

**IRSN**

INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

*Faire avancer la sûreté nucléaire*

# Simulation de la pyrolyse de mélanges EVA-ATH : étude de sensibilité

J. Shi<sup>†\*</sup>, G. Boyer<sup>†</sup>, J.-F. Thovert<sup>\*</sup>, V. Mourzenko<sup>\*</sup>  
GDR Feux, Lille  
13/02/2020

† IRSN/PSN-RES/SA21/LIE

\* Institut P', Poitiers

MEMBRE DE

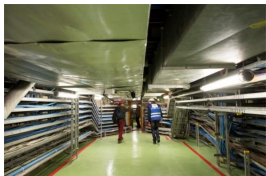
**ETSON**

EUROPEAN  
TECHNICAL SAFETY  
ORGANISATIONS  
NETWORK

INSTITUT  
**P'**

  
Université  
de Poitiers

# Contexte : modélisation des feux de chemins de câbles



## Approche macroscopique (modèle type FLASH-CAT)

- Description macroscopique de la propagation verticale et horizontale du feu sur les C.C.
- Lois semi-empiriques pour les vitesses de propagation en fonction de paramètres macroscopiques
- Essais à l'échelle macroscopique (dispositif CISCCO, essais à grande échelle)

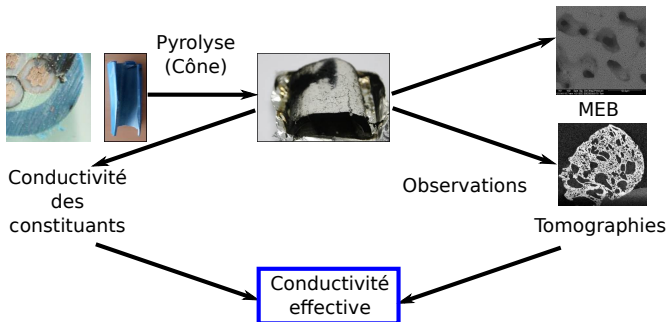
## Approche analytique : modélisation locale de la pyrolyse des gaines de câbles

- Caractérisation des propriétés thermocinétiques et thermiques des matériaux
- Validation : cône calorimètre

## Matériaux d'intérêt :

- PVC (câbles halogénés)
- Mélanges Ethyl-Vinylacetate / Aluminium tri-hydraté (EVA/ATH, non-halogénés)

## Rappel : conductivité effective des mélanges EVA-ATH



### Deux approches proposées (Shi, 2019)

#### Caractérisation par état de dégradation (post-déshydratation, résidu final) :

- Homogénéisation volumique à partir des tomographies et de la conductivité des deux phases
- Nécessite l'évaluation de la conductivité apparente de la phase condensée
- Hypothèses sur la morphologie de la phase condensée à l'échelle sub-voxel (images MEB)

#### Modélisation conceptuelle

- Définition d'un modèle évolutif de la morphologie du matériau (tomographies, images MEB)
- Conductivité effective du matériau en fonction de l'avancement de la dégradation par upscalings successifs

# Rappel : conductivité effective des mélanges EVA-ATH

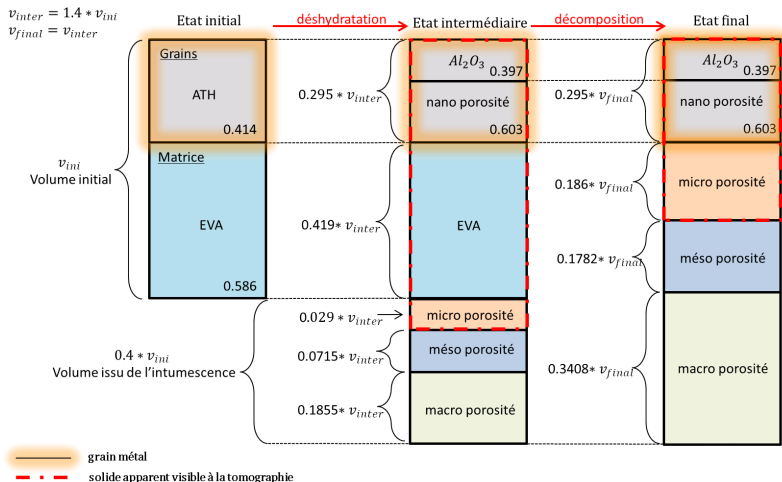


Figure – Fractions volumiques des différents constituants et porosités des mélanges EVA-ATH à l'état initial, intermédiaire (post-déshydratation de l'ATH) et final.

## Rappel : conductivité effective des mélanges EVA-ATH

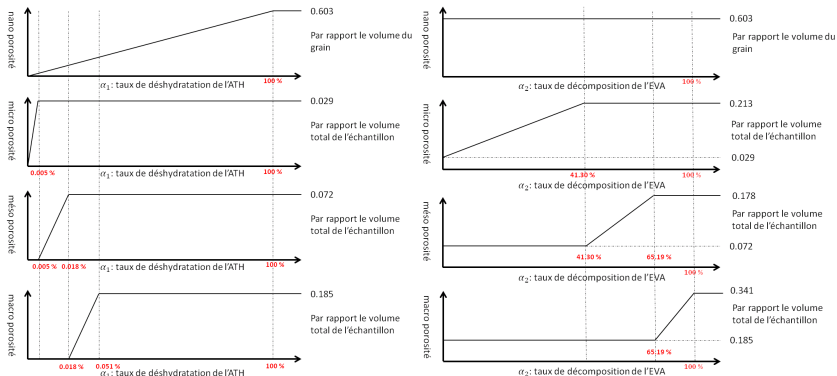


Figure – Gauche : évolution des porosités des mélanges EVA-ATH au cours de la déshydratation de l'ATH. Droite : évolution des porosités au cours de la décomposition de l'EVA

## Rappel : conductivité effective des mélanges EVA-ATH

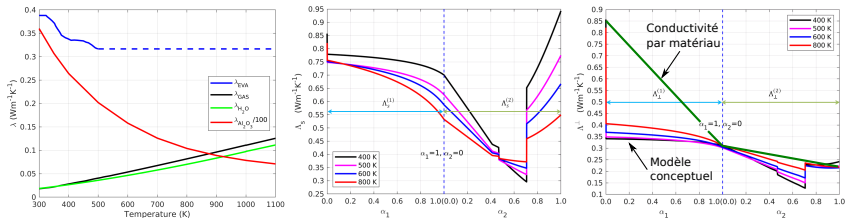


Figure – Conductivités : gauche : constituants ; centre : solide apparent à la tomographie ; droite : conductivité effective

## Rappel : conductivité effective des mélanges EVA-ATH

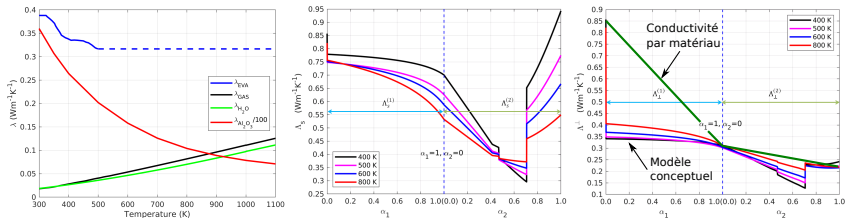


Figure – Conductivités : gauche : constituants ; centre : solide apparent à la tomographie ; droite : conductivité effective

### Autres propriétés effectives

- Perméabilité : entre  $10^{-13}$  m<sup>2</sup> (intermédiaire) et  $10^{-11}$  m<sup>2</sup> (final), paramètre insensible en l'absence de montée en pression dans le matériau
- Diffusivité effective :  $D_{\text{eff}} = 0.005D_m\Phi$  (intermédiaire),  $D_{\text{eff}} = 0.3D_m\Phi$  (final) ; paramètre insensible
- Émissivité de surface : modèle conceptuel analogue à la conductivité pour prendre en compte les effets de porosité et de matériau (EVA → alumine poreuse)

## Rappel : conductivité effective des mélanges EVA-ATH

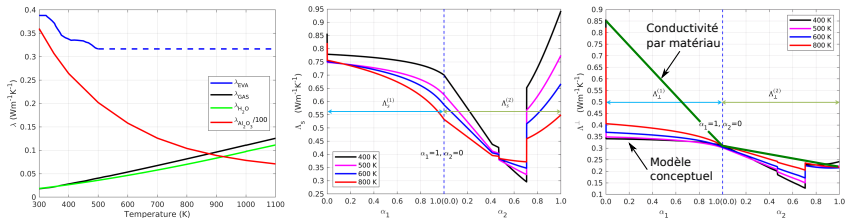


Figure – Conductivités : gauche : constituants ; centre : solide apparent à la tomographie ; droite : conductivité effective

### Autres propriétés effectives

- Perméabilité : entre  $10^{-13}$  m<sup>2</sup> (intermédiaire) et  $10^{-11}$  m<sup>2</sup> (final), paramètre insensible en l'absence de montée en pression dans le matériau
- Diffusivité effective :  $D_{eff} = 0.005D_m\Phi$  (intermédiaire),  $D_{eff} = 0.3D_m\Phi$  (final) ; paramètre insensible
- Émissivité de surface : modèle conceptuel analogue à la conductivité pour prendre en compte les effets de porosité et de matériau (EVA → alumine poreuse)

### Comparaison essais sous cône calorimètre/simulation ?



# Problématique : dispersion des résultats expérimentaux

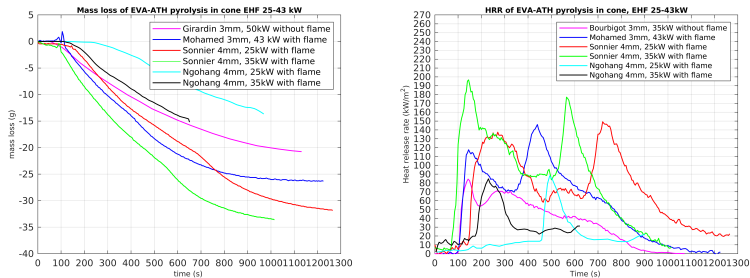


Figure – Essais sous cône calorimètre de mélanges EVA-ATH : perte de masse (gauche) et taux de dégagement de chaleur (droite). Flux imposés de 25 à 43 kW/m<sup>2</sup>

## Effets système ?

- Transferts thermiques à la surface exposée : flux de flamme, échanges convectifs et radiatifs
- Transferts thermiques en face arrière : propriétés thermiques du matériau isolant ?

## Incertitudes sur les propriétés des matériaux ?

- Expérimentalement : matériaux identiques ?
- Incertitudes : intumescence, émissivité, identification des étapes de dégradation ?

# Problématique : dispersion des résultats expérimentaux

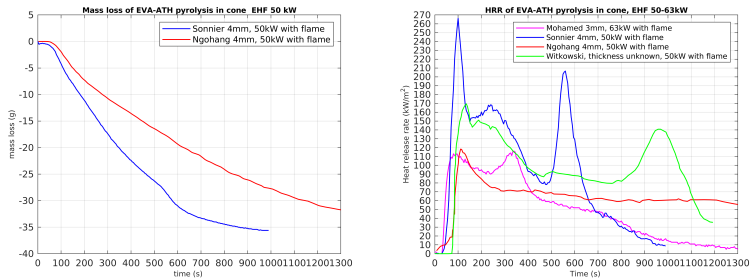


Figure – Essais sous cône calorimètre de mélanges EVA-ATH : perte de masse (gauche) et taux de dégagement de chaleur (droite). Flux imposés de  $50 \text{ kW/m}^2$

## Effets système ?

- Transferts thermiques à la surface exposée : flux de flamme, échanges convectifs et radiatifs
- Transferts thermiques en face arrière : propriétés thermiques du matériau isolant ?

## Incertitudes sur les propriétés des matériaux ?

- Expérimentalement : matériaux identiques ?
- Incertitudes : intumescence, émissivité, identification des étapes de dégradation ?

# Problématique : dispersion des résultats expérimentaux

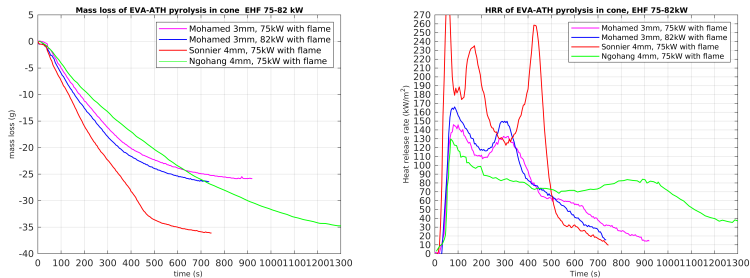


Figure – Essais sous cône calorimètre de mélanges EVA-ATH : perte de masse (gauche) et taux de dégagement de chaleur (droite). Flux imposés de 75 à 82 kW/m<sup>2</sup>

## Effets système ?

- Transferts thermiques à la surface exposée : flux de flamme, échanges convectifs et radiatifs
- Transferts thermiques en face arrière : propriétés thermiques du matériau isolant ?

## Incertitudes sur les propriétés des matériaux ?

- Expérimentalement : matériaux identiques ?
- Incertitudes : intumescence, émissivité, identification des étapes de dégradation ?

## Outline

Modélisation de la pyrolyse

Analyse des résultats de simulation

Étude de sensibilité

Conclusion

# Modélisation de la pyrolyse pour les mélanges EVA-ATH

- Modélisation à l'échelle de Darcy (homogénéisée)
- Modélisation 1D, selon la direction de propagation des fronts de réaction
- Évolution compositionnelle de la phase condensée *via* la notion de pseudo-matériaux
- Équations de conservation :
  - masse de la phase condensée
  - masse de la phase gazeuse
  - enthalpie du système diphasique

Table – Paramètres physico-chimiques

Types	Méthodes de caractérisation
Propriétés physiques ( $\rho$ , $c_p$ , $\lambda$ , $D_m, \dots$ )	DSC, pycnomètre He, DSC
Porosité	densité initiale $\oplus$ ATG    tomographie

Table – Propriétés effectives

Propriété	Loi de comportement	Méthodes de caractérisation
Perméabilité $K_{\text{eff}}$	Loi de Darcy	Évaluation sur tomo.
Diffusivité $D_{\text{eff}}$	Loi de Fick	Évaluation sur tomo.
Conductivité $\Lambda_{\text{eff}}$	Loi de Fourier	Tomo. $\oplus$ propriétés locales
Taux de réaction	Loi d'Arrhénius	

# Hypothèses de modélisation — représentation homogénéisée

- | Séparation d'échelles
- | Équilibre thermique et compositionnel local

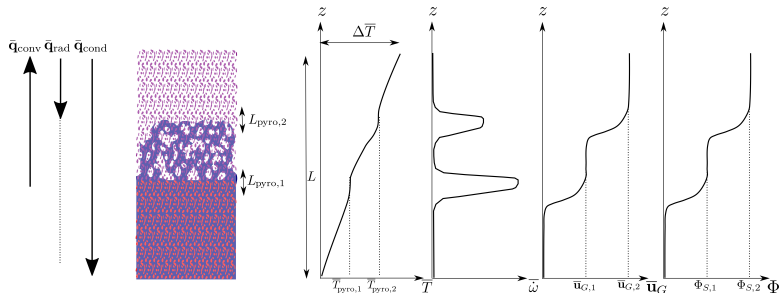


Figure – Transferts thermiques et schéma d'évolution des différentes quantités physiques en profondeur dans un matériau en pyrolyse.

# Outline

Modélisation de la pyrolyse

Analyse des résultats de simulation

Étude de sensibilité

Conclusion

## Cas de référence

- | Essai sous cône à atmosphère contrôlée de Girardin et al., 2015
- | Épaisseur de l'échantillon : 3mm
- | Flux imposé de 50 kW/m<sup>2</sup>
- | Données pour les propriétés physiques et thermocinétiques : Girardin et al., 2015
  - Chaleurs spécifiques, densités :
  - Lois d'Arrhénius
  - Isolant en face arrière (céramique)

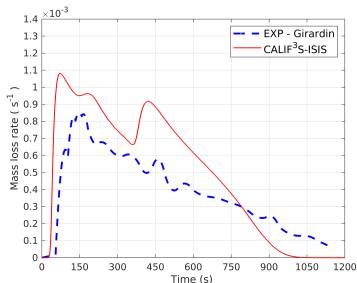
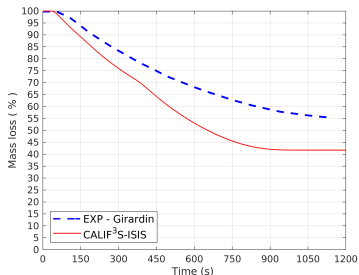


Figure – Comparaison essai (Girardin et al., 2015)/simulation : perte de masse (gauche) et taux de perte de masse (droite)



# Séparation d'échelles pour l'homogénéisation

Échelle macroscopique : épaisseur des zones de réaction

$$L_{\text{reac},i} = \frac{1}{(\partial X_{M_i} / \partial z)_{\text{max}}}$$

Échelle microscopique  $l$  : demi-axes  $A$  des ellipsoïdes macro-poreux dans la direction du gradient de température

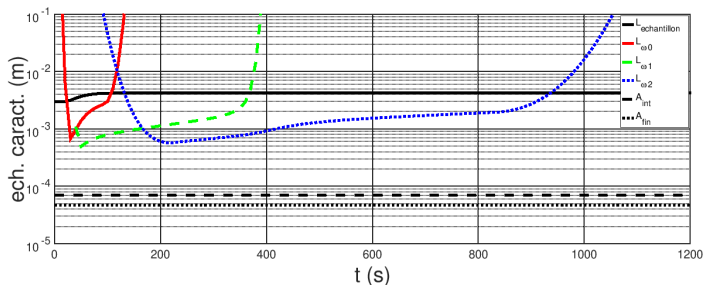


Figure – Évolution des épaisseurs des zones de réaction, comparées à la taille de l'échantillon et aux tailles des demi-axes des ellipsoïdes macro-poreux dans le sens du gradient de température observés sous tomographie

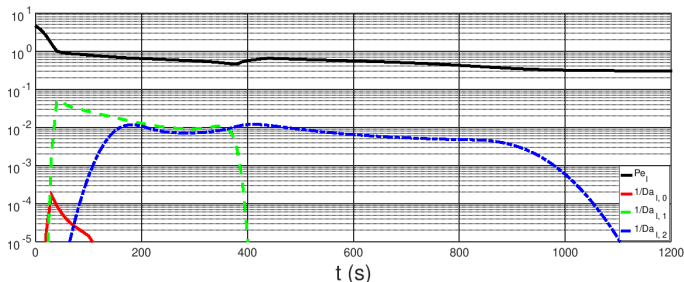
## Conditions pour l'équilibre thermique local

- Idée : compensation des déséquilibres locaux par conduction à l'échelle de la micro-structure ?
- Déséquilibres par convection dans les pores : nombre de Péclet

$$\frac{\tau_{\text{cond}}}{\tau_{\text{conv}}} = Pe_l = \frac{\rho_G c_{p,G} \bar{u}_G l}{\lambda_G} \ll 1$$

- Déséquilibres dus à la dégradation d'une substance  $S_i$  par pyrolyse :

$$\frac{\tau_{\text{cond}}}{\tau_{\text{chem}}} = \frac{1}{Da_l} = \frac{\Delta h_{p,i} \bar{\omega} l^2}{\lambda_{S_i} \Delta T} \ll 1 \quad (\text{ici } \Delta T = 1 \text{ K})$$



# Bilan thermique

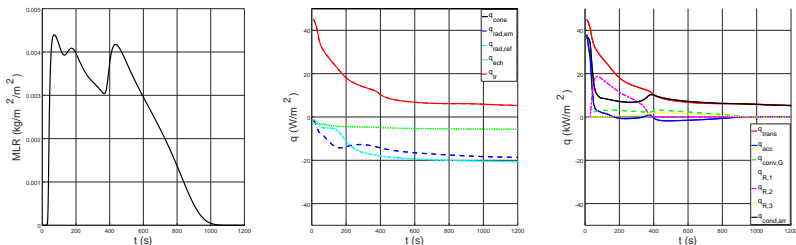


Figure – Taux de perte de masse (gauche) et bilans thermiques en surface (centre) et en épaisseur (droite).

## Flux en surface

- $q_{imp}$  (cône)
- $q_{rad,em}$  (radiatif, émis)
- $q_{rad,ref}$  (radiatif, réfléchi)
- $q_{ech}$  (échanges convectifs)
- $q_{tr}$  (net transmis)
- $q_{cond,arr}$  : pertes en face arrière

## Transferts intégrés sur l'échantillon

- $q_{acc} \equiv \partial_t(\rho_S c_{p,S} T) + \partial_t(\rho_G \Phi c_{p,G} T)$
- $q_{conv,G} \equiv \rho_G \Phi c_{p,G} u T$
- $q_{R,i} \equiv \Delta h_{p,i} \dot{w}_i$

# Bilan thermique

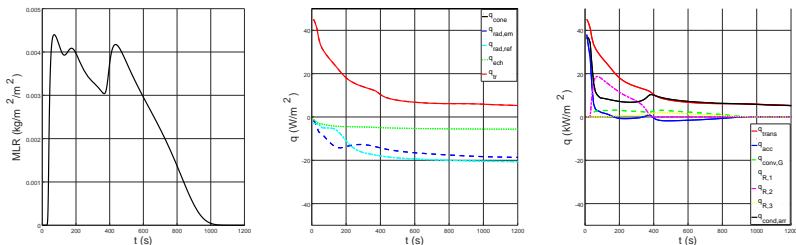


Figure – Taux de perte de masse (gauche) et bilans thermiques en surface (centre) et en épaisseur (droite).

## Flux en surface

- $q_{imp}$  (cône)
- $q_{rad,em}$  (radiatif, émis)
- $q_{rad,ref}$  (radiatif, réfléchi)
- $q_{ech}$  (échanges convectifs)
- $q_{tr}$  (net transmis)
- $q_{cond,arr}$  : pertes en face arrière

## Transferts intégrés sur l'échantillon

- $q_{acc} \equiv \partial_t(\rho_S c_{p,S} T) + \partial_t(\rho_G \Phi c_{p,G} T)$
- $q_{conv,G} \equiv \rho_G \Phi c_{p,G} u T$
- $q_{R,i} \equiv \Delta h_{p,i} \dot{\omega}_i$

En surface : influence de l'émissivité radiative

En épaisseur : réaction de déshydratation de l'ATH

Dès l'étape de décomposition de l'EVA : importance des pertes par la face arrière

## Outline

Modélisation de la pyrolyse

Analyse des résultats de simulation

Étude de sensibilité

Conclusion

# Étude de sensibilité : quantification

Grandeurs considérées pour l'étude de sensibilité :

$$t_{50} \text{ tel que } \frac{m_{\text{final}} - m(t_{50})}{m_{\text{final}} - m_{\text{initial}}} = 0.5 \quad \text{et} \quad t_{100} \text{ tel que } \frac{m_{\text{final}} - m(t_{100})}{m_{\text{final}} - m_{\text{initial}}} = 1.$$

Quantification  $s$  de l'erreur due à une incertitude de 10% sur un paramètre  $p$  :

$$s_{50}(p) = 0.1 \frac{p}{t_{50}} \frac{\partial t_{50}}{\partial p}, \quad s_{100}(p) = 0.1 \frac{p}{t_{100}} \frac{\partial t_{100}}{\partial p}$$

Sensibilités étudiées :

- Incertitudes sur les conditions aux limites en face avant (flux imposé, échanges convectifs)
- Incertitudes sur les conditions aux limites en face arrière (conductivité de l'isolant, ou modélisation alternative par échanges convectifs)
- Incertitudes sur les propriétés des matériaux : intumescence, émissivité de surface, chaleurs de pyrolyse

# Étude de sensibilité : conditions aux limites

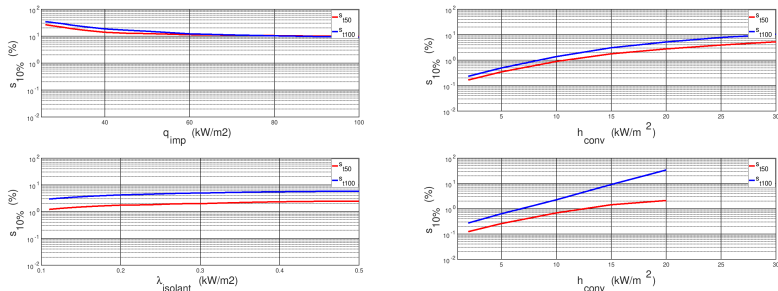


Figure – Sensibilité des temps de pyrolyse à 50% et 100% de dégradation à une incertitude de 10% sur le flux incident (h. g.), le coefficient d'échanges convectifs en face avant (h. d.), la conductivité de l'isolant en face arrière (b. g.) et le coefficient d'échanges convectifs en face arrière (b. d.).

# Étude de sensibilité : propriétés du matériau

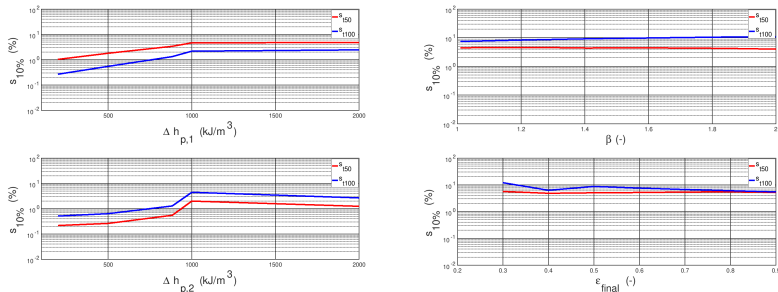


Figure – Sensibilité des temps de pyrolyse à 50% et 100% de dégradation à une incertitude de 10% sur les chaleurs de pyrolyse (g.), l'intumescence (u. d.) et l'émissivité de surface à l'état final (b. d.).



## Outline

Modélisation de la pyrolyse

Analyse des résultats de simulation

Étude de sensibilité

Conclusion

# Conclusion et perspectives

## Pertinence de la représentatin homogénéisée

- Existence d'une séparation d'échelles
- Hypothèse d'équilibre thermique local vérifiée
- **Cas d'autres matériaux (PVC) ?**

## Dispersion des résultats expérimentaux : effets système ?

- Fort effet d'une incertitude sur le flux imposé lorsque celui-ci est faible ( $< 40 \text{ kW/m}^2$ )
- Flux convectif en surface exposée : influence d'ordre inférieur (**pas de flamme ici**)
- Pertes thermiques en face arrière dominantes sur le bilan thermique dès la fin de la déshydratation de l'ATH

## Effet des incertitudes sur les propriétés des matériaux

- Pertes radiatives par émission et réflexion à la surface exposée dominantes dans le bilan de flux en surface
- **Émissivité radiative de l'alumine poreuse ?**
- Bilan thermique en volume dominé par les chaleurs de pyrolyse
- Sensibilité aux incertitudes sur les chaleurs de pyrolyse modérée
- Intumescence : sensibilité modérée, mais forte incertitude (tomographies au repos)