



27^e 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

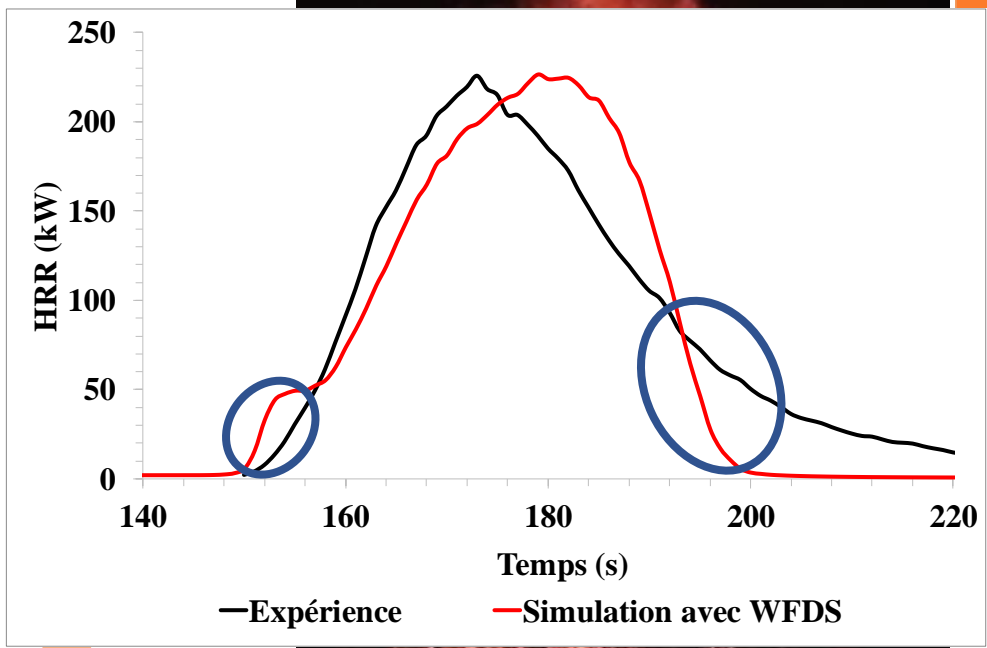
Guillaume GERANDI, Virginie TIHAY-FELICELLI, Paul-Antoine SANTONI
Laboratoire UMR SPE 6134 CNRS





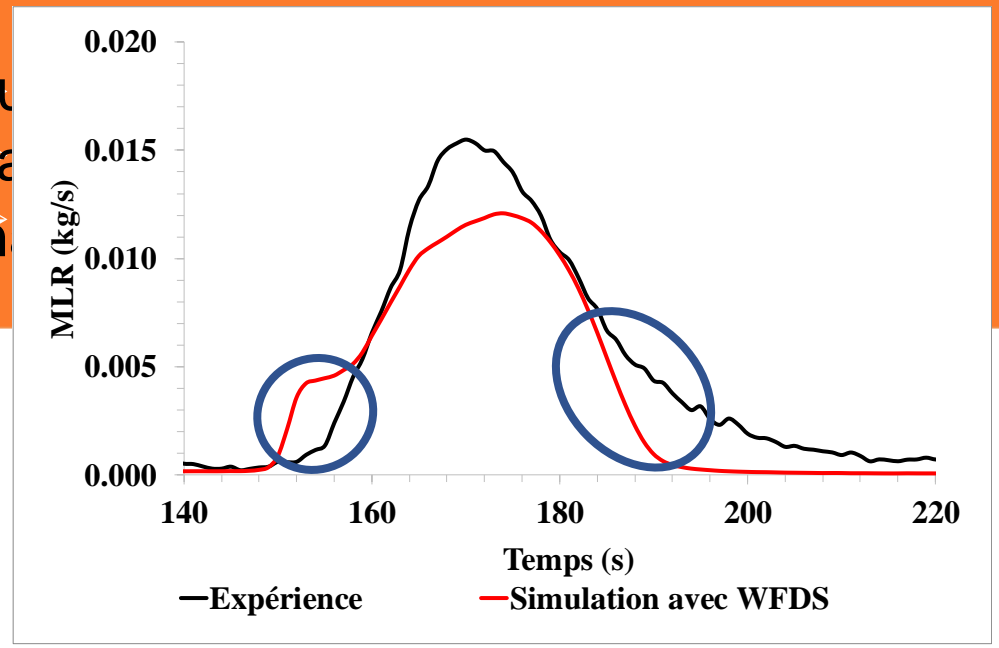
Contexte de l'étude

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

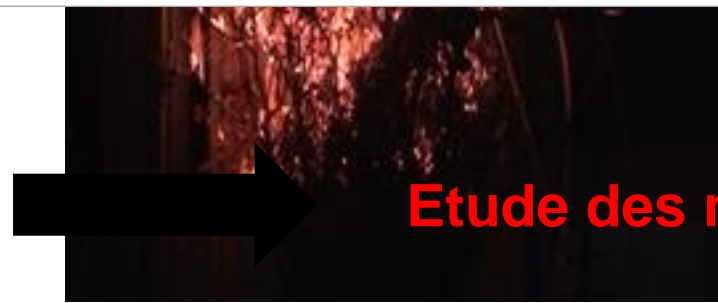


Mauvaise
détail
dynamique

-
-



- 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



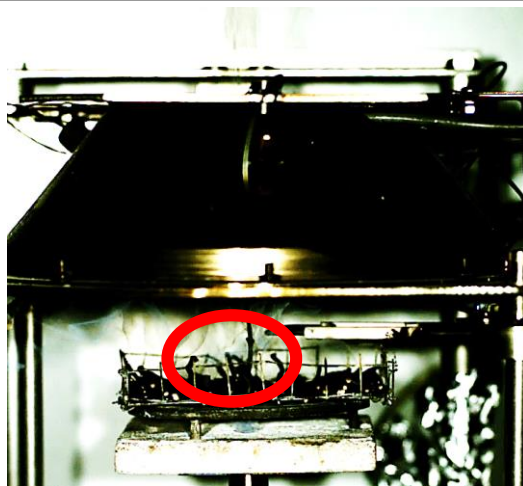
Utilisation d'une approche multi-échelle pour traiter la problématique du changement d'échelle

Contexte de l'étude

Quel type de combustible faut-il étudier ?

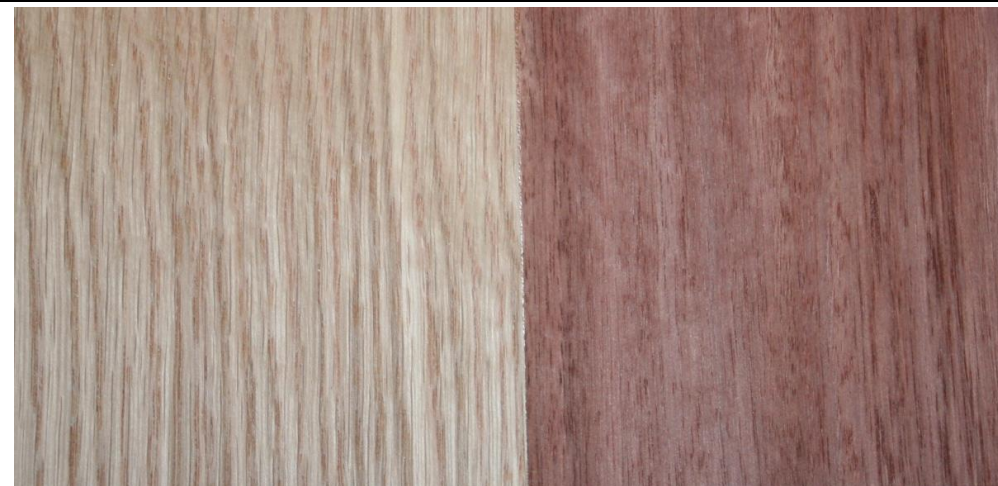
Brindilles et feuilles de végétation :

- 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 :

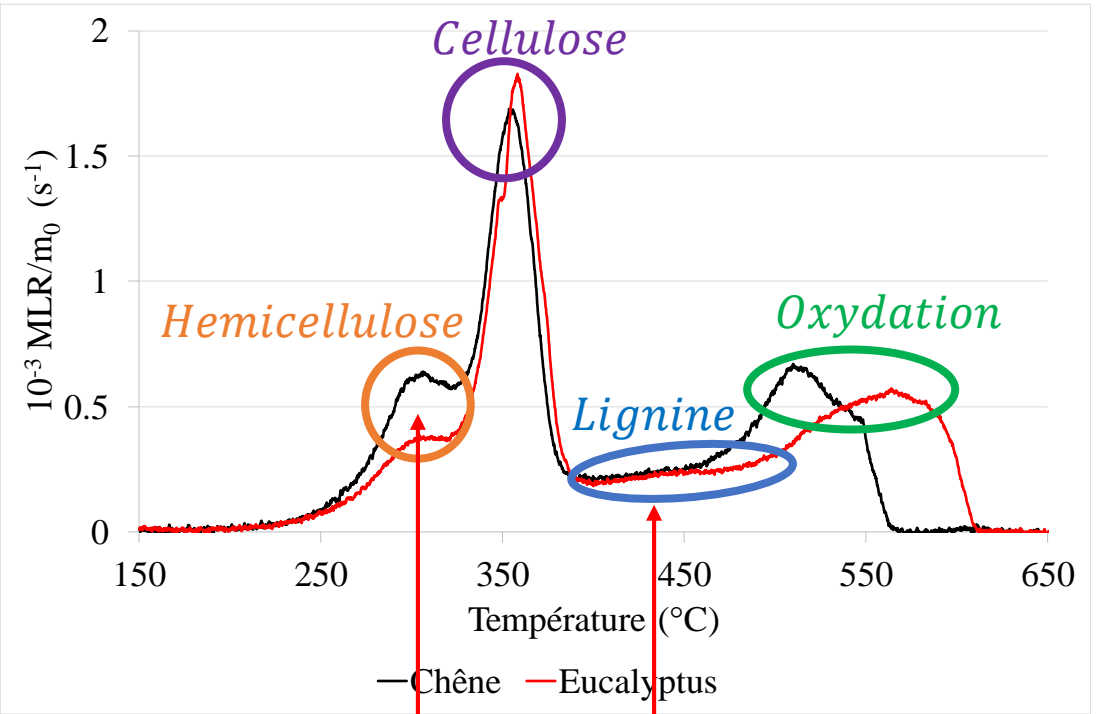
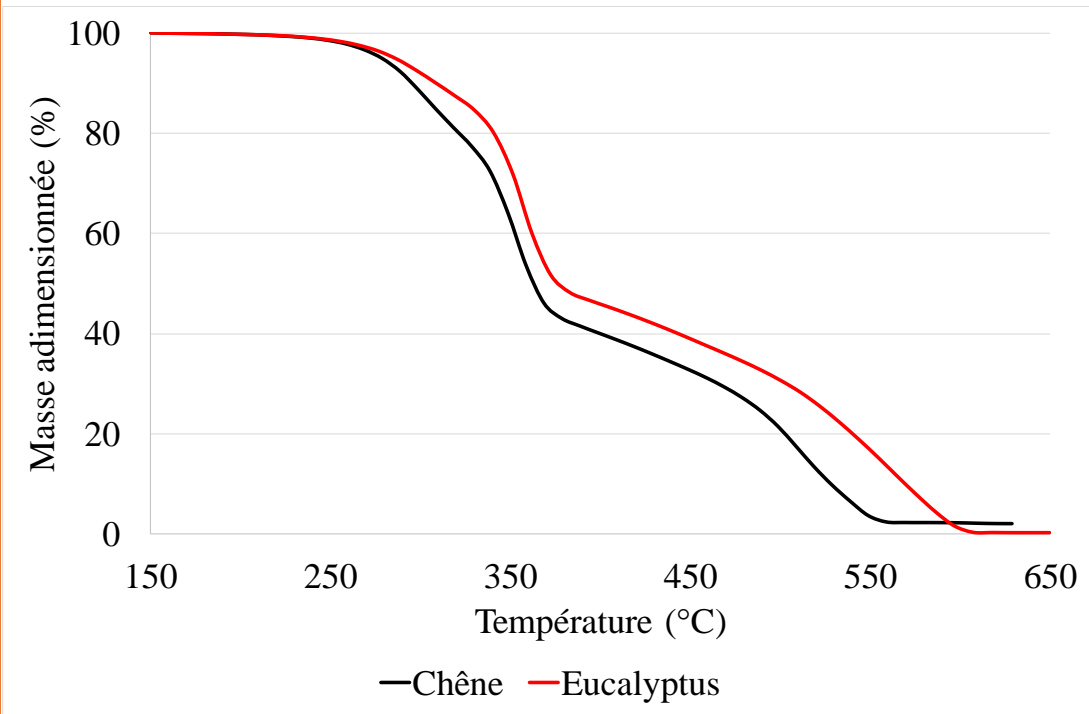
Diamètre : 4 mm

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



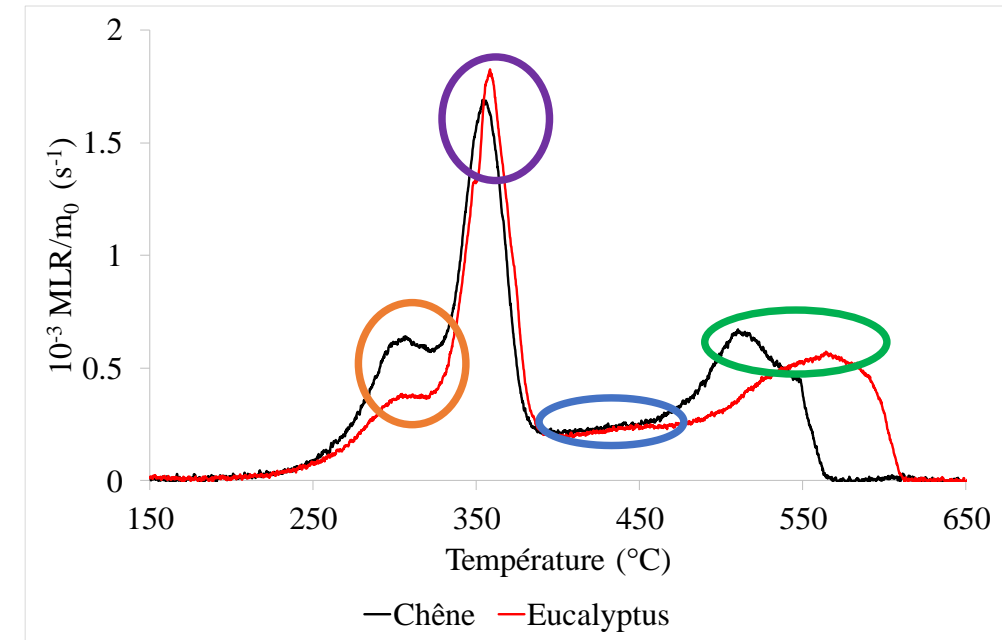
- Même tendance de dégradation pour chaque espèce de bois
- 2 différences majeures sur le MLR :
 - 1^{ère} réaction : Moins d'hémicellulose pour l'eucalyptus
 - 3^{ème} réaction : Moins de lignine pour le chêne

	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 ν_i

Algorithme du gradient descendant

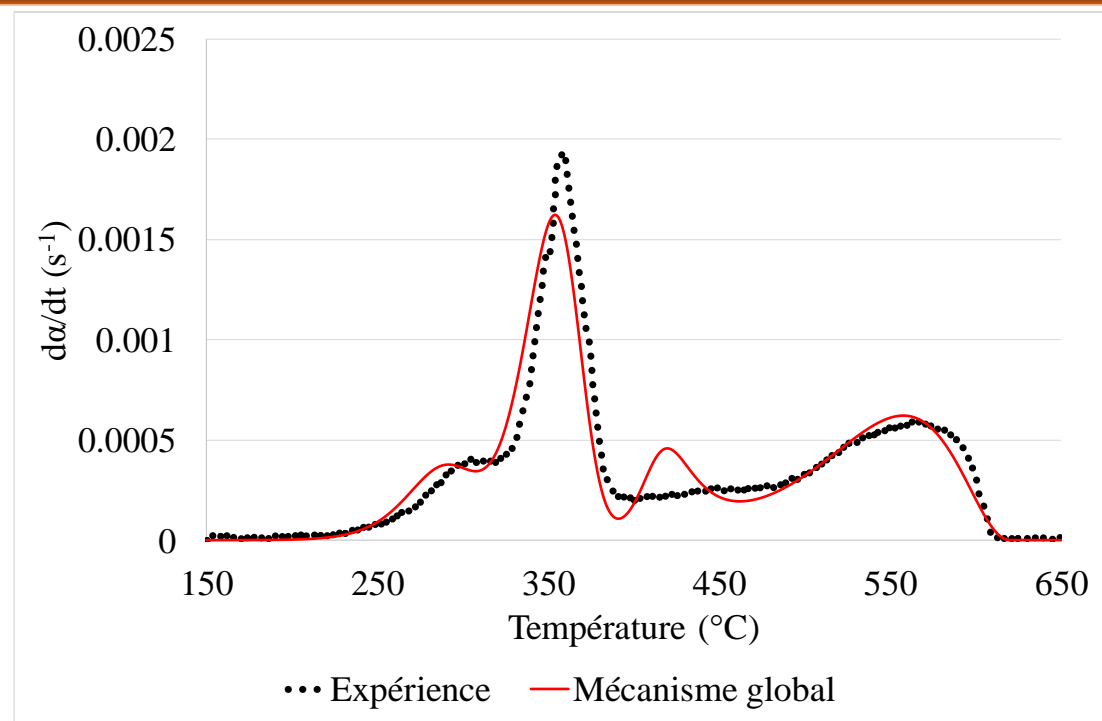
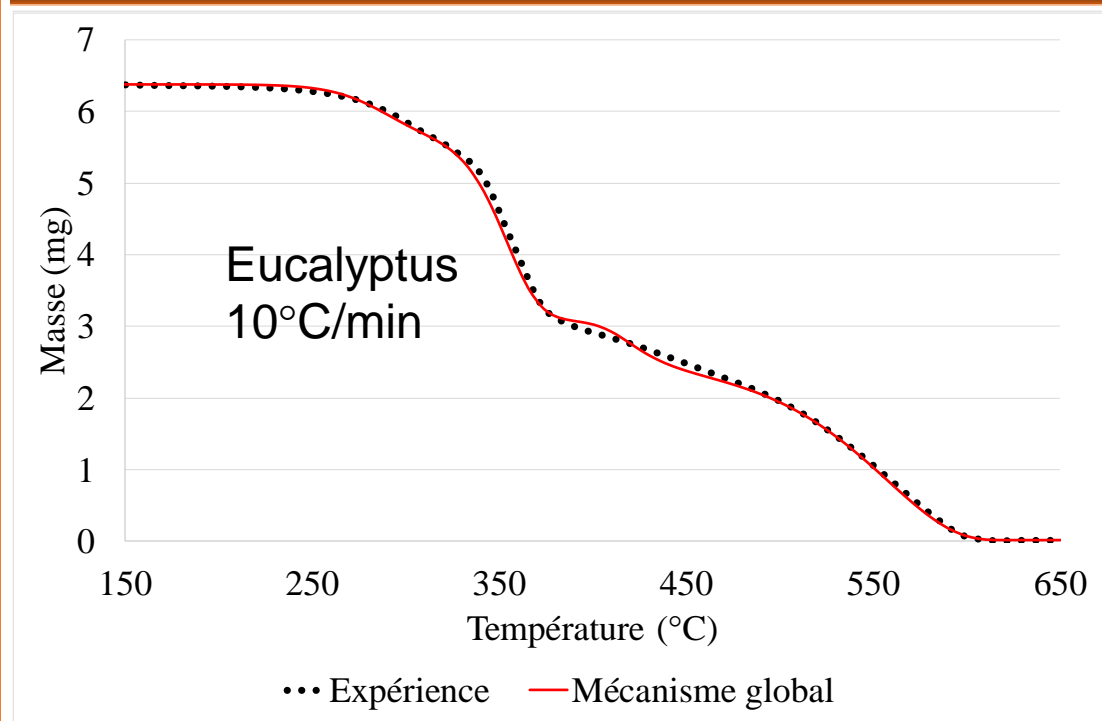


Masse des
expériences aux
5 vitesses de chauffe

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



Optimisation des paramètres cinétiques : Mécanisme global



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

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

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

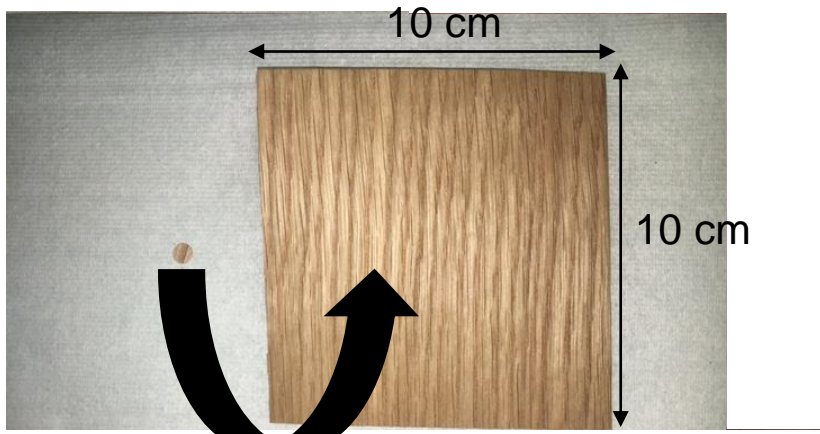
$n_4 = 0,58$
 $E_{a4} = 118 \text{ kJ/mol}$
 $\ln(A_4) = 12 \text{ s}^{-1}$
 $v_4 = 0,03$

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*)

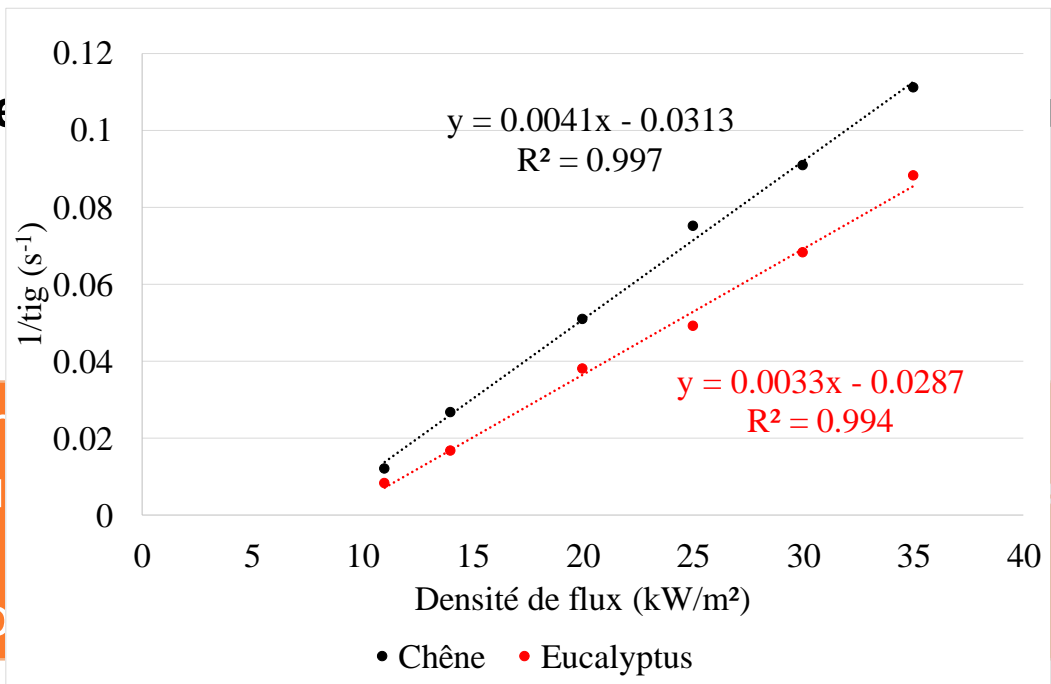
Epaisseur = 0,6 mm \longrightarrow Plaque thermiquement fine

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

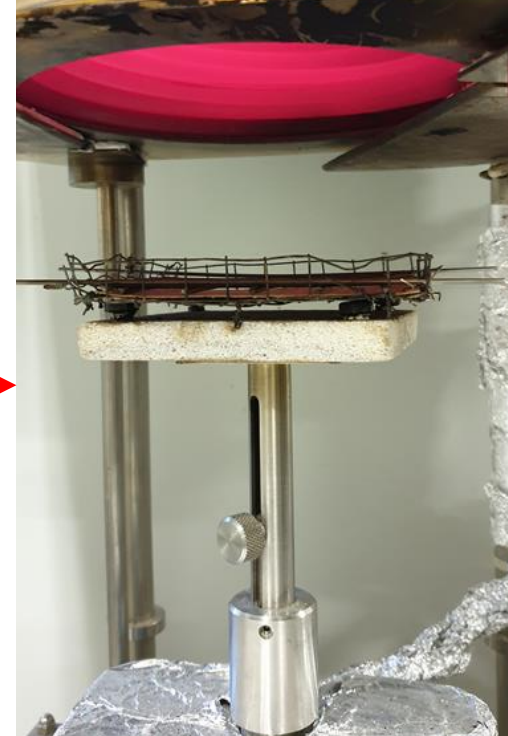


S

L'échelle matériau



Cône calorimètre



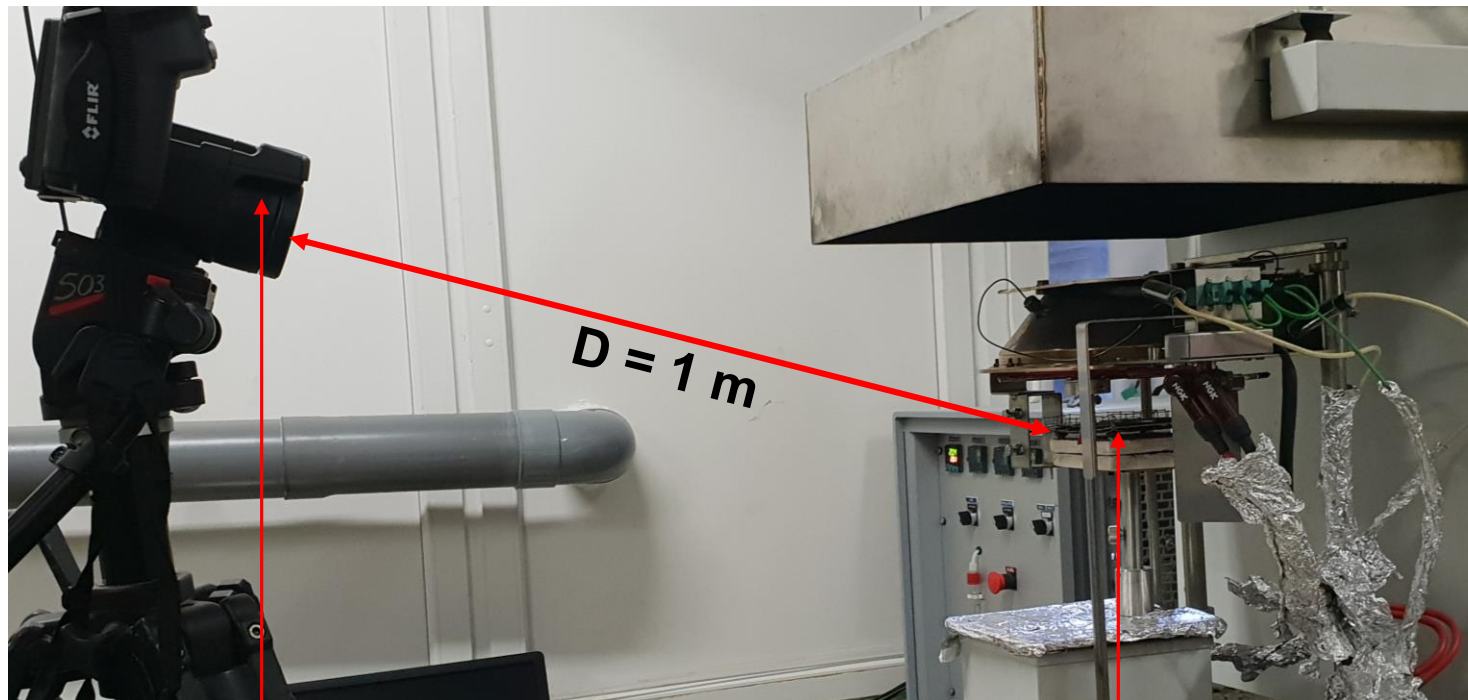
Densités de flux imposées :
 $18 \leq \overline{\dot{q}}_e'' \text{ (kW/m}^2\text{)} \leq 28,5$



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

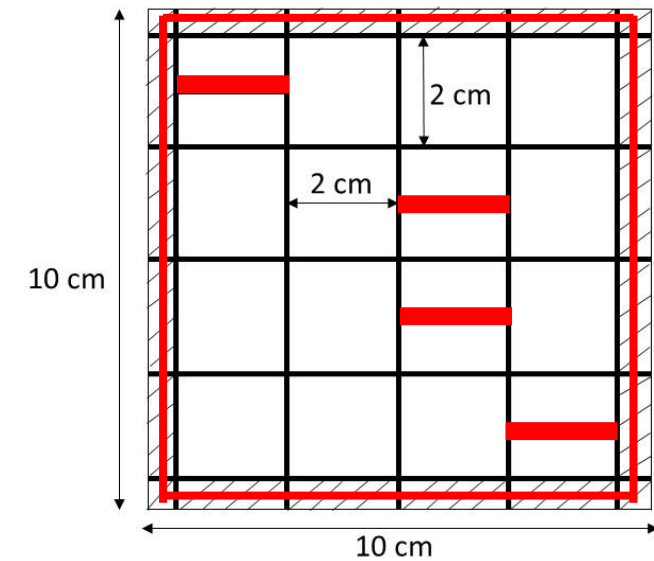
Relevé de températures par caméra IR

Température relevée par caméra IR sur la face supérieure

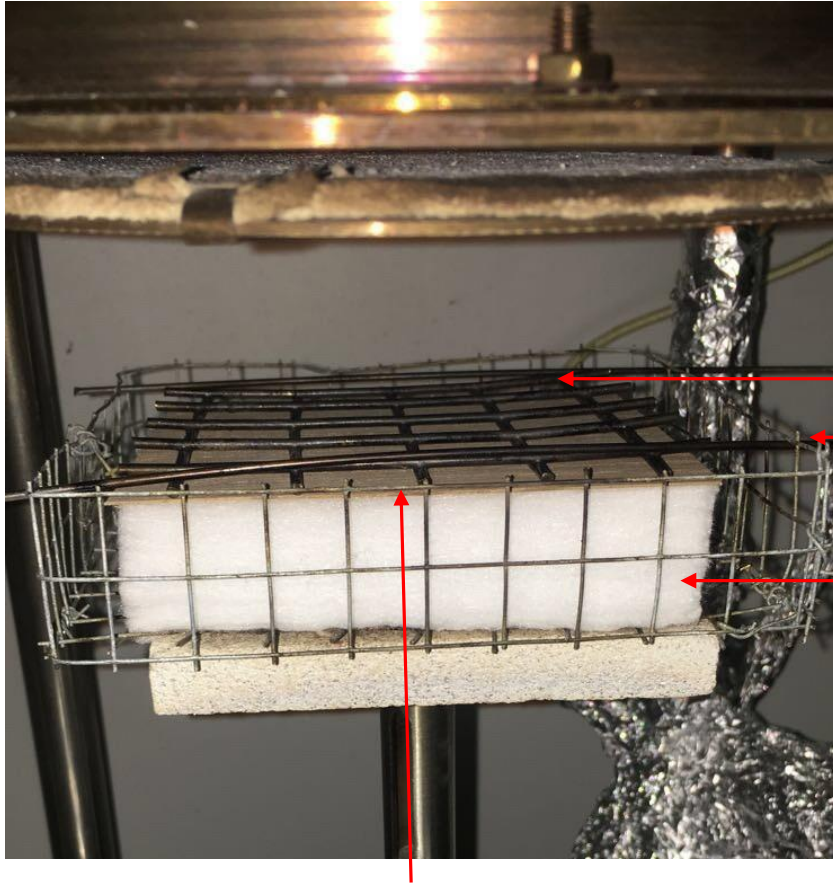


Caméra IR

Echantillon



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



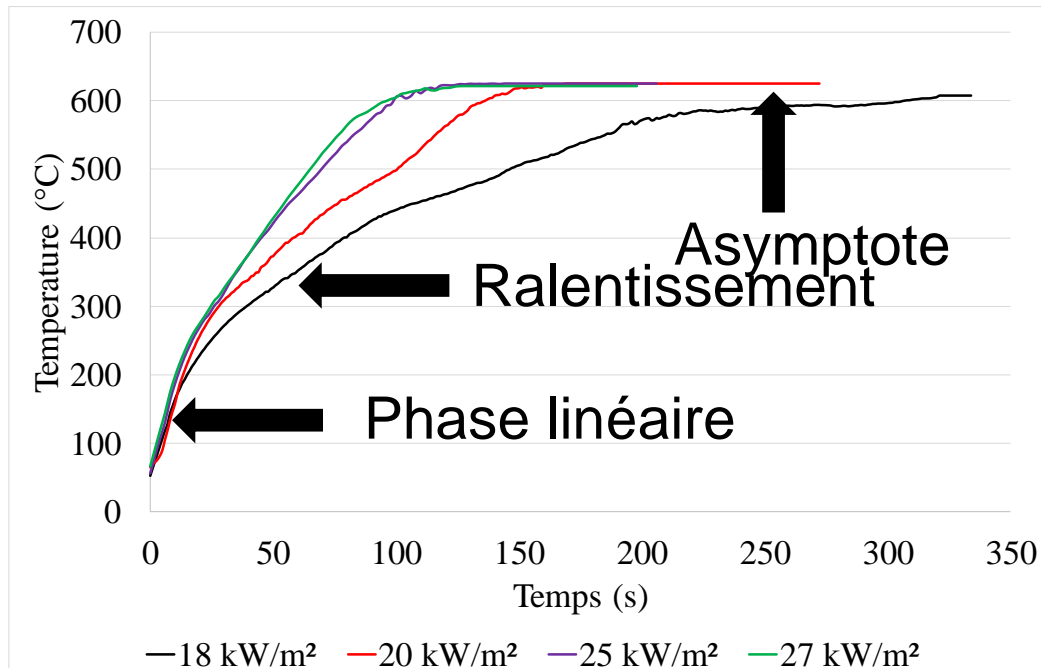
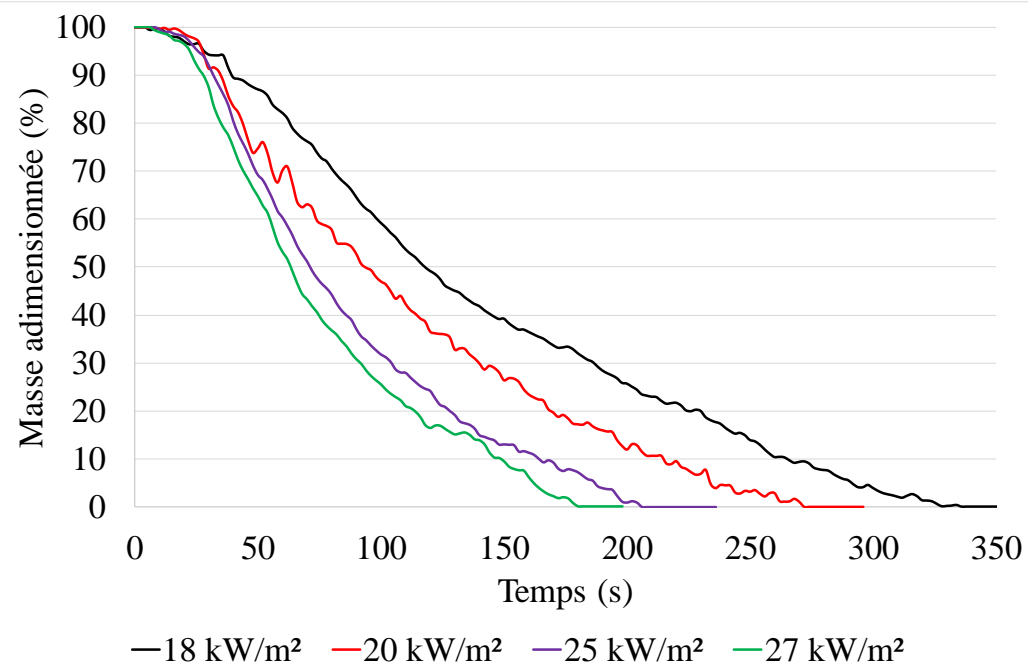
- Bois
- Porte échantillon
- Laine céramique

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



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

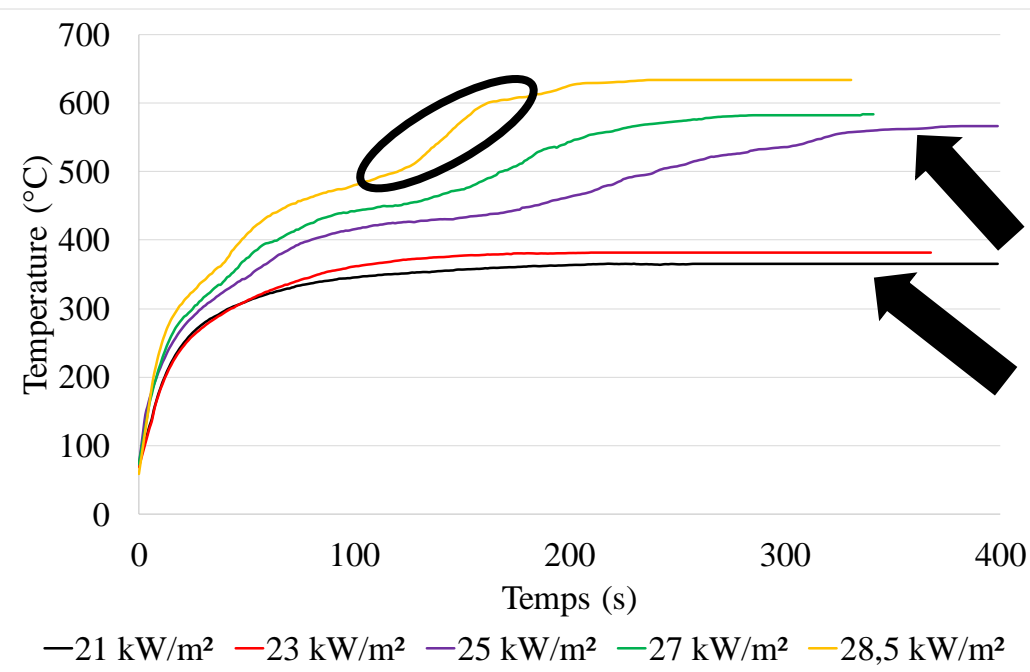
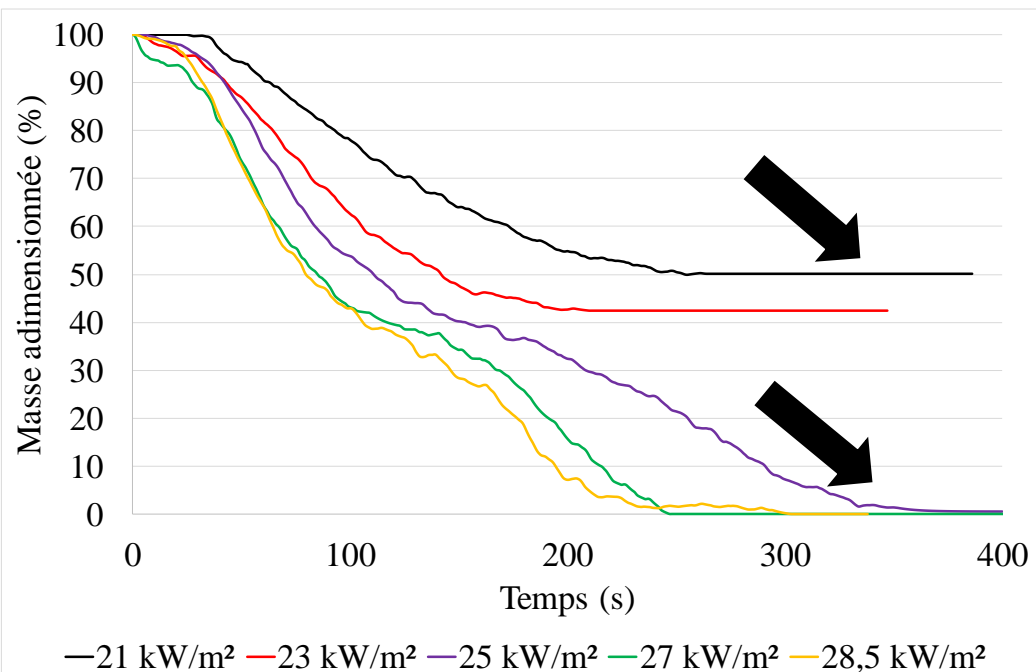


Porte échantillon
Bois

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

Résultats expérimentaux : Masses et Températures

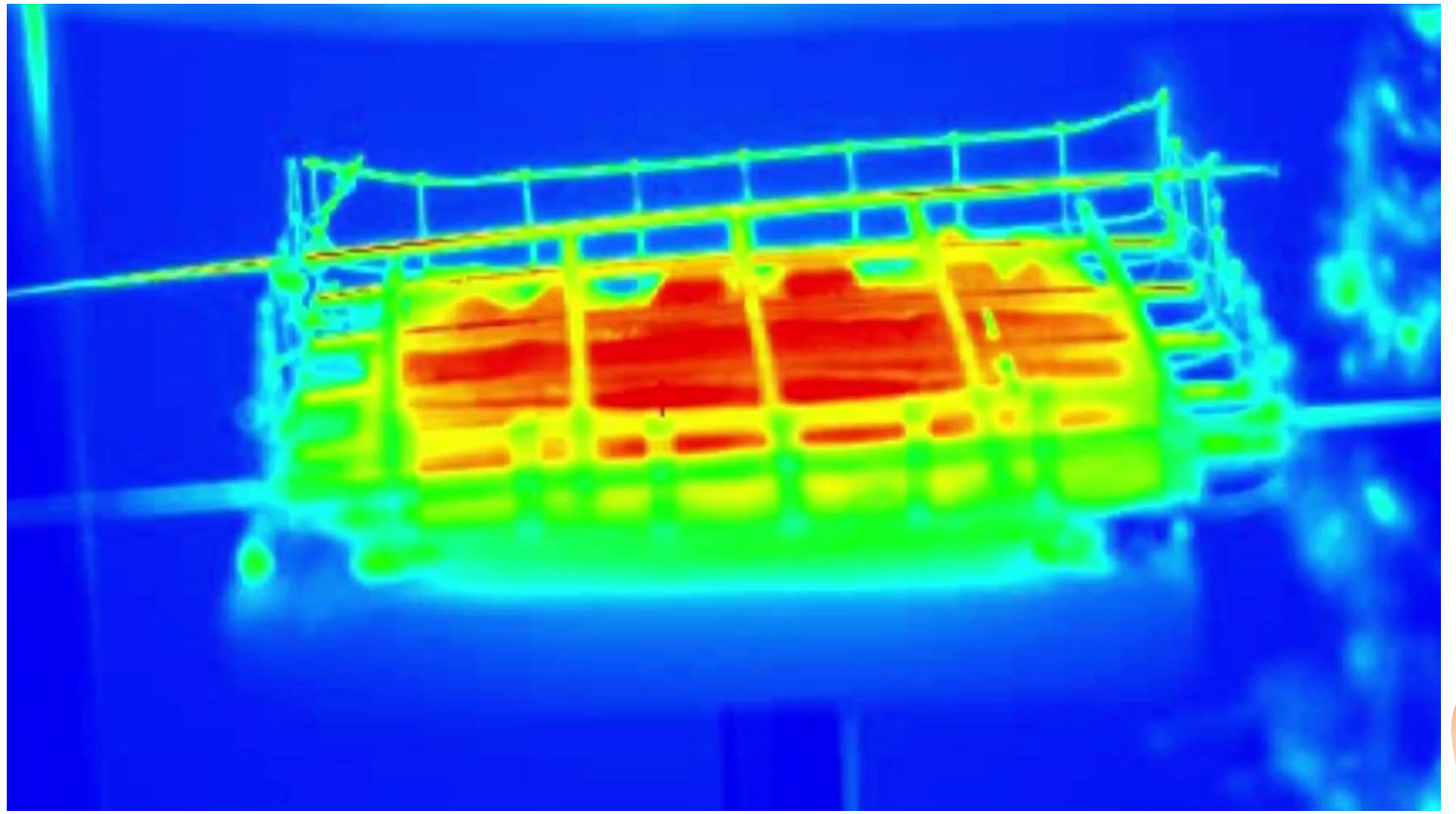
Condition limite de convection libre



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



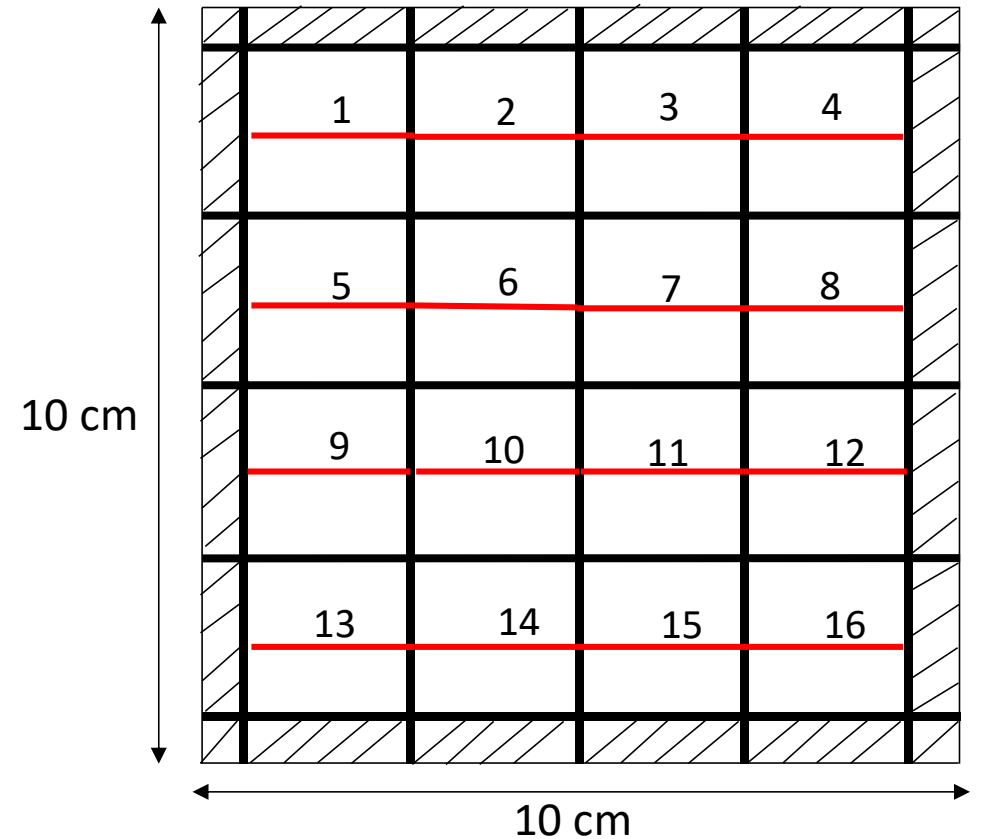
Sommaire

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

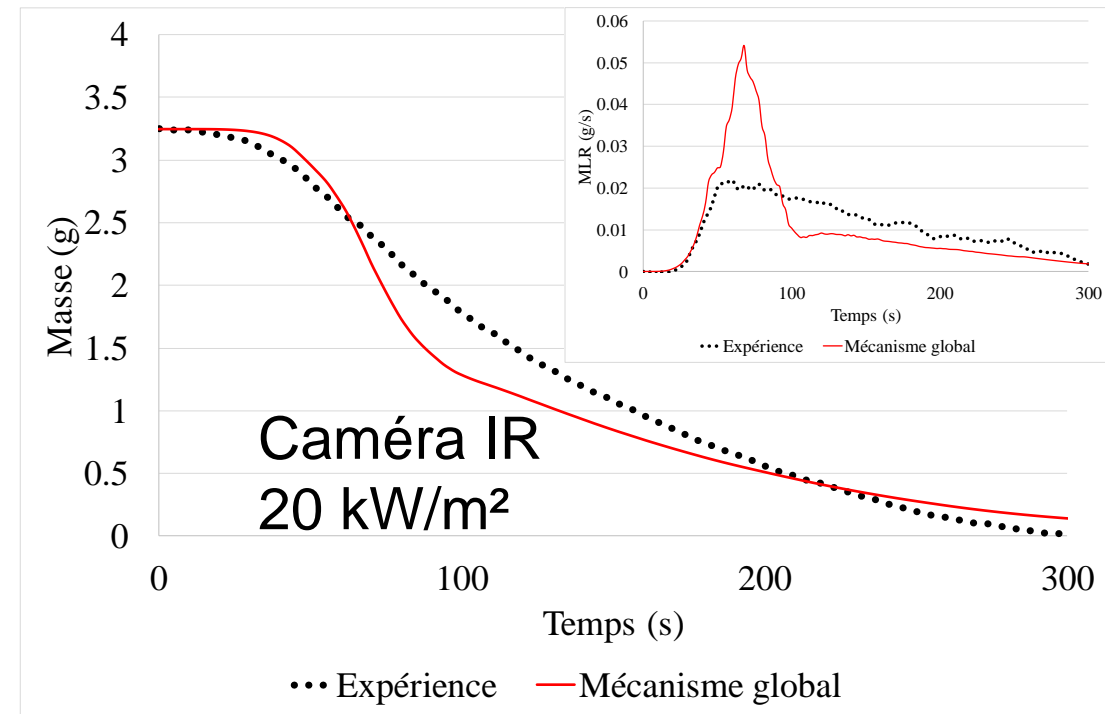
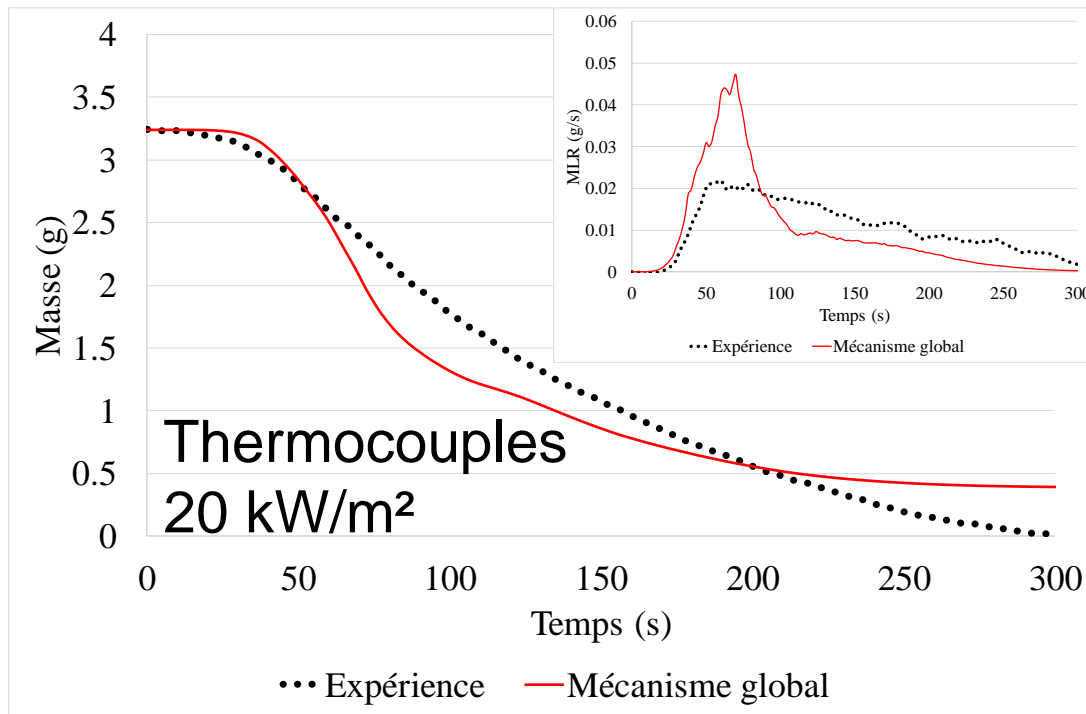
Avec la température expérimentale :

- 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

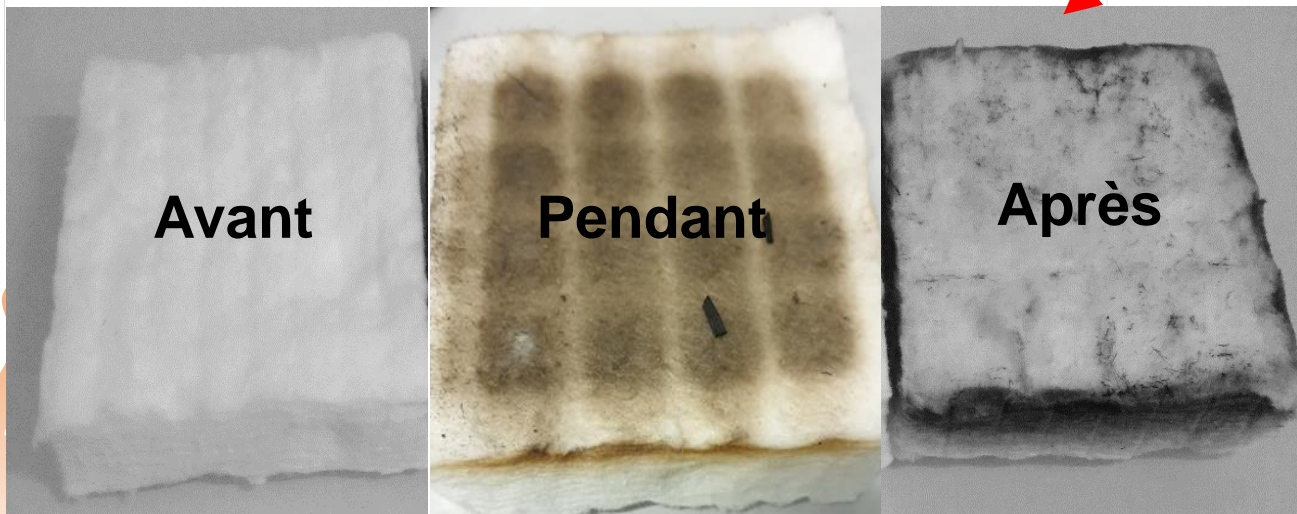
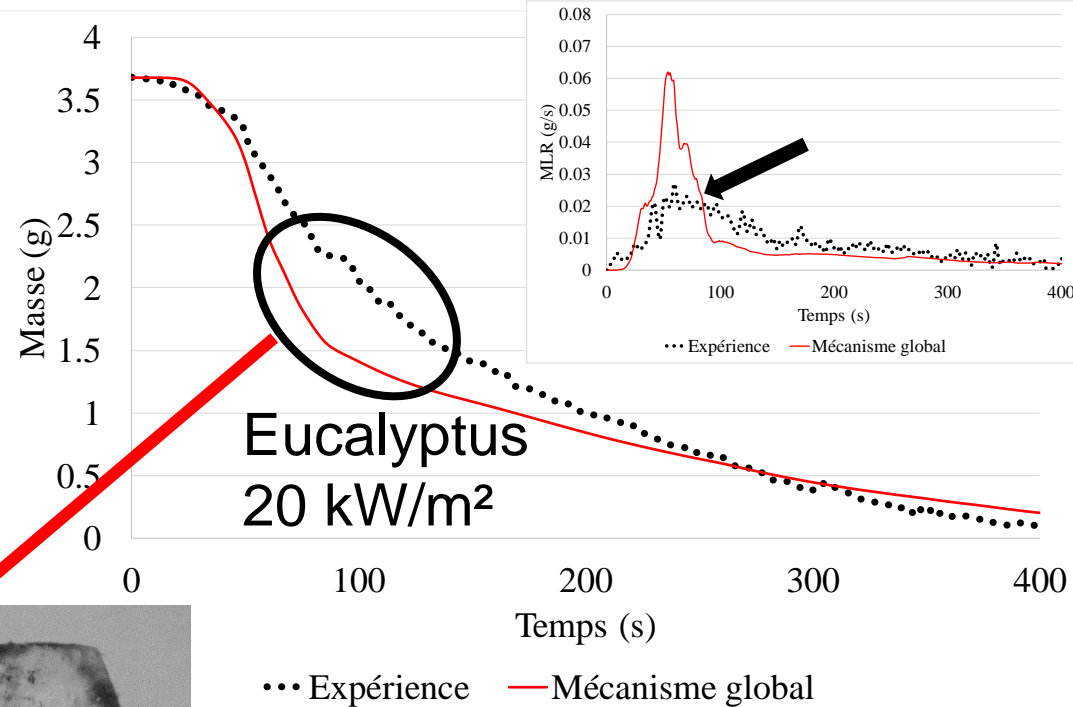
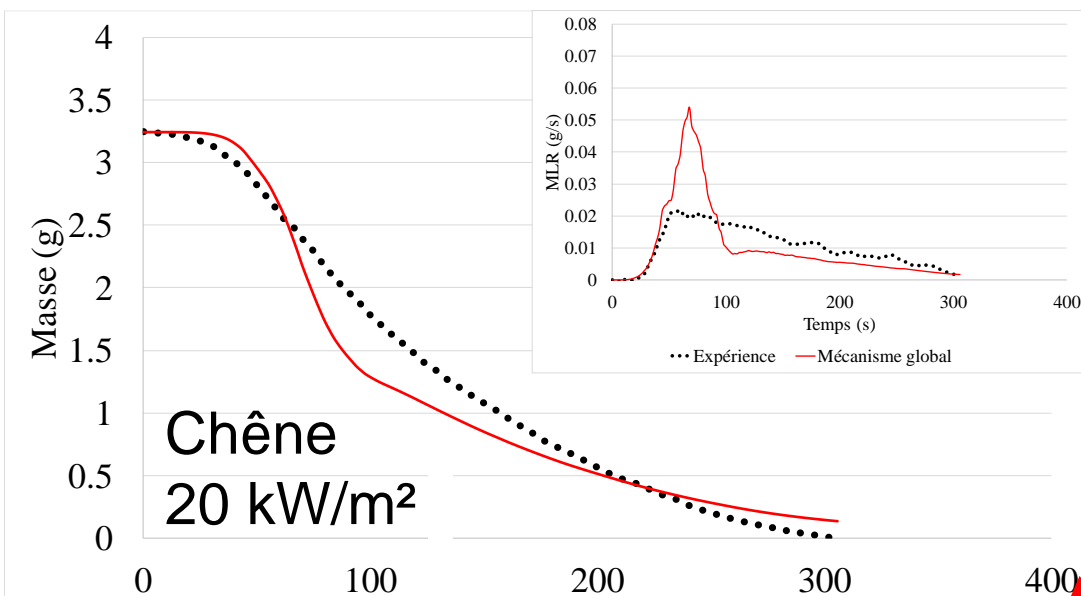
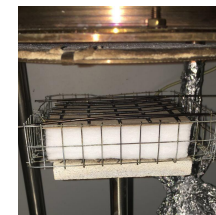


Principales observations :

- 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

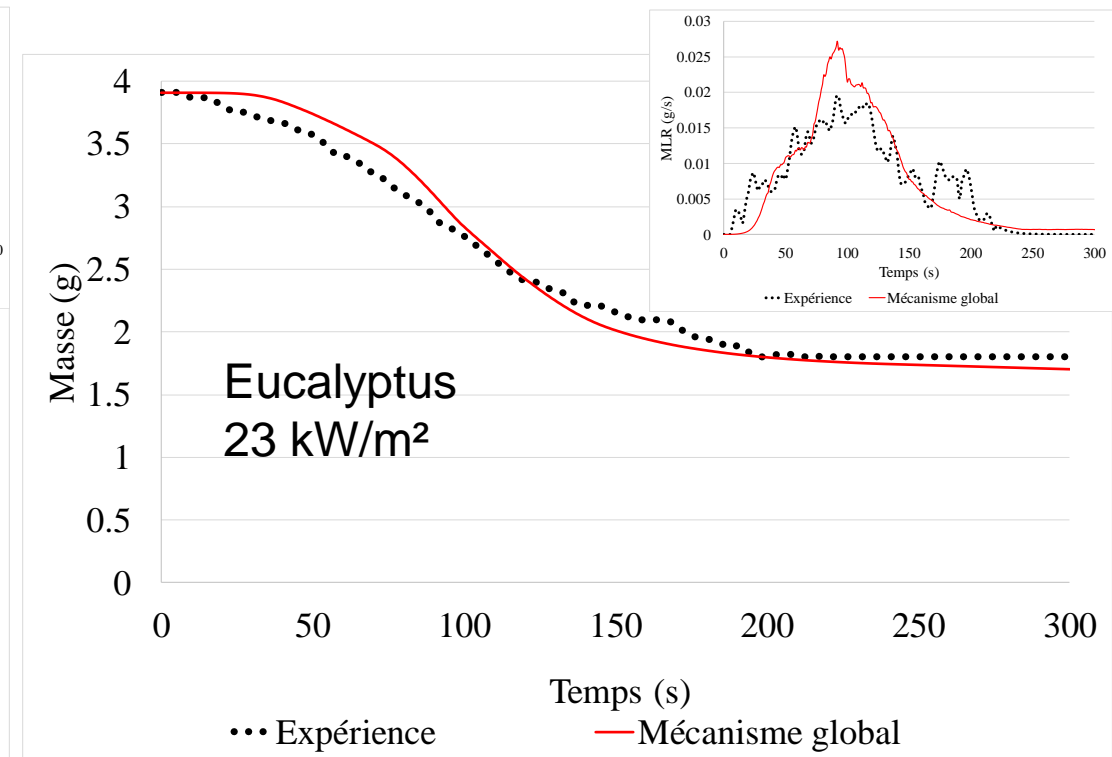
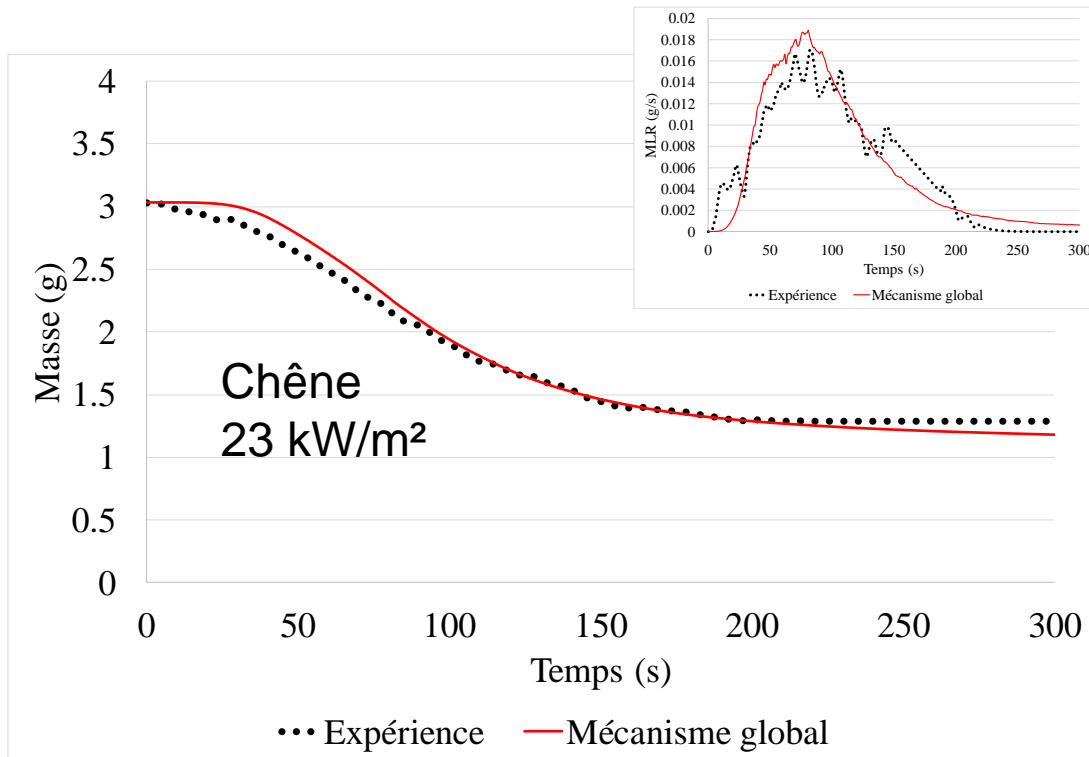


Goudrons piégés dans la laine

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

Test des mécanismes réactionnels : Sans oxydation

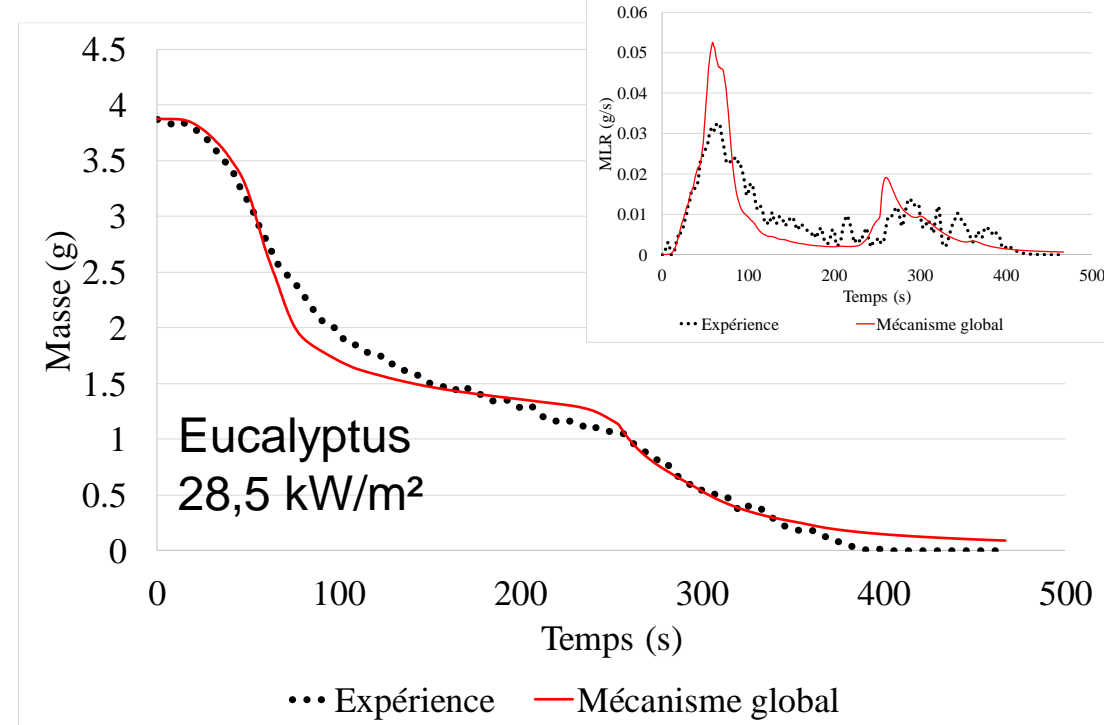
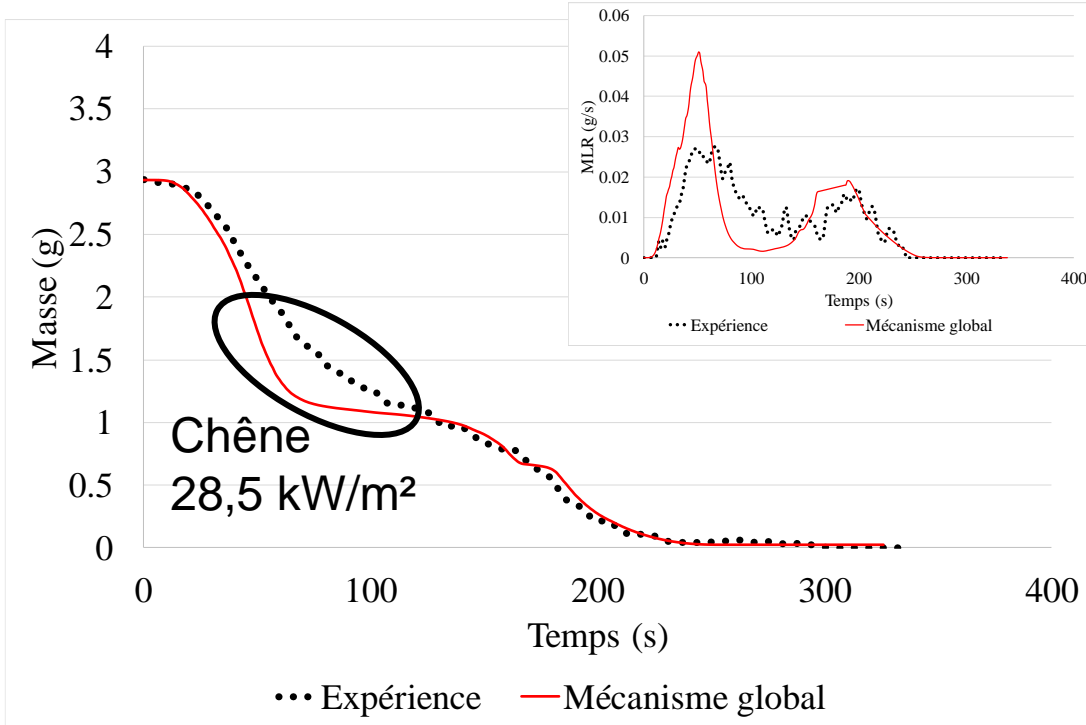
Condition de convection libre avec température expérimentale



- 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

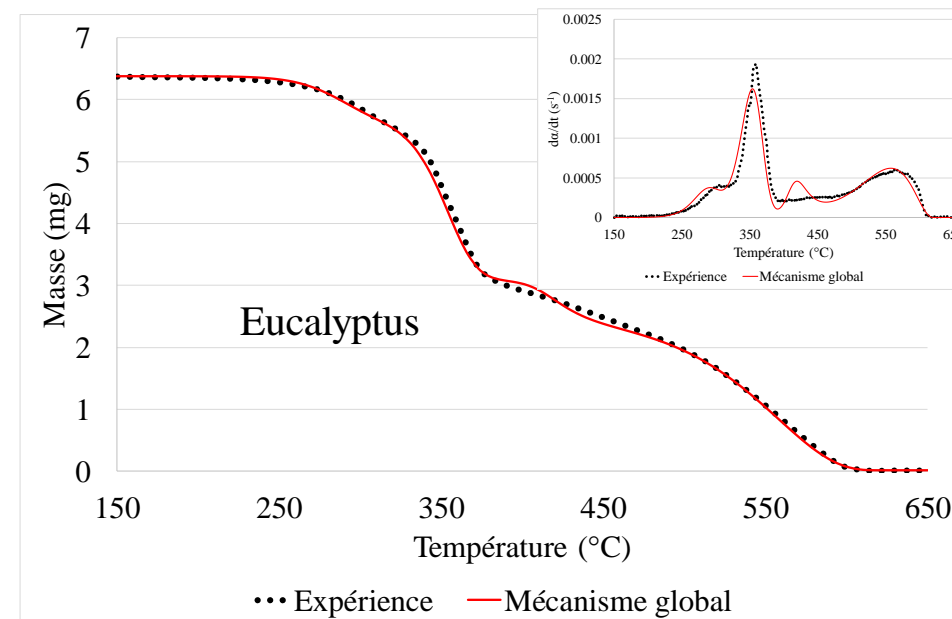
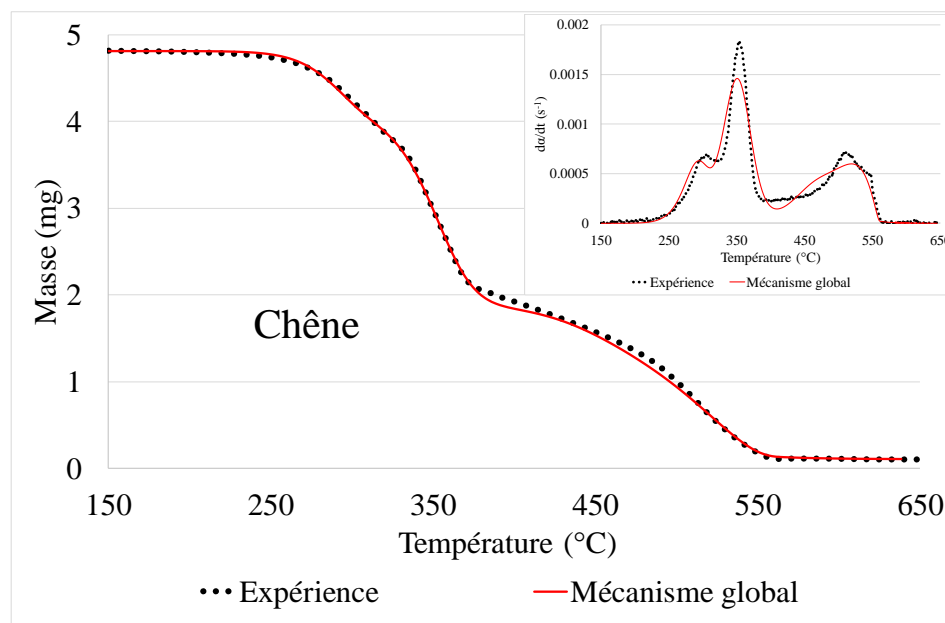
1. Etude expérimentale et développement des mécanismes réactionnels à l'échelle matière
2. Etude de la dégradation des plaques thermiquement fines à l'échelle matériau
3. Etude de la dégradation des plaques thermiquement épaisses à l'échelle matériau
4. Conclusion et perspectives



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





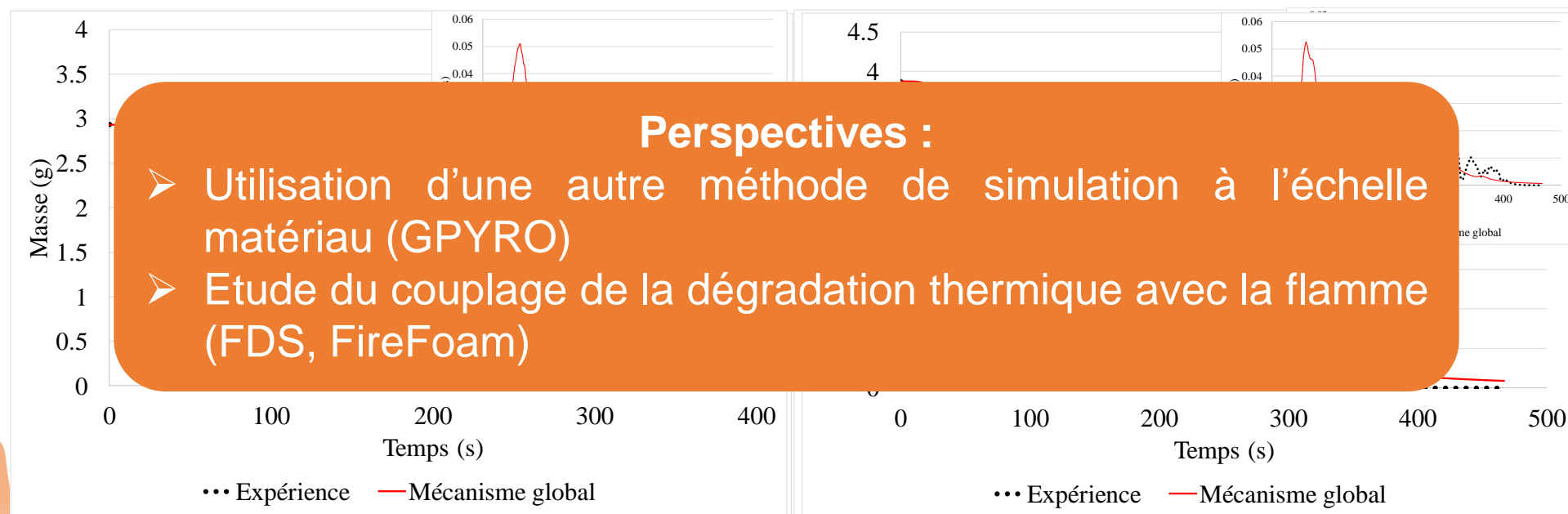
Conclusion et Perspectives

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

