

## Vers l'estimation des propriétés thermiques intrinsèques de matériaux semi-transparents à haute température à partir d'un modèle couplé résolu par la méthode de Monte-Carlo

L. Penazzi <sup>a,b</sup>, O. Farges <sup>a,b</sup>, Y. Jannot <sup>a,b</sup>, J. Meulemans <sup>b,c</sup>, V. Schick <sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Université de Lorraine, CNRS, LEMTA, F-54500, Vandoeuvre-lès-Nancy, France

<sup>b</sup> Laboratoire Commun Canopée, CNRS, Université de Lorraine, Saint-Gobain

<sup>c</sup> Saint-Gobain Research Paris, 39 quai Lucien Lefranc, F-93303, Aubervilliers, France

4<sup>èmes</sup> journées annuelles du GDR TAMARYS, Villeurbanne, 27-29 juin 2022

# Sommaire

1. Contexte & objectifs
2. Méthodologie d'estimation
3. Estimation des propriétés thermiques effectives
4. Développement d'un modèle couplé conduction–rayonnement
5. Conclusions & Perspectives

# 1 - Contexte & objectifs

## Introduction

Laboratoire commun **CANOPEE**<sup>1</sup> :

→ Diminuer l'empreinte carbone des procédés de fabrication à haute température



**Limites** aux températures considérées ( $> 1000\text{ °C}$ ) :

- Mesure et instrumentation difficiles

↪ Conséquences : comportement des matériaux pas toujours bien modélisé



Optimiser l'utilisation des matériaux isolants dans ces systèmes ?

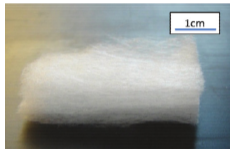
↪ Développer des **méthodes d'estimation adaptées** à ces matériaux à leurs **températures de fonctionnement**

---

<sup>1</sup>enjeu **CA**rbone : matériaux **inNO**vants pour des **P**rocédés **E**conomés en **E**nergie

# 1 - Contexte & objectifs

## Matériaux à l'étude



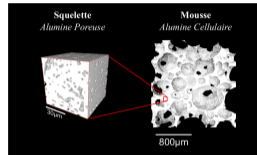
Echantillon de fibres de silice<sup>[a]</sup>



Echantillon de mousse de silice<sup>[b]</sup>



Echantillon de mousse d'alumine<sup>[c]</sup>



Microstructure mousse de silice<sup>[d]</sup>

### Mousse de **silice**

Céramique faible densité composée à 99.95%  
**fibre de silice**

↔ Jusqu'à 1200 °C

### Mousse d'**alumine**

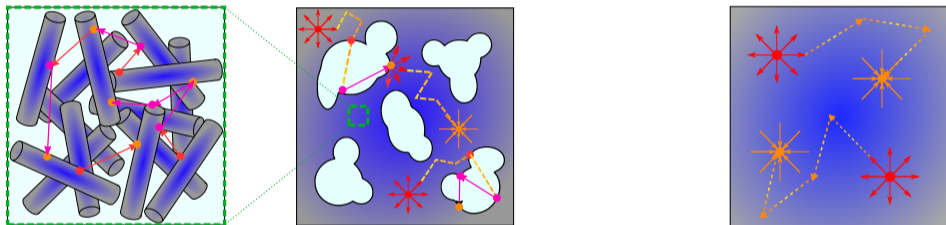
Mousse d'**alumine** à porosités ouvertes (99.5%  
alumine)

↔ Jusqu'à 1650 °C–1800 °C

# 1 - Contexte & objectifs

## Transferts de chaleurs couplés conduction–rayonnement

- Températures  $> 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$   $\rightarrow$  Transferts de chaleur **couplés**
- $\hookrightarrow$  Conduction + Rayonnement **volumique**



Milieu homogène équivalent



émission



absorption



diffusion



réflexion



conduction

## 2 - Méthodologie d'estimation

## 2 - Méthodologie d'estimation

**Objectif** : Caractériser les propriétés thermiques de matériaux isolants à haute température



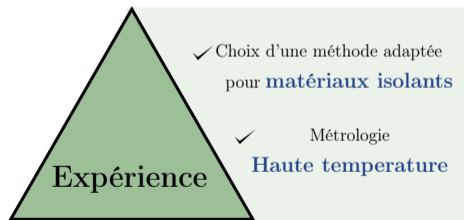
Conductivité thermique :  $\lambda$

## 2 - Méthodologie d'estimation

Objectif : Caractériser les **propriétés thermiques**  
de matériaux isolants à **haute température**



Conductivité thermique :  $\lambda$



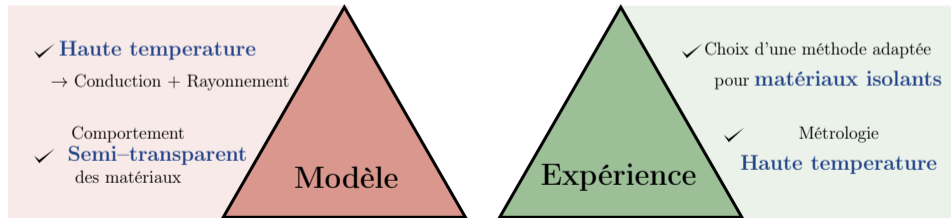


## 2 - Méthodologie d'estimation

Objectif : Caractériser les **propriétés thermiques**  
de matériaux isolants à **haute température**



Conductivité thermique :  $\lambda$

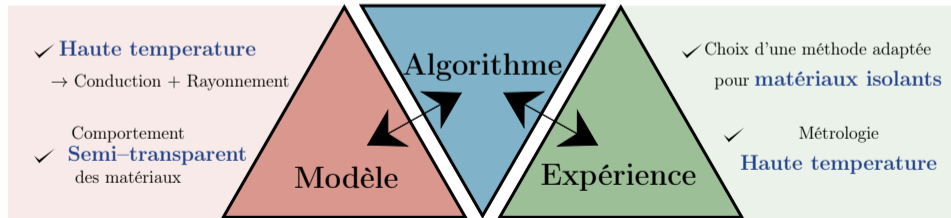


## 2 - Méthodologie d'estimation

Objectif : Caractériser les **propriétés thermiques**  
de matériaux isolants à **haute température**



Conductivité thermique :  $\lambda$



## 2 - Méthodologie d'estimation

Objectif : Caractériser les **propriétés thermiques** de matériaux isolants à **haute température**

Conductivité thermique :  $\lambda$

Identification pertinente des propriétés thermiques

Estimation

$\lambda$

- ✓ **Haute température**  
→ Conduction + Rayonnement

- ✓ Comportement **Semi-transparent** des matériaux

Modèle

Algorithmes

- ✓ Choix d'une méthode adaptée pour **matériaux isolants**

- ✓ Métrologie **Haute température**

Expérience

## 3 - Estimation des propriétés thermiques effectives

1<sup>ère</sup> stratégie : modèle conductif pur

- ▶ Estimation des propriétés thermiques → dépend du **modèle** utilisé

### 3 - Estimation des propriétés thermiques effectives

1<sup>ère</sup> stratégie : modèle conductif pur

- ▶ Estimation des propriétés thermiques → dépend du **modèle** utilisé
- Estimation de  $\lambda_{\text{eff}}$  avec un **modèle conductif pur** + 1<sup>ère</sup> **expérience**
- Estimation des propriétés optiques ( $\beta$ ) avec un **modèle radiatif** + 2<sup>ème</sup> **expérience**

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_{\text{cond}} + \lambda_{\text{rad}} \quad \text{with} \quad \lambda_{\text{rad}} = \frac{16\sigma_{\text{SB}}n^2 T^3}{3\beta}$$

### 3 - Estimation des propriétés thermiques effectives

1<sup>ère</sup> stratégie : modèle conductif pur

- ▶ Estimation des propriétés thermiques → dépend du **modèle** utilisé
- Estimation de  $\lambda_{\text{eff}}$  avec un **modèle conductif pur** + 1<sup>ère</sup> expérience
- Estimation des propriétés optiques ( $\beta$ ) avec un **modèle radiatif** + 2<sup>ème</sup> expérience

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_{\text{cond}} + \lambda_{\text{rad}} \quad \text{with} \quad \lambda_{\text{rad}} = \frac{16\sigma_{\text{SB}}n^2 T^3}{3\beta}$$



**Contraintes :**

- ▶ **Hypothèses** sur le comportement **radiatif** (Rosseland, Deissler, etc.)
- ▶ **Deux** expériences et procédures d'estimation séparées

### 3 - Estimation des propriétés thermiques effectives

#### Dispositif fil chaud parallèle

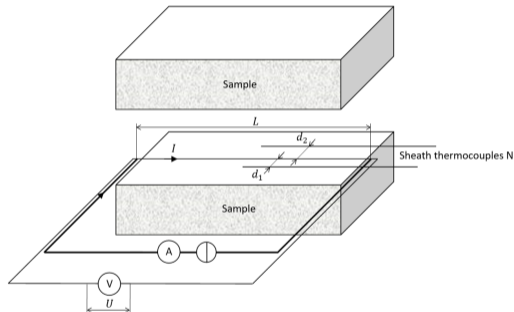


Figure: Représentation schématique du dispositif de mesure

- Méthode sonde chaude **transitoire**
- Estimation de la **conductivité thermique** à **haute température**
- Méthode normée<sup>\*</sup> (ISO 8894-2) : Matériaux **réfractaires**

# 3 - Estimation des propriétés thermiques effectives

## Dispositif fil chaud parallèle

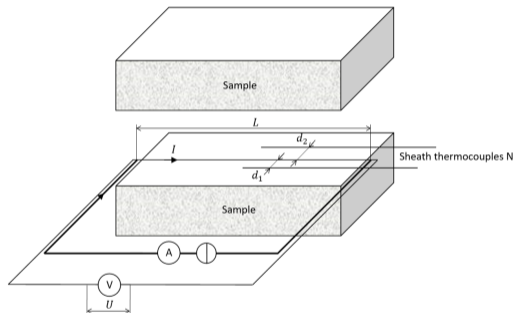


Figure: Représentation schématique du dispositif de mesure

- Méthode sonde chaude **transitoire**
- Estimation de la **conductivité thermique** à **haute température**
- Méthode normée\* (ISO 8894-2) : Matériaux **réfractaires**

\* Procédure d'analyse **non adaptée** quand les **transferts radiatifs** sont impliqués (haute température)

↪ Estimation de la **conductivité thermique effective améliorée**<sup>[c]</sup>



### 3 - Estimation des propriétés thermiques effectives

Estimation de  $\lambda_{\text{eff}}$  de la mousse de silice jusqu'à 1200 °C

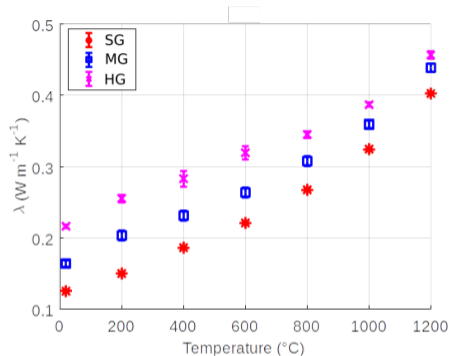


Figure: Estimations de la conductivité thermique effective de la mousse de silice pour différentes densités en fonction de la température de l'échantillon (SG :  $581 \text{ kg m}^{-3}$ , MG :  $741 \text{ kg m}^{-3}$ ,  $910 \text{ kg m}^{-3}$ )<sup>[d]</sup>

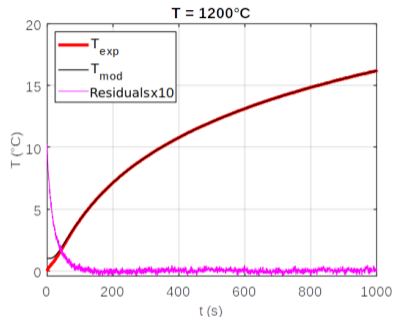
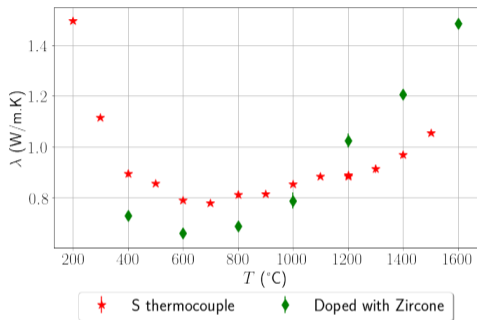


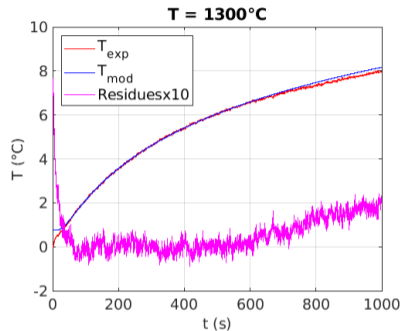
Figure: Tracés des évolutions de températures expérimentale ( $T_{\text{exp}}$ ) et modèle ( $T_{\text{mod}}$ ) à partir des estimations entre 100 s et 800 s avec des résidus d'estimation  $\times 10$  pour la mousse de silice basse densité (SG) à 1200 °C et  $d = 10 \text{ mm}$  <sup>[d]</sup>

### 3 - Estimation des propriétés thermiques effectives

Estimation de  $\lambda_{\text{eff}}$  de la mousse d'alumine jusqu'à 1600 °C



**Figure:** Estimations de la conductivité thermique effective de la mousse d'alumine (S thermocouple) et la mousse d'alumine dopée Zircon, de densité  $\rho = 720 \text{ kg m}^{-3}$



**Figure:** Tracés des évolutions de températures expérimentale ( $T_{\text{exp}}$ ) et modèle ( $T_{\text{mod}}$ ) à partir des estimations entre 100 s et 600 s avec des résidus d'estimation  $\times 10$  pour la mousse d'alumine à 1300 °C et  $d = 15 \text{ mm}$

### 3 - Estimation des propriétés thermiques effectives

Limites de l'approche

En premier lieu

↪ **Séparation des contributions**  $\lambda_{\text{cond}}$  et  $\lambda_{\text{rad}}$  avec l'estimation de  $\beta$

# 3 - Estimation des propriétés thermiques effectives

Limites de l'approche

En premier lieu

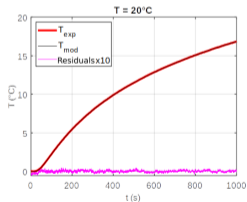
↪ **Séparation des contributions**  $\lambda_{\text{cond}}$  et  $\lambda_{\text{rad}}$  avec l'estimation de  $\beta$



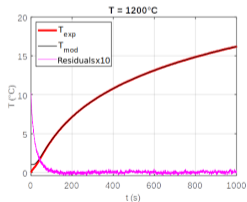
**Limites** de l'approche :

+ le rayonnement est **important** + l'intervalle d'estimation est **réduit**

Mousse de **silice**

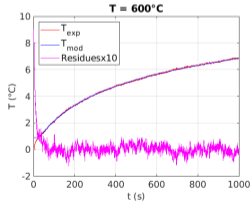


$t_{\text{est}} \in [0.2\text{s} : 1000\text{s}]$

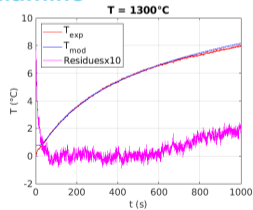


$t_{\text{est}} \in [100\text{s} : 800\text{s}]$

Mousse d'**alumine**



$t_{\text{est}} \in [0.5\text{s} : 800\text{s}]$



$t_{\text{est}} \in [100\text{s} : 600\text{s}]$

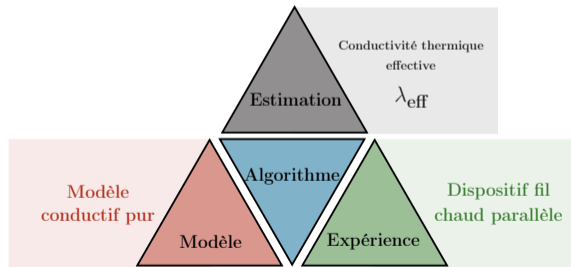
## 4 - Développement d'un modèle couplé conduction–rayonnement

Démarche adoptée

$$\lambda_{\text{eff}} ? \lambda_{\text{cond}} ?$$



Qu'est-ce que l'on peut faire pour aller vers la **séparation des contributions** conduction et rayonnement dans  $\lambda$  avec les **mesures fil chaud parallèle** dont on dispose ?



## 4 - Développement d'un modèle couplé conduction–rayonnement

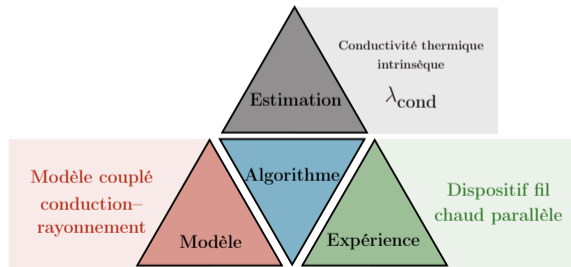
Démarche adoptée

$$\lambda_{\text{eff}} ? \lambda_{\text{cond}} ?$$



Qu'est-ce que l'on peut faire pour aller vers la **séparation des contributions** conduction et rayonnement dans  $\lambda$  avec les **mesures fil chaud parallèle** dont on dispose ?

Développement d'un **modèle conduction–rayonnement**



## 4 - Développement d'un modèle couplé conduction-rayonnement

Démarche adoptée

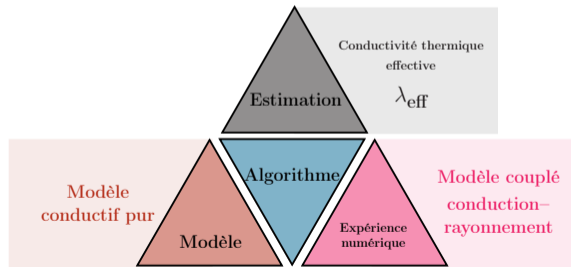
$$\lambda_{\text{eff}} ? \lambda_{\text{cond}} ?$$



Qu'est-ce que l'on peut faire pour aller vers la **séparation des contributions** conduction et rayonnement dans  $\lambda$  avec les **mesures fil chaud parallèle** dont on dispose ?

Développement d'un **modèle conduction-rayonnement**

↪ Expérience numérique



## 4 - Développement d'un modèle couplé conduction–rayonnement

Expérience numérique : Dispositif fil chaud parallèle

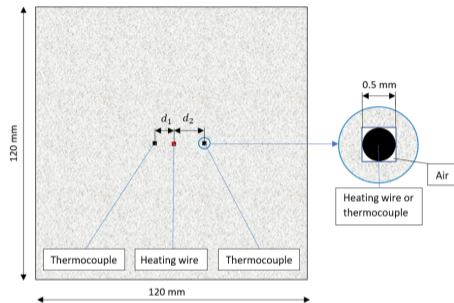


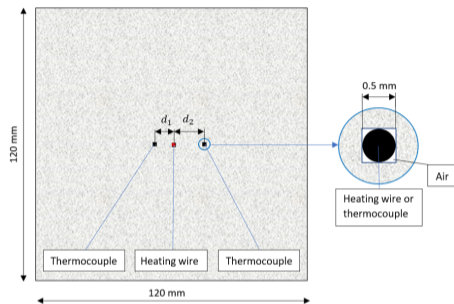
Figure: Schéma 2D du système modélisé avec  $d_1 = 10$  mm et  $d_2 = 15$  mm

- Estimation des **températures locales** des thermocouples  $T(\vec{x}, t)$
- **Emission de puissance** dans le fil chauffant
- Température initiale de l'échantillon à l'équilibre avec le four



## 4 - Développement d'un modèle couplé conduction–rayonnement

Expérience numérique : Dispositif fil chaud parallèle



- Estimation des **températures locales** des thermocouples  $T(\vec{x}, t)$
- **Emission de puissance** dans le fil chauffant
- Température initiale de l'échantillon à l'équilibre avec le four

Figure: Schéma 2D du système modélisé avec  $d_1 = 10$  mm et  $d_2 = 15$  mm



Elements à prendre en compte:

- ▶ Conduction **instationnaire** → Estimation de  $T(\vec{x}, t)$  à de multiples temps
- ▶ Milieu **semi-transparent** → Rayonnement volumique (absorption/émission + diffusion)

## 4 - Développement d'un modèle couplé conduction–rayonnement

Quels sont les besoins ?



**Critères** de choix :

- ▶ Modèle directe robuste **sans hypothèse sur les propriétés optiques**
- ▶ Approche **non limitée** aux modèles asymptotiques (milieu optiquement épais ou mince)

## 4 - Développement d'un modèle couplé conduction–rayonnement

Quels sont les besoins ?



**Critères** de choix :

- ▶ Modèle directe robuste **sans hypothèse sur les propriétés optiques**
- ▶ Approche **non limitée** aux modèles asymptotiques (milieu optiquement épais ou mince)

**Modèle couplé** basé sur les **méthodes de Monte Carlo** :

- Résolution de problèmes de thermique **couplés et transitoires** dans le cadre de la caractérisation des milieux complexes<sup>[e]</sup>
- Prise en compte du **rayonnement volumique** dans les algorithmes Monte–Carlo couplés conduction–rayonnement<sup>[f]</sup>

## 4 - Développement d'un modèle couplé conduction–rayonnement

Quels sont les besoins ?



**Critères** de choix :

- ▶ Modèle directe robuste **sans hypothèse sur les propriétés optiques**
- ▶ Approche **non limitée** aux modèles asymptotiques (milieu optiquement épais ou mince)

**Modèle couplé** basé sur les **méthodes de Monte Carlo** :

- Résolution de problèmes de thermique **couplés et transitoires** dans le cadre de la caractérisation des milieux complexes<sup>[e]</sup>
- Prise en compte du **rayonnement volumique** dans les algorithmes Monte–Carlo couplés conduction–rayonnement<sup>[f]</sup>

↔ Possibilité de **lever des hypothèses** faites à ce stade (milieu homogène, corps gris etc.)

## 4 - Développement d'un modèle couplé conduction–rayonnement

Deux algorithmes Monte–Carlo envisagés

Algorithme MC "tout en un" **A1**

Conduction (MC)  
&  
Rayonnement **linéarisé** (MC)

Algorithme MC–DF **A2**

Conduction (DF)  
+  
Rayonnement **non linéarisé** (MC)

**MC** : Monte Carlo ; **DF** : Différences finies

## 4 - Développement d'un modèle couplé conduction–rayonnement

Deux algorithmes Monte–Carlo envisagés

Algorithme MC "tout en un" **A1**

Conduction (MC)  
&  
Rayonnement **linéarisé** (MC)

Algorithme MC–DF **A2**

Conduction (DF)  
+  
Rayonnement **non linéarisé** (MC)



Stratégie adoptée :

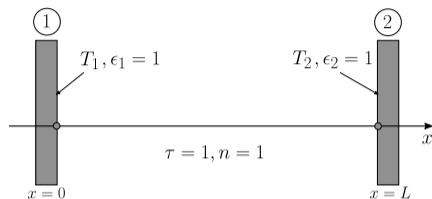
1. Validation de **A2** sur des configurations avec **solutions semi–analytiques**<sup>[g, h, i]</sup>
2. Études paramétriques théoriques pour **identifier les limites** de **A1** par rapport à **A2**
3. Modélisation du **dispositif fil chaud parallèle** avec les algorithmes **A1** et/ou **A2**

**MC** : Monte Carlo ; **DF** : Différences finies

## 4 - Développement d'un modèle couplé conduction–rayonnement

Validation semi-analytique : Cas 1D milieu absorbant et parois noires<sup>[g]</sup>

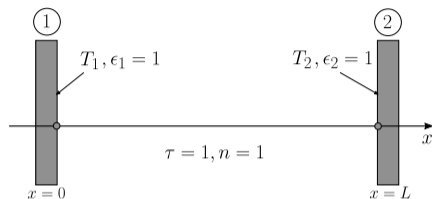
- Conduction en régime **stationnaire**
- Rayonnement : absorbant/émettant (**pas de diffusion**)
- Milieu **gris homogène**
- Parois **noires** ( $\epsilon = 1$ )
- Epaisseur optique unitaire  $\tau = 1 \rightarrow k_a = 1 \text{ m}^{-1}$



## 4 - Développement d'un modèle couplé conduction–rayonnement

Validation semi-analytique : Cas 1D milieu absorbant et parois noires<sup>[g]</sup>

- Conduction en régime **stationnaire**
- Rayonnement : absorbant/émettant (**pas de diffusion**)
- Milieu **gris homogène**
- Parois **noires** ( $\epsilon = 1$ )
- Épaisseur optique unitaire  $\tau = 1 \rightarrow k_a = 1 \text{ m}^{-1}$



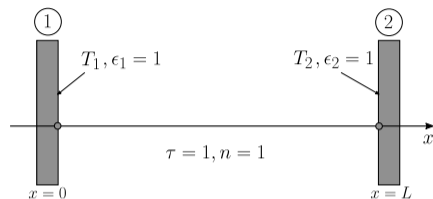
- ▶ Solution **semi-analytique** : Exponential Integral Functions (EIF)
- ▶ **Plan chaud** :  $T_1$  imposé en  $x = 0$  et  $T_2$  en  $x = L$



## 4 - Développement d'un modèle couplé conduction–rayonnement

Validation semi–analytique : Cas 1D milieu absorbant et parois noires<sup>[g]</sup>

- Conduction en régime **stationnaire**
- Rayonnement : absorbant/émettant (**pas de diffusion**)
- Milieu **gris homogène**
- Parois **noires** ( $\epsilon = 1$ )
- Épaisseur optique unitaire  $\tau = 1 \rightarrow k_a = 1 \text{ m}^{-1}$



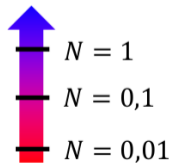
- ▶ Solution **semi–analytique** : Exponential Integral Functions (EIF)
- ▶ **Plan chaud** :  $T_1$  imposé en  $x = 0$  et  $T_2$  en  $x = L$

2 cas d'étude :

- $T_1 = 2 \times T_2$
- $T_1 = 10 \times T_2$

Évalués pour différents **Nombre de Stark** :

$$N = \frac{\lambda_{\text{cond}} k_a}{4 \sigma_{\text{SB}} T_1^3}$$



## 4 - Développement d'un modèle couplé conduction–rayonnement

Validation semi-analytique : Cas 1D milieu absorbant et parois noires<sup>[g]</sup>

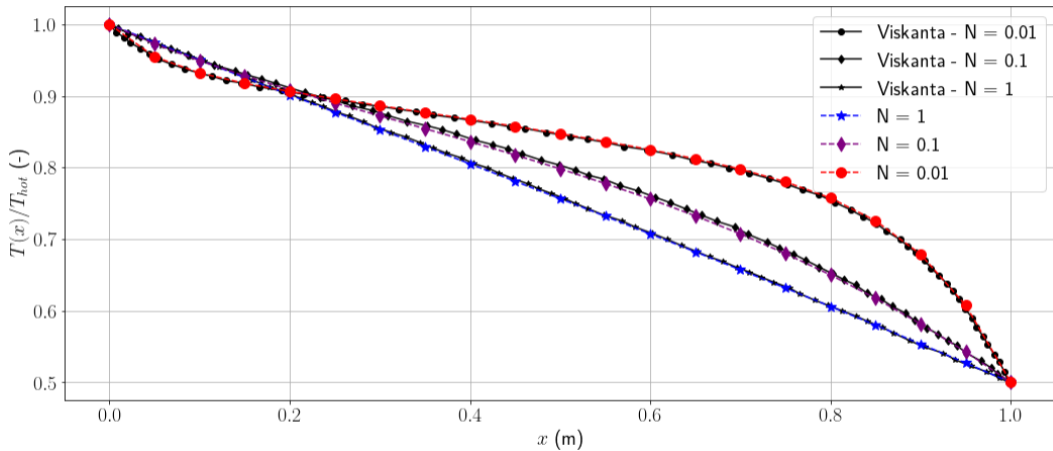


Figure: Profils de températures issus de l'algorithme MC-DF A2 comparés aux résultats issus de la solution analytique<sup>[g]</sup> pour  $T_1 = 2 \times T_2$

## 4 - Développement d'un modèle couplé conduction–rayonnement

Etude paramétrique théorique (I)

- ▶ Études paramétriques théoriques pour **identifier les limites** de **A1** par rapport à **A2**

## 4 - Développement d'un modèle couplé conduction–rayonnement

Étude paramétrique théorique (I)

- ▶ Études paramétriques théoriques pour **identifier les limites** de **A1** par rapport à **A2**

 Comment aborder ces **études paramétriques** en se rapprochant du **dispositif fil chaud parallèle** ?

## 4 - Développement d'un modèle couplé conduction–rayonnement

### Étude paramétrique théorique (I)

- ▶ Études paramétriques théoriques pour **identifier les limites** de **A1** par rapport à **A2**

 Comment aborder ces **études paramétriques** en se rapprochant du **dispositif fil chaud parallèle** ?



Éléments à prendre en compte:

- ▶ Conduction **instationnaire**
- ▶ Milieu **semi-transparent**

## 4 - Développement d'un modèle couplé conduction–rayonnement

### Étude paramétrique théorique (I)

- ▶ Études paramétriques théoriques pour **identifier les limites** de **A1** par rapport à **A2**

 Comment aborder ces **études paramétriques** en se rapprochant du **dispositif fil chaud parallèle** ?



Éléments à prendre en compte:

- ▶ Conduction **instationnaire**
- ▶ Milieu **semi-transparent**

 Qu'est-ce qui pilote les **non-linéarités** ?

## 4 - Développement d'un modèle couplé conduction–rayonnement

Étude paramétrique théorique (I)

- ▶ Études paramétriques théoriques pour **identifier les limites** de **A1** par rapport à **A2**

 Comment aborder ces **études paramétriques** en se rapprochant du **dispositif fil chaud parallèle** ?



Éléments à prendre en compte:

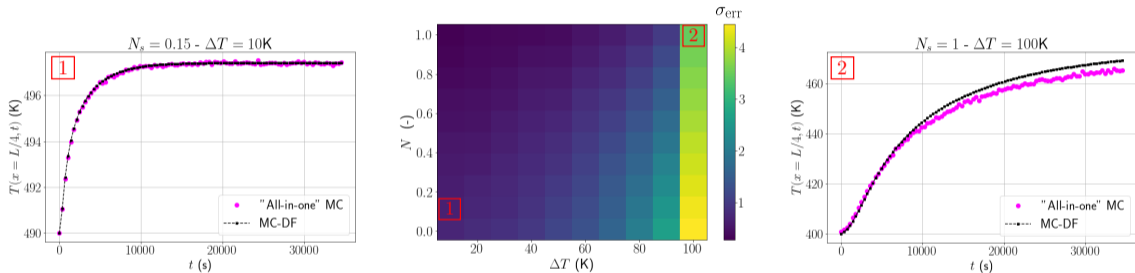
- ▶ Conduction **instationnaire**
- ▶ Milieu **semi-transparent**

 Qu'est-ce qui pilote les **non-linéarités** ?

1. Le **gradient de température**  $\Delta T$  dans le système
2. Le **nombre de Stark**  $N = \frac{\lambda_{\text{cond}} k_a}{4 \sigma_{\text{SB}} T_1^3}$

## 4 - Développement d'un modèle couplé conduction–rayonnement

### Etude paramétrique théorique (II)



↔ Ecarts entre les algorithmes **A1** et **A2** augmentent lorsqu'à la fois  $N \searrow$  et  $\Delta T \nearrow$



## 5 - Conclusions & Perspectives

Poursuite des **études paramétriques** :

- avec d'**autres paramètres** d'influence ( $\tau$ ,  $\epsilon$  etc.)
- en augmentant la complexité pour **aller vers le dispositif fil chaud parallèle**

## 5 - Conclusions & Perspectives

Poursuite des **études paramétriques** :

- avec d'**autres paramètres** d'influence ( $\tau$ ,  $\epsilon$  etc.)
- en augmentant la complexité pour **aller vers le dispositif fil chaud parallèle**

**Modélisation 2D/3D** du dispositif fil chaud parallèle :

- Etude de **sensibilités paramétriques**
  - Utilisation du modèle comme **expérience numérique**
- ↪ Comparaison des estimations issues de l'expérience numérique avec celles de l'expérience fil chaud parallèle

## 5 - Conclusions & Perspectives

Poursuite des **études paramétriques** :

- avec d'**autres paramètres** d'influence ( $\tau$ ,  $\epsilon$  etc.)
- en augmentant la complexité pour **aller vers le dispositif fil chaud parallèle**

**Modélisation 2D/3D** du dispositif fil chaud parallèle :

- Etude de **sensibilités paramétriques**
  - Utilisation du modèle comme **expérience numérique**
- ↪ Comparaison des estimations issues de l'expérience numérique avec celles de l'expérience fil chaud parallèle

**Objectif final** :

Développer une **méthode de mesure** pour **caractériser les propriétés thermiques** de matériaux isolants **jusqu'à 1500 °C**

**Merci pour votre attention,**

**Avez-vous des questions ?**

# Bibliographie

- [a] Y. Maanane, Identification expérimentale de propriétés radiatives à partir de méthodes Monte Carlo Symbolique : Application aux matériaux hétérogènes à haute température, Thèse de doctorat, Université de Lyon, 2020
- [b] Fiche technique SGQ, 2016
- [c] Site internet Saint-Gobain Refractories
- [d] Z. K. Low, Matériaux cellulaires isolants haute température relations microstructure–propriétés, Thèse de doctorat, INSA Lyon, 2020
- [e] Jannot Y., Degiovanni A., Schick V., Meulemans J., Apparent thermal conductivity measurement of anisotropic insulating materials at high temperature by the parallel hot-wire method, International Journal of Thermal Sciences 160 (2021) 106672.
- [f] Penazzi L., Jannot Y., Meulemans J., Farges O., Schick V., Influence of radiation heat transfer on parallel hot-wire thermal conductivity measurements of semi-transparent materials at high temperature, International Journal of Thermal Sciences, vol. 179, art. 107690 (2022).
- [g] Sans M., Schick V., Parent G., Farges O., Experimental characterization of the coupled conductive and radiative heat transfer in ceramic foams with a flash method at high temperature, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 148, art. 119077 (2020).
- [h] Penazzi L., Blanco S., Caliot C., Coustet C., El-Hafi M., Fournier R., Galtier M., Ibarrart L., Roger M., Toward the use of Symbolic Monte Carlo for conduction-radiation coupling in complex geometries, RAD-19 - 9th International Symposium on Radiative Transfer, pp. 311-318. (2019).
- [i] Viskanta, R., and Grosh, R. J. (February 1, 1962). "Heat Transfer by Simultaneous Conduction and Radiation in an Absorbing Medium." ASME. J. Heat Transfer. February 1962; 84(1): 63–72.
- [j] R. Viskanta, R.J. Grosh, Effect of surface emissivity on heat transfer by simultaneous conduction and radiation, International Journal of Heat and Mass Transfer, (1962)
- [k] R. Viskanta. Heat Transfer by Conduction and Radiation in Absorbing and Scattering Materials. Journal of Heat Transfer, (1965).

# Premières estimation du coefficient d'extinction de la mousse de silice

	$\rho$	$\beta$	$\sigma_\beta$	a	$\sigma_a$	b	$*\sigma_b$	$\frac{\lambda_c 1200\text{ °C}}{\lambda_c 20\text{ °C}}$		
	$\text{kg m}^{-3}$	$\text{m}^{-1}$	%	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	%	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	%	thermique	SiO2 *	Air
SG	$581 \text{ kg m}^{-3}$	$6.83 \times 10^3$	3.0	$9.09 \times 10^{-2}$	2.1	$1.15 \times 10^{-4}$	3.2	2.4		
MG	$741 \text{ kg m}^{-3}$	$7.86 \times 10^3$	8.6	$1.34 \times 10^{-1}$	3.7	$1.20 \times 10^{-4}$	7.6	2.0	2.0	3.5
HG	$910 \text{ kg m}^{-3}$	$1.35 \times 10^4$	19.4	$1.83 \times 10^{-1}$	3.5	$1.31 \times 10^{-4}$	9.2	1.8		

Table: Valeurs des paramètres  $a$ ,  $b$  et  $\beta$  estimés et leurs incertitudes.

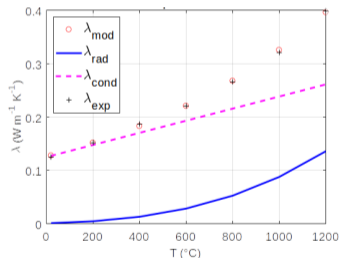


Figure: Conductivités thermiques estimées pour la mousse de silice basse densité (SG)

\* d'après Combis et al., 2012.

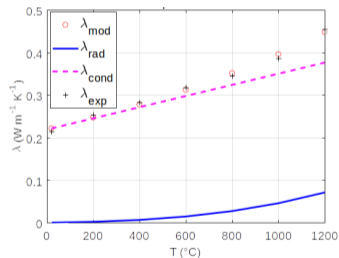


Figure: Conductivités thermiques estimées pour la mousse de silice haute densité (HG)

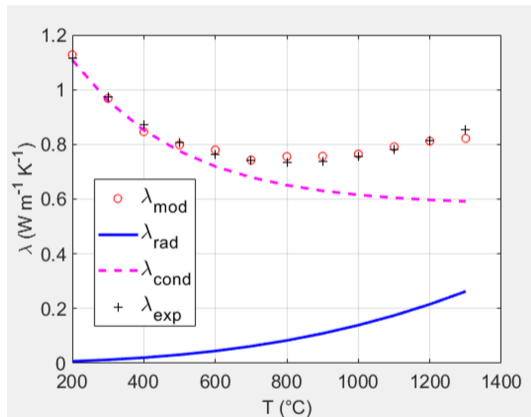
# Premières estimation du coefficient d'extinction de la mousse d'alumine

**Masse volumique** de l'échantillon de mousse d'alumine :

$$\rho = 720 \text{ kg m}^{-3}$$

Première estimation du **coefficient d'extinction** :

$$\beta = 4400 \text{ m}^{-1}$$



**Figure:** Conductivités thermiques estimées pour la mousse d'alumine