



# JOURNEE DE RESTITUTION DU PROJET LOCABATI

2 juin 2026, Champs-Sur-Marne



## Expérimentations et modélisation du comportement au feu couvant des agrobétons

Placide Uwizeyimana, IMT Mines Alès

*Tania Lopes, Rodolphe Sonnier, Raïssa Carvalho Martins, Arnaud Regazzi, Laurent Ferry, IMT Mines Alès*



# Sommaire



Qu'est ce que le feu couvant ?

Matériaux étudiés

Expérimentations

Modélisation

Conclusion



# Définition

## Feu couvant

Combustion d'un matériau,  
 sans flamme, avec ou sans  
 émission visible de lumière <sup>(1)</sup>



## Caractéristiques des matériaux sensibles au feu couvant

Présence de la matière organique (combustible)

Porosité → diffusion de l'oxygène

Faible conductivité thermique → conservation de la chaleur

Production de résidu carbonneux → réaction d'oxydation



(1)EN 16733



# Feu couvant vs Feu vif

- ▶ **Pyrolyse** : Combustible + Chaleur → Gaz + Solides (Char et Cendre)
- ▶ **Oxydation hétérogène (Feu couvant)** : Char + O<sub>2</sub> → Chaleur + Gaz + H<sub>2</sub>O + Cendre
- ▶ **Oxydation homogène (Feu vif)** : Gaz + O<sub>2</sub> → Chaleur + Gaz + H<sub>2</sub>O

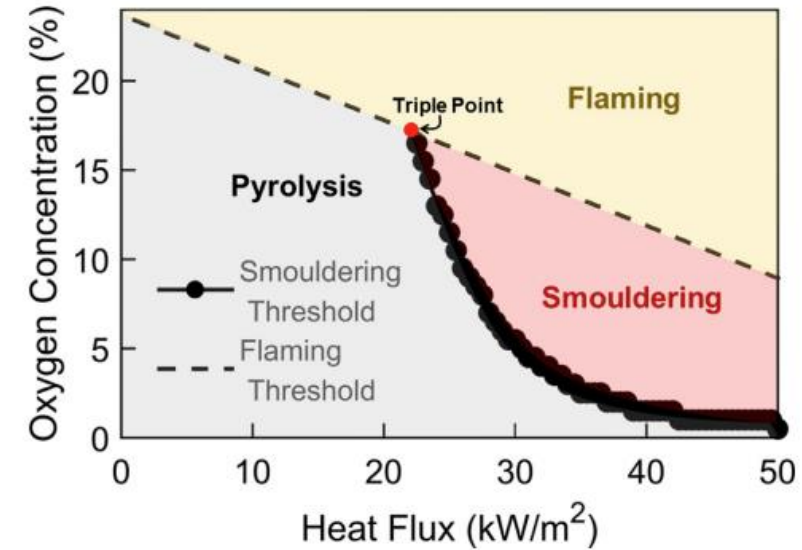
## Transition du feu couvant vers le feu vif (2)

Pics de T :  
 450 – 700°C



Pics de T :  
 1500 – 1800°C

## Cas du bois<sup>(3)</sup>

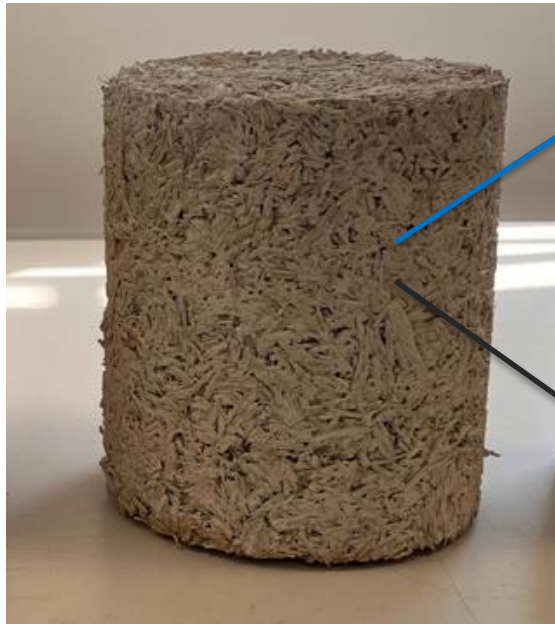


(2) Santoso et al. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 2019

(3) Richter et al. *Combustion and Flame*, 2021

# Matériaux étudiés

## Agrobéton



Granulat végétal

Chènevotte  
 Moelle de tournesol  
 Paille de blé  
 Balle de riz

Liant minéral

Chaux  
 Terre  
 Plâtre  
 Terre + Plâtre

> 100 formulations

180 kg/m<sup>3</sup>

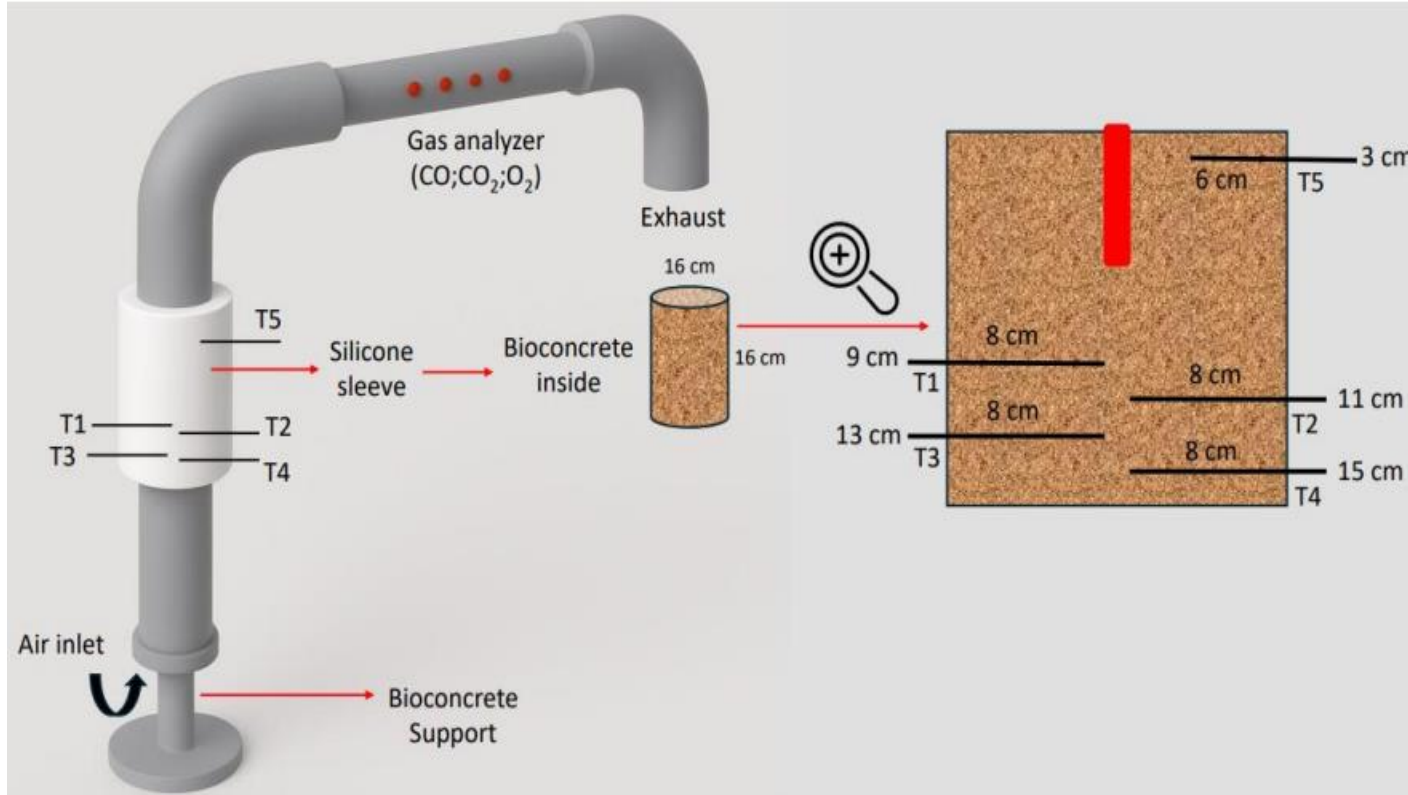
600 kg/m<sup>3</sup>

**Influence de la densité  
 et de la composition  
 sur le développement  
 du feu couvant**



# Expérimentations

## Dispositif ASHES (Advanced Study of Heat and Emissions in Smoldering)



### Déroulement de l'essai :

- ▶ Source de chaleur dans le matériau – fer à souder (25 min)
- ▶ Puissance de chaleur maîtrisée (300 W)
- ▶ Contrôle du débit d'air et de sa direction

### Paramètres mesurés :

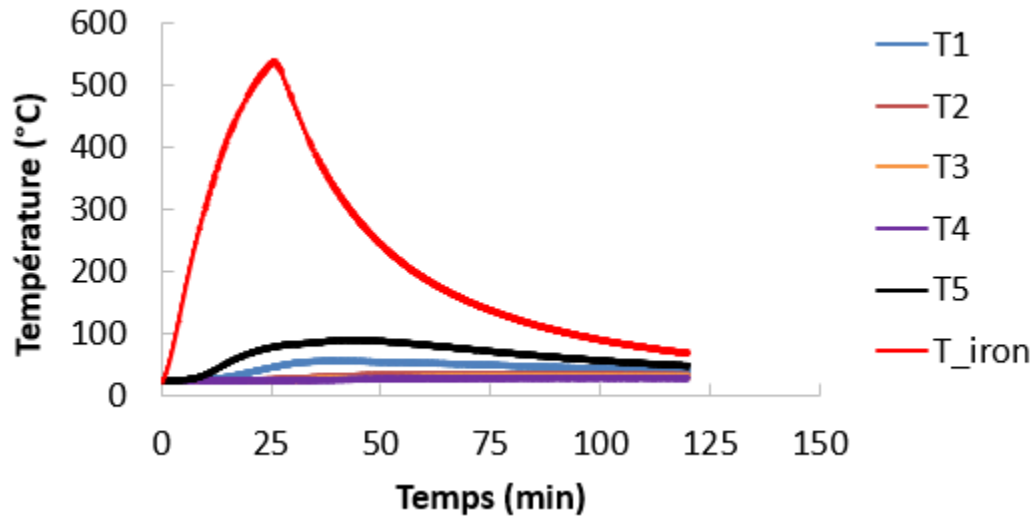
- ▶ Evolution de la T°C (5 thermocouples)
- ▶ Evolution des gaz (CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>)
- ▶ Vitesse de propagation du feu couvant



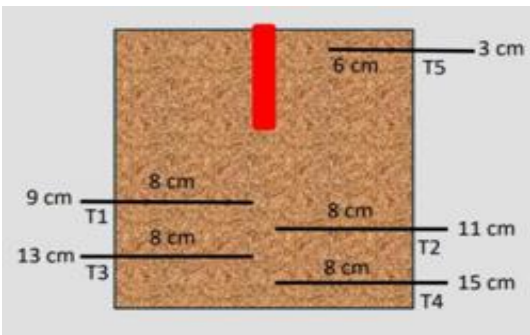
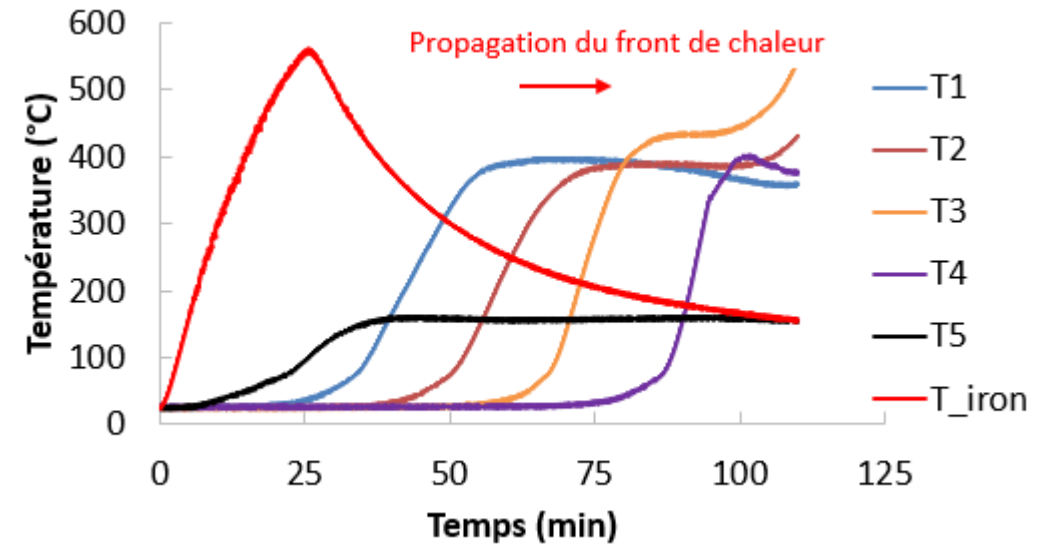
# Expérimentations

## Dynamique du feu couvant

Echantillon sans feu couvant : TP2.4Ch (411 kg/m<sup>3</sup>)



Echantillon avec feu couvant : TP1.4Ch (231 kg/m<sup>3</sup>)

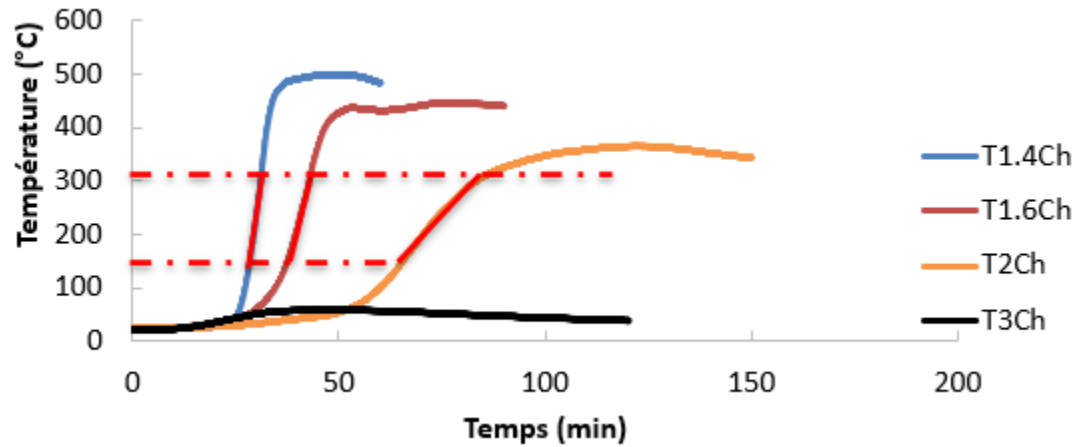


- ▶ Vitesse d'élévation de la température  $T_i$  ( $\Delta T = 120-300$  °C en °C/min)
- ▶ Vitesse de propagation du front de chaleur à 200°C (T1-T4 en cm/min)

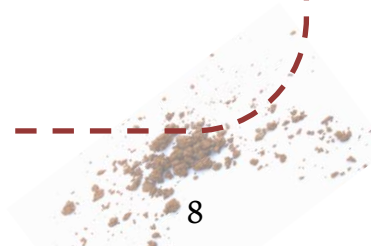
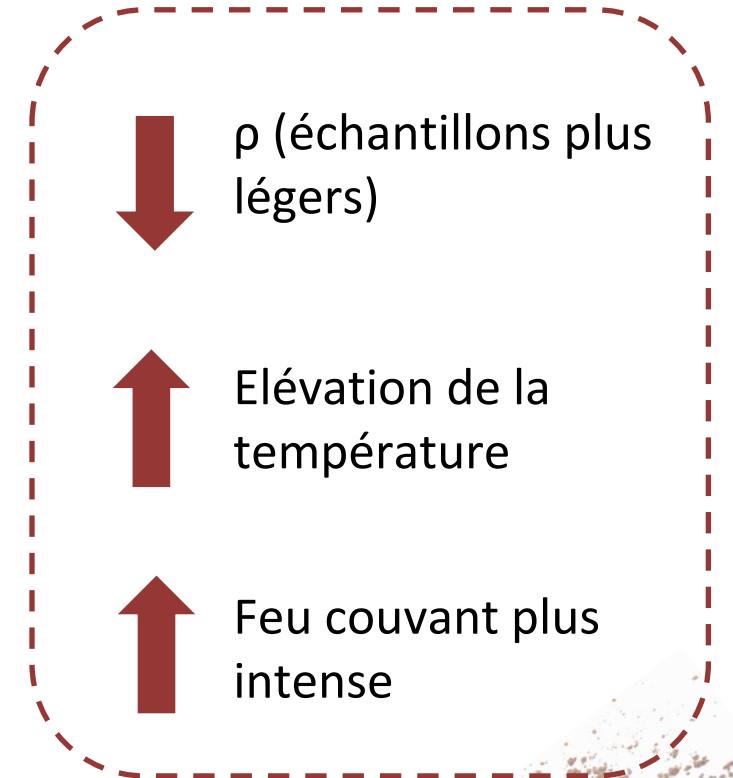


# Expérimentations

## Influence de la densité de l'agrobéton

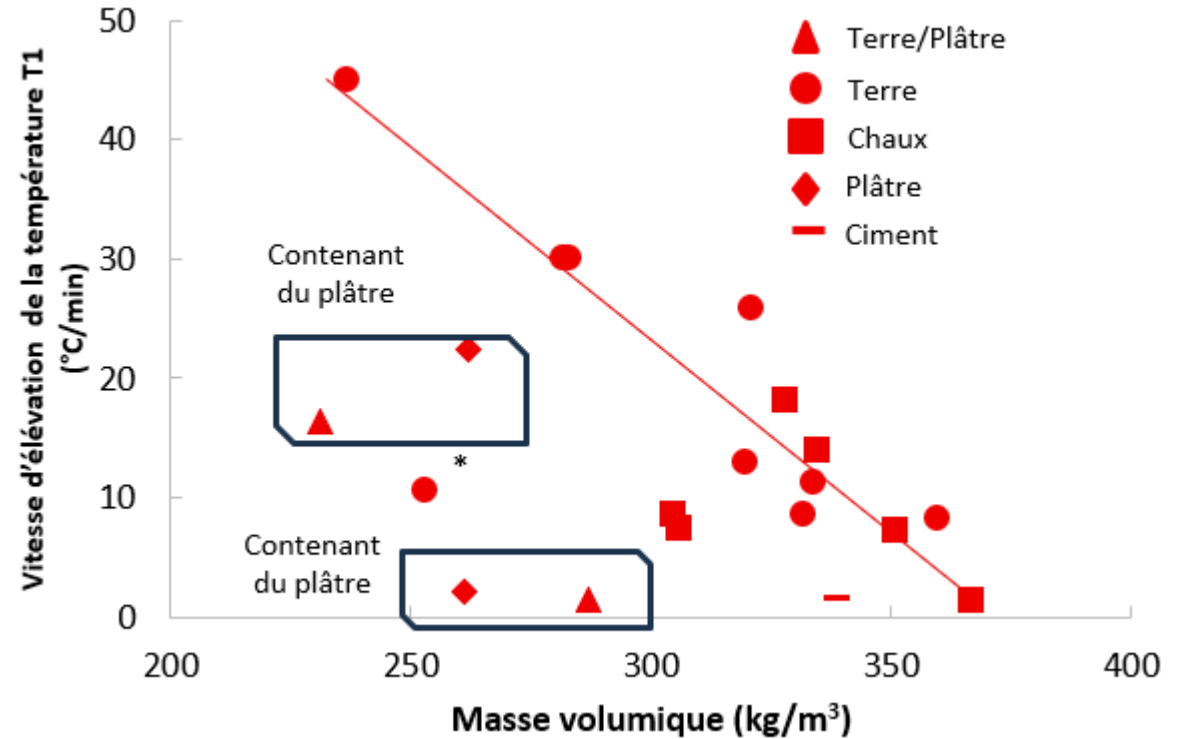
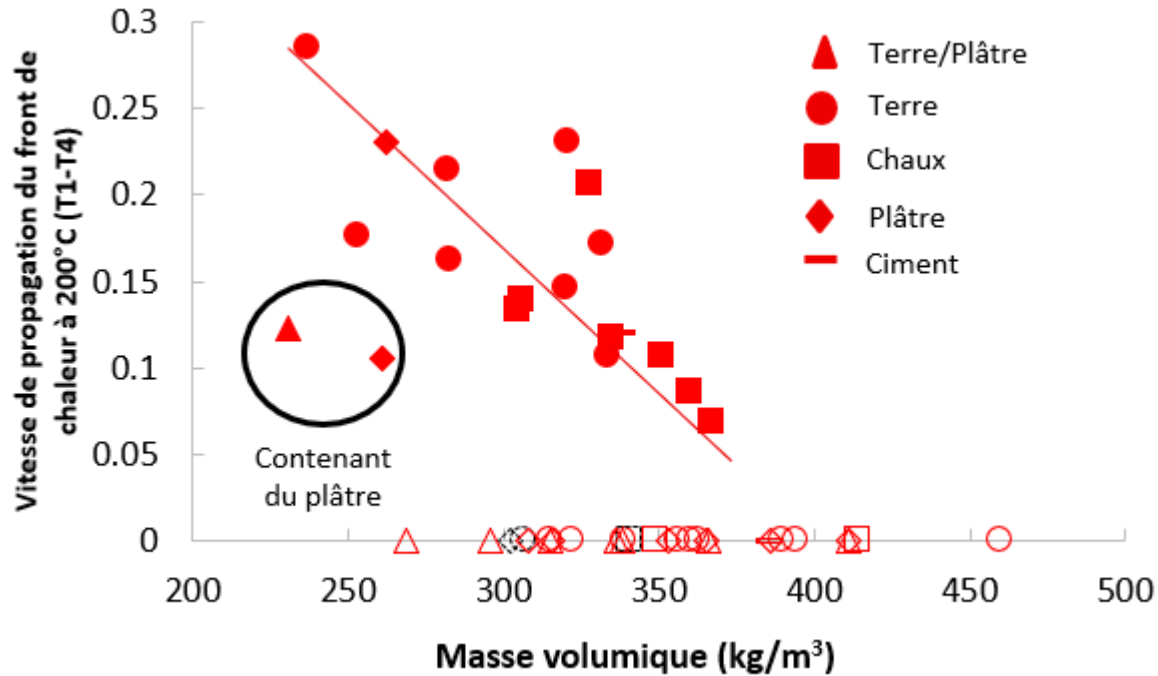


Échantillon	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	T1 Max (°C)	Vitesse élévation T1 entre 120-300 °C (°C/min)	Vitesse feu couvant à 200°C (T1-T4) (cm/min)
T1.4Ch	237	500	45	0.285
T1.6Ch	282	446	30	0.214
T2Ch	332	364	8.6	0.171
T3Ch	394	58	-	-



# Expérimentations

## Influence de la densité et de la composition



- ▶ La vitesse diminue avec l'augmentation de la densité
- ▶ La présence de plâtre limite la dynamique du feu couvant



# Modélisation

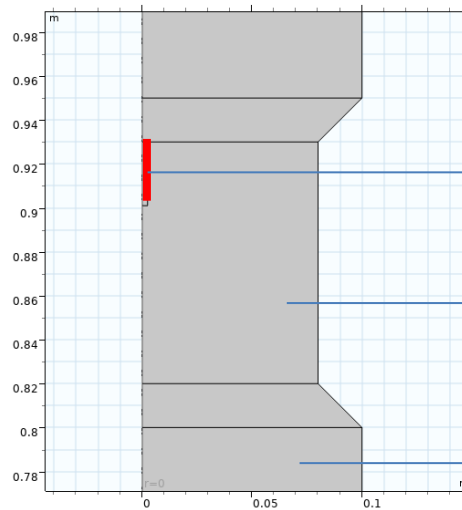


Granulat végétal

Liant minéral



## 2D axisymétrique



1) Fer à souder → source de chaleur (solide)

2) Agrobéton (milieux poreux)

3) Conduit (air)





# Modélisation

## Physiques modélisées :

- ▶ Transfert de chaleur (1, 2, 3)

$$(\rho c_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-\lambda_{eff} \nabla T) = Q$$

- ▶ Transport de fluide (2, 3)

$$\frac{\rho_f \partial \mathbf{u}}{\epsilon_p \partial t} + \frac{\rho_f}{\epsilon_p} (\mathbf{u} \cdot \nabla) \frac{\mathbf{u}}{\epsilon_p} = \nabla \cdot \left( -p \mathbf{I} + \frac{\mu}{\epsilon_p} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2\mu}{3\epsilon_p} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right) - \left( \frac{\mu}{\kappa} + \beta \rho_f |\mathbf{u}| + \frac{Q_m}{\epsilon_p^2} \right) \mathbf{u} + \mathbf{F}$$

Paramètres matériaux :

$$\rho, \lambda, c_p, \epsilon_p, E_a, A$$

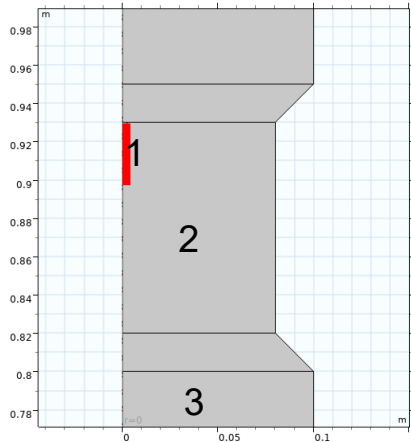
Sorties :

T,  $\Delta m$ , vitesse, ...

- ▶ Réaction chimique (2)  $\rightarrow$  pyrolyse, oxydation

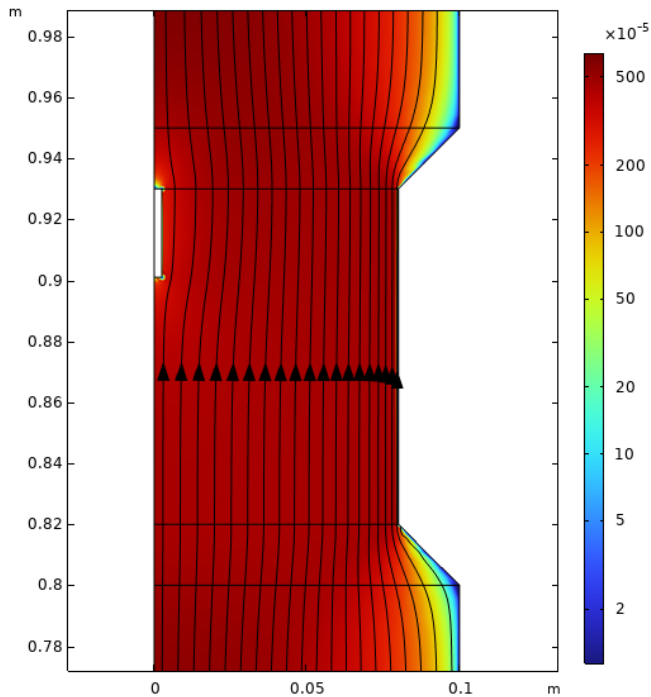
$$\frac{d\alpha_i}{dt} = k_i(T) f(\alpha_i)$$

$$k_i(T) = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

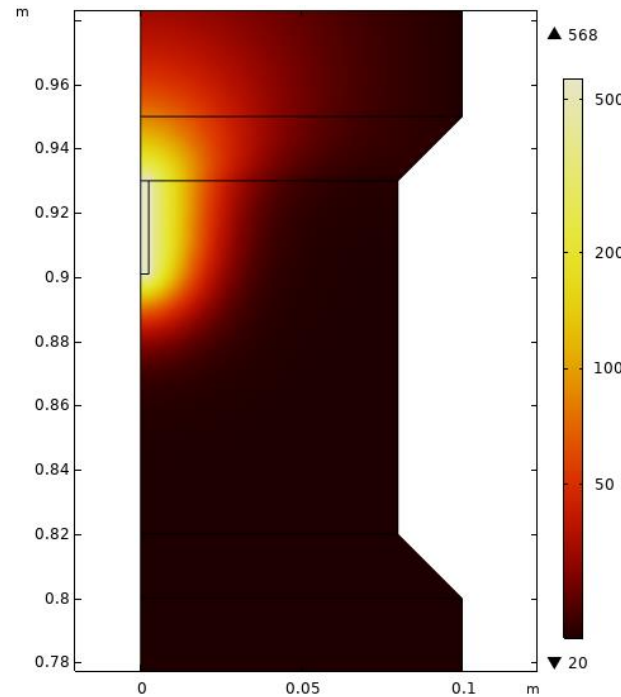


# Modélisation

Champ de vitesse  
 après 20 min (T1.8CH)



Champ de température  
 après 20 min (T1.8CH)



- ▶ Flux d'air ( $O_2$ ) uniforme (avant propagation)
- ▶ Champ de température  $\rightarrow$  courbes isothermes & propagation du feu couvant



**Thèse ANR MODEFIRE**



# Conclusion



- ▶ La sensibilité au feu couvant dépend fortement de la densité et de la composition de l'agro-béton
- ▶  $\rho$  faible  $\rightarrow \alpha_{combustible}$  élevé,  $\phi$  élevée  $\rightarrow$  propagation plus rapide
- ▶ Une modélisation multiphysique permettra une analyse plus fine des mécanismes impliqués et une prédiction du feu couvant (thèse ANR MODEFIRE)





## JOURNEE DE RESTITUTION DU PROJET LOCABATI

2 juin 2026, Champs-Sur-Marne



**MERCI POUR VOTRE ATTENTION**

**[Placide.Uwizeyimana@mines-ales.fr](mailto:Placide.Uwizeyimana@mines-ales.fr)**

