28e rencontres du GDR Feux

03 Décembre 2020

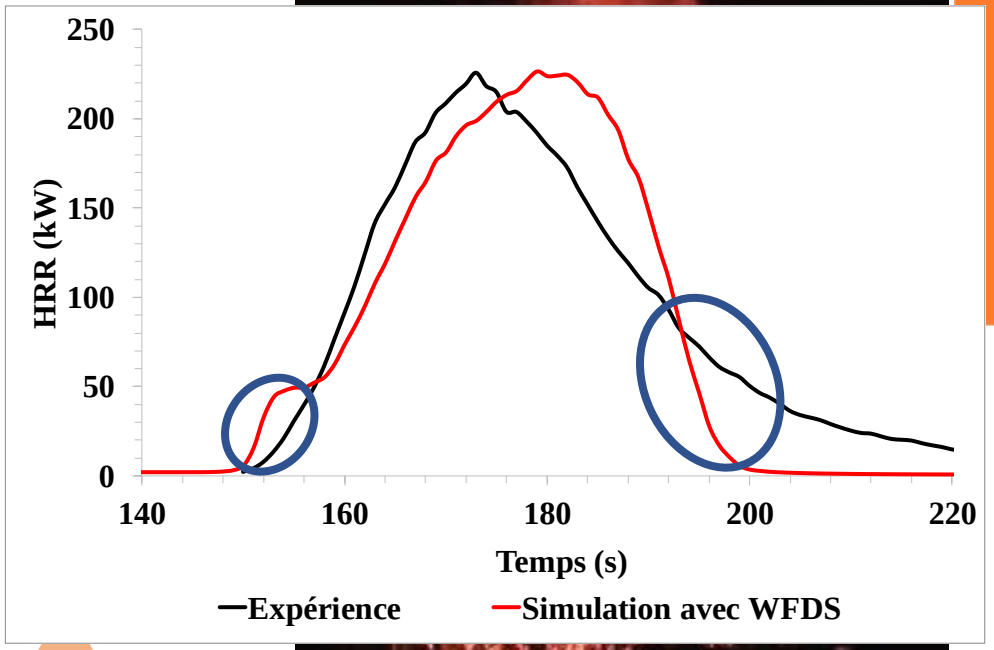
# Simulations multi-échelle de la dégradation thermique de plaques de bois fines : Evaluation de deux mécanismes réactionnels

Guillaume GERANDI, Virginie TIHAY-FELICELLI, Frédéric MORANDINI, Paul-Antoine SANTONI

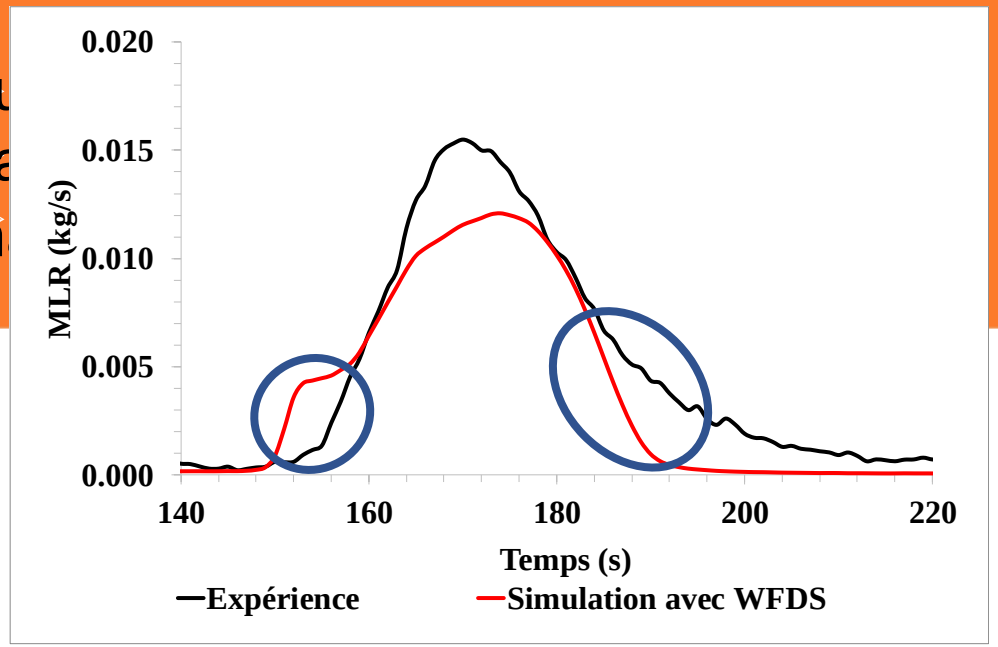
Université de Corse - CNRS UMR 6134 SPE - Projet Feux

# Contexte de l'étude

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




Mau
déta
dyn




- 
- 
- l'oxydation des résidus charbonneux

**Etude des mécanismes de dégradation**

# Contexte de l'étude et travaux déjà réalisés

## 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**

# Choix du combustible

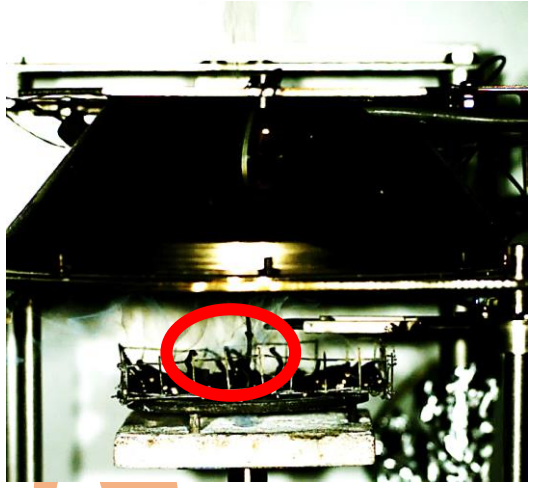
Quel type de combustible faut-il étudier ?

**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 l'étude : **Plaques de bois fines**

# Sommaire

1. Etude expérimentale et validation des mécanismes réactionnels à l'échelle matière
2. Etude expérimentale et validation des mécanismes réactionnels à l'échelle matériau
3. Conclusion et perspectives

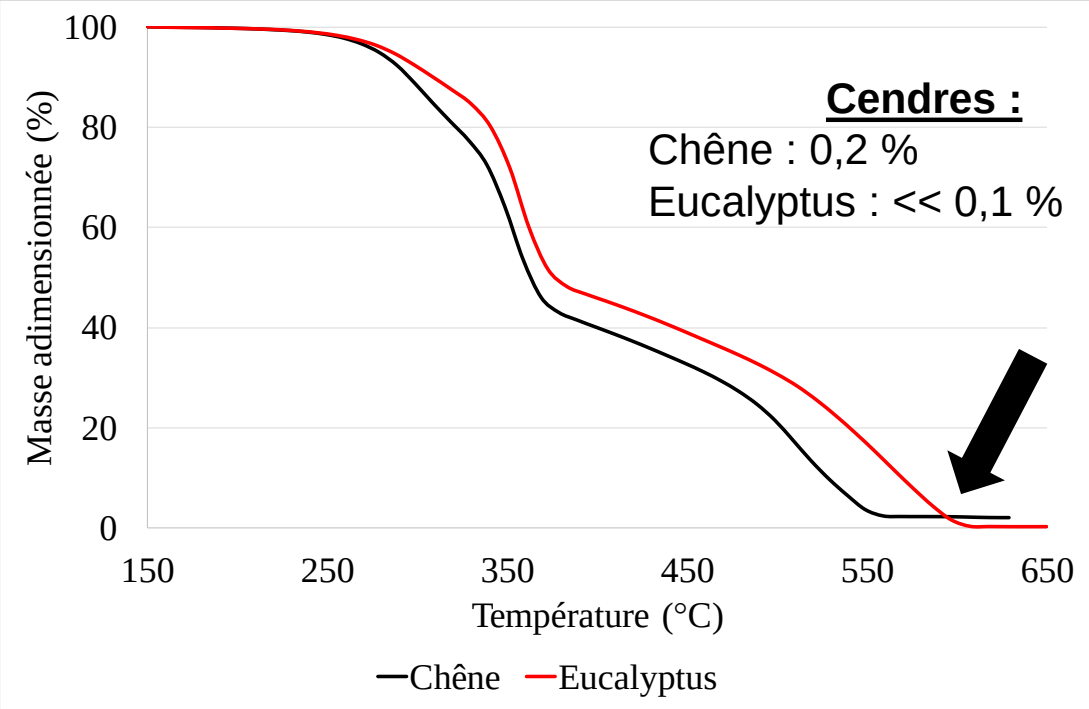
# Protocole expérimental à l'échelle matière

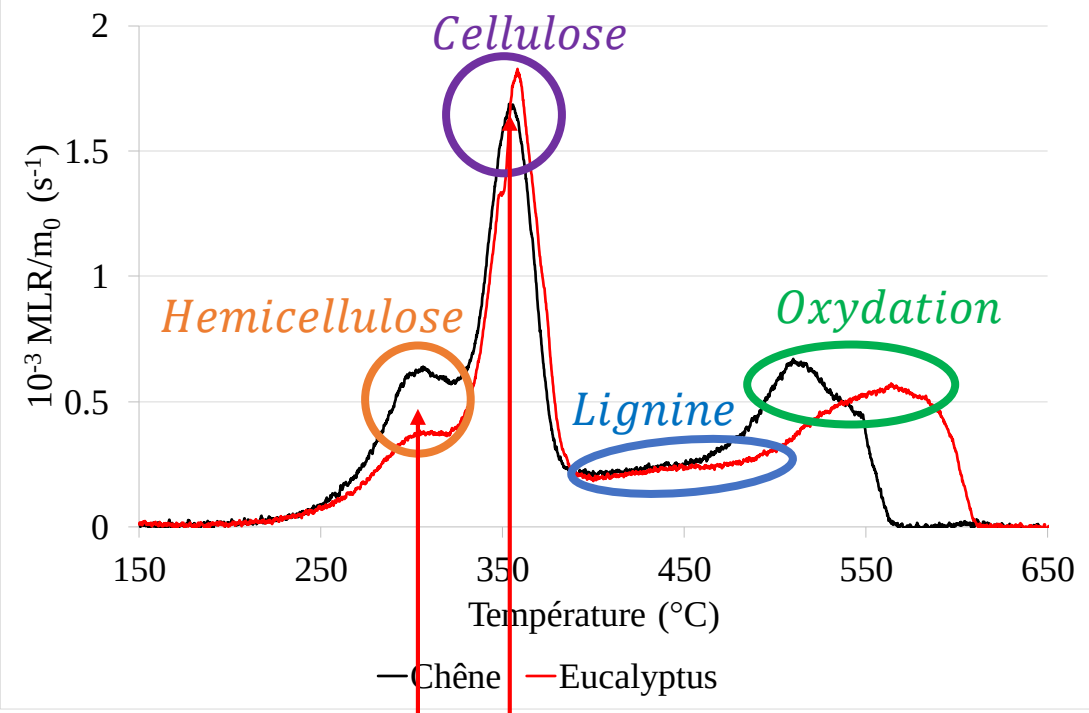
- 5 vitesses de chauffe pour l'optimisation des modèles
  - 2, 5, 10, 20 et 30 °C/min
- 4 vitesses de chauffe pour la validation :
  - 1.5, 3, 7 et 50 °C/min
- Rampes de température de 150°C à 750°C
- 1 atmosphère d'étude : air

Analyseur thermogravimétrique

<u>Echelle matière :</u>
Diamètre : 4 mm
Masse sèche chêne : 4,4 mg (± 0,6 mg)
Masse sèche eucalyptus : 6,5 mg (± 0,5 mg)

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



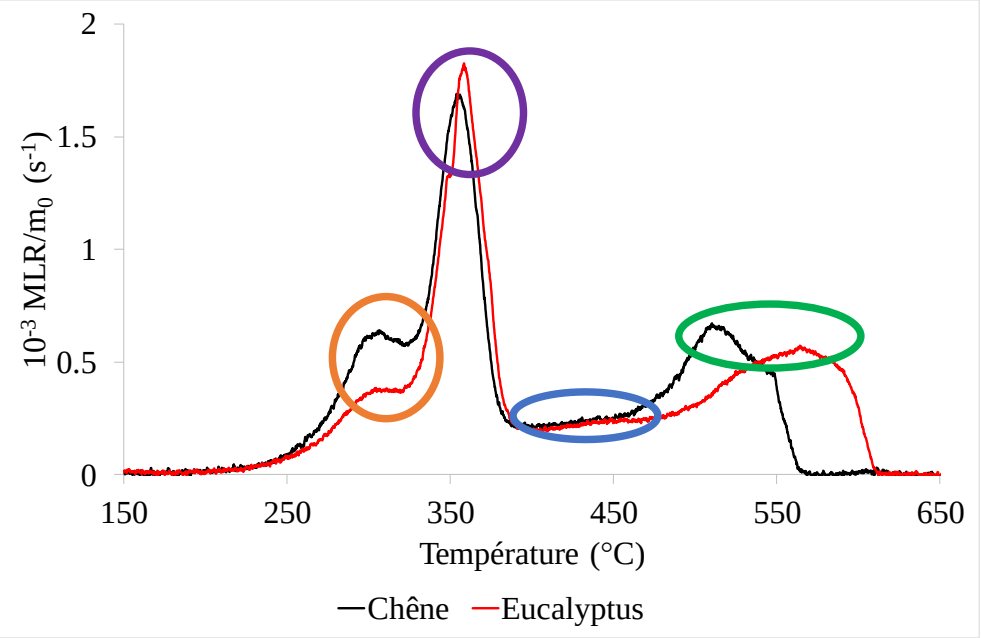

- Même tendance de dégradation pour chaque espèce de bois
- 2 différences majeures sur le MLR :
  - 1ère réaction : Moins d'hémicellulose pour l'eucalyptus
  - 3ème réaction : Moins de cellulose pour le chêne

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

# Les différents mécanismes réactionnels développés

## 1er mécanisme réactionnel : mécanisme global (4 étapes)

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




**Loi d'Arrhenius :**

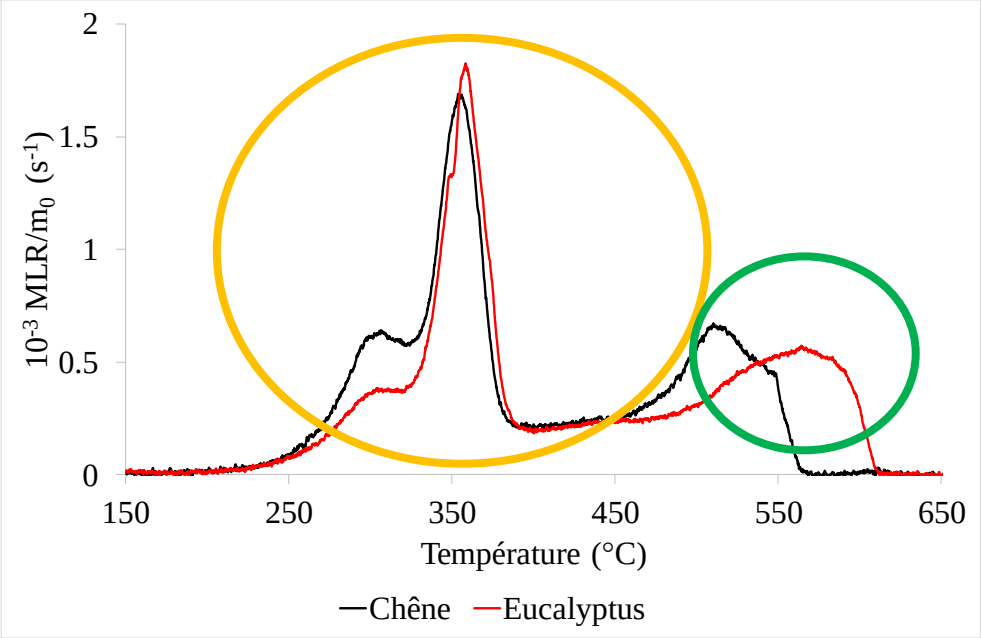
$$\alpha = \frac{m_0 - m}{m_0 - m_{cendres}}$$

- $\frac{d\alpha_1}{dt} = (1-\alpha_1)^{n_1} A_1 \exp\left(-\frac{E_{a_1}}{RT}\right)$
- $\frac{d\alpha_i}{dt} = (\alpha_{i-1}-\alpha_i)^{n_i} A_i \exp\left(-\frac{E_{a_i}}{RT}\right)$ pour $2 \le i \le 4$

# Les différents mécanismes réactionnels développés

## 2e mécanisme réactionnel : mécanisme simplifié (2 étapes)

- $BS =$ Bois Sec
- $BS \xrightarrow{1} \nu_1 Charbon + (1-\nu_1)Gaz$
- $Charbon \xrightarrow{2} \nu_2\ Cendres + (1-\nu_2)Gaz$

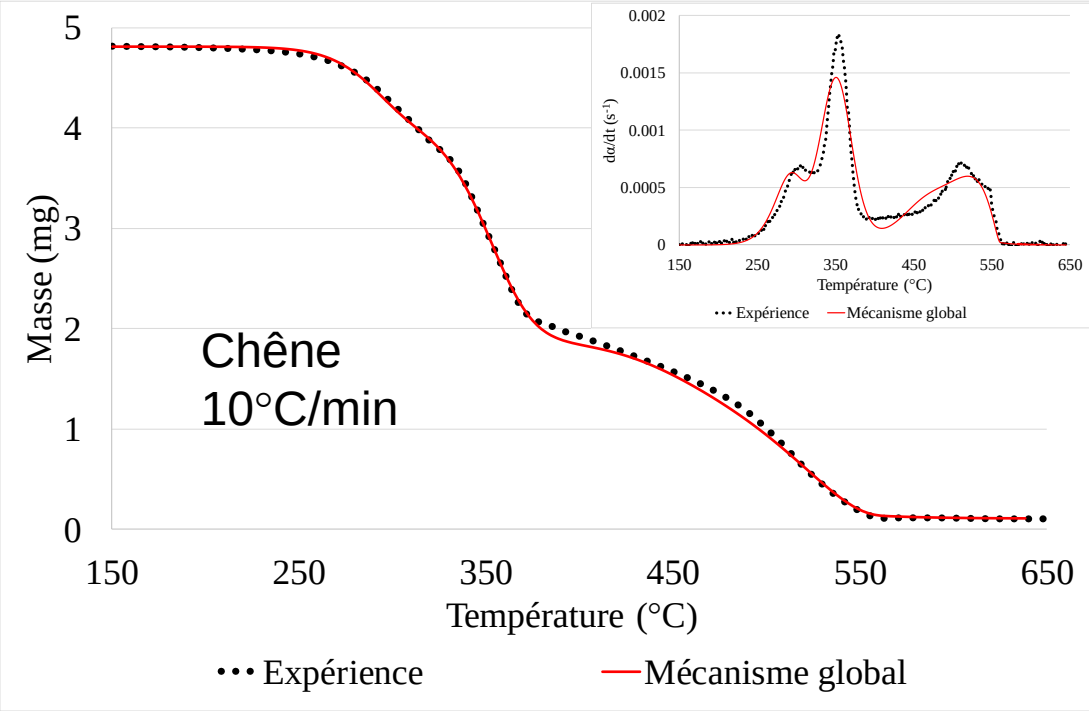


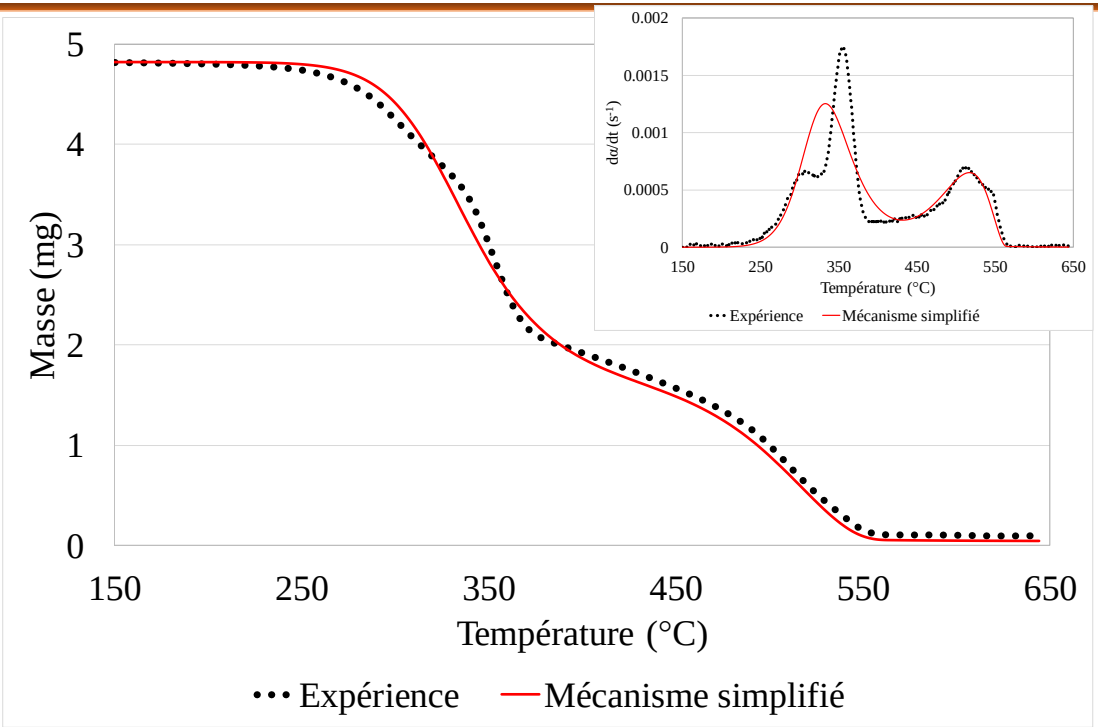

**Loi d'Arrhenius :**

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

- $\frac{d\alpha_1}{dt} = (1-\alpha_1)^{n_1} A_1 \exp\left(-\frac{E_{a_1}}{RT}\right)$
- $\frac{d\alpha_2}{dt} = (\alpha_1-\alpha_2)^{n_2} A_2 \exp\left(-\frac{E_{a_2}}{RT}\right)$

# Optimisation des paramètres cinétiques

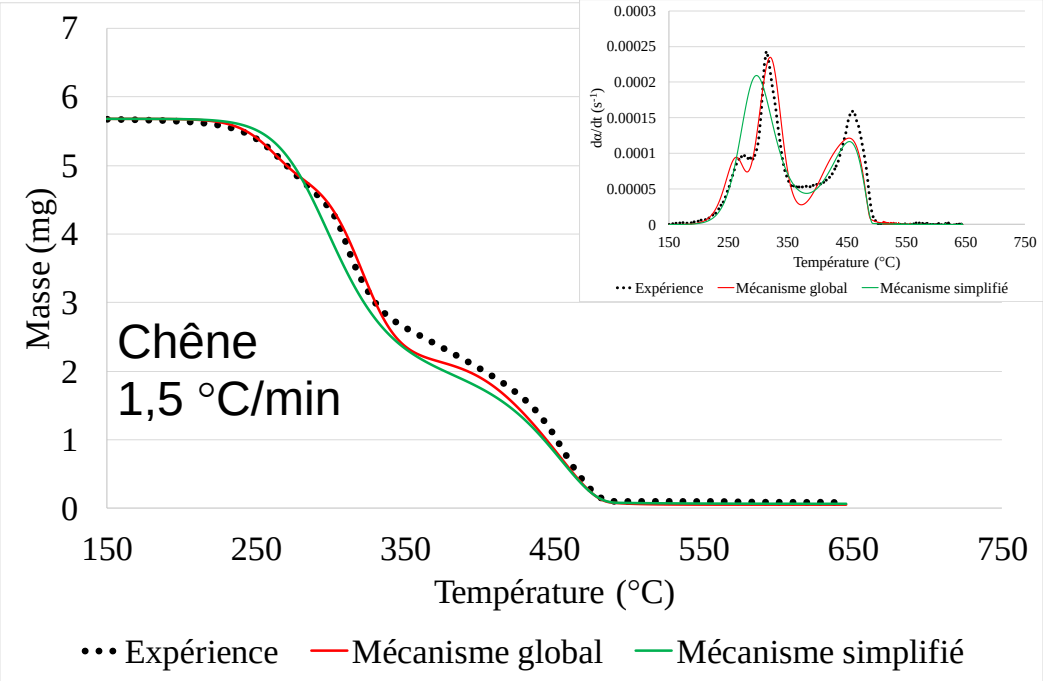


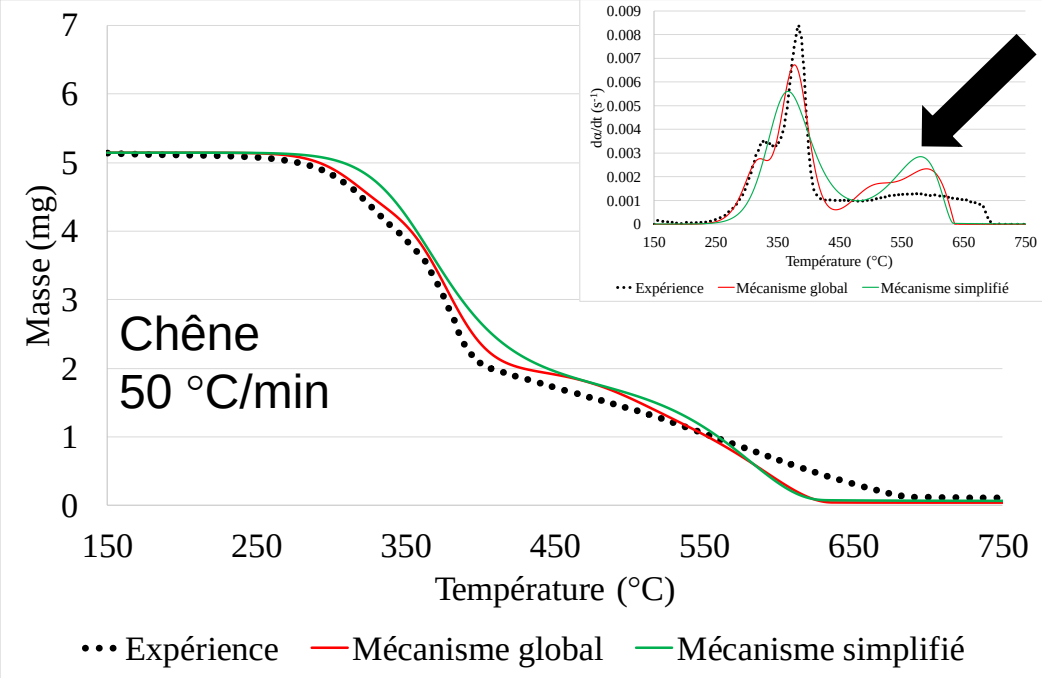




**Principaux résultats :**

- Bonne adéquation entre expériences et simulations pour toutes les vitesses de chauffe
- Meilleure performance obtenue avec le mécanisme global

# Validation des mécanismes réactionnels



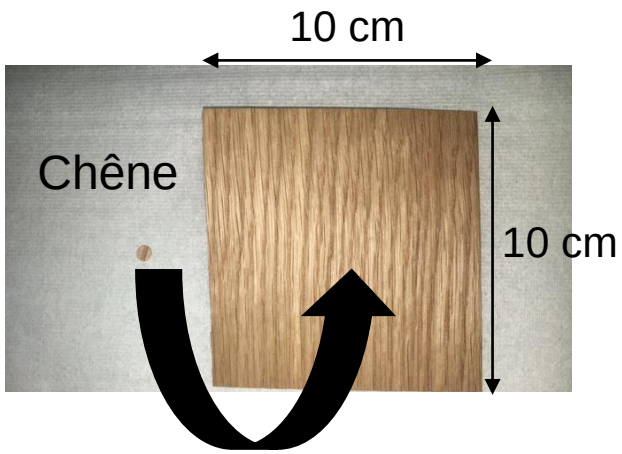

**Principaux résultats :**

- Bonne adéquation entre expériences et simulations à 1,5 et 7 °C/min
- Ecarts de prédiction sur l'oxydation du résidu charbonneux à 50 °C/min
- Meilleure performance pour le mécanisme global

# Sommaire

1. Etude expérimentale et validation des mécanismes réactionnels à l'échelle matière
2. Etude expérimentale et validation des mécanismes réactionnels à l'échelle matériau
3. Conclusion et perspectives

# L'échelle matériau



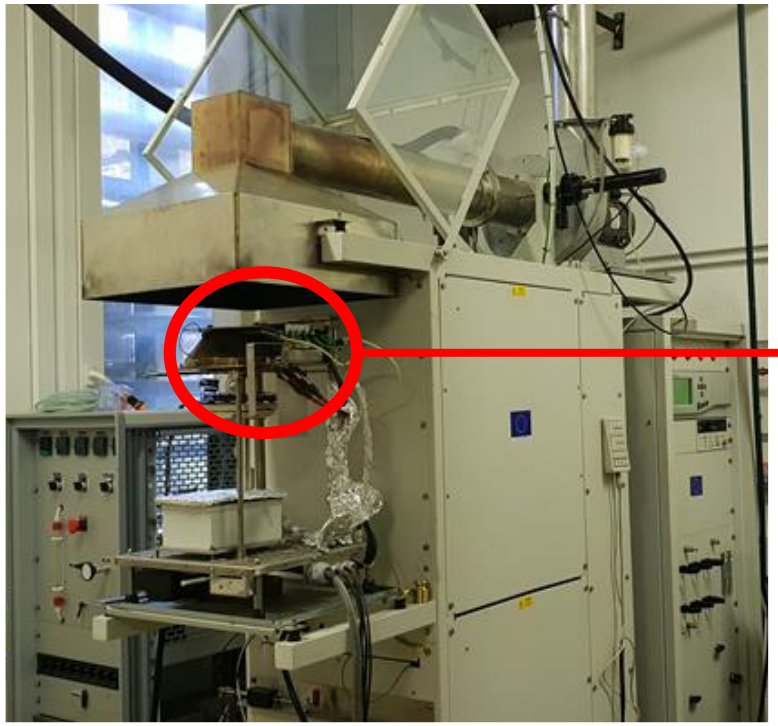

**Echelle matériau :**

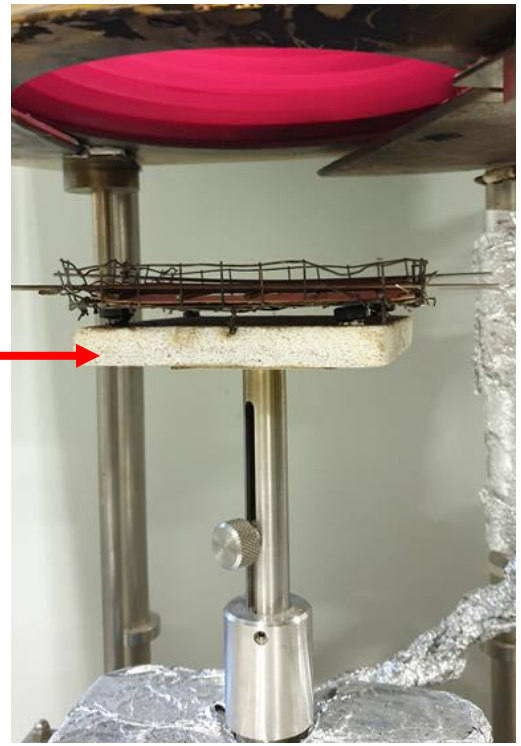
Epaisseur : 0,6 mm

Masses :

Eucalyptus : 3,9 g (± 0,4 g)

Chêne : 3,2 g (± 0,4 g)





Cône calorimètre

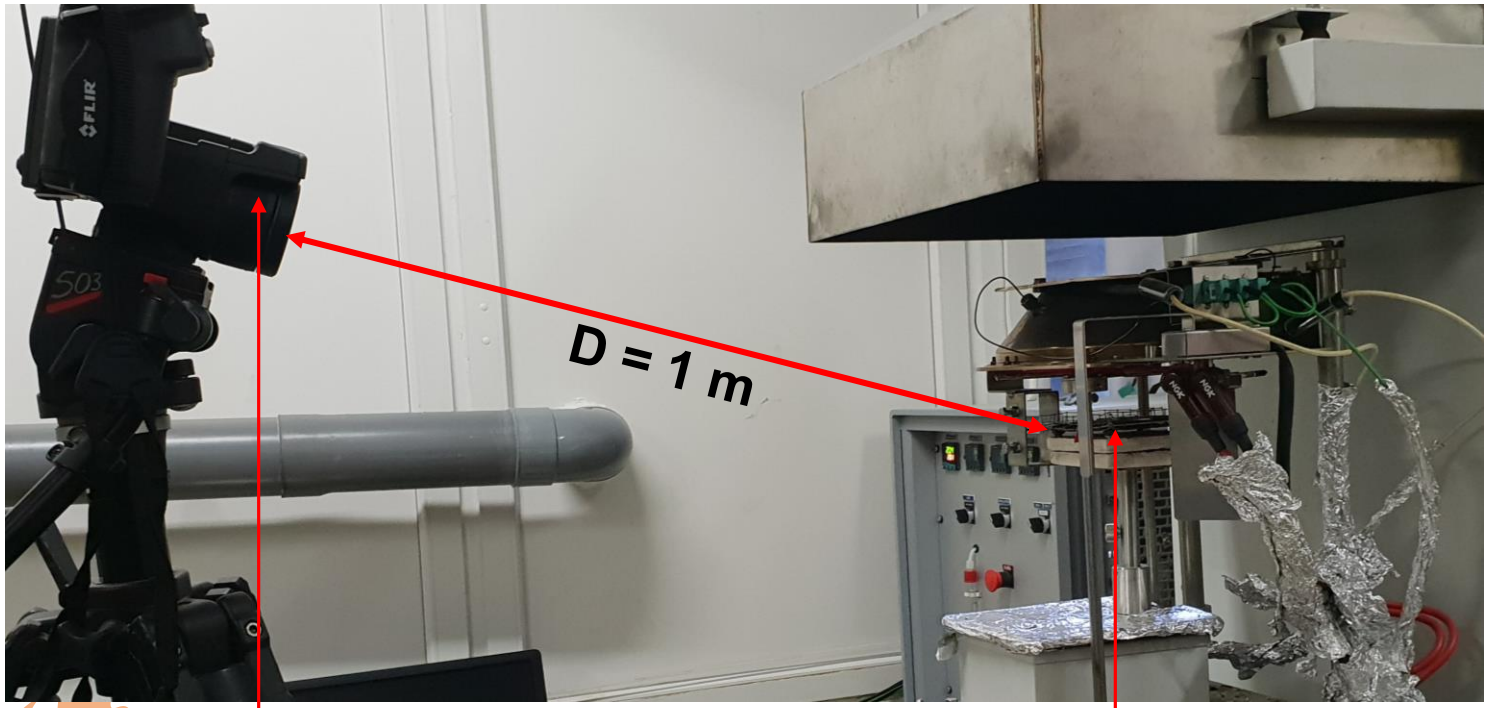
Densités de flux imposées :

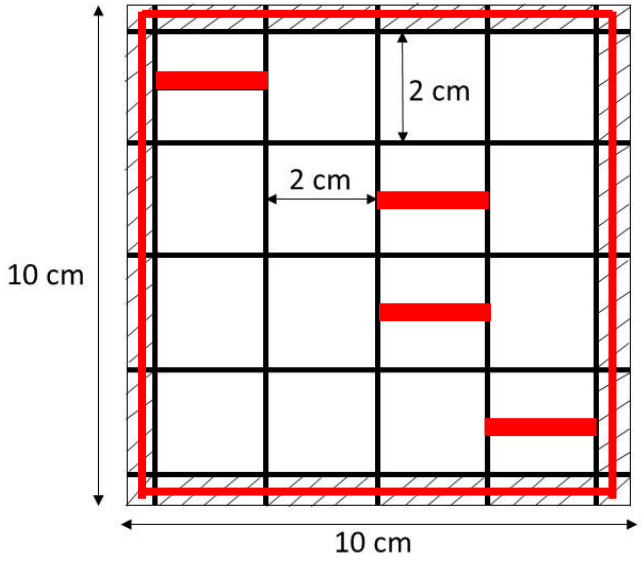
$$23 \leq \overline{\dot{q}''_e}\ (\mathrm{kW/m^2}) \leq 28{,}5$$

**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

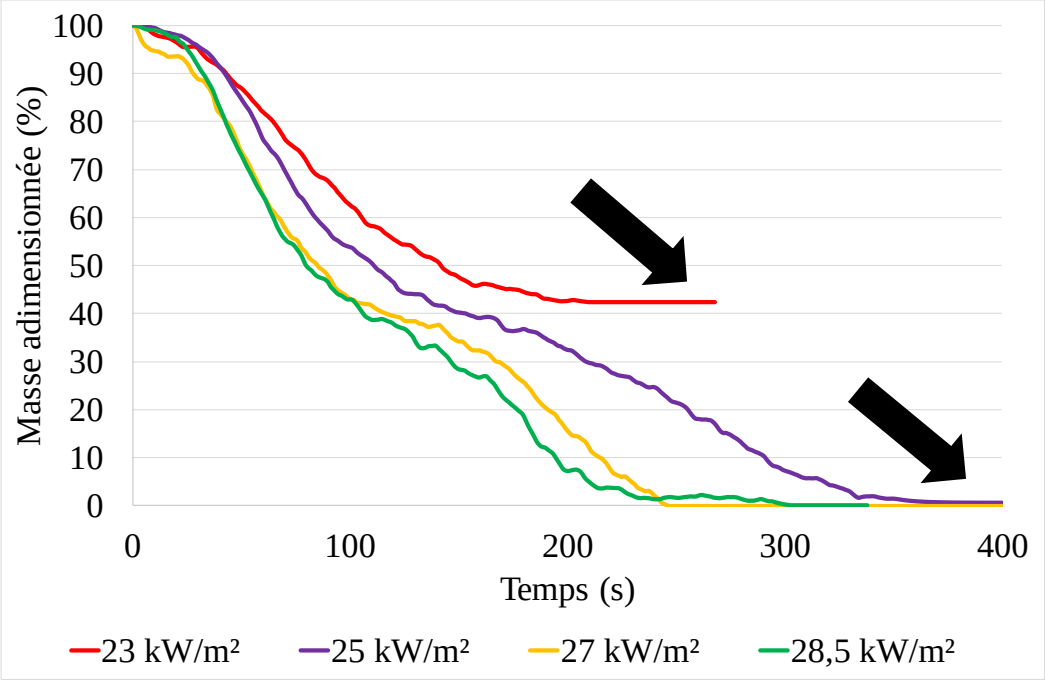


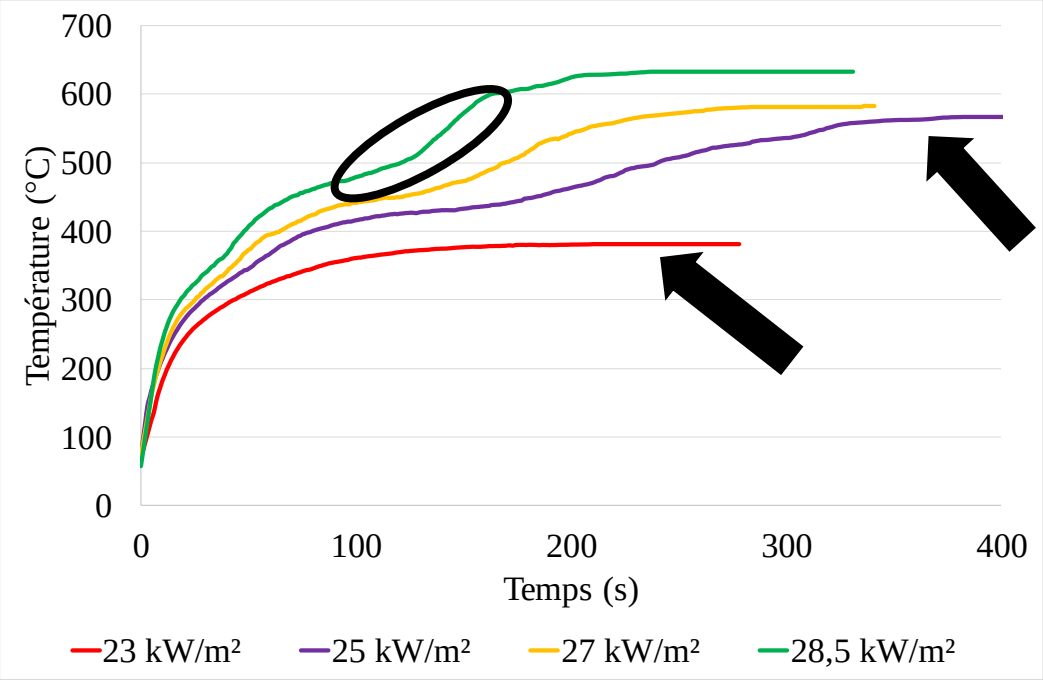




Caméra IR

Echantillon

# Résultats expérimentaux : Masses et Températures

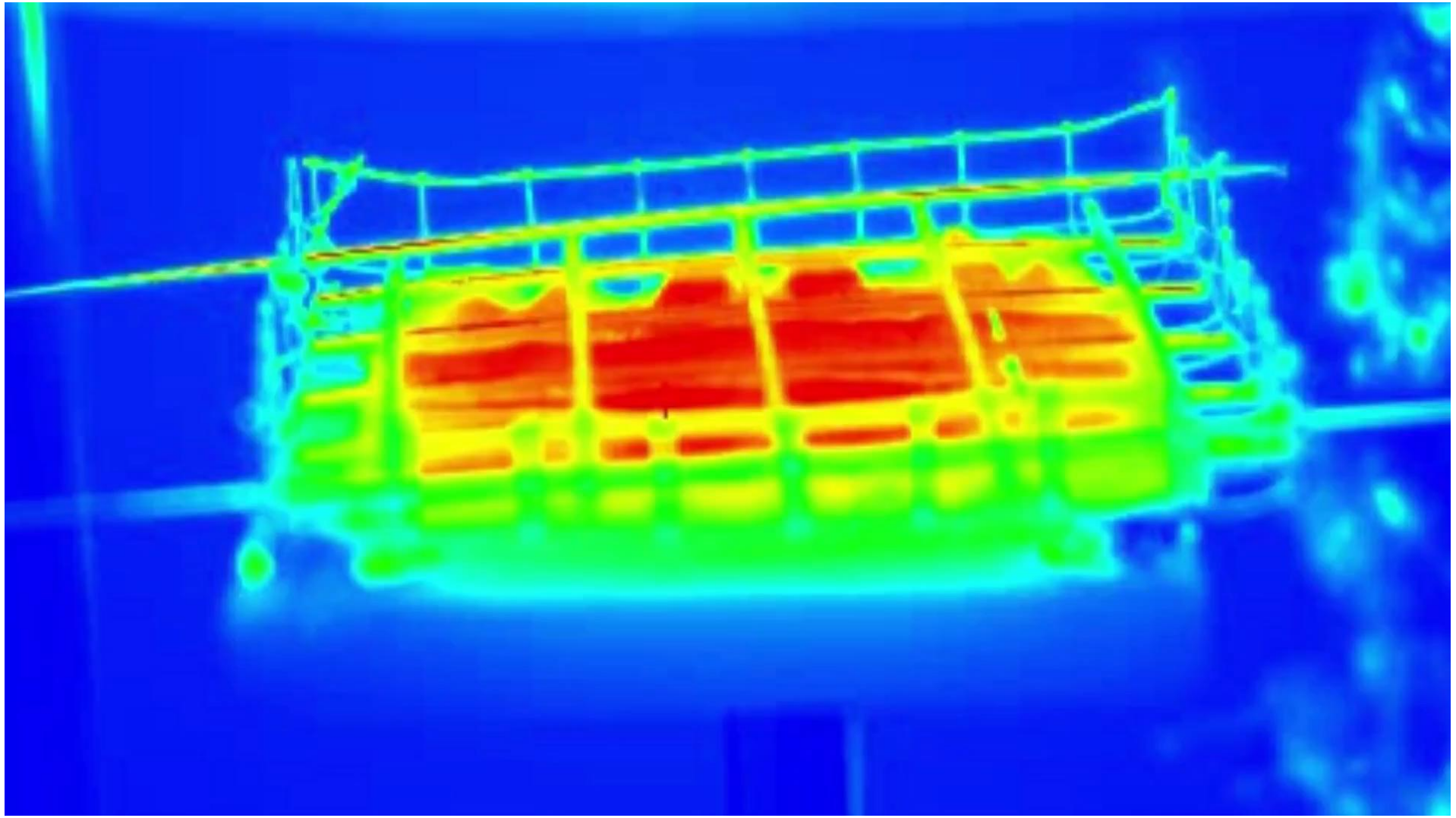



**Principaux résultats :**

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

# Propagation surfacique de l'oxydation du résidu charbonneux



# Simulations numériques avec GPYRO

**Calcul de la température :**

- Modélisation 1D
- Utilisation du code de calcul GPYRO
- Propriétés thermiques du bois sec fixées expérimentalement
- Propriétés thermiques du résidu charbonneux et des cendres prises dans la littérature
- Prise en compte de l'oxygène dans la loi d'Arrhenius

| | Chêne | Eucalyptus |
|---|---|---|
| Masse volumique (kg/m³) | 540 | 652 |
| Conductivité thermique (W/m.K) | 0,128 | 0,128 |
| Emissivité effective (-) | 0,94 | 0,94 |
| Coefficient $n_{\lambda,i}$ | 0 | 0 |

$$\lambda_i = \lambda_{0,i}\left(\frac{T}{T_r}\right)^{n_{\lambda,i}}$$

$$C_{p,i} = 1100 + 3{,}7\,T$$

*(Parker, 1989, Fire Safety Science)*

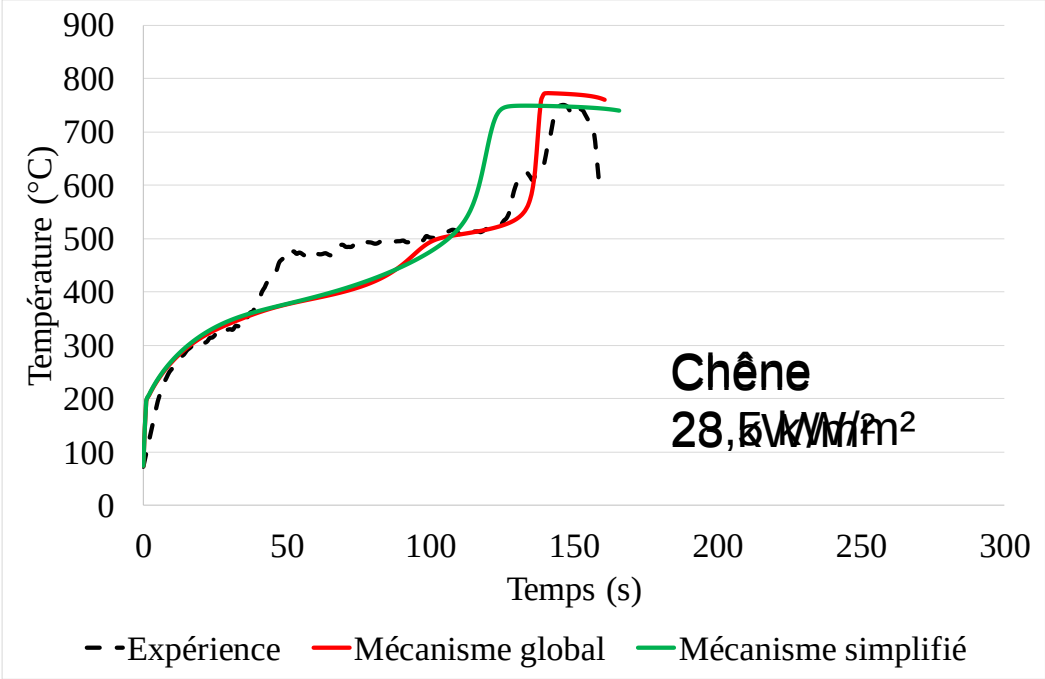
$$k_{0D}(T) = A_{0D}\exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

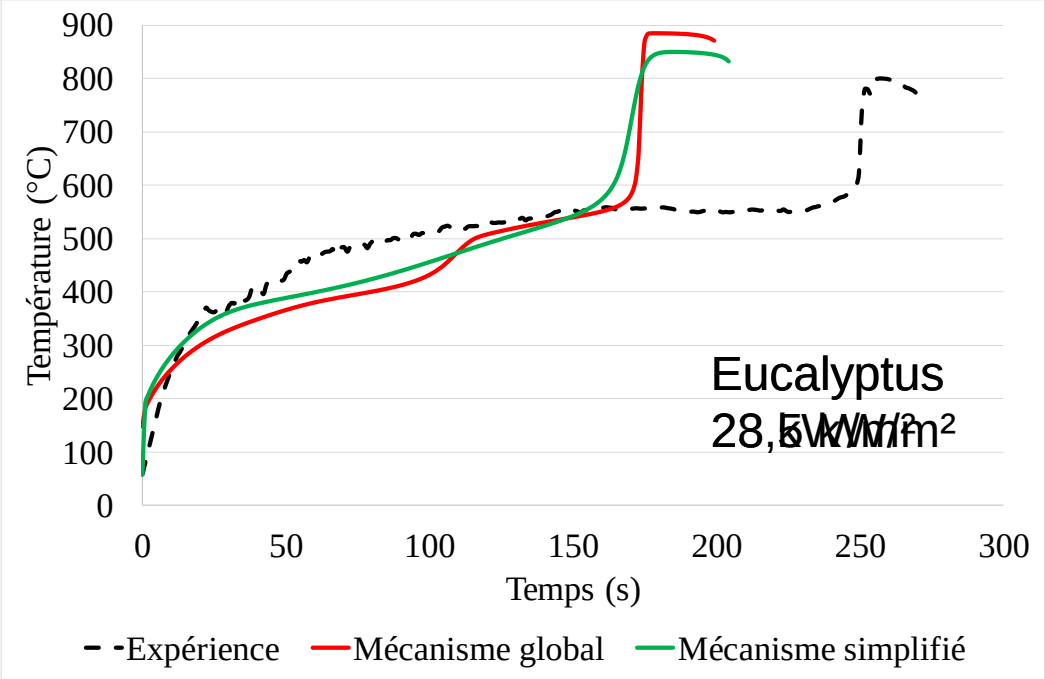
$$k_{1D}(T) = Y_{O_2}\,A_{1D}\exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

A l'échelle matière → A l'échelle matériau

$$\boldsymbol{A_{1D} = \frac{A_{0D}}{0,23}}$$

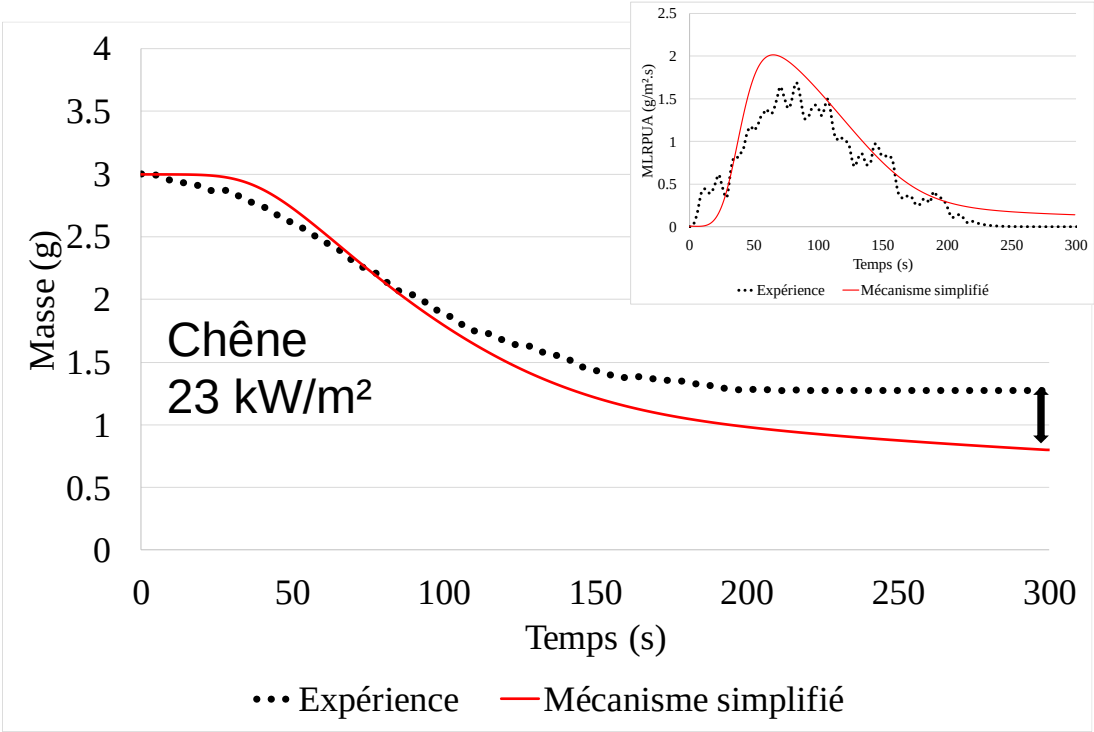
# Test des mécanismes réactionnels : Températures

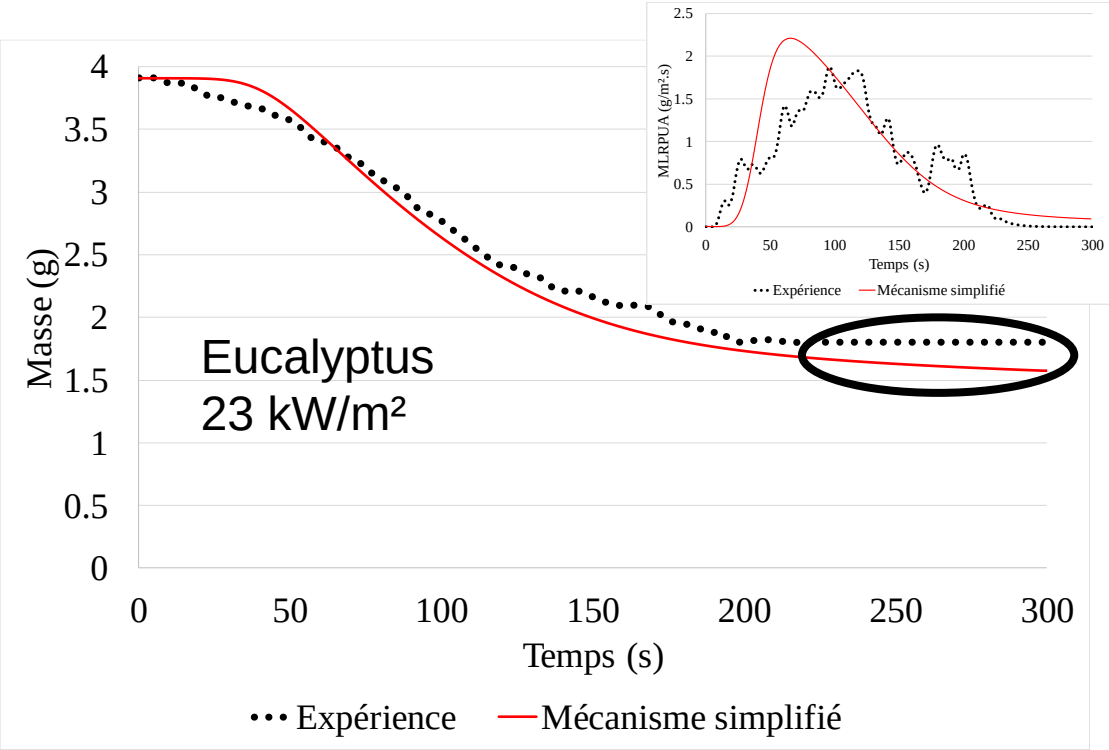



- Bonne prédiction par le mécanisme simplifié du début d'oxydation pour le chêne
- Début d'oxydation plus rapide pour l'eucalyptus
- Durée de l'oxydation numérique plus longue

# Test des mécanismes réactionnels : Sans oxydation



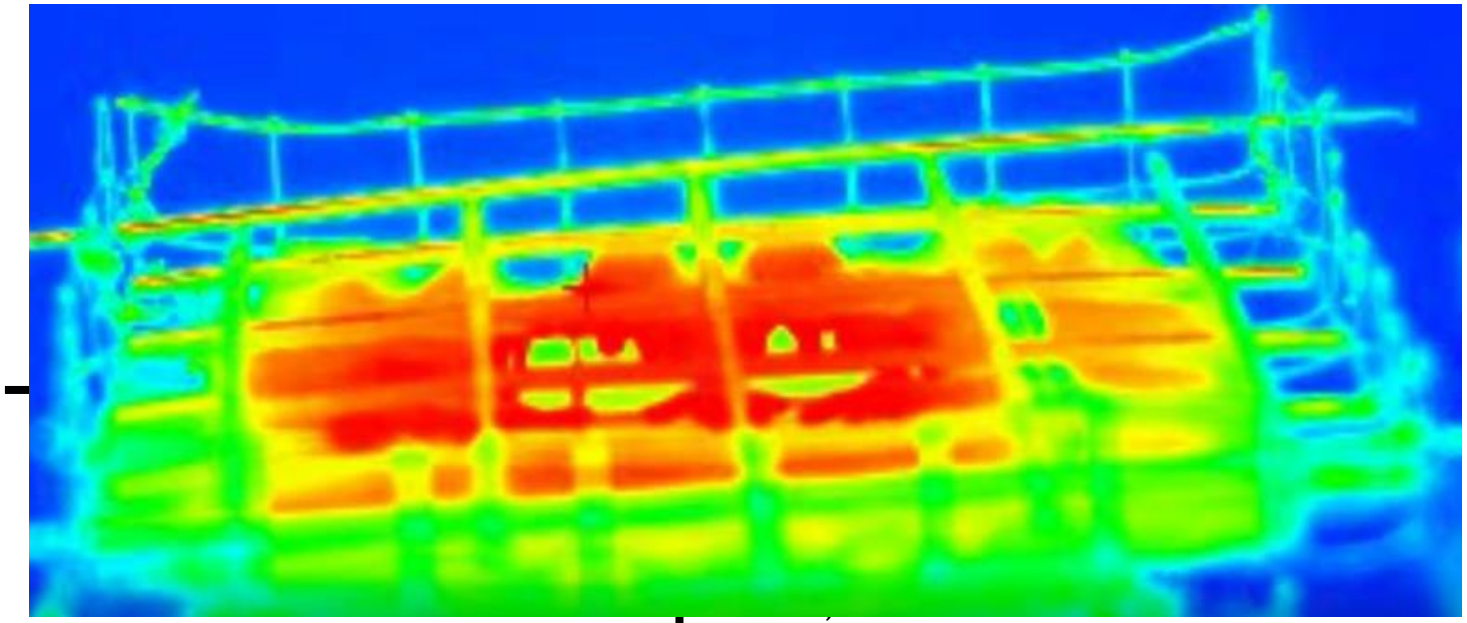

**Principaux résultats :**

- Prédiction fiable de la perte de masse des deux bois
- Sous-estimation de la masse finale restante pour les deux bois
- Meilleure représentation de la masse pour l'eucalyptus

# Principe de la convolution des données numériques

Surface expérimentale d'oxydation du résidu charbonneux $A_{char}$

2D



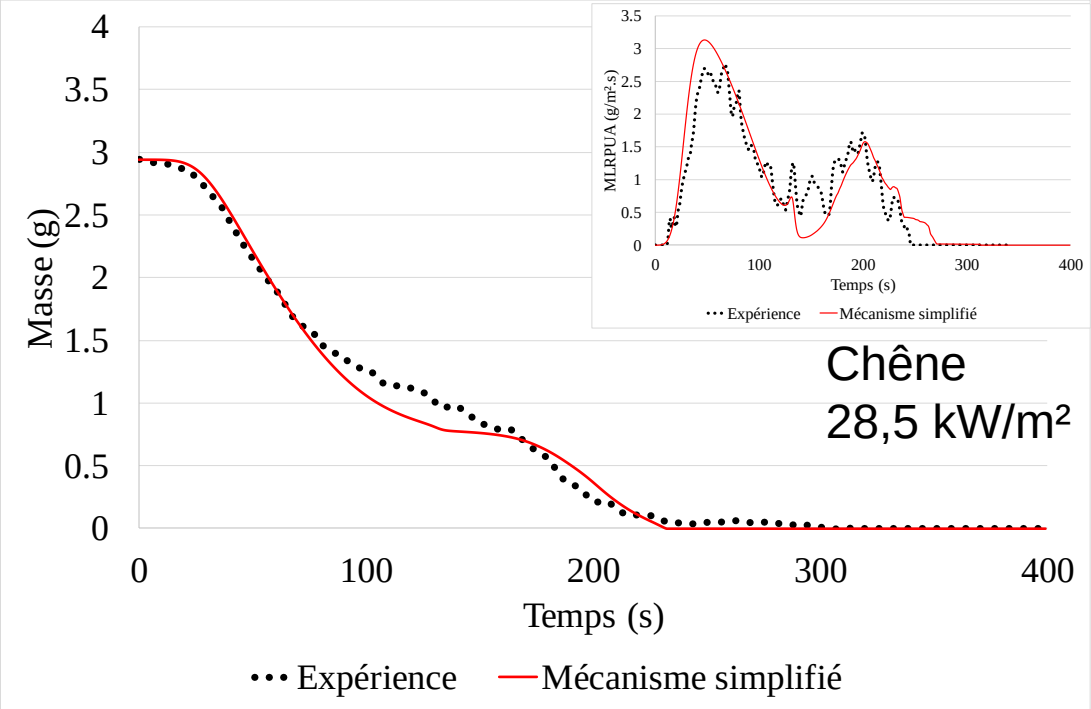
1D

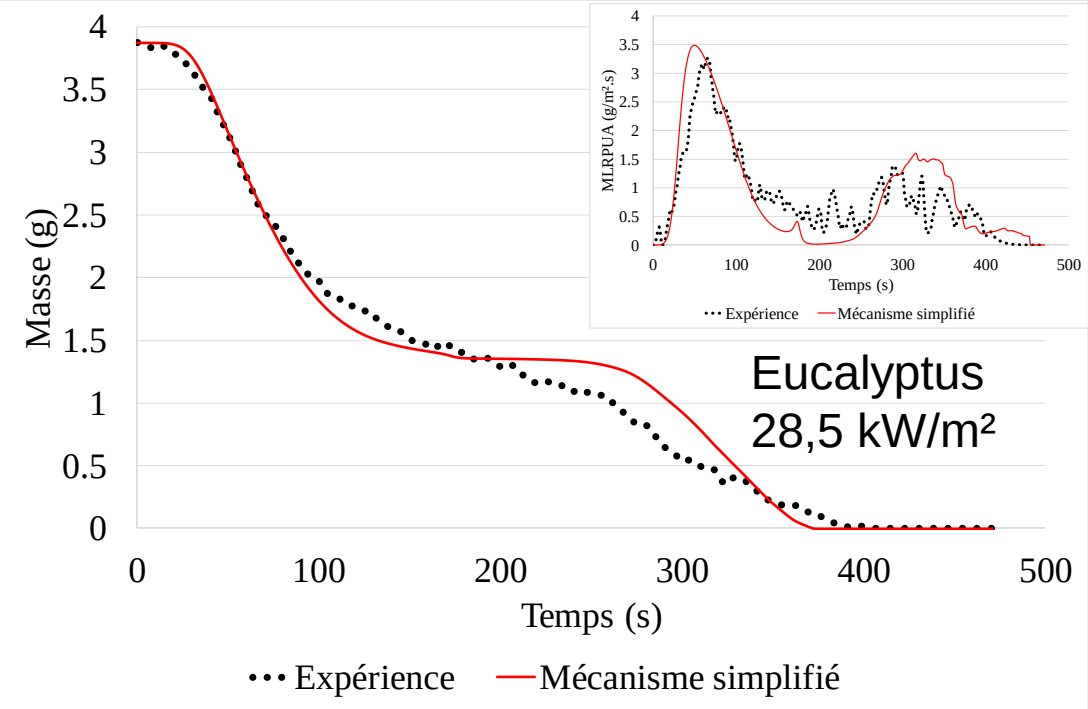
GPYRO 1D
MLR et masse numérique

2D

$MLR_{num} = \dot{m}_{gaz} + \dot{m}_{char,conv}$ uniquement avec oxydation

# Test des mécanismes réactionnels : Avec oxydation

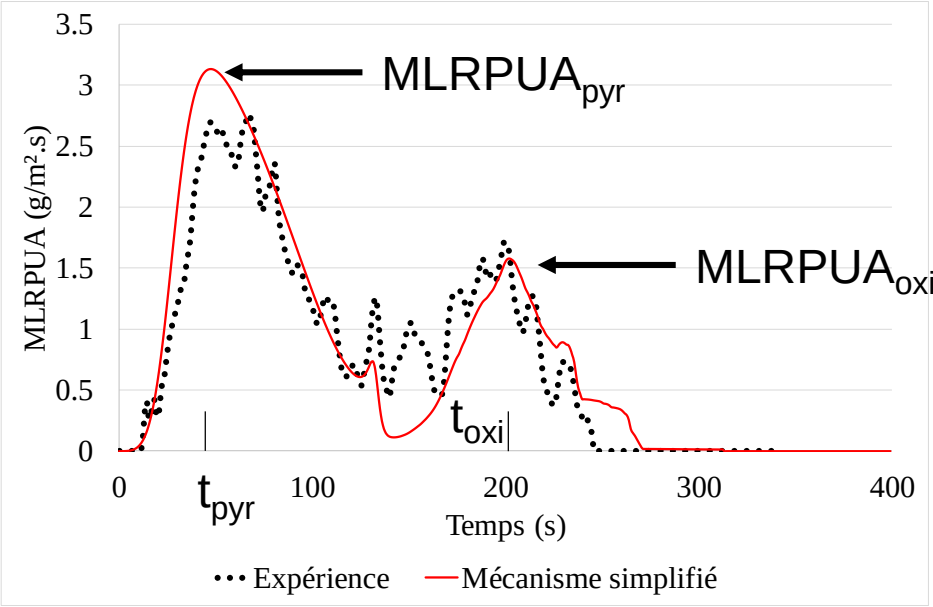


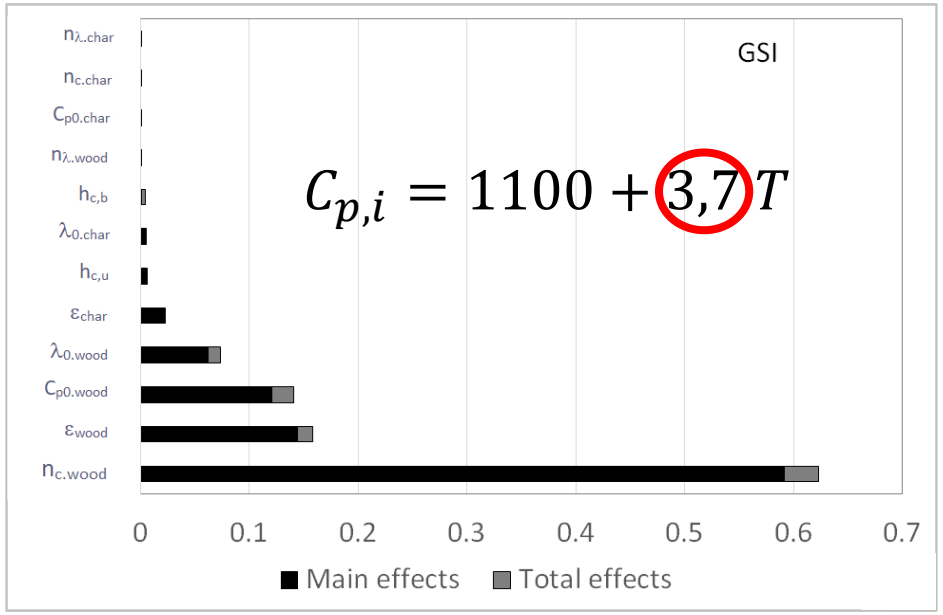




- Bonne représentation de la perte de masse des deux bois
- Meilleure adéquation modèle-expérience pour le chêne
- Meilleures prédictions sur l'ensemble des densités de flux testées
- Meilleure performance pour le mécanisme simplifié

# Analyse de sensibilité

- Toutes les propriétés thermiques du bois sec et du résidu charbonneux
- Variation de ± 20 % de chaque paramètre d'entrée
- Etude de l'influence sur 4 paramètres de sortie
- Utilisation de l'indice de sensibilité généralisé pour évaluer l'influence des entrées




$$C_{p,i} = 1100 + 3{,}7\,T$$

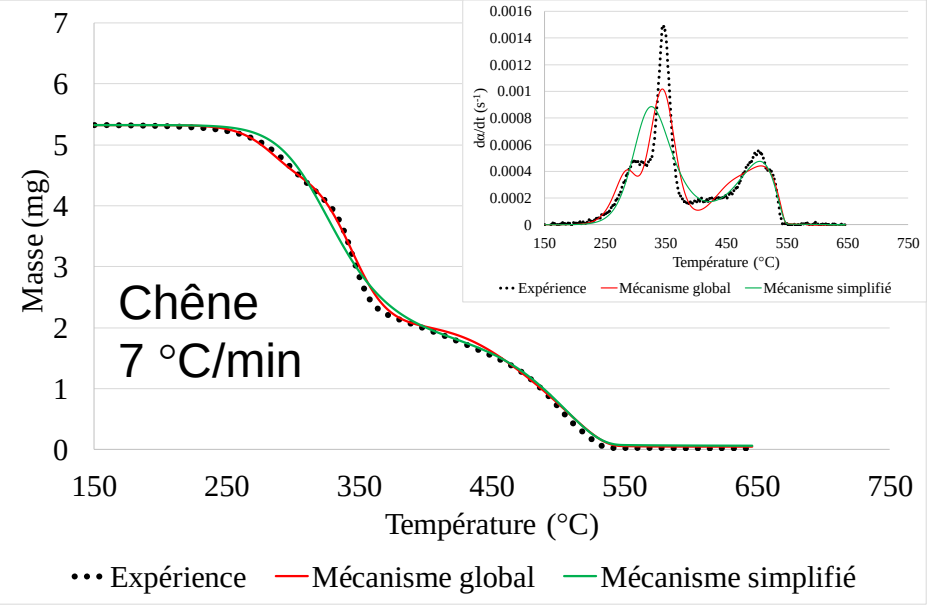
# Sommaire

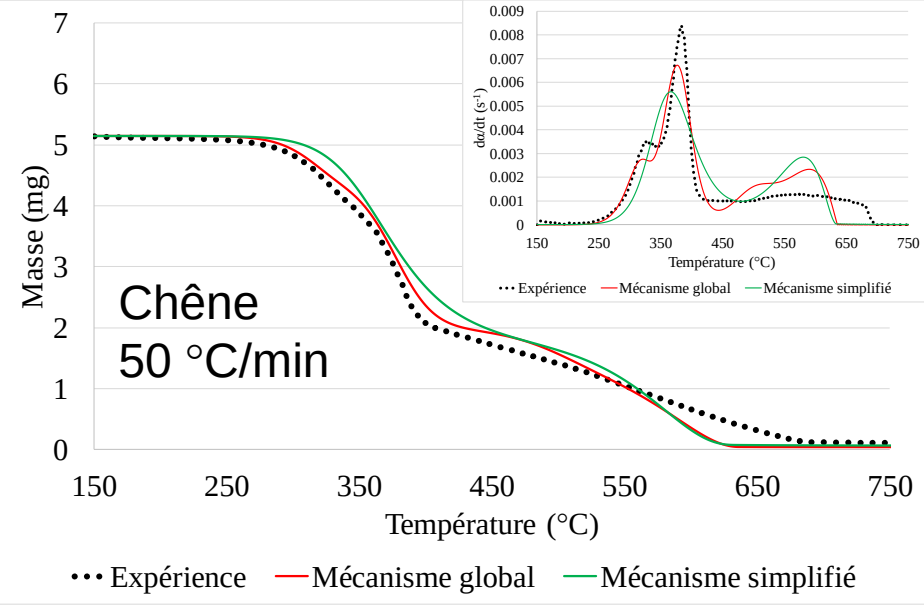
1. Etude expérimentale et validation des mécanismes réactionnels à l'échelle matière
2. Etude expérimentale et validation des mécanismes réactionnels à l'échelle matériau
3. Conclusion et perspectives

# Conclusion

## Echelle matière :

- Développement de 2 mécanismes réactionnels : 1 à 4 étapes et 1 à 2 étapes
- Bonne adéquation expériences – simulations pour le chêne et l'eucalyptus
- Validation à l'intérieur et en dehors de la gamme d'optimisation (à faibles vitesses)
- Meilleure performance obtenue avec le mécanisme global
- Etudes supplémentaires nécessaires au-dessus de 50 °C/min



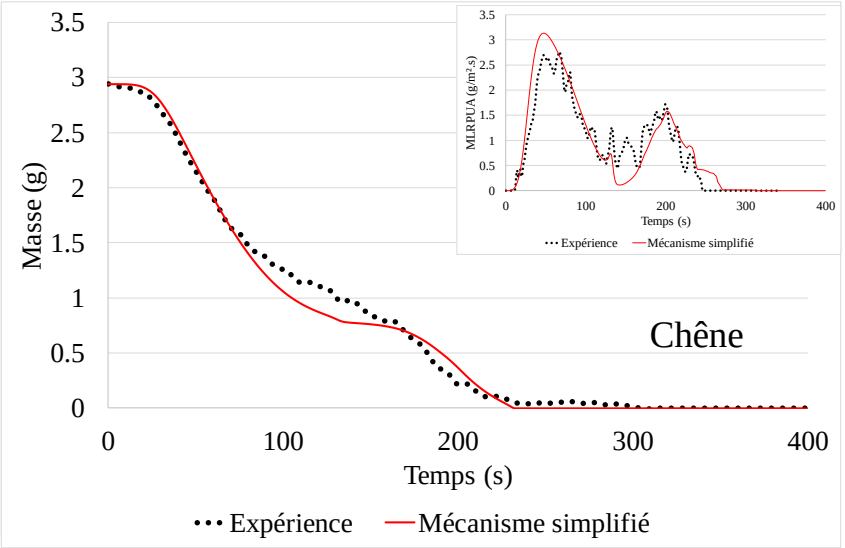



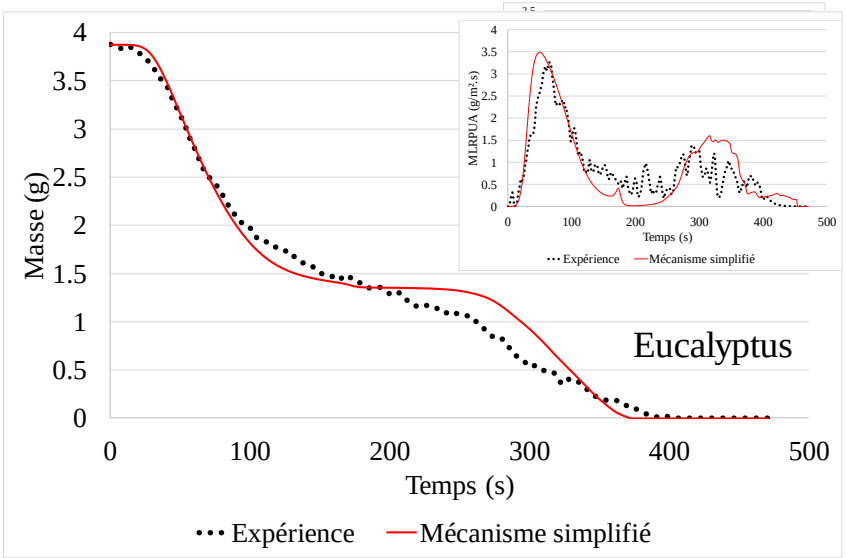
# A l'échelle matériau

## Echelle matériau :

- Expériences dans une gamme de densités de flux entre 23 et 28,5 kW/m²
- Conditions ventilées, sans flammes avec condition limite de convection libre
- Bonne adéquation expériences – simulations sans oxydation du résidu charbonneux
- Bonne adéquation expériences – simulations sans oxydation du résidu charbonneux
- Meilleure performance obtenue avec le mécanisme simplifié à cette échelle

**Sans oxydation du résidu charbonneux**



# Perspectives

## Echelle matière :

- Etude à l'échelle matière pour des vitesses de chauffe > 50 °C/min

## Echelle matériau :

- Etude à l'échelle matériau pour des densités de flux > 28,5 kW/m² dans des conditions sans flamme
- Etude expérimentale et numérique du couplage de la dégradation thermique avec la flamme

# Merci de votre attention

Contact : gerandi_g@universita.corsica