

# Modélisation des transferts couplés conduction - rayonnement dans des matériaux hétérogènes à haute-température

---

**Maxime Roger**

*Centre d'Énergie et Thermique de Lyon, CETHIL UMR 5008*

Journée de rencontre de la graduate initiative EIF

11-12 juillet 2024



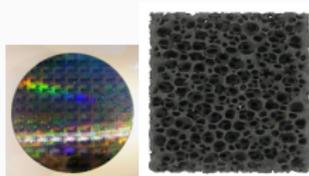
$30^{\circ}\text{C} < T < 1800^{\circ}\text{C}$



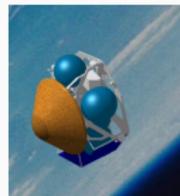
Sécurité incendie



Fours verriers

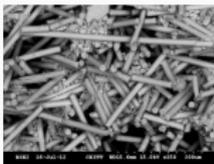


Matériaux pour le solaire

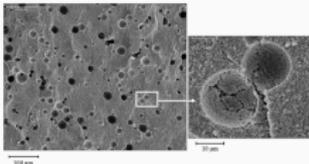


Protection thermique

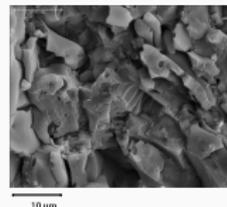
- Barrières thermiques - isolants haute-température



Silice

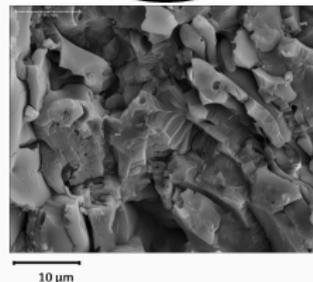
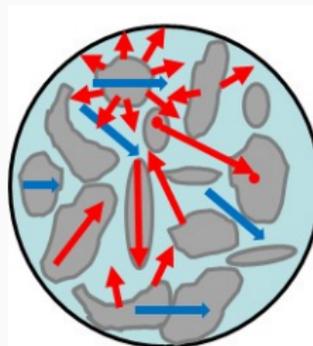
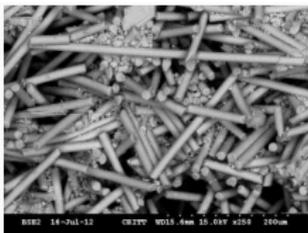
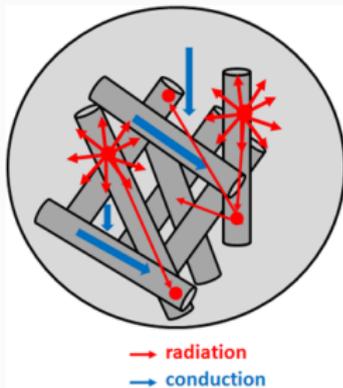


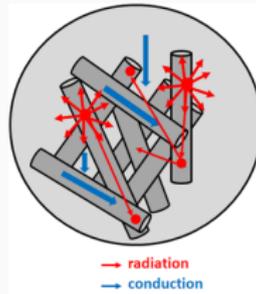
Zircone frittée



Alumine projetée plasma

Etude de l'impact des transferts radiatifs sur l'ensemble des transferts thermiques





## Milieu solide opaque et milieux gazeux transparent

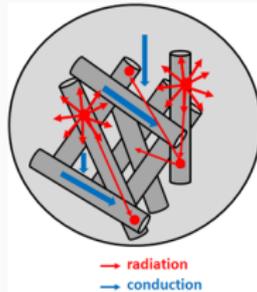
- Éq. de la chaleur

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = 0$$

- Conditions aux bords :

$$-\lambda \nabla T(\mathbf{x}_{\text{lim}}) \cdot \mathbf{n} = \int_0^{+\infty} \int_{4\pi} L_\eta(\mathbf{x}_{\text{lim}}, \mathbf{u})(\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) d\mathbf{u} d\eta$$

avec  $L_\eta(\mathbf{x}_{\text{lim}}, \mathbf{u}) \equiv L_\eta(\mathbf{x}_{\text{lim}}, \mathbf{u}; \varepsilon_\lambda)$  dépend de l'émissivité  $\varepsilon_\lambda$



## Milieu solide et gaz semi-transparentes

- Éq. de la chaleur avec un terme source radiatif ( $S_r$ )

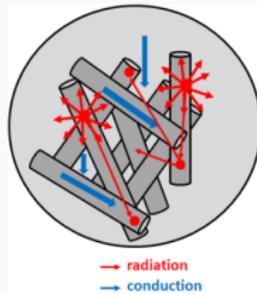
$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = S_r = \int_0^{+\infty} \kappa_\eta \left( 4\pi L_\eta^0(T) - \int_{4\pi} L_\eta(\mathbf{x}, \mathbf{u}) d\mathbf{u} \right) d\eta$$

- Équation de Transfert Radiatif (ETR)

$$\mathbf{u} \cdot \nabla L_\eta(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = -(\kappa_\eta + \sigma_\eta) L_\eta(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + \kappa_\eta L_\eta^0(T) + \sigma_\eta \int_{4\pi} p_\eta(\mathbf{u}|\mathbf{u}') L_\eta(\mathbf{x}, \mathbf{u}') d\mathbf{u}'$$

- Conditions aux bords avec  $L_\eta(\mathbf{x}_{\text{lim}}, \mathbf{u}) \equiv L_\eta(\mathbf{x}_{\text{lim}}, \mathbf{u}; \varepsilon \lambda)$  :

$$-\lambda \nabla T(\mathbf{x}_{\text{lim}}) \cdot \mathbf{n} = \int_0^{+\infty} \int_{4\pi} L_\eta(\mathbf{x}_{\text{lim}}, \mathbf{u}) (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) d\mathbf{u} d\eta$$

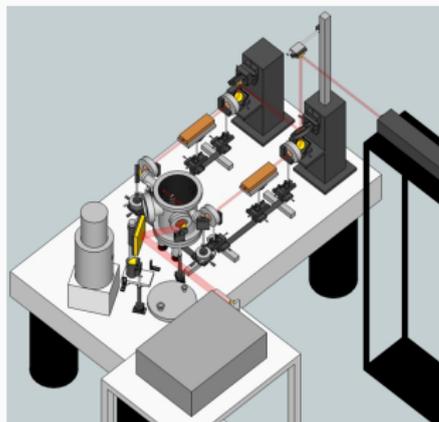


Les propriétés thermophysiques sont nécessaires pour prédire les transferts thermiques

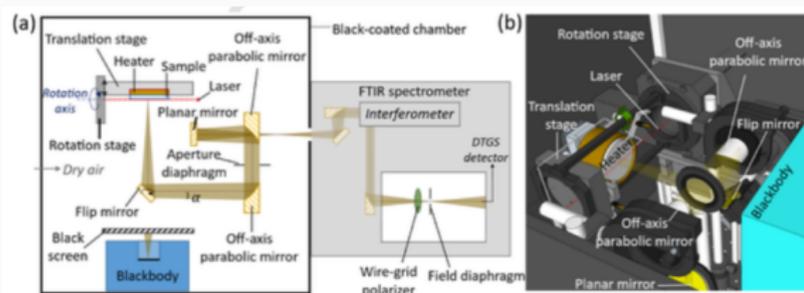
- $\rho$ ,  $c_p$  et  $\lambda$
- Propriétés radiatives :  $\varepsilon_\lambda$ ,  $\kappa_\eta$ ,  $\sigma_\eta$  et  $p_\eta(\mathbf{u}|\mathbf{u}')$  sur tout le spectre utile

# Métrologie radiative à haute-température

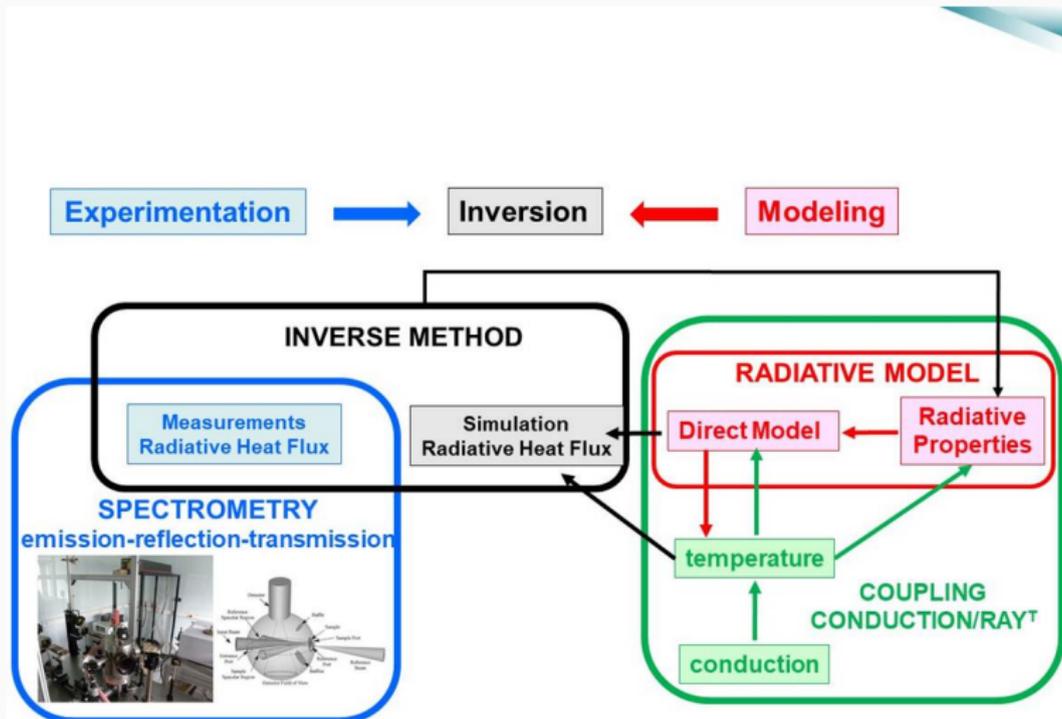
- Banc de mesure de spectres d'émission à haute-température  $T > 800^{\circ}\text{C}$ .



- Banc d'émission spectrale directionnelle  $100^{\circ}\text{C} < T < 300^{\circ}\text{C}$  à plus basse température

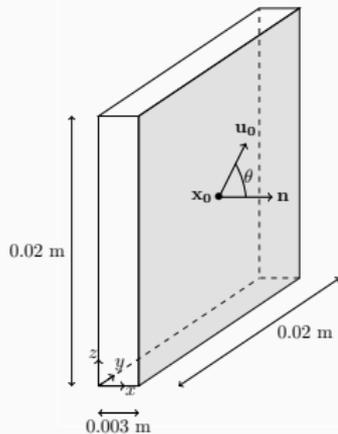


# Identification expérimentales des propriétés radiatives



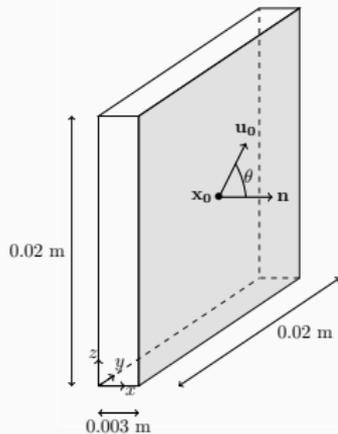
## Méthodes statistiques de Monte Carlo

- Méthodes de références
- gestion de la complexité (physique et géométrique)



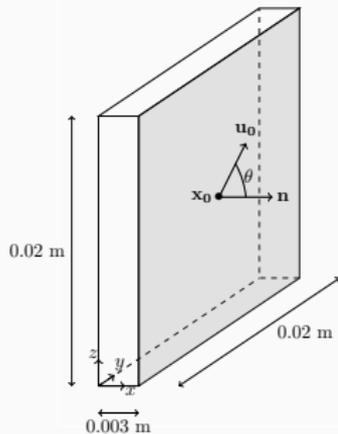
## Méthodes statistiques de Monte Carlo

- Méthodes de références
- gestion de la complexité (physique et géométrique)



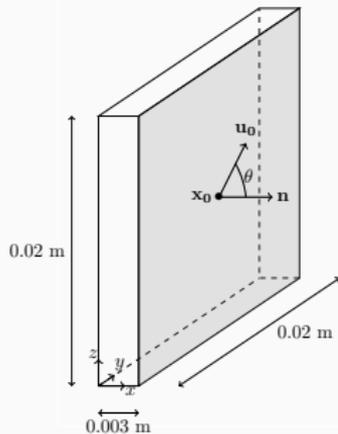
## Méthodes statistiques de Monte Carlo

- Méthodes de références
- gestion de la complexité (physique et géométrique)



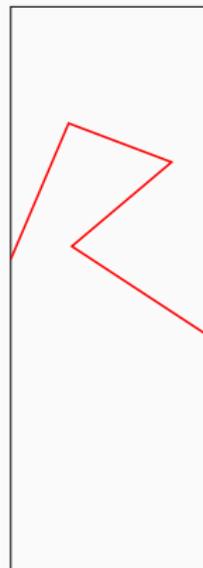
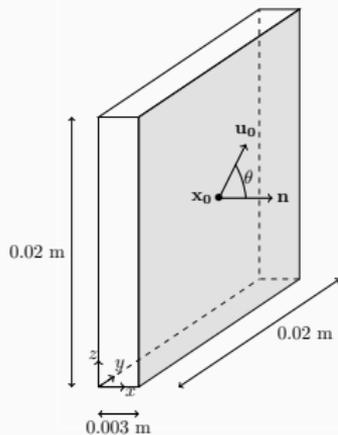
## Méthodes statistiques de Monte Carlo

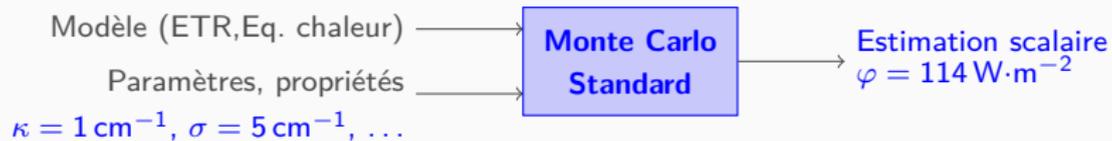
- Méthodes de références
- gestion de la complexité (physique et géométrique)

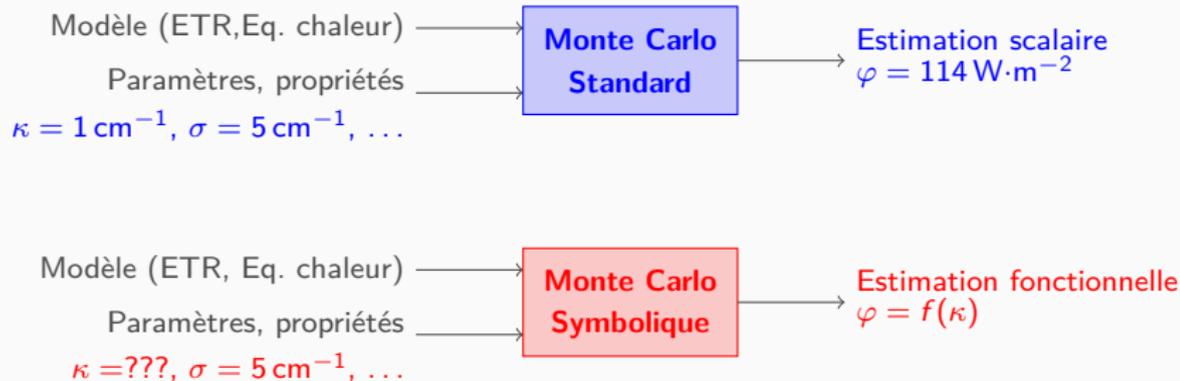


## Méthodes statistiques de Monte Carlo

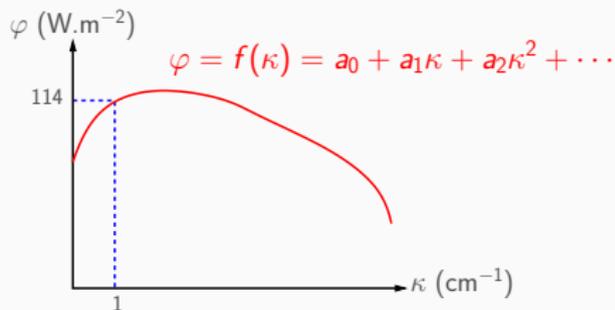
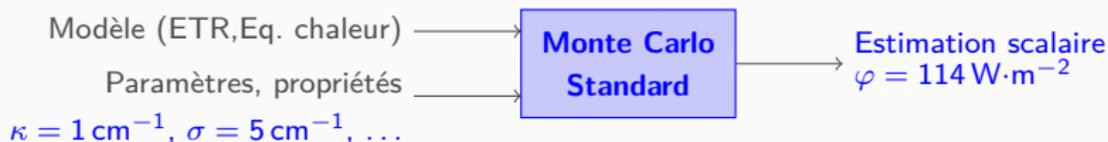
- Méthodes de références
- gestion de la complexité (physique et géométrique)



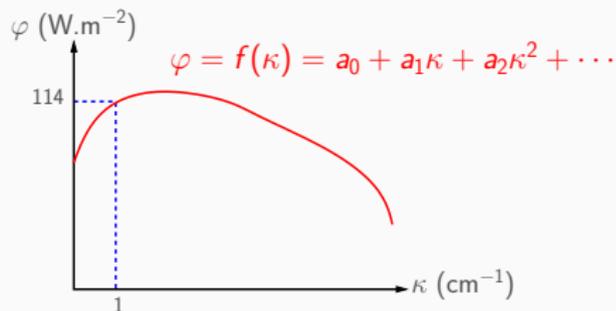
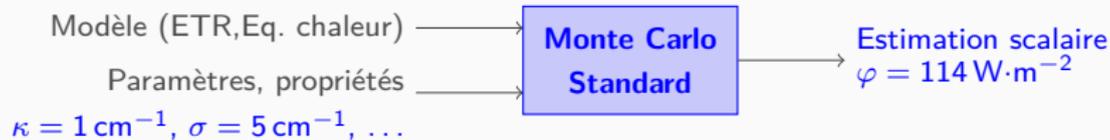




# Méthodes de Monte-Carlo Symboliques



# Méthodes de Monte-Carlo Symboliques



- En 1 seule simulation, l'observable est décrite sur **tout un espace paramétrique**.
- **Apports importants** pour l'analyse, l'inversion, le pilotage ou l'expérimental.
- Les avantages des méthodes de Monte Carlo sont conservés.

**Jusqu'alors, méthodes limitées à certains paramètres.**

**Plusieurs ruptures dans le cadre du transfert radiatif :**

- Extension aux **coefficients d'absorption et de diffusion**

↪ Emploi d'algorithmes à collisions nulles

📄 Galtier, Roger, André, Delmas, *A symbolic approach for the identification of radiative properties*, JQSRT, 2017

- Extension aux **paramètres de fonctions de phase**

↪ Projection sur des bases polynomiales

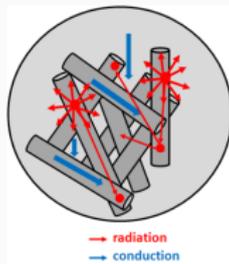
📄 Roger, Maanane, Galtier, André, Delmas, *Symbolic Monte Carlo method based on orthogonal polynomials series : application to phase function*, RAD19, 2019

- Extension aux **paramètres géométriques**

↪ Flux radiatif en fonction de la taille d'une hétérogénéité (taille et position d'un cylindre)

📄 Said, Galtier, Mahieu-Willieme, Montcel, Roger, *A Monte Carlo approach for brain functional mapping* RAD23, 2023

**Objectif :** Modélisation du couplage conduction-rayonnement dans des céramiques hétérogène (Alumine et silice) à haute-température



1. Étude bibliographique sur les modèles de conduction en milieux hétérogènes
2. Utilisation des méthodes de Monte-Carlo symboliques pour :
  - Développer des modèles de flux radiatif en fonction des températures :

$$S_r \equiv S_r(T_0, T_1, \dots, T_N)$$

pour faciliter le couplage conduction - rayonnement

- Étudier l'influence de paramètres géométriques (taille des hétérogénéités) sur les flux de chaleurs
3. Quantifier l'impact des transferts radiatifs sur les performances de ces matériaux

Développement de méthode d'identification des paramètres thermophysiques dans des procédés à haute-température (propriétés radiatives et conductives)

- Approches expérimentales pour mesurer les flux radiatifs et conductifs à haute-température
- Modélisation des transferts couplés
- Prédiction et optimisation des performances thermiques des matériaux

**Merci pour votre attention.**