



LABORATOIRE
SCIENCES POUR
L'ENVIRONNEMENT
UMR 6134 SPE



Etude expérimentale et numérique multi-échelle de la dégradation de l'épicéa sous argon

Guillaume GERANDI¹, Lucas TERREI^{1,2}, Virginie TIHAY-FELICELLI¹, Zoubir ACEM²,
Gilles PARENT², Paul-Antoine SANTONI¹

1 UMR SPE 6134 CNRS, Université de Corse, France

2 Université de Lorraine, CNRS, LEMTA, F-54000 Nancy, France

29^e rencontres du GDR Feux

Le 01/07/2021

Collaboration entre SPE et LEMTA

Travail collaboratif entre 2 Post-Doctorants :

Lucas Terrei :

Etude expérimentale de l'auto-inflammation, de la dégradation et de l'extinction du bois :

- Etude de plaques d'épicéa et de hêtre épaisses (5 cm).
- Mesure de température par thermocouples noyés.
- Détermination de critères d'inflammation et d'extinction.
- Essais sous différentes atmosphères à l'échelle du cône.

Guillaume Gerandi :

Etude expérimentale et numérique multi-échelle de la dégradation du bois :

- Etude de plaques de chêne et d'eucalyptus très fines (0.6 mm).
- ATG – Développement de 4 mécanismes réactionnels.
- Cône calorimètre – Essais sous air en configuration horizontale.
- Modélisation 0D et 1D (GPYRO) de la dégradation à l'échelle du cône.



Etude expérimentale et numérique multi-échelle de la dégradation de l'épicéa sous argon

Objectif du travail

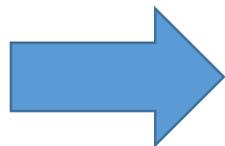
Ce qui existe :

- Publications principalement expérimentales ou numériques.
- Expériences réalisées principalement sous azote et sous air.
- Mesures de température à certaines profondeurs.
- Peu d'études multi-échelles.

Dans cette étude :

- Etude de la dégradation de l'épicéa sous argon.
- Mesure de la température tous les 2 mm avec des thermocouples noyés.
- Approche multi-échelle mélangeant expériences et modélisations.

Objectif du travail

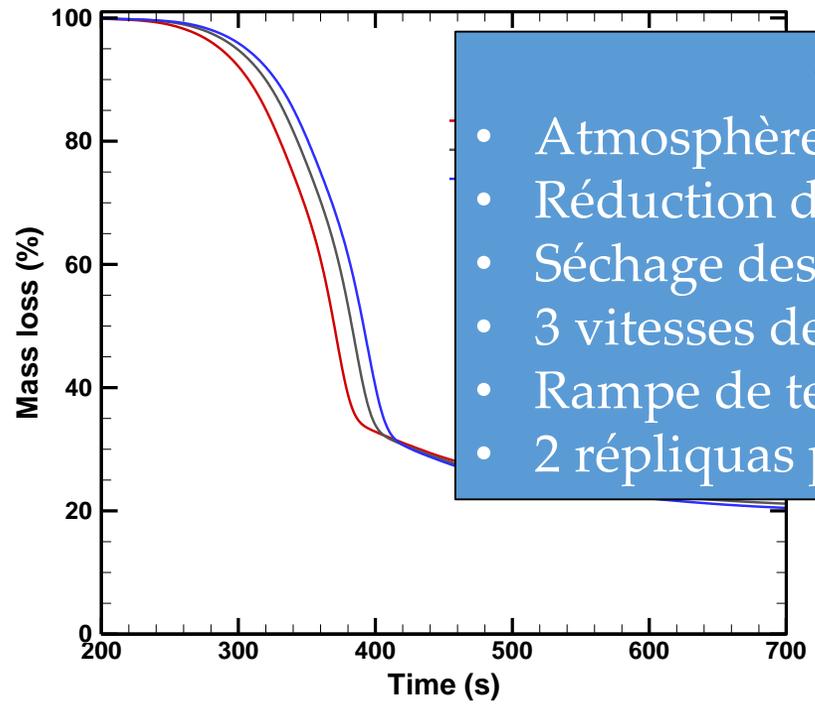


- Améliorer la prédiction de la perte de masse et des températures avec un modèle 1D.
- Etudier l'effet d'échelle de la cinétique.
- Etudier l'influence des propriétés thermiques sur un modèle 1D.

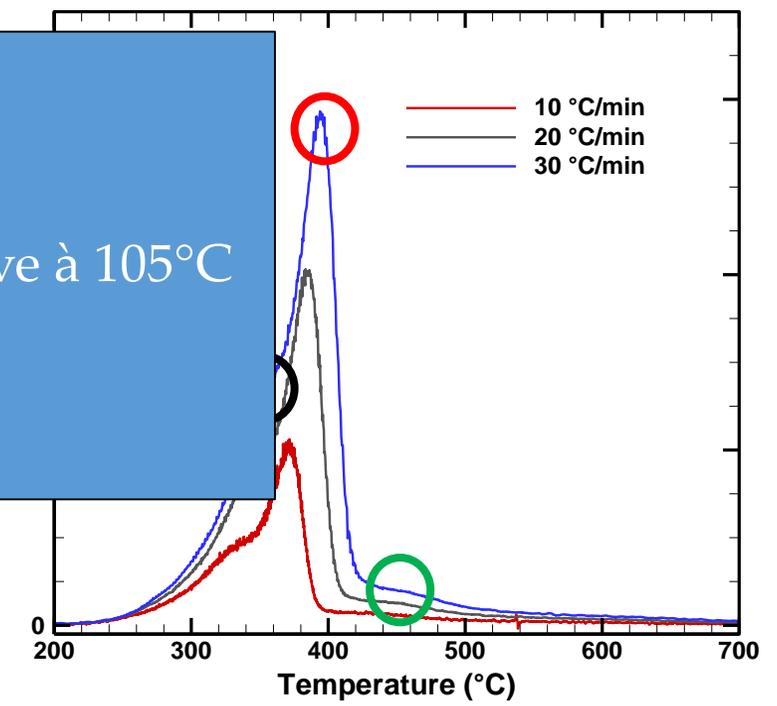
Plan

1. Etude de la dégradation de l'épicéa à l'échelle matière
 - Protocole et résultats expérimentaux
 - Développement d'un mécanisme réactionnel
 - Comparaison des résultats expérimentaux et numériques
2. Etude de la dégradation de l'épicéa à l'échelle matériau
 - Protocole et résultats expérimentaux
 - Modélisation et résultats numériques
3. Analyse de sensibilité du modèle 1D
4. Conclusion

Résultats expérimentaux en ATG



- Protocole expérimental :
 - Atmosphère : Argon
 - Réduction du bois en poudre
 - Séchage des échantillons 24h dans une étuve à 105°C
 - 3 vitesses de chauffe : 10, 20 et 30 °C/min
 - Rampe de température entre 30°C et 900°C
 - 2 répliquas par vitesse



- Même tendance en fonction de la vitesse de
- 3 réactions identifiables :
 - Dégradation de l'hémicellulose
 - Dégradation de la cellulose
 - Dégradation de la lignine
- Taux de résidu carbonneux environ égal à



3 réactions pour le mécanisme réactionnel

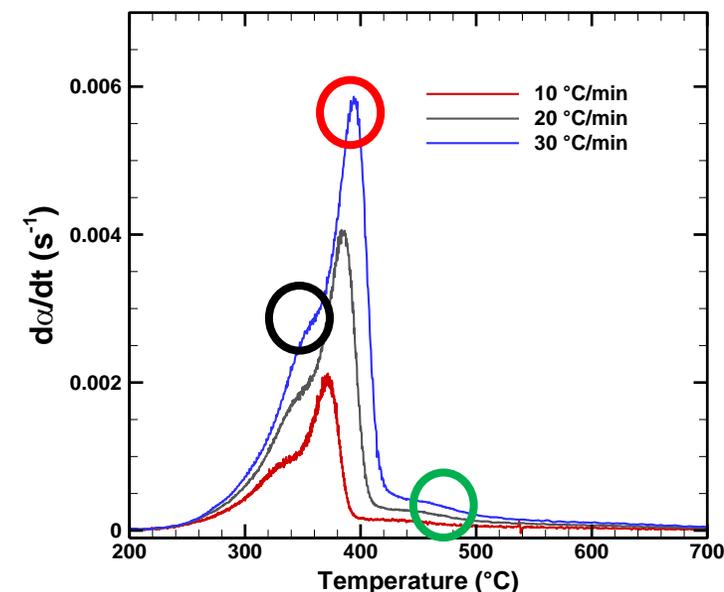
Mécanisme réactionnel

Mécanisme global en 3 étapes :

- $DW \xrightarrow{1} v_1 DW_1 + (1 - v_1) Gaz$
- $DW_1 \xrightarrow{2} v_2 DW_2 + (1 - v_2) Gaz$
- $DW_2 \xrightarrow{3} v_3 Charbon + (1 - v_3) Gaz$

Loi d'Arrhenius :

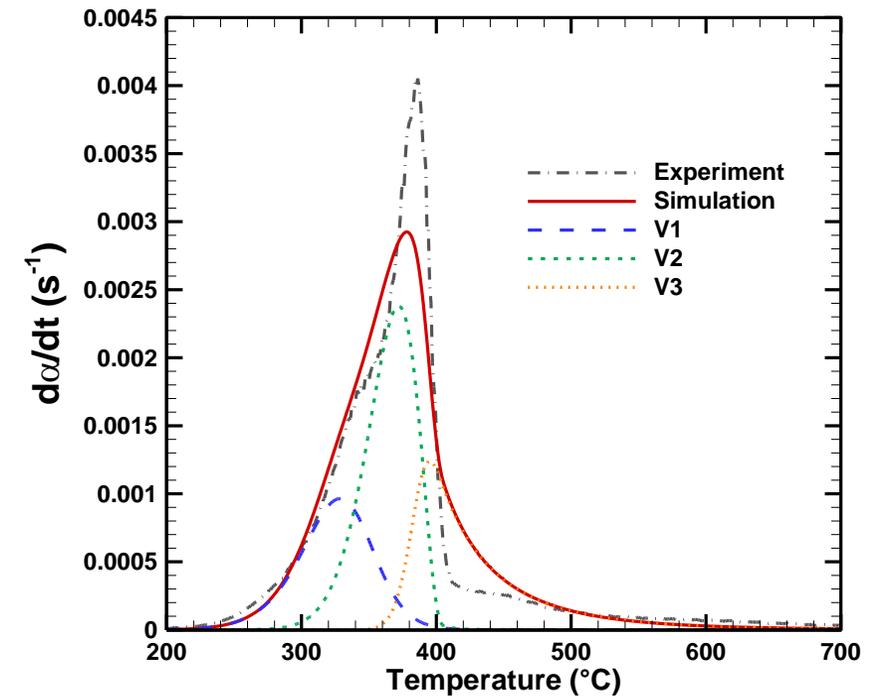
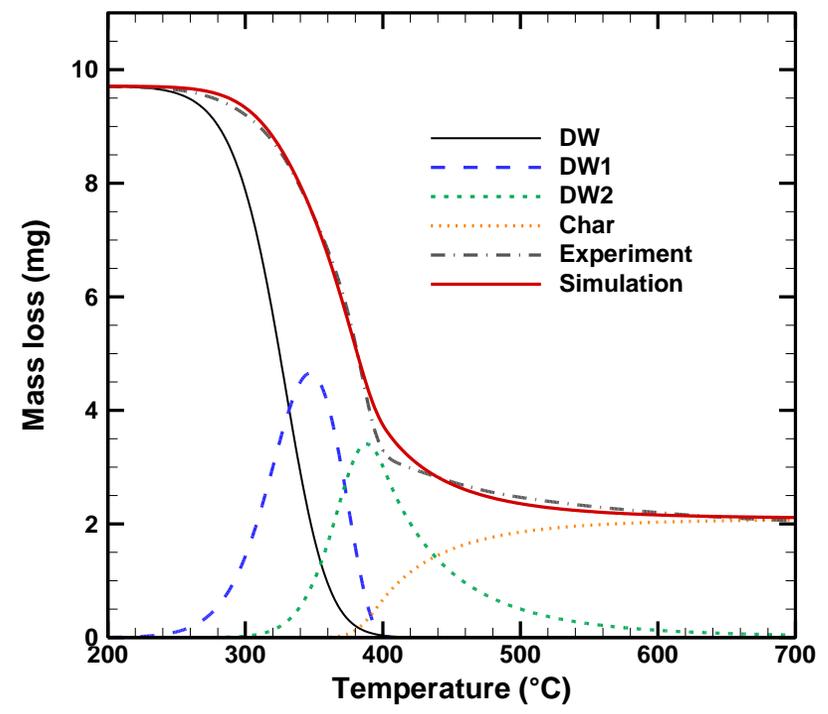
- $\frac{d\alpha_1}{dt} = (1 - \alpha_1)^{n_1} A_1 \exp\left(-\frac{E_{a1}}{RT}\right)$
- $\frac{d\alpha_i}{dt} = (\alpha_{i-1} - \alpha_i)^{n_i} A_i \exp\left(-\frac{E_{ai}}{RT}\right)$ pour $2 \leq i \leq 3$



- Détermination des paramètres cinétiques par optimisation sur les 3 vitesses de chauffe.
- Utilisation de l'algorithme de Levenberg-Marquardt.
- Utilisation du MSE comme fonction d'optimisation de l'algorithme :

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

Résultats des simulations à 20°C/min

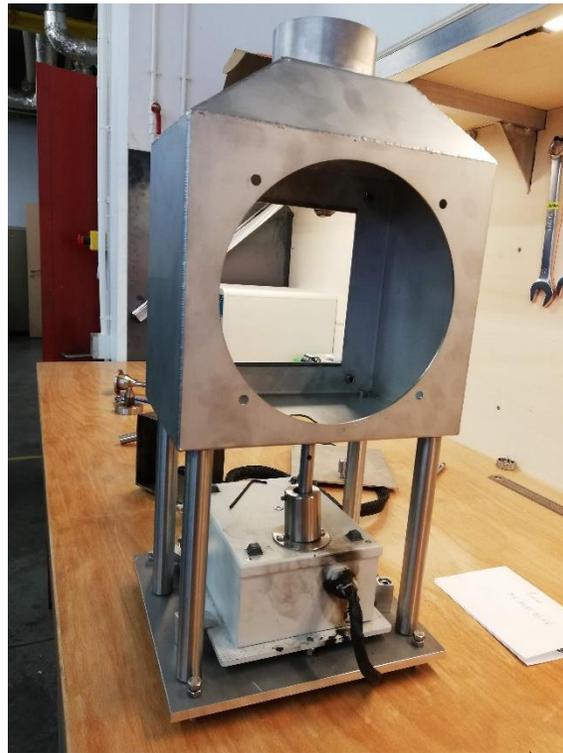
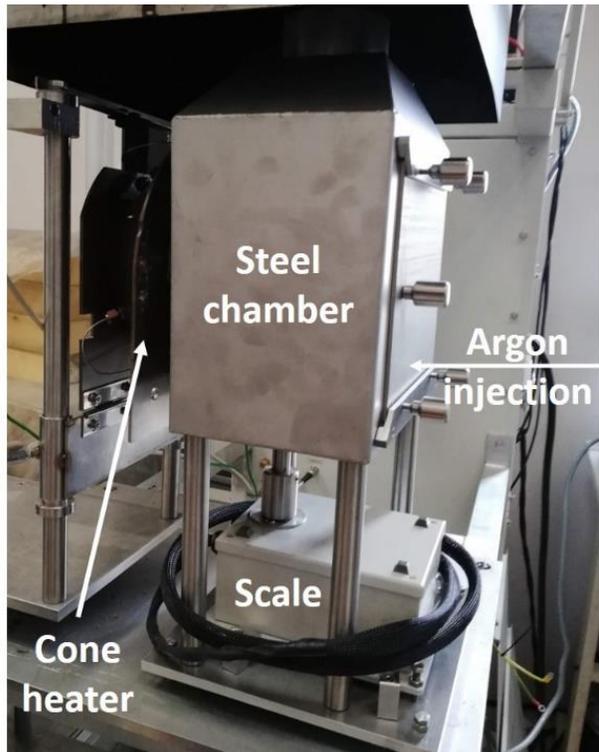


- Bonne adéquation entre expériences et simulation pour toutes les vitesses de chauffes
- $1.16 \leq RMSE(\%) \leq 1.53$
- Prédiction du taux de résidu carbonneux à 21%
- Principal écart sur la courbe de $\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)$ au niveau du pic principal

Plan

1. Etude de la dégradation de l'épicéa à l'échelle matière
 - Protocole et résultats expérimentaux
 - Développement d'un mécanisme réactionnel
 - Comparaison des résultats expérimentaux et numériques
2. Etude de la dégradation de l'épicéa à l'échelle matériau
 - Protocole et résultats expérimentaux
 - Modélisation et résultats numériques
3. Analyse de sensibilité du modèle 1D
4. Conclusion

Dégradation du bois sous argon : protocole expérimental



- Injection d'argon pour obtenir un taux d'oxygène inférieur à 6 %.
- Fenêtre saphir : laisser passer le rayonnement et éviter que les gaz ne s'échappent.
- Mesures : température de surface, MLRPUA et température en profondeur.
- Pas d'inflammation ni de combustion de résidus carbonneux.
- Echantillon d'épicéa de 5 cm d'épaisseur.
- Humidité : ~ 10 %
- Dimensions : 20 x 20 x 5 cm³

Dégradation du bois sous argon : paramètres GPYRO (Modèle 1D)

Échantillon épicea

- épaisseur : 5 cm
- masse volumique moyenne initiale : 534 kg/m³
- conductivité thermique : 0,108 W.m⁻¹.K⁻¹
- C_p : 1770 J.kg⁻¹.K⁻¹
- Variation de l'émissivité : $\varepsilon_{Dw} = 0,85$; $\varepsilon_{Dw1} = 0,70$; $\varepsilon_{Dw2} = 0,70$; $\varepsilon_{char} = 0,95$
- Paramètres cinétiques déterminés en ATG
- Coefficient de convection (convection forcée) : 22 W.m⁻².K⁻¹

Evolution des propriétés thermiques :

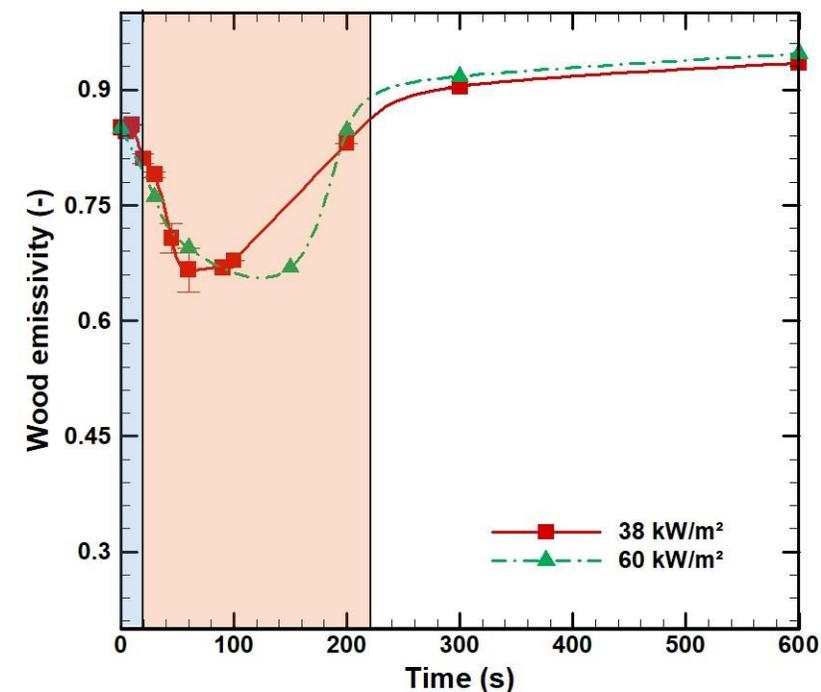
$$\lambda_i(T) = \lambda_{0,i} \left(\frac{T}{T_r} \right)^{n_\lambda}$$

$$C_{p_i}(T) = C_{p_{0,i}} \left(\frac{T}{T_r} \right)^{n_c}$$

$$\bar{\varepsilon} = \sum \varepsilon_i X_i$$

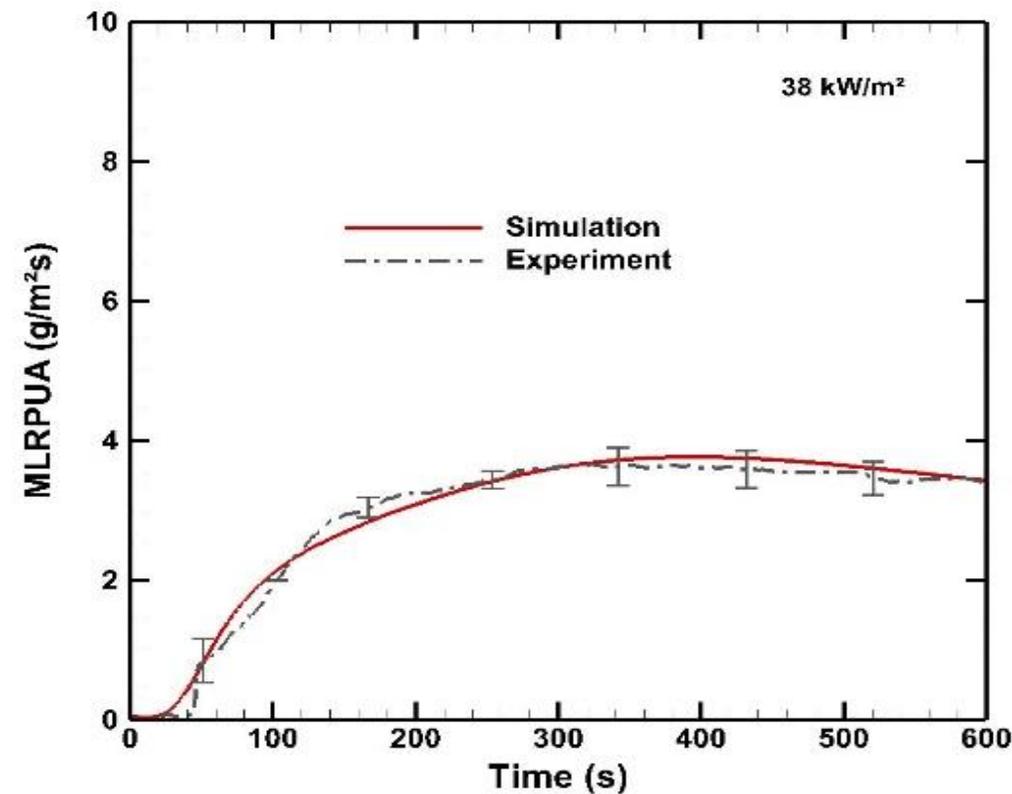
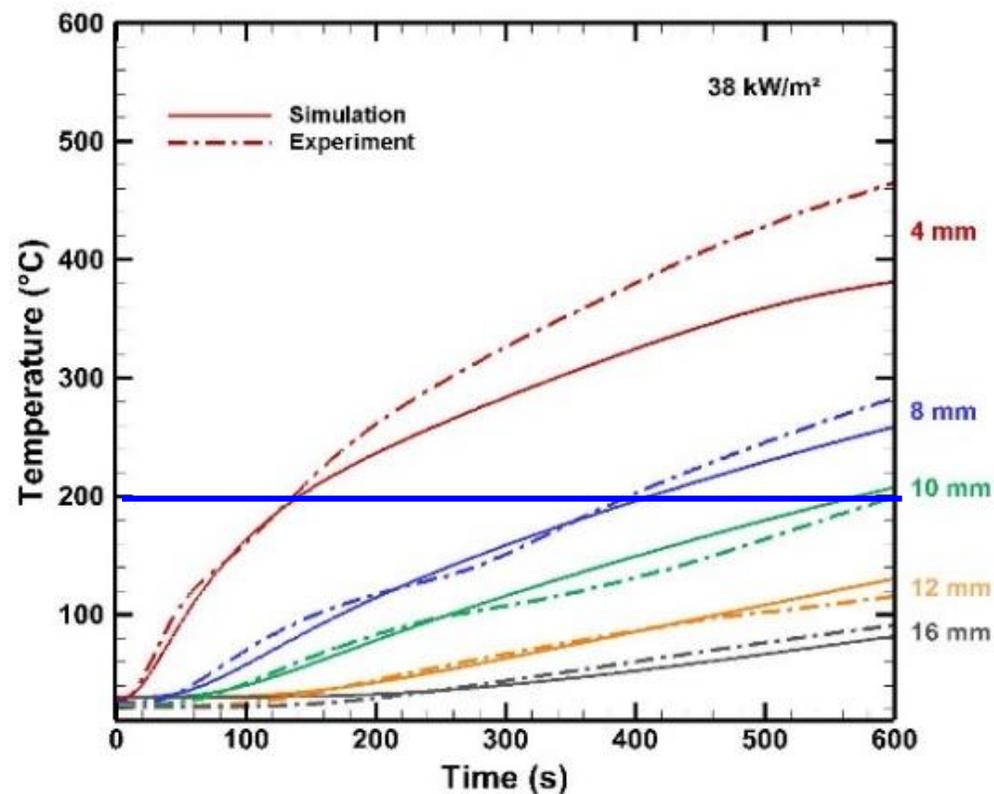
Données de comparaison à 38, 49 et 59 kW/m²

- MLRPUA
- Température : 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 30, 40 mm de profondeur



Variation de l'émissivité à 2564 cm⁻¹

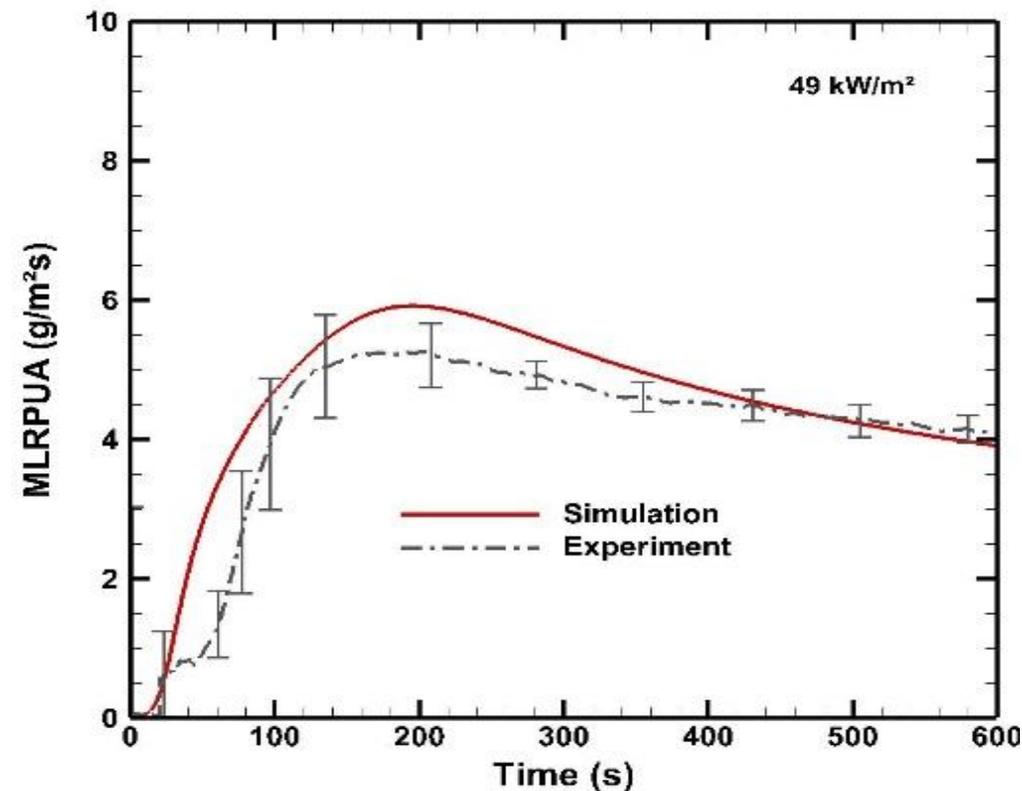
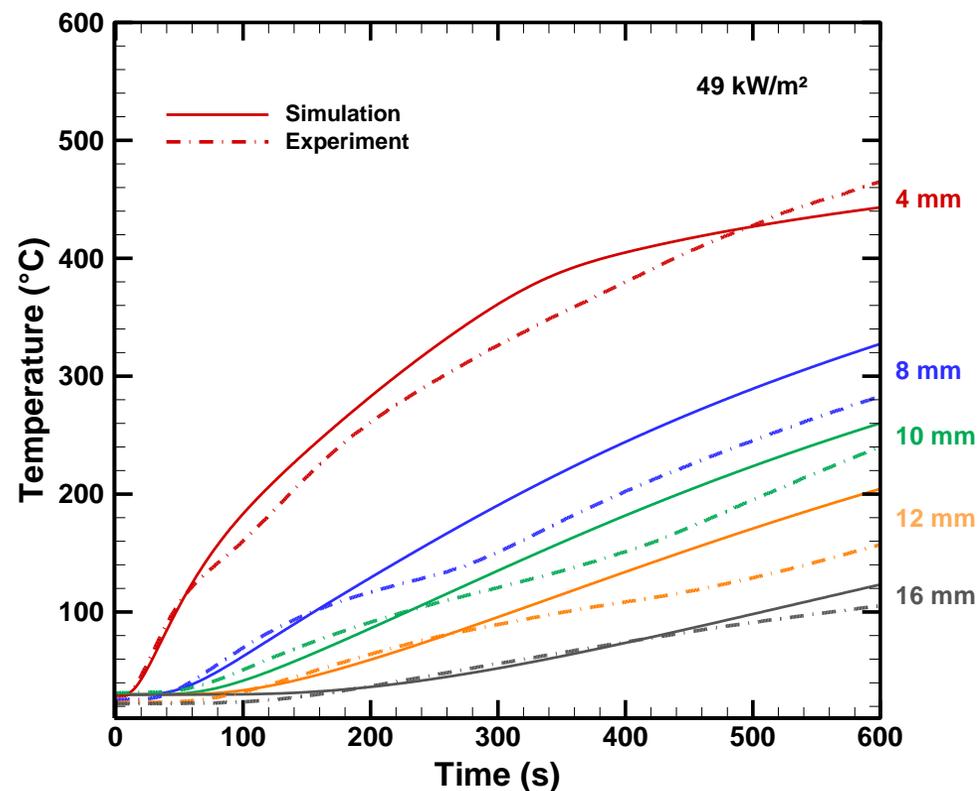
Résultat des simulations numériques à 38 kW/m²



- Bonnes prédictions du MLRPUA sur l'ensemble de l'expérience
- Bonnes prédictions des températures jusqu'à 200°C
- Au-delà de 200°C, sous-estimation du modèle

Piste d'amélioration : Meilleure prédiction du coefficient de convection ?

Résultats des simulations numériques à 49 kW/m²



- Bonnes prédictions du MLRPUA sur l'ensemble de l'expérience
- Bonnes prédictions des températures proches de la surface même au-delà de 200°C
- Surestimation du modèle pour des températures éloignées de la surface

Piste d'amélioration : Meilleure prédiction de la conductivité thermique du résidu carbonneux ?

Plan

1. Etude de la dégradation de l'épicéa à l'échelle matière
 - Protocole et résultats expérimentaux
 - Développement d'un mécanisme réactionnel
 - Comparaison des résultats expérimentaux et numériques
2. Etude de la dégradation de l'épicéa à l'échelle matériau
 - Protocole et résultats expérimentaux
 - Modélisation et résultats numériques
3. Analyse de sensibilité du modèle 1D
4. Conclusion

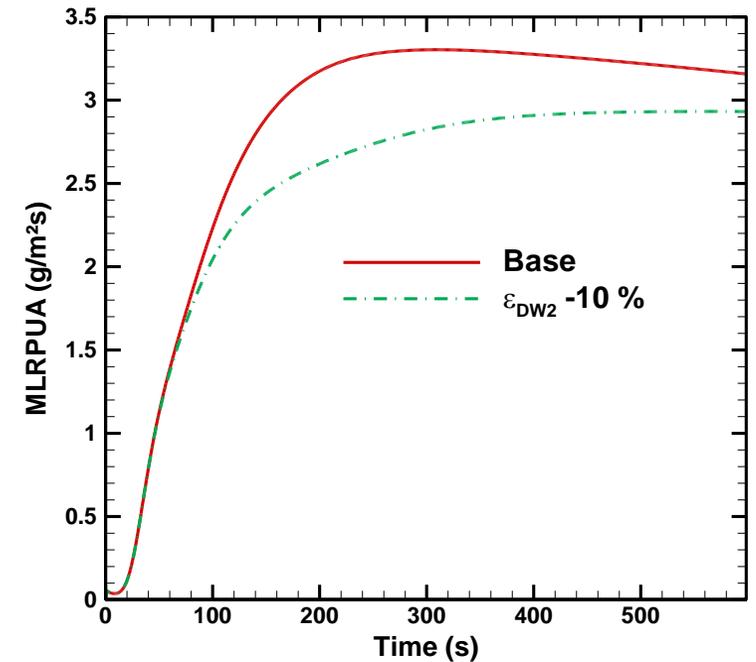
Analyse de sensibilité

Analyse préliminaire :

- Variation de $\pm 10\%$ de l'ensemble des propriétés thermiques du modèle.
- Influence étudiée sur 5 paramètres de sortie : $MLRPUA_{max}$, Températures moyennes (0, 2, 8 et 14 mm).
- 11% d'écart maximal sur l'analyse effectuée
- 5 paramètres très influents

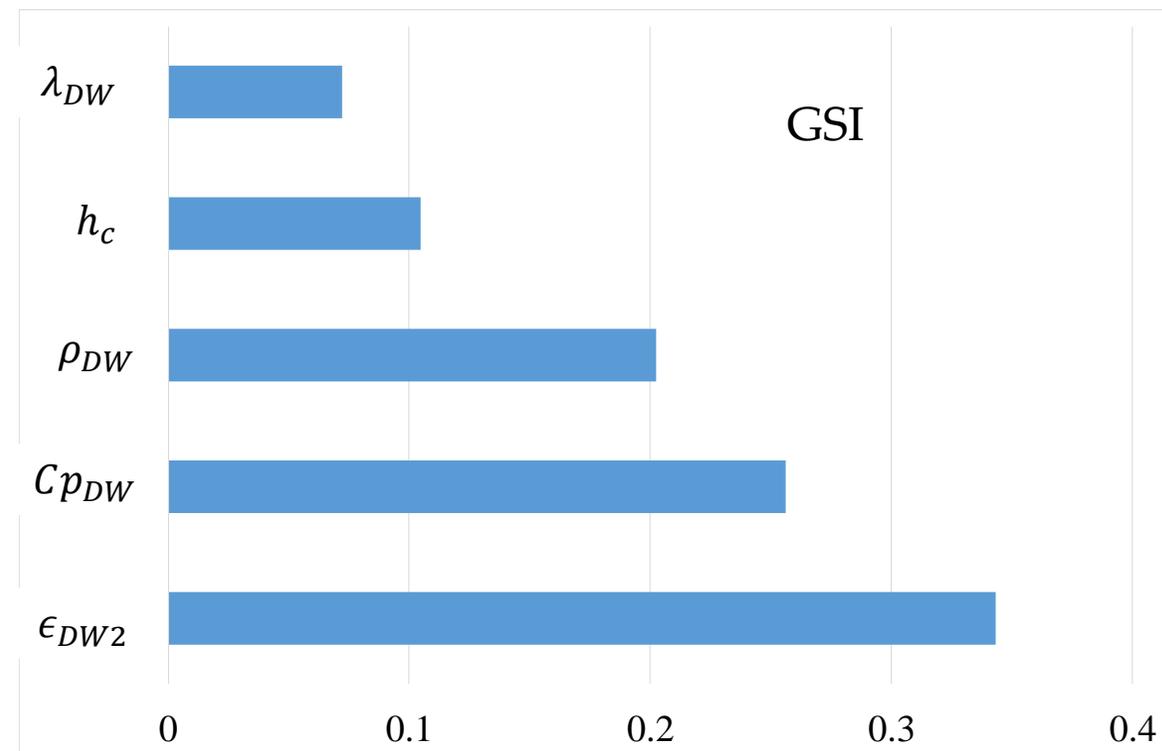
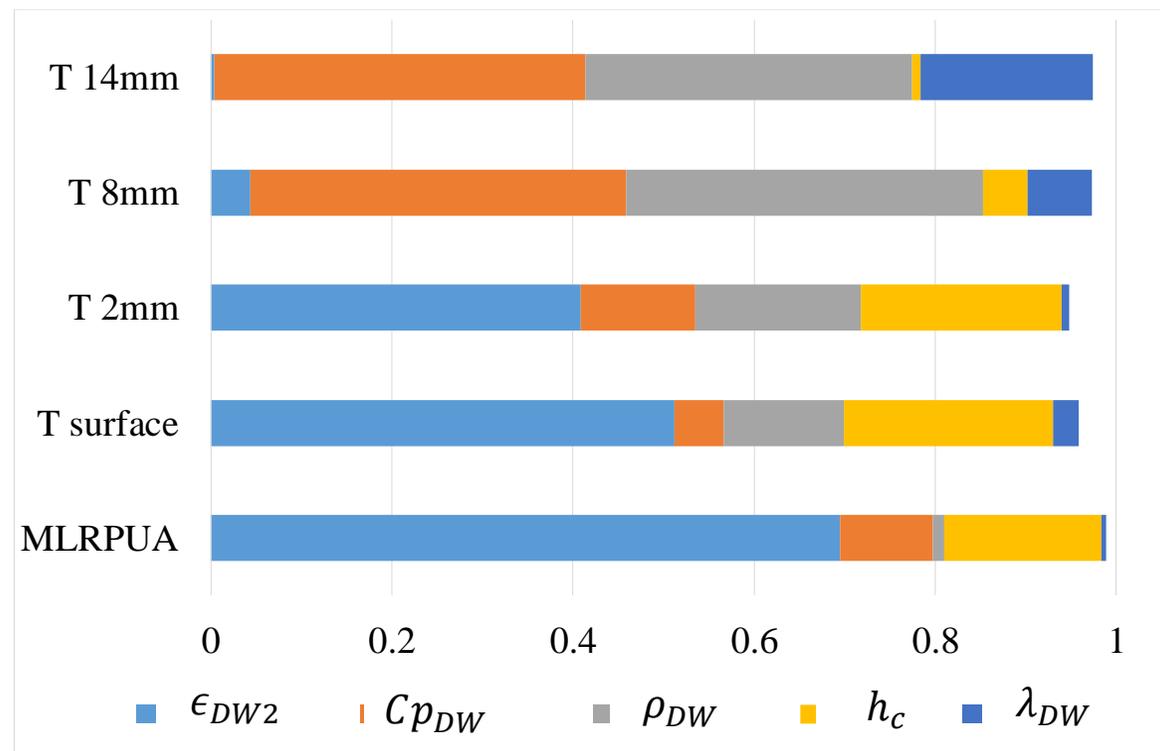
Analyse complète :

- Réalisation d'un plan d'expériences pour étudier les effets combinés entre ces paramètres thermiques (32 simulations).
- Utilisation des indices de sensibilité pour étudier leurs effets (simples et globaux)



Paramètres influents	Signification
ϵ_{DW2}	Emissivité
λ_{DW}	Conductivité thermique
C_{pDW}	Capacité calorifique
h_c	Coefficient de convection
ρ_{DW}	Masse volumique

Résultats statistiques



Avec les SI :

- ρ et C_p influents sur les températures en profondeur.
- ϵ_{DW2} très influent sur le MLRPUA et sur les températures proches de la surface.

GSI :

- ϵ_{DW2} très influent sur l'ensemble des paramètres de la dégradation thermique.

Plan

1. Etude de la dégradation de l'épicéa à l'échelle matière
 - Protocole expérimental
 - Résultats expérimentaux
 - Développement d'un mécanisme réactionnel
 - Comparaison des résultats expérimentaux et numériques
2. Etude de la dégradation de l'épicéa à l'échelle matériau
 - Protocole expérimental
 - Résultats expérimentaux
 - Modélisation
 - Résultats numériques
3. Analyse de sensibilité du modèle 1D
4. Conclusion

Conclusion

Expérimental :

- Mise en place d'une chambre à atmosphère inerte sous argon
- Exposition d'échantillon d'épicéa de 5 cm à trois valeurs de flux (38, 49 et 59 kW/m²)
- Mise en place de 12 thermocouples noyés

Modélisation GPYRO :

- Evolution du modèle des plaques fines vers des plaques épaisses
- Passage sans oxygène : résultats satisfaisants au vu de la bibliographie
- Comparaison MLRPUA et températures

Perspectives

Dégradation sous Argon :

- ❑ Campagne expérimentale avec des échantillons anhydres

Dégradation sous air :

- ❑ Etude multi-échelle de l'oxydation du résidu carbonneux.
- ❑ Etude expérimentale de plusieurs espèces de bois
- ❑ Modélisation sous GPYRO