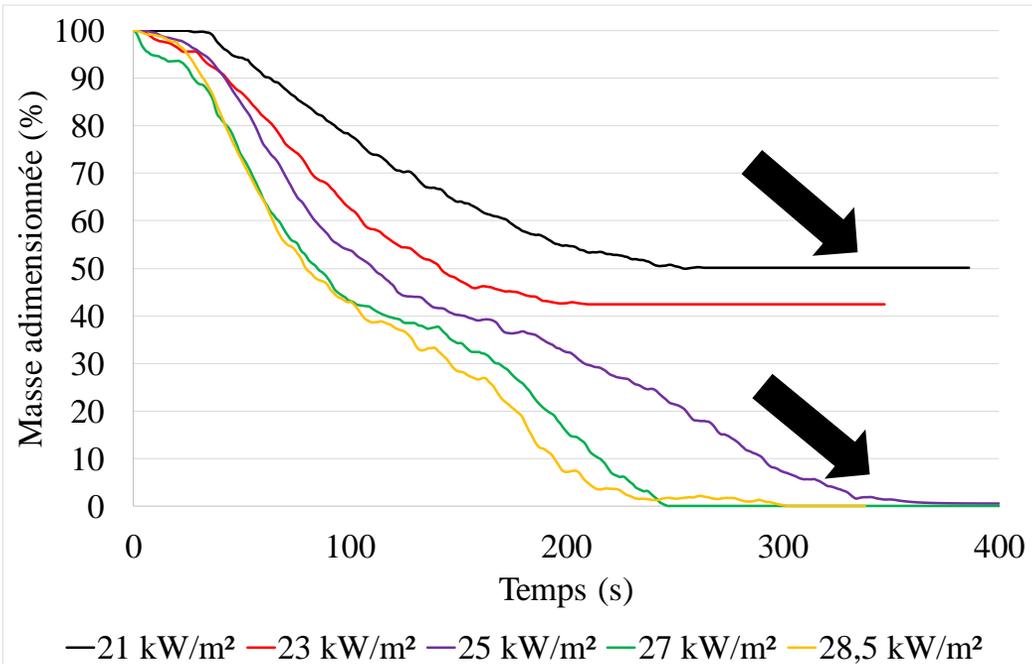


Porte échantillon  
Bois

$$-\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=e} = h_{c,b}(T - T_{\infty})$$

# Résultats expérimentaux : Masses et Températures

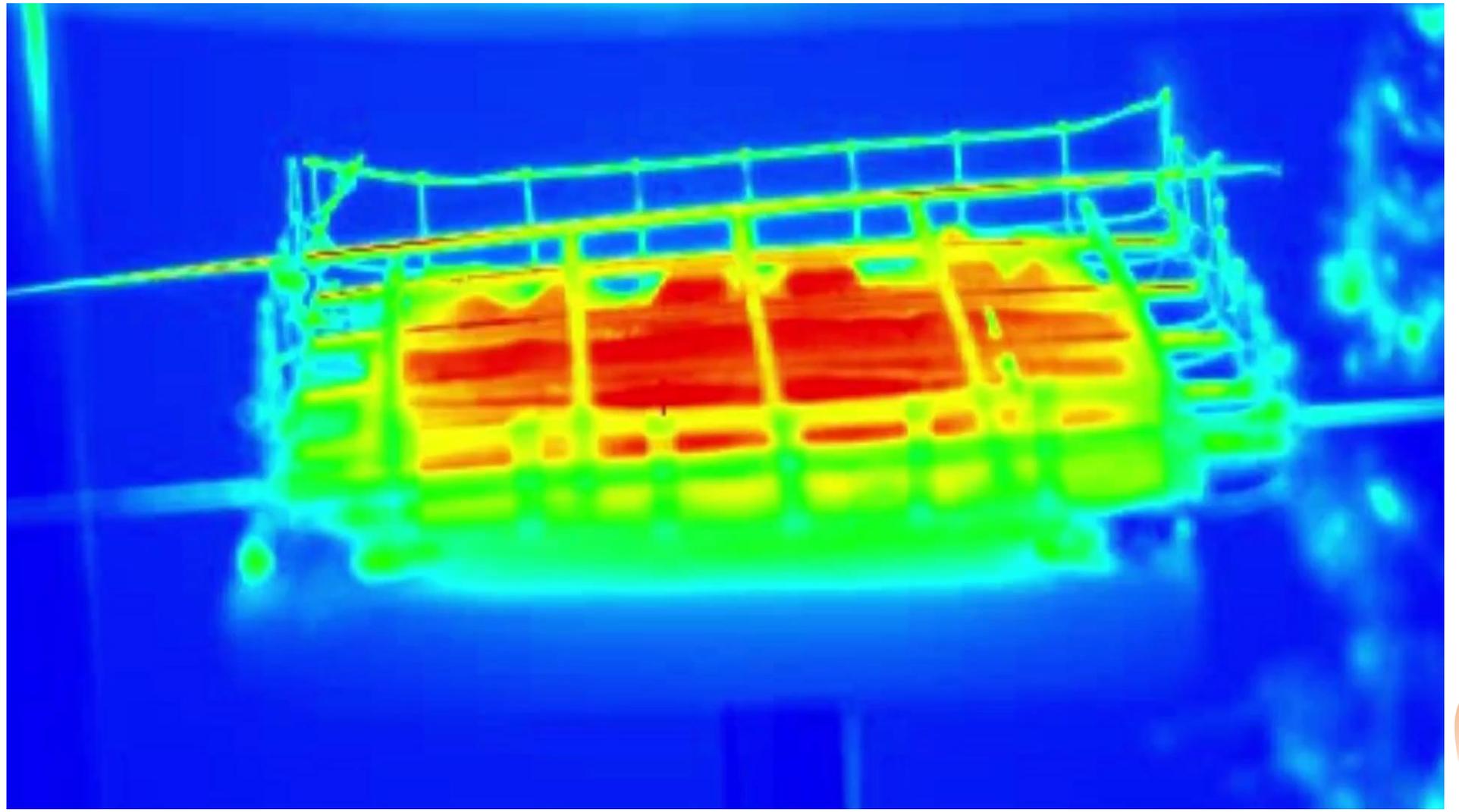
## Condition limite de convection libre



### Principaux résultats :

- Plus la densité de flux est élevée, plus la perte de masse est rapide
- Deux comportements distincts :
  - Dégradation thermique sans oxydation du résidu carbonneux
  - Dégradation thermique avec oxydation du résidu carbonneux

# Propagation surfacique de l'oxydation du résidu carbonneux



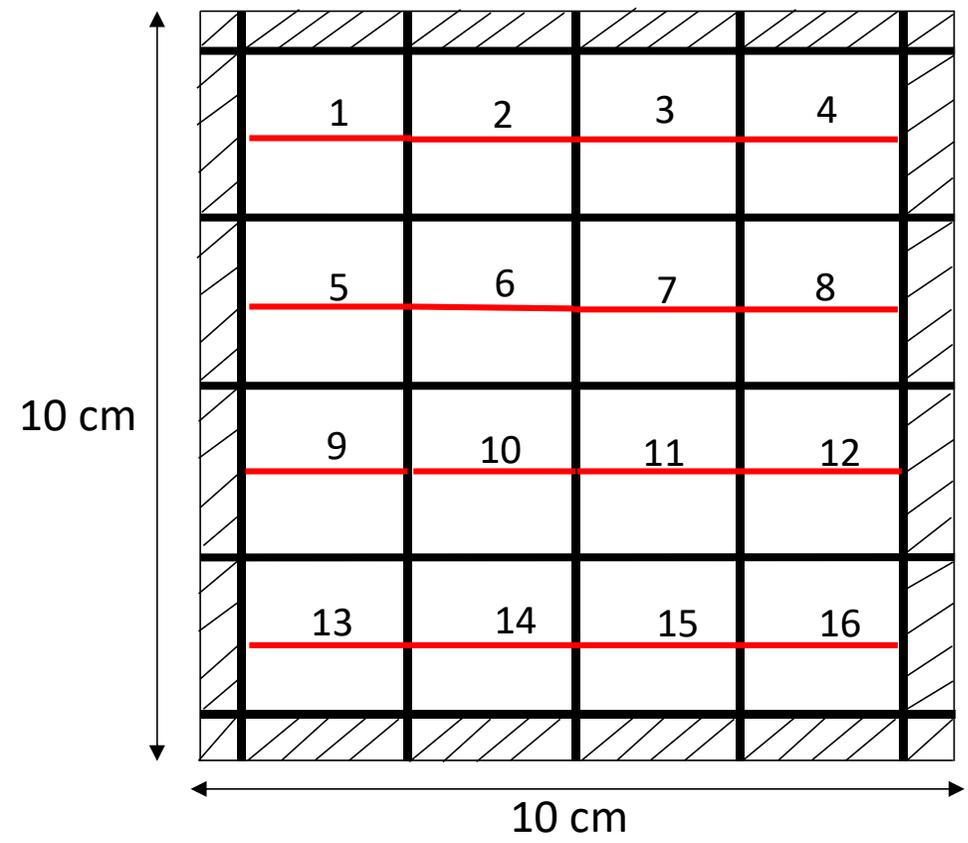
# Sommaire

1. Développement du mécanisme réactionnel à l'échelle matière
2. Etude expérimentale de la dégradation de plaques thermiquement fines à l'échelle matériau
3. Tests d'un mécanisme réactionnel à l'échelle matériau
4. Conclusion et perspectives



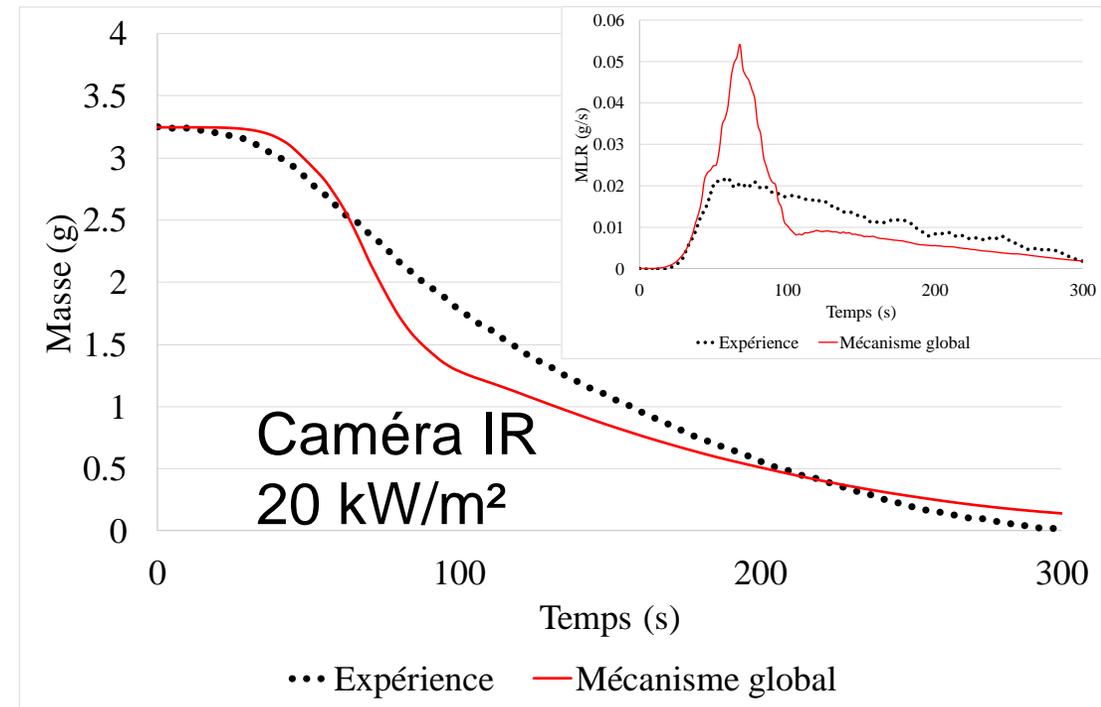
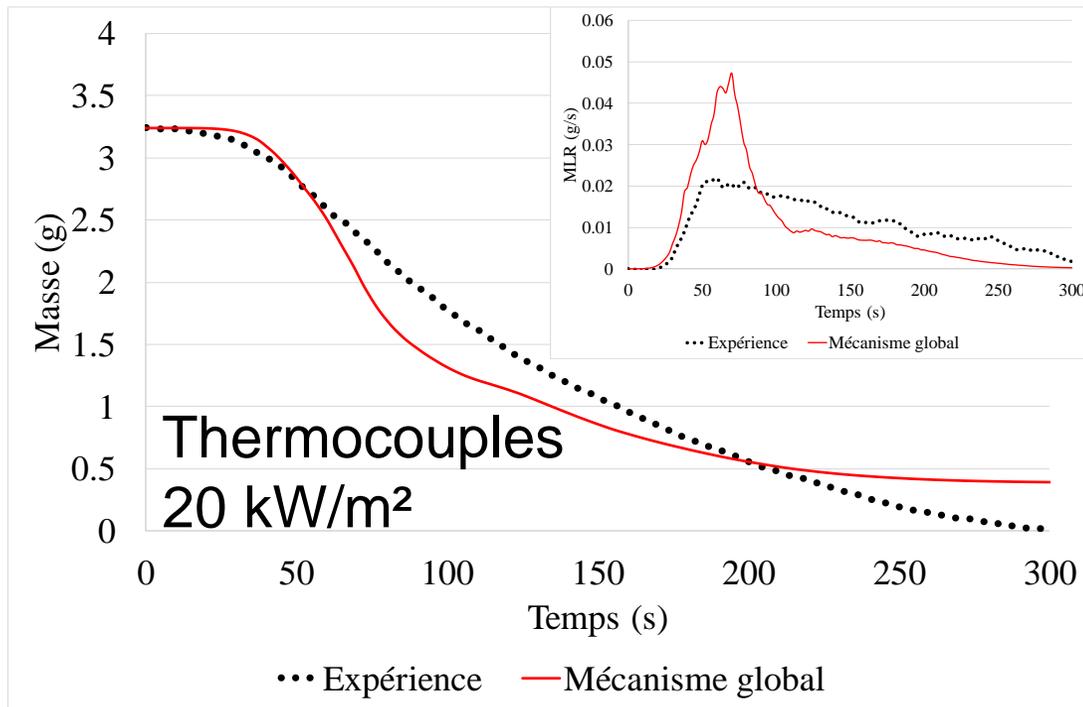
# Simulations numériques à l'échelle matériau

- Avec la température expérimentale :**
- Données obtenues avec la caméra thermique
  - 16 zones de mesure
  - Logiciel MATLAB
  - Test uniquement des paramètres cinétiques
  - Pas de prise en compte des propriétés thermiques du bois
  - Mêmes lois utilisées qu'à l'échelle matière



# Simulations numériques à l'échelle matériau :

## Comparaison entre thermocouples et Caméra IR

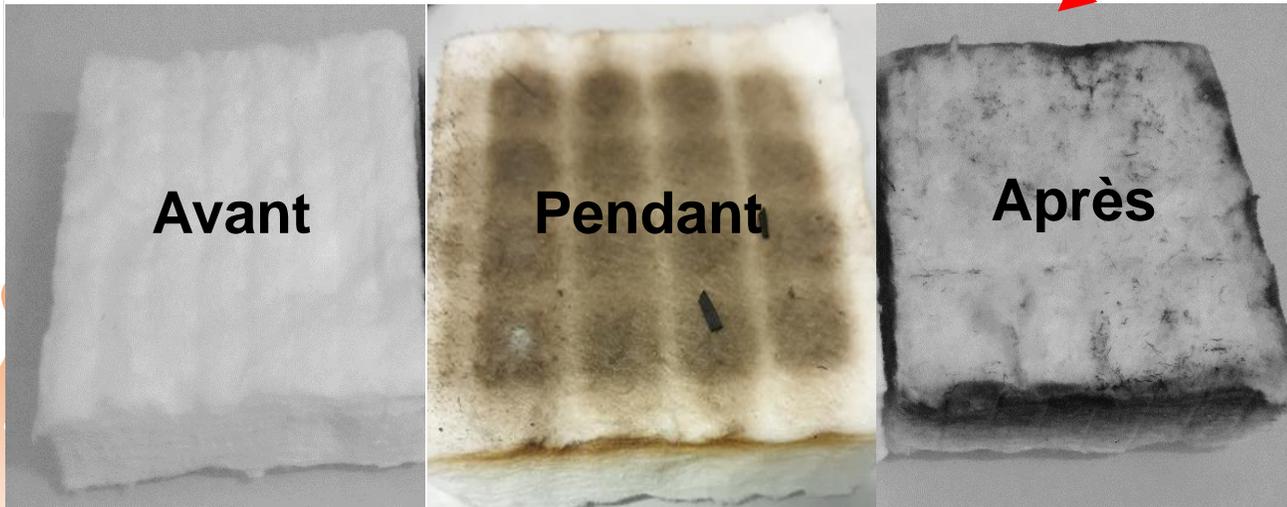
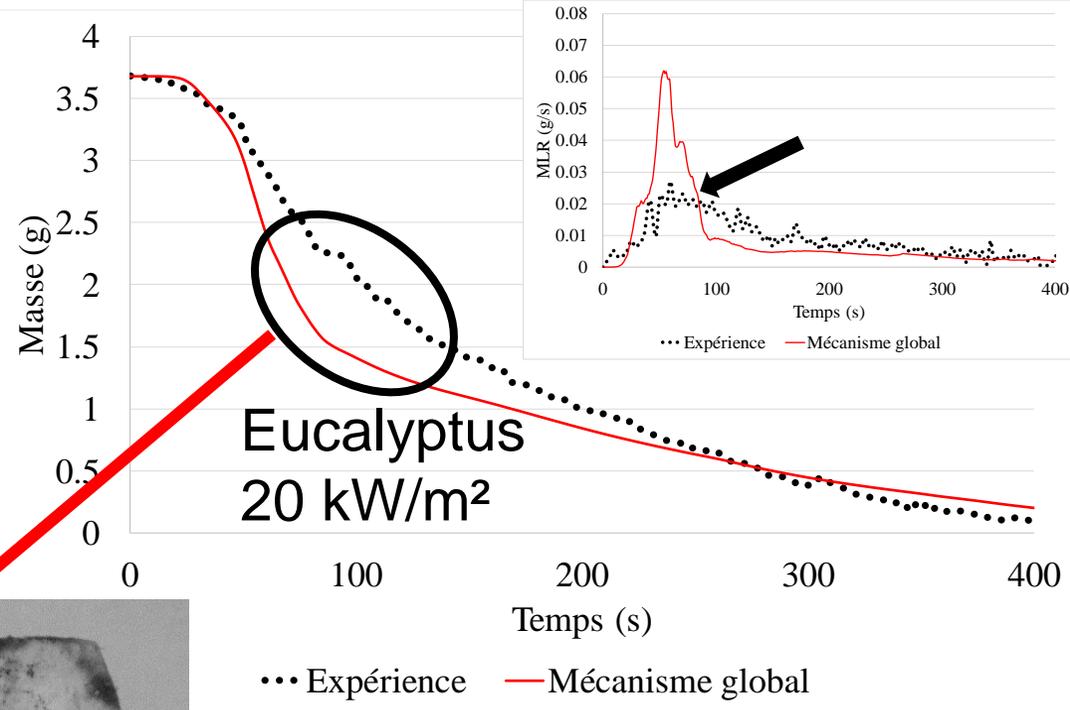
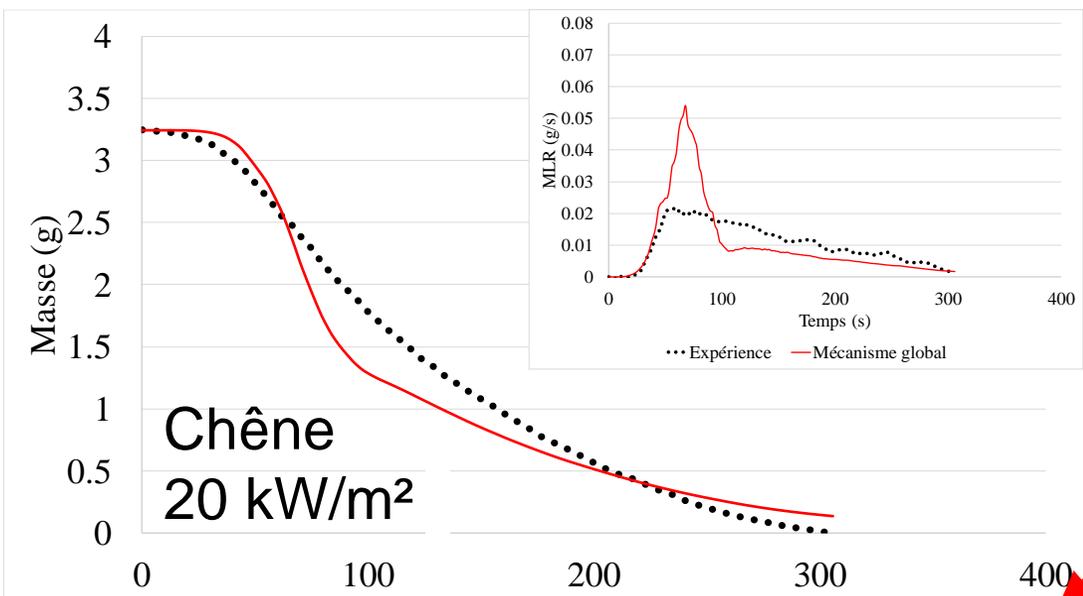


### Principales observations :

- Tendence globale de la dégradation thermique bien représentée
- Bonne représentation de la masse restante par la présence de la caméra IR
- Décalage important masse expérimentale – simulée entre 50 et 150 s



# Tests des mécanismes réactionnels : Condition adiabatique avec température expérimentale

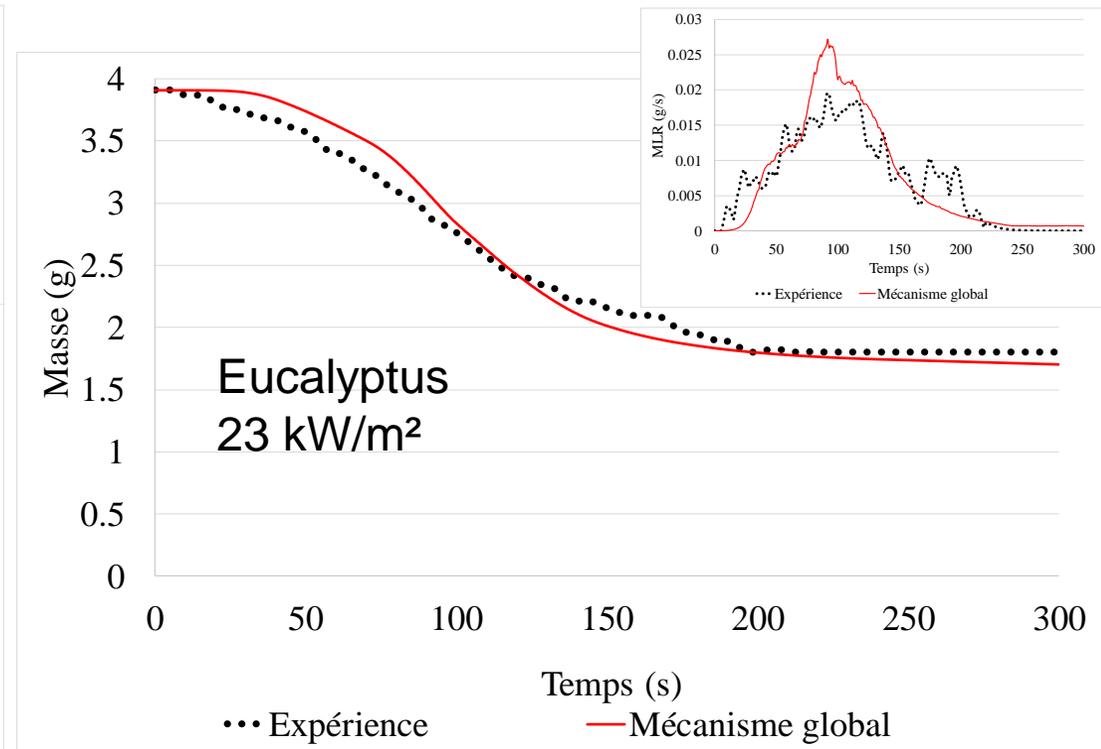
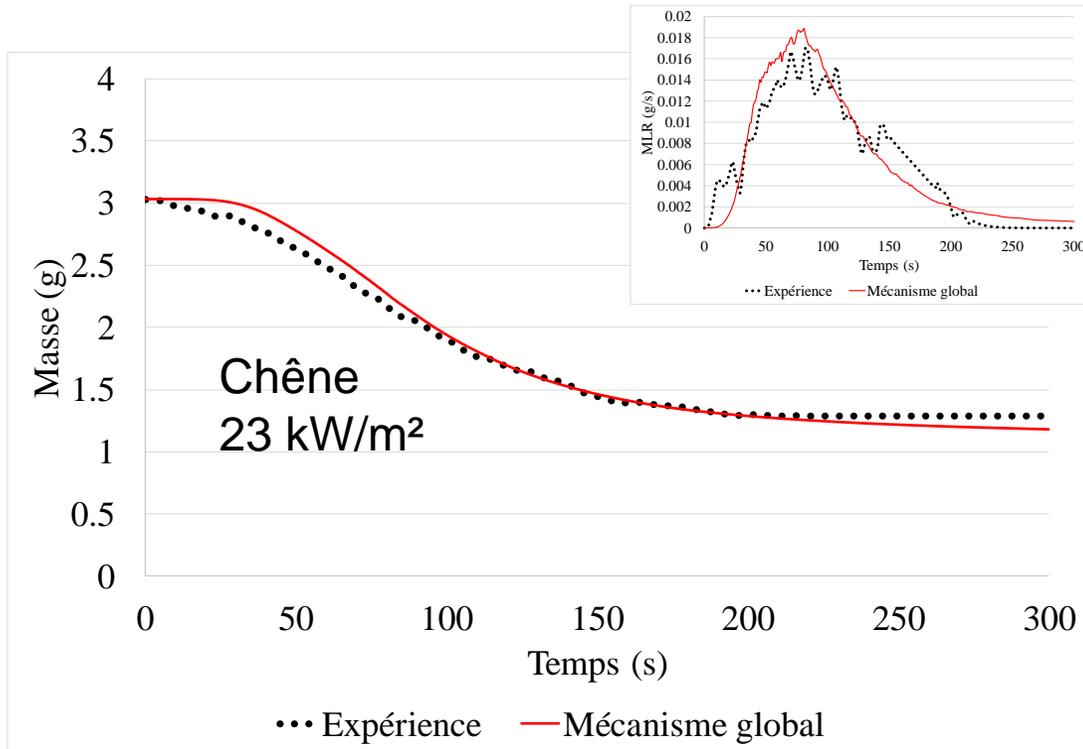


**Goudrons piégés dans la laine**

ions :  
par la présence de la caméra IR  
simulée entre 50 et 150 s

# Test des mécanismes réactionnels : Sans oxydation

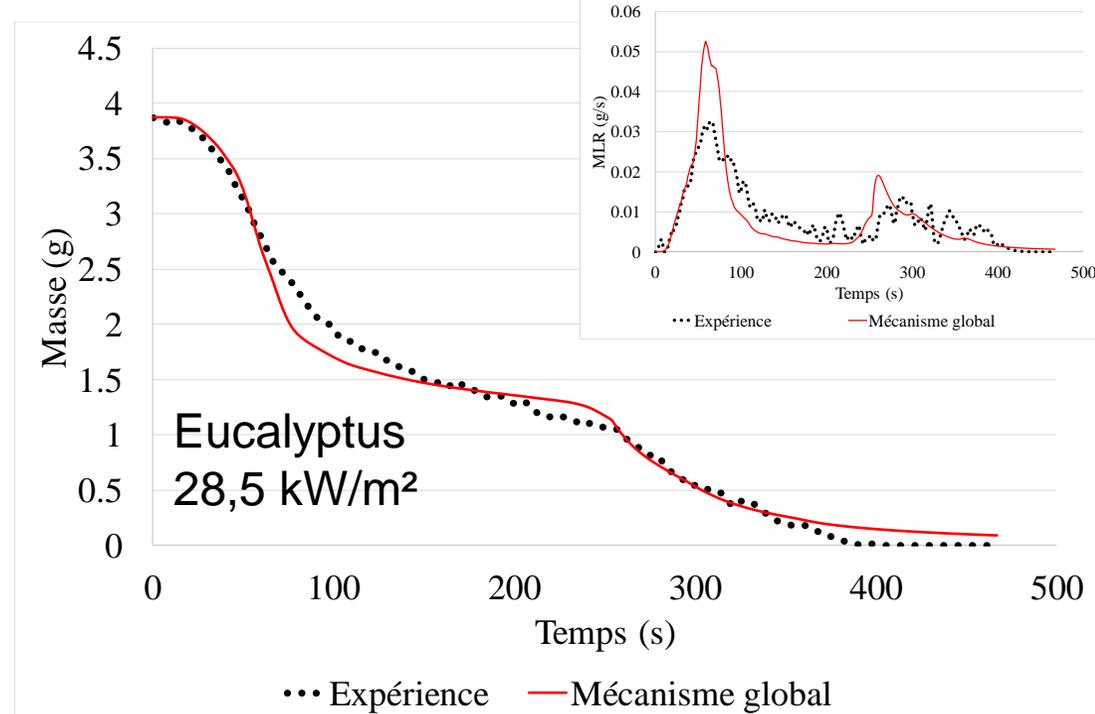
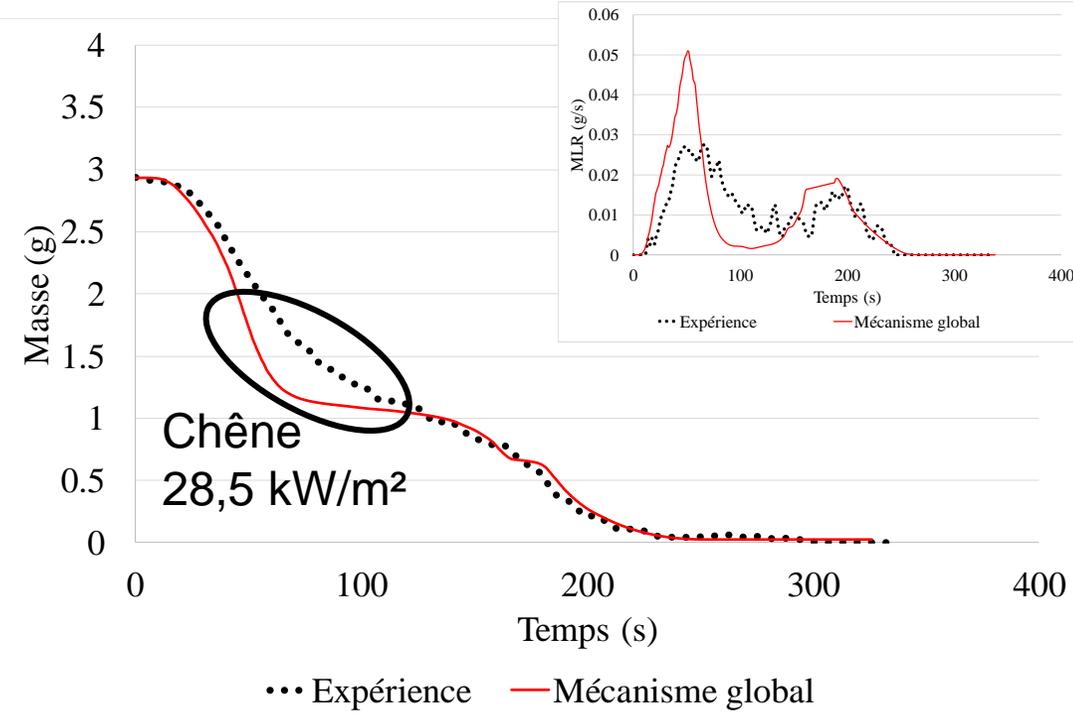
## Condition de convection libre avec température expérimentale



- Bonne représentation de la masse sur l'ensemble de la dégradation
- Masse finale restante légèrement sous-estimée
- Meilleures prédictions pour le chêne
- Résultat représentatif des autres conditions de flux sans oxydation

# Test des mécanismes réactionnels : Avec oxydation

## Condition de convection libre avec température expérimentale



- Bonne représentation de la masse sur l'ensemble de la dégradation
- Masse finale restante correctement prédite
- Décalage entre 50 et 150 s pour les deux bois
  - Discrétisation de la température trop faible
  - Changement de cinétique pour des densités de flux élevées

# Sommaire

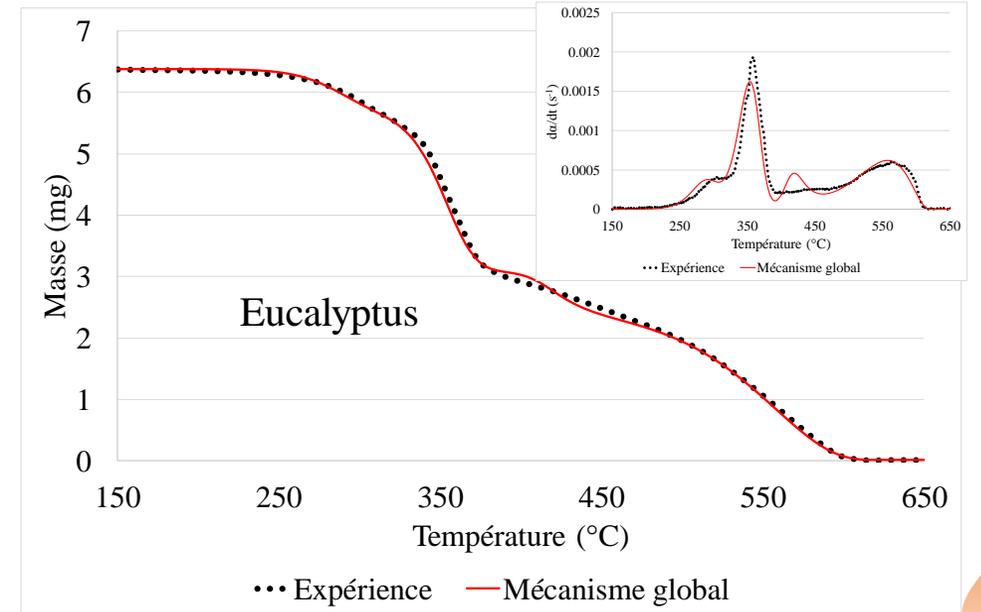
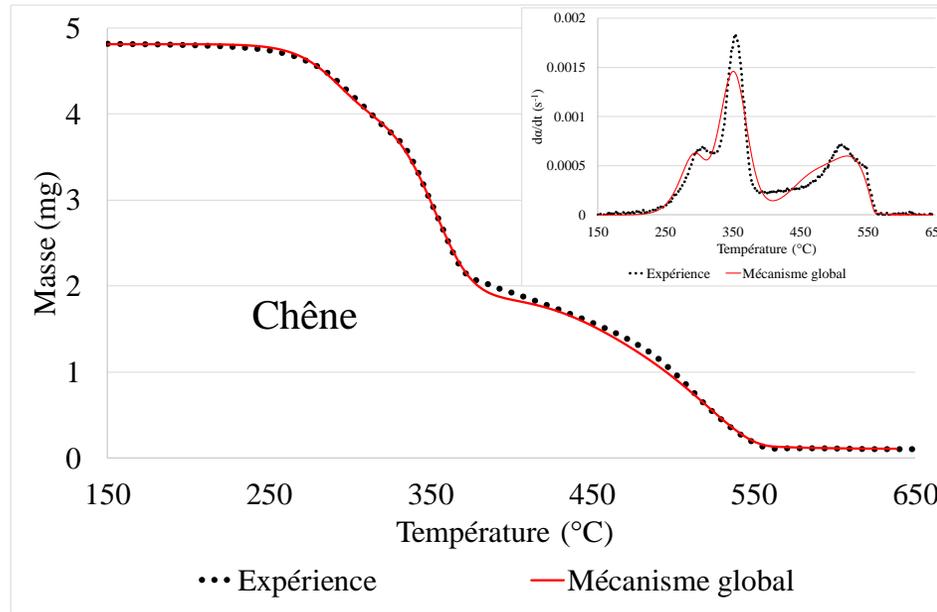
1. Etude expérimentale et développement des mécanismes réactionnels à l'échelle matière
2. Etude de la dégradation des plaques thermiquement fines à l'échelle matériau
3. Etude de la dégradation des plaques thermiquement épaisses à l'échelle matériau
4. Conclusion et perspectives

# Conclusion



## Echelle matière :

- Développement d'un mécanisme réactionnel à 4 étapes
- Optimisation des paramètres cinétiques par la méthode du gradient descendant
- Bonne adéquation expériences – simulations pour le chêne et l'eucalyptus



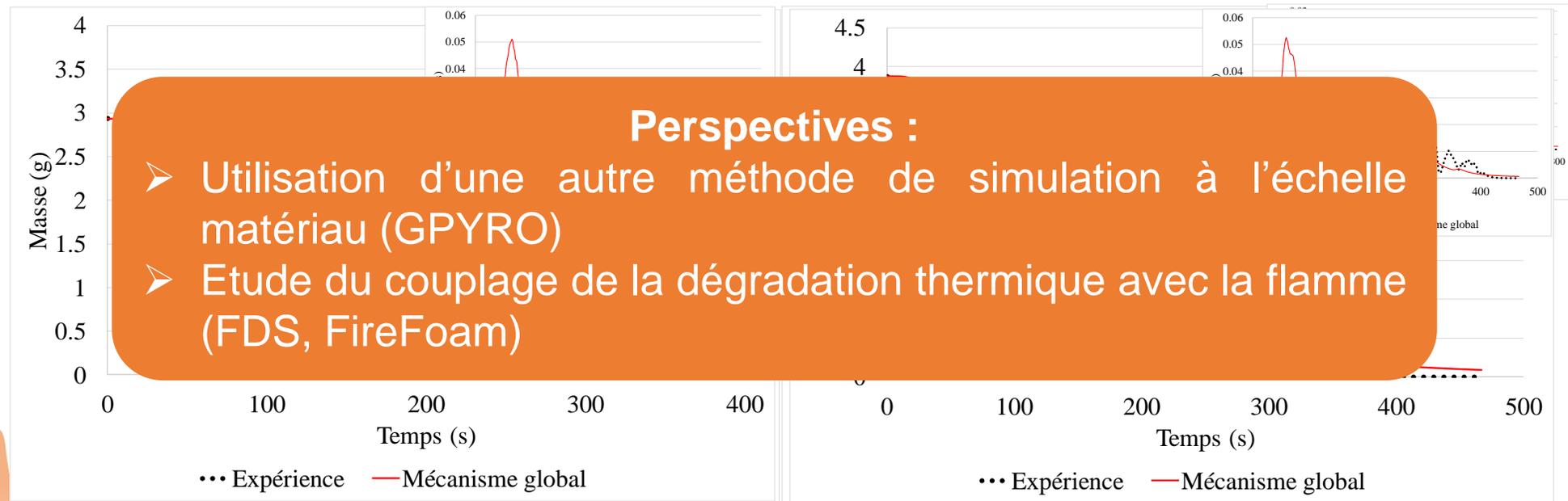
# Conclusion et Perspectives

## Echelle matériau :

- Une méthode de simulation du mécanisme réactionnel pour les plaques fines
- Utilisation de la température expérimentale à cette échelle
- Bonne adéquation expériences – simulations avec la température expérimentale

## Perspectives :

- Utilisation d'une autre méthode de simulation à l'échelle matériau (GPYRO)
- Etude du couplage de la dégradation thermique avec la flamme (FDS, FireFoam)



# Merci de votre attention

Contact : [gerandi\\_g@universita.corsica](mailto:gerandi_g@universita.corsica)

