



# ÉCHANGEURS DE CHALEUR ET SIMULATIONS PAR DES MILIEUX POREUX

---

Atelier Sûreté-MSFR

**NEEDS PF** Systèmes nucléaires et scénarios

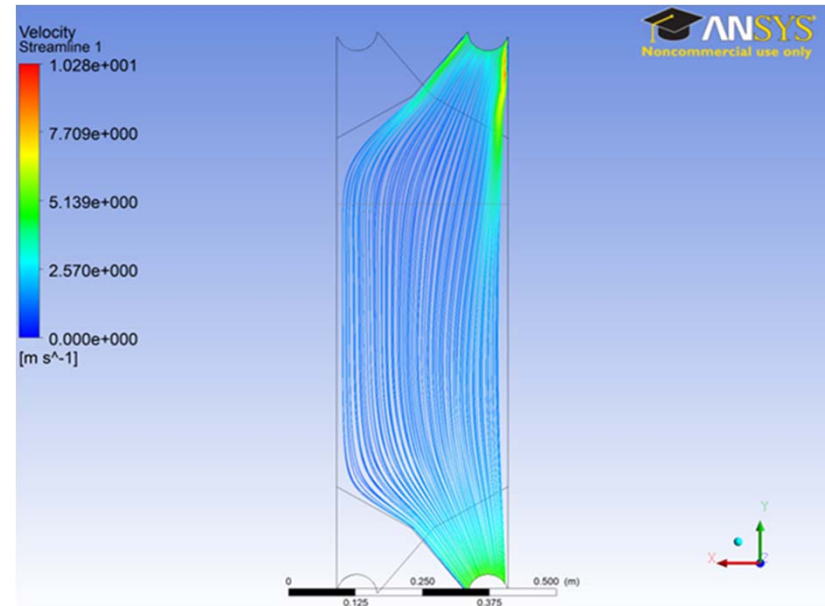
Mardi 25 novembre 2014

# OBJECTIFS

---

# Pourquoi utiliser une approche milieu poreux dans les échangeurs (HXs)?

- Des échangeurs type plaque sont actuellement en considération pour le MSFR...
- Cependant la géométrie des HXs peut encore évoluer en fonction des contraintes de conception
- Le distributeur et collecteur des HXs ne sont pas connus
- Calculs CFD sont très coûteux même avec des géométries simplifiées et des écoulements monophasiques
- La phénoménologie est assez compliquée: écoulements turbulents, transfert radiatif, changement de phase, ...



**Modèle CFD  
FLUENT pour les  
HXs du type  
plaque.  
Comparaison avec  
des données  
industrielles  
(Stage M. Duffoi)**



# Performances attendues du modèle

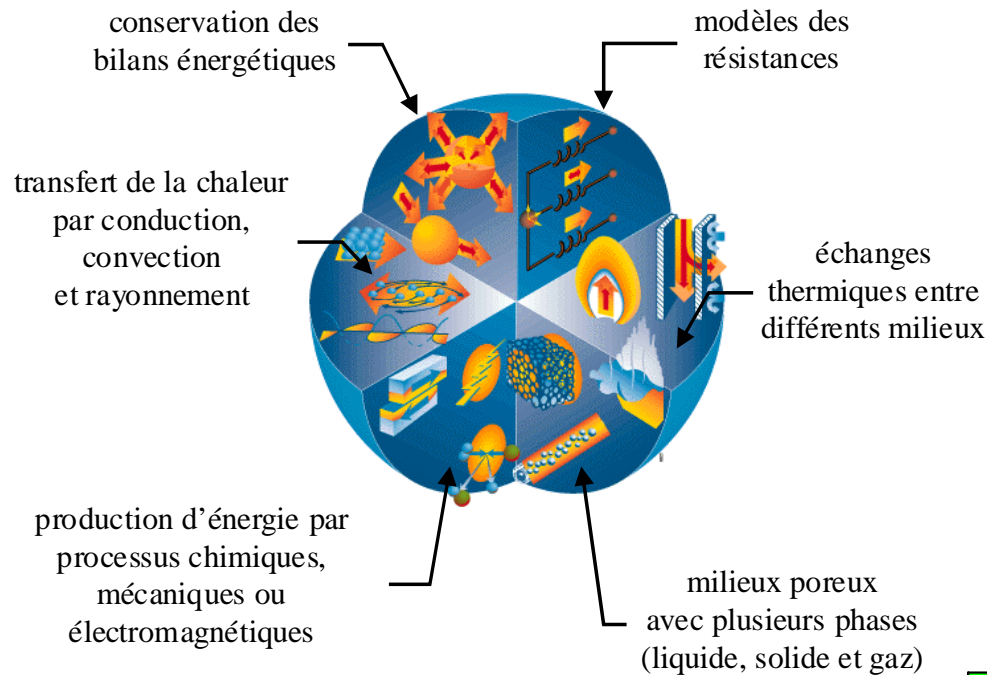
- Prise en compte des échanges d'énergie par rayonnement, conduction et convection entre les surfaces et le(s) fluide(s)
- Modélisation du changement de phase du sel (solidification, et fusion)
- Précision raisonnable ( $<10\%$ ) avec un domaine de validité pour les paramètres du milieu poreux ( $p$ ,  $e$ ,  $k$ ,  $T$ , forme particules) suffisamment large pour les études de sûreté
- Coût numérique faible (nombre mailles) et intégration simple dans la résolution numérique des équations RANS des autres régions du circuit combustible
- A terme: doit permettre d'intégrer des aspects du comportement thermomécanique des HXs

# APPROCHE MILIEUX POREAUX

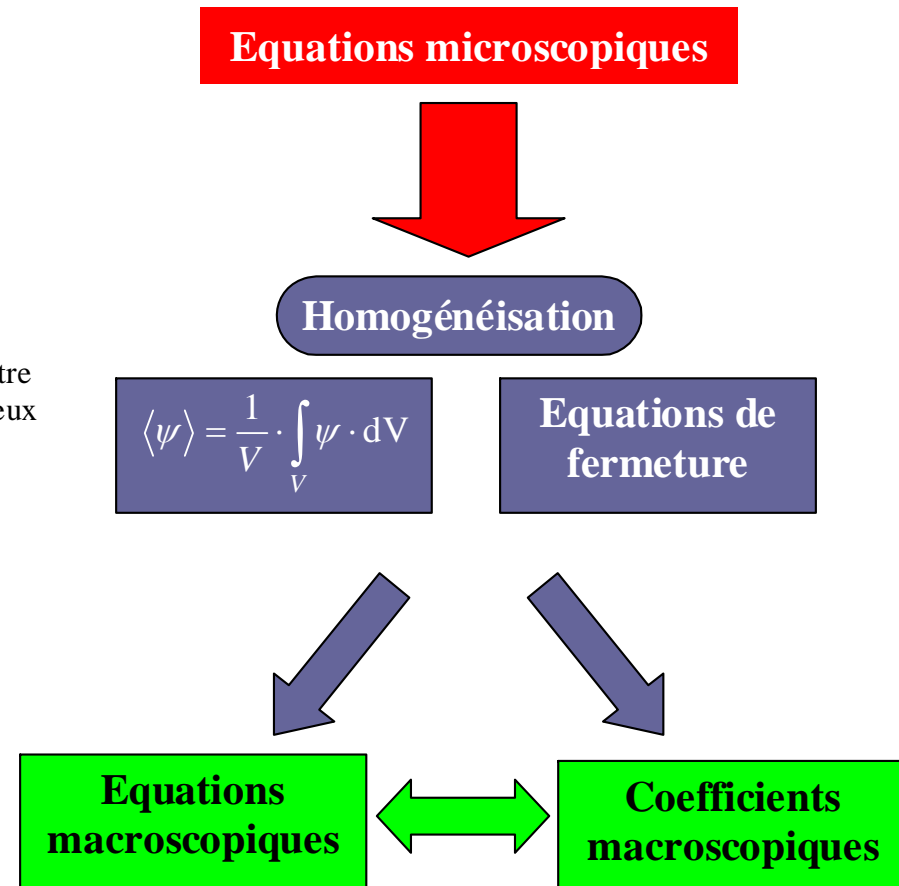
---

# Obtention des équations du milieu poreux

## Approche milieu poreux



## Méthode de moyenne volumique



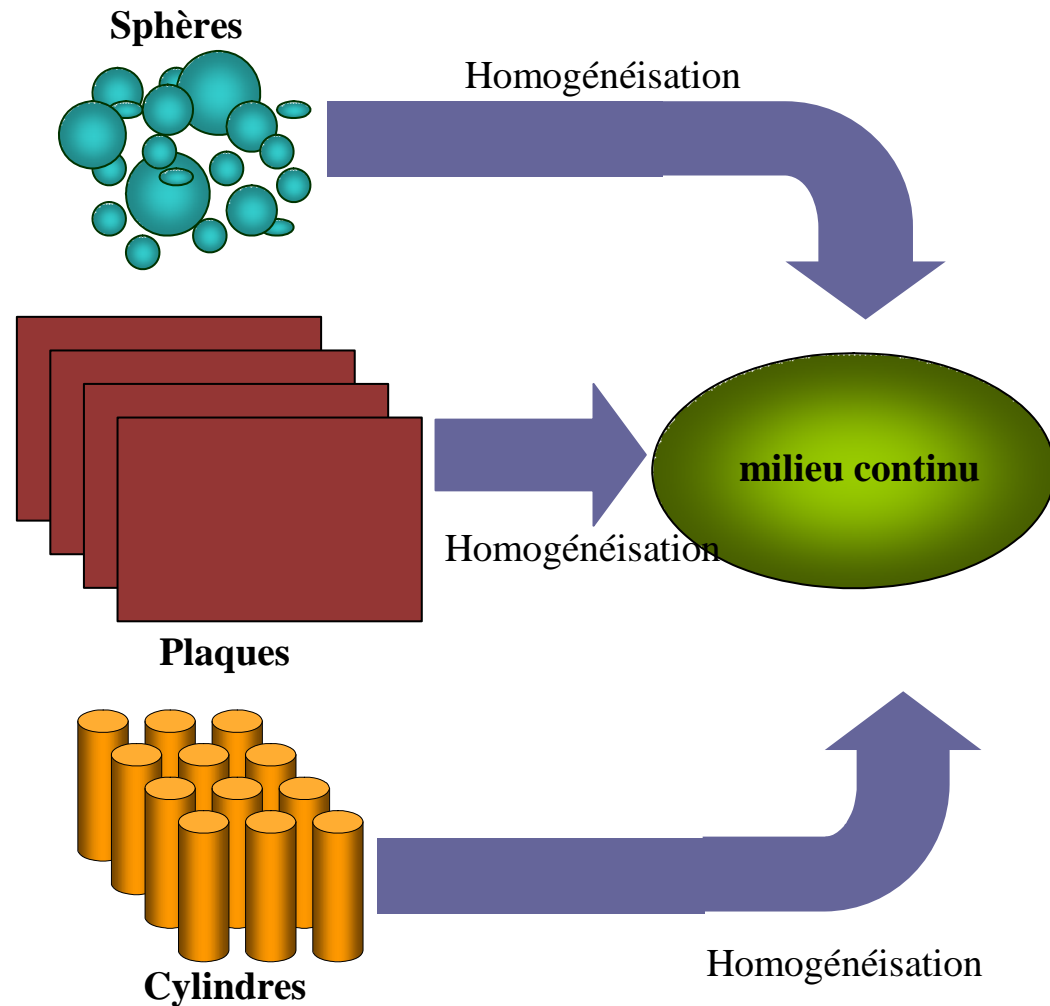
# Définition des composants du milieu

- *Phase solide*

- Plaques ou tubes
- Croûte solide

- *Phase fluide*

- Sel combustible
- Fluide intermédiaire



# Exemple des équations macroscopiques

- **Conservation de la masse**

$$\text{Phase solide : } \frac{\partial (1-p) \langle \rho \rangle^s}{\partial t} = 0$$

$$\text{Phase fluide : } \frac{\partial p \langle \rho \rangle^f}{\partial t} + \nabla \cdot p \langle \rho \cdot \mathbf{V} \rangle^f = 0$$

- **Conservation de la quantité de mouvement**

$$\underbrace{\langle \rho \rangle^f \left\{ \frac{\partial \langle V_i \rangle^f}{\partial t} + \langle \mathbf{V} \rangle^f \cdot p \cdot \nabla \langle V_i \rangle^f \right\}}_{\text{terme de force macroscopique d'inertie}} = \underbrace{-\nabla \langle P \rangle^f}_{\text{terme de pression}} - \underbrace{\frac{p \cdot \langle \mu \rangle^f}{K_i} \langle V_i \rangle^f}_{\text{terme de Darcy}} - \underbrace{\frac{p^2 \cdot C_{Ei}}{K_i^{\frac{1}{2}}} \langle \rho \rangle^f \left| \langle V_i \rangle^f \right| \cdot \langle V_i \rangle^f}_{\text{terme d'inertie de Ergun}} + \underbrace{\langle \rho \rangle^f \langle f_i \rangle^f}_{\text{force volumique}}$$



# Exemple des équations macroscopiques

- **Modèle à une seule température**

$$\textit{Phase solide-fluide} : \frac{\partial \langle \rho \cdot h \rangle}{\partial t} + \nabla \cdot p \langle \mathbf{V} \rangle^f \cdot \langle \rho \cdot h \rangle^f = \nabla \cdot \langle \mathbf{Ke} \rangle \cdot \nabla \langle T \rangle + (1-p) \varphi_s$$

- **Modèle à deux températures**

$$\textit{Phase solide} : \frac{\partial (1-p) \langle \rho \cdot h \rangle^s}{\partial t} = \nabla \cdot \langle \mathbf{Ke} \rangle^s \cdot \nabla \langle T \rangle^s + \frac{A_{sf}}{V} h_{sf} \cdot [\langle T \rangle^f - \langle T \rangle^s] + (1-p) \varphi_s$$

$$\textit{Phase fluide} : \frac{\partial p \langle \rho \cdot h \rangle^f}{\partial t} + \nabla \cdot p \langle \mathbf{V} \rangle^f \langle \rho \cdot h \rangle^f = \nabla \cdot \langle \mathbf{Ke} \rangle^f \cdot \nabla \langle T \rangle^f + \frac{A_{fs}}{V} h_{sf} \cdot [\langle T \rangle^s - \langle T \rangle^f]$$

# Hypothèses du modèle thermique

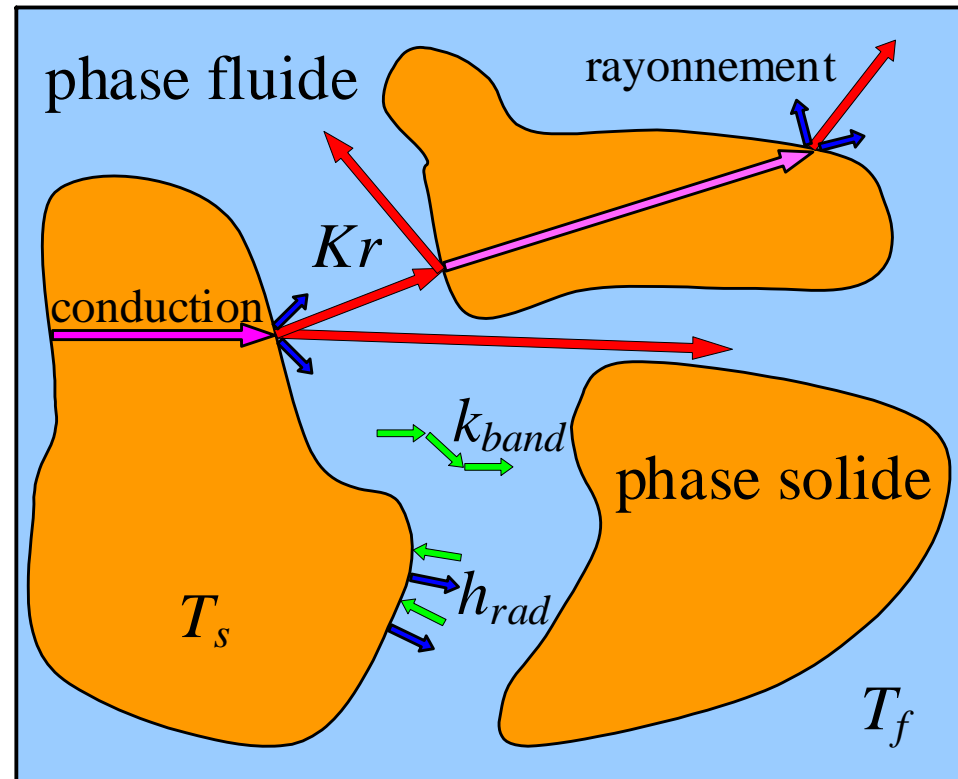
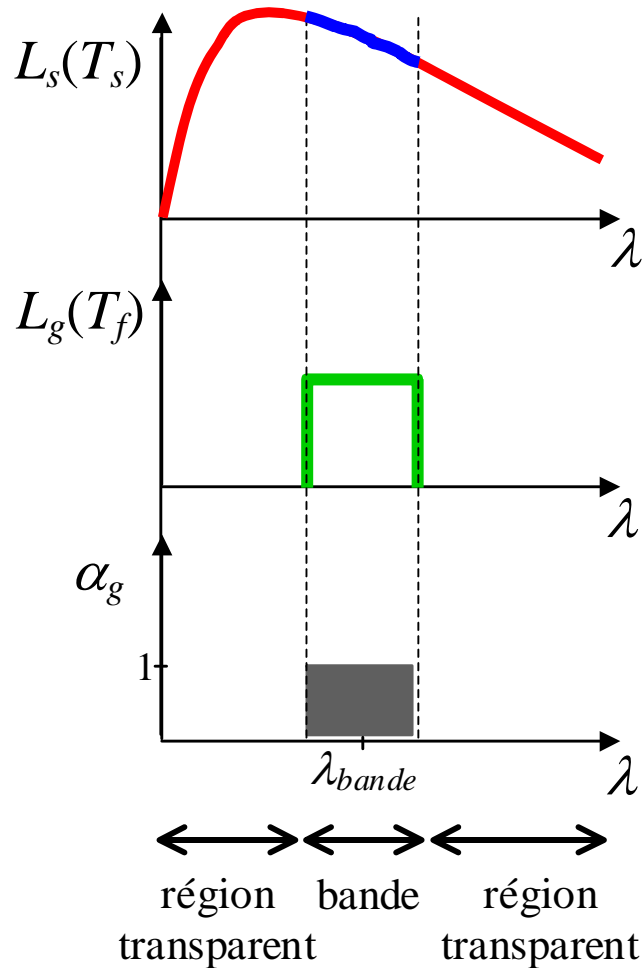
- Les surfaces sont grises, opaques et diffuses
- Le sel combustible est un milieu semi-transparent
- Le flux radiatif est légèrement anisotrope
- Les variations locales de la température sont inférieures à la différence entre les températures moyennes de chaque phase :

$$T'_s, T'_f \ll \left| \langle T \rangle^s - \langle T \rangle^f \right|$$

- Les variations locales de la température sont inférieures aux variations à l'échelle du milieu :

$$T'_s, T'_f \ll \Delta T_s(L), \Delta T_f(L)$$

# Mécanismes de transfert d'énergie



régions transparentes  $\rightarrow Kr$   
 région de la bande  $\rightarrow h_{rad}, k_{band}$

# Coefficient d'échange total d'énergie

- Le recourt à un modèle à deux températures nécessite l'utilisation du coefficient d'échange total d'énergie entre les deux phases  $h_{sf}$

- Les contributions radiative et convective sont supposées agir en parallèle :

$$h_{sf} = h_{conv} + h_{rad}$$

- Le coefficient d'échange convectif est déterminé à partir d'une corrélation semi-empirique

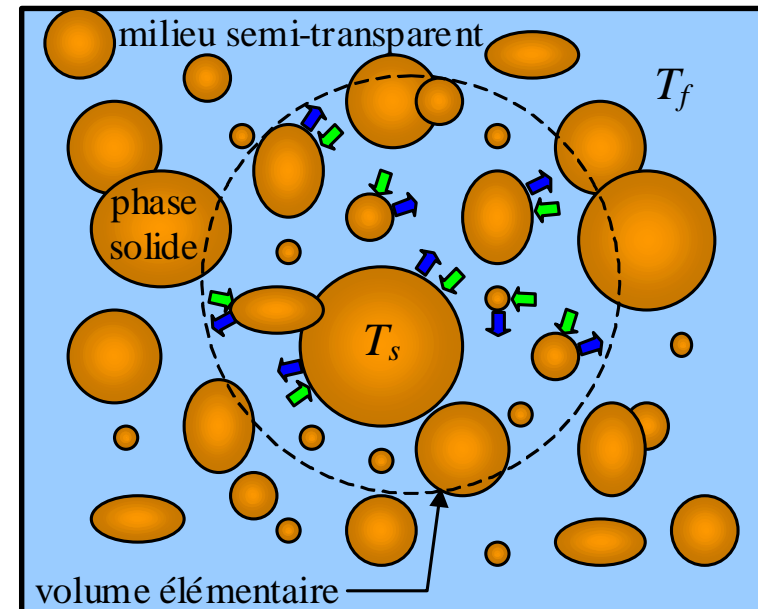
# Coefficient d'échange radiatif

- $h_{rad}$  est déterminé en utilisant :

- ❑ les variations locales de température vérifient que :

$$T'_s, T'_f \ll \left| \langle T \rangle^s - \langle T \rangle^f \right|$$

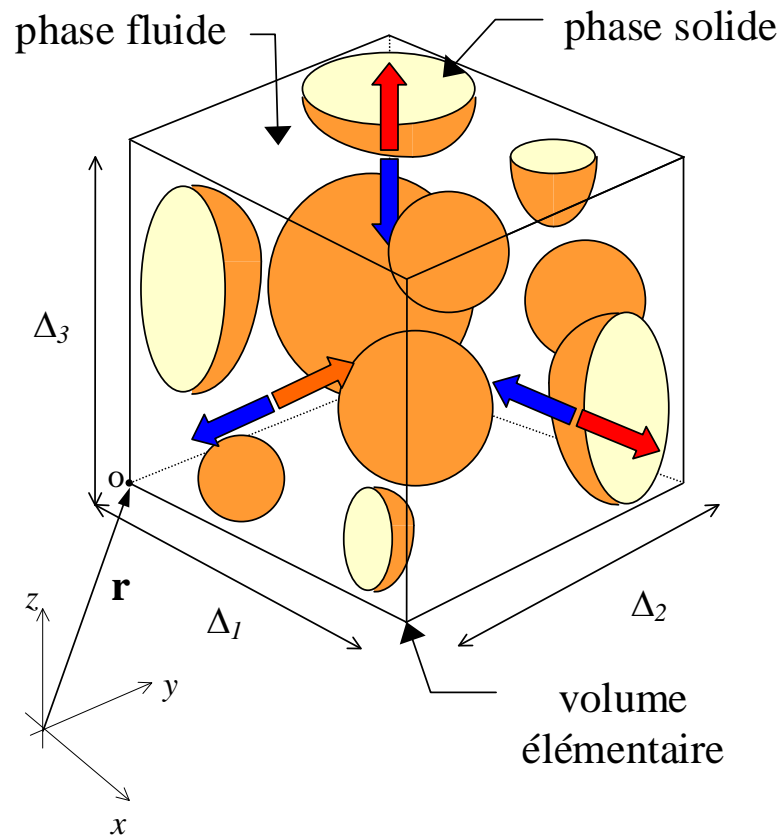
- ❑ un modèle de bandes noires (par exemple le modèle de bande exponentielle d'Edwards)
  - ❑ le concept de longueur moyenne de faisceau



- $h_{rad}$  est obtenu tel que :

$$h_{rad} = \varepsilon_s \cdot \frac{\bar{\varepsilon}_f \cdot \sigma \cdot [\langle T \rangle^f]^4 - \bar{\alpha}_f \cdot \sigma \cdot [\langle T \rangle^s]^4}{\langle T \rangle^f - \langle T \rangle^s}$$

# Conductivité équivalente du milieu



- Aussi bien le modèle à une seule température que le modèle à deux températures nécessitent de connaître la conductivité équivalente du milieu
- Le tenseur de conductivité équivalente est supposé fonction de:

$$\mathbf{K}_e = f(\mathbf{K}_t, \mathbf{K}_r)$$

- Tenseur de conductivité thermique :

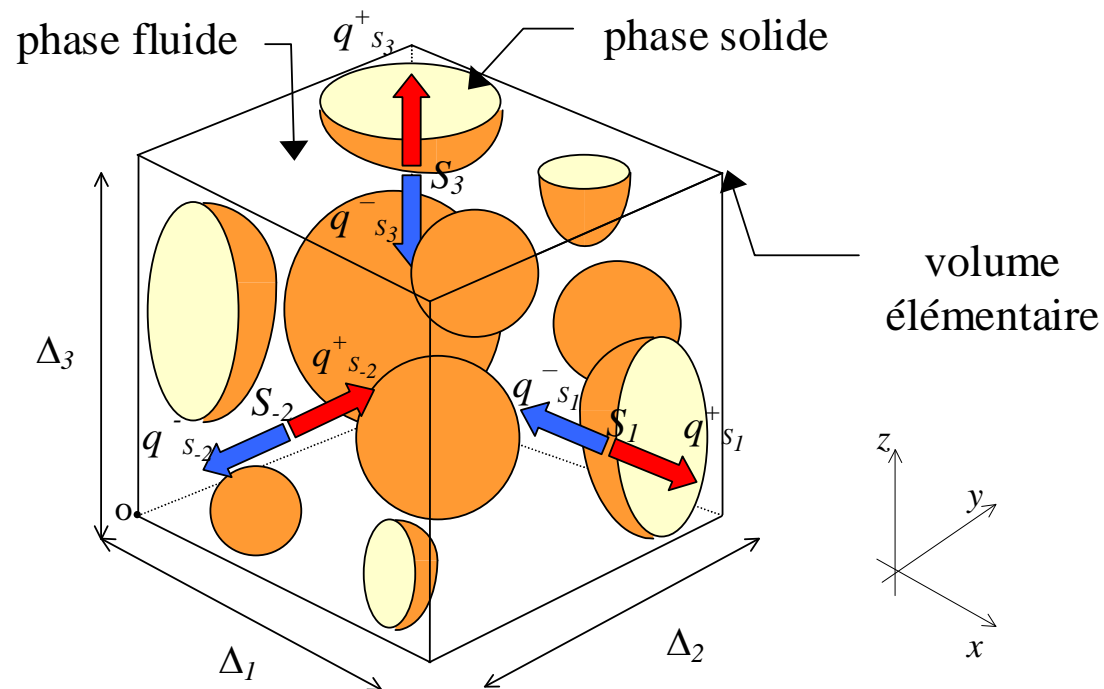
$$\mathbf{q} = -\mathbf{K}_t \cdot \nabla \langle T \rangle \quad (\mathbf{K}_r \rightarrow 0)$$

- Tenseur de conductivité radiative :

$$\mathbf{q} = -\mathbf{K}_r \cdot \nabla \langle T \rangle \quad (k_f \rightarrow 0)$$

# Bilan d'énergie radiative du volume

$$\begin{aligned}
 q_{S_1}^+(\mathbf{r}, \lambda) = & \underbrace{T_1(\lambda) \cdot q_{S_{-1}}^+(\mathbf{r}, \lambda)}_{\text{fraction transmise de } q_{S_{-1}}^+} + \underbrace{R_1(\lambda) \cdot q_{S_1}^-(\mathbf{r}, \lambda)}_{\text{fraction réfléchie de } q_{S_1}^-} + \underbrace{R_{21}(\lambda) \cdot [q_{S_2}^-(\mathbf{r}, \lambda) + q_{S_{-2}}^+(\mathbf{r}, \lambda)]}_{\text{fraction réfléchie de } q_{S_2}^+ \text{ et } q_{S_{-2}}^-} + \\
 & + \underbrace{R_{31}(\lambda) \cdot [q_{S_3}^-(\mathbf{r}, \lambda) + q_{S_{-3}}^+(\mathbf{r}, \lambda)]}_{\text{fraction réfléchie de } q_{S_3}^+ \text{ et } q_{S_{-3}}^-} + \underbrace{M_{S_1}(\langle T \rangle_{(\mathbf{r})}^s, \langle T \rangle_{(\mathbf{r})}^f, \lambda)}_{\text{émission thermique de la phase solide et fluide}}
 \end{aligned}$$



Phénomènes à considérer :

- ✓ Forme particules
- ✓ Réflexions multiples
- ✓ Absorptions/émissions fluide
- ✓  $\Delta T$  surface des particules
- ✓ Variations (p,e,k,...) aux frontières

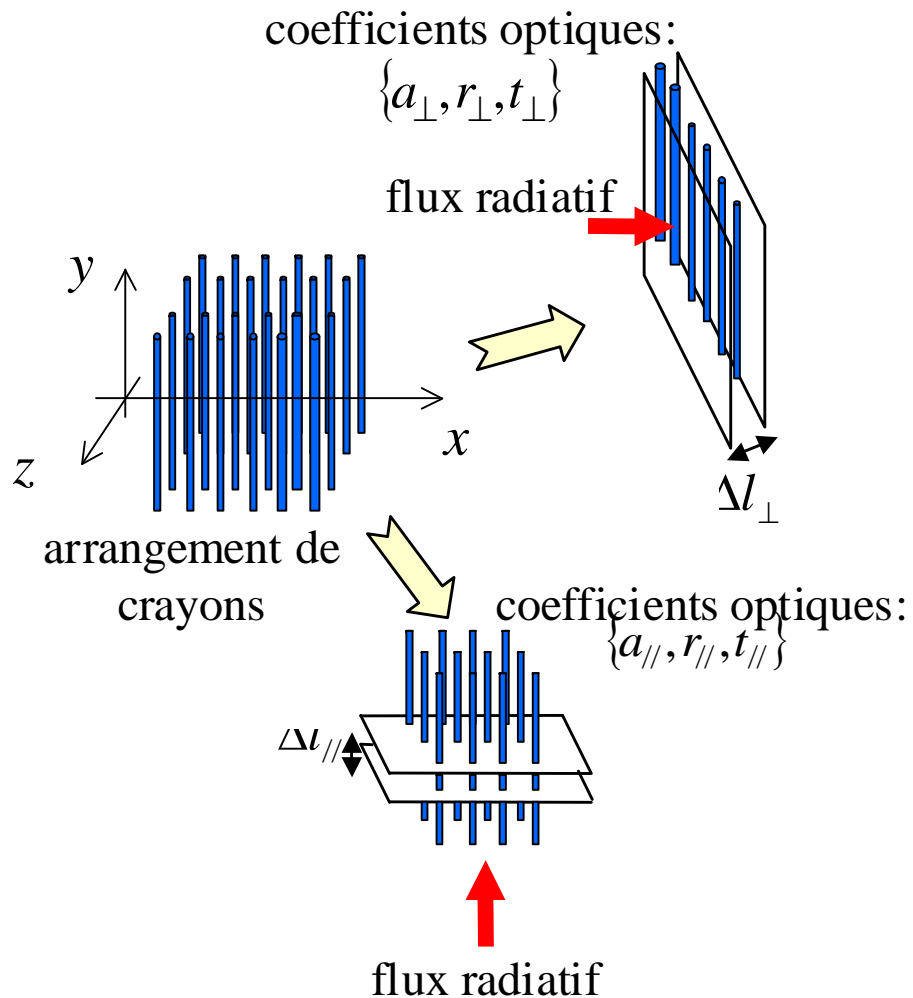
# Conductivité radiative (1)

- Dans le cas où :
  1. La phase fluide est un milieu transparent
  2. La température à la surface des particules est uniforme
- La conductivité radiative s'exprime par :

$$Kr_i = 4 \cdot \left[ \frac{2 - a_i - 2 \cdot r_i}{a_i + 2 \cdot r_i} \right] \cdot \sigma \cdot \Delta_i \cdot [\langle T \rangle_{(\mathbf{r})}^s]^3$$



# Exemple d'évaluation de coefficients optiques : arrangement de crayons/tubes



- l'arrangement est décomposé en couches orientées selon les directions // et  $\perp$  aux axes des crayons
- le tenseur de conductivité radiative est calculé à partir des coefficients optiques de ces couches

# Conductivité radiative (2)

- Dans le cas où :
  1. la phase fluide est un milieu semi-transparent (modèle de bandes noires)
  2. la température à la surface des particules est constante
- La conductivité radiative s'exprime par :

$$Kr_i = 4 \cdot \left[ \frac{2 - a_i - 2 \cdot r_i}{a_i + 2 \cdot r_i} \right] \cdot \sigma \cdot [1 - \bar{\alpha}_f (\langle T \rangle_{(r)}^f, \langle T \rangle_{(r)}^s)] \cdot \Delta_i \cdot [\langle T \rangle_{(r)}^s]^3$$

## Conductivité radiative (3)

- Les effets liés aux variations de la température à la surface des particules sont introduits au moyen d'une correction dans les coefficients optiques du milieu :

$$Kr_i = 4 \cdot \left[ \frac{2 - \hat{a}_i - 2 \cdot \hat{r}_i}{\hat{a}_i + 2 \cdot \hat{r}_i} \right] \cdot \sigma \cdot [1 - \bar{\alpha}_g (\langle T \rangle_{(r)}^f, \langle T \rangle_{(r)}^s)] \cdot \Delta_i \cdot [\langle T \rangle_{(r)}^s]^3$$

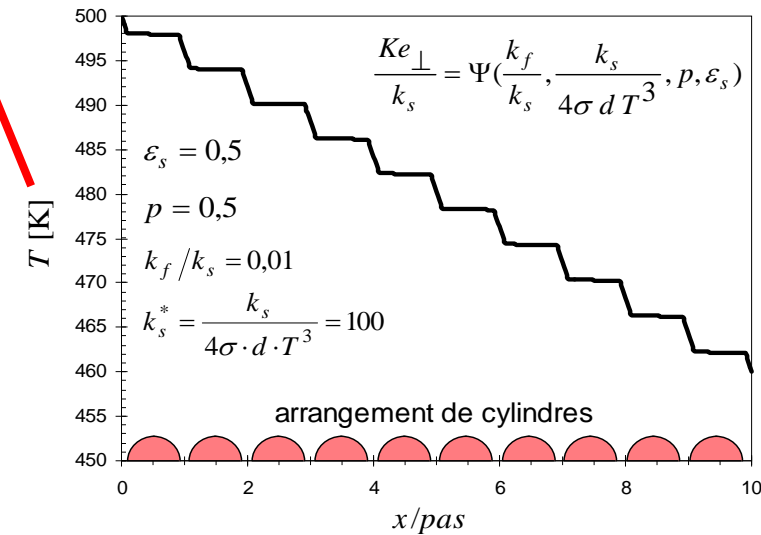
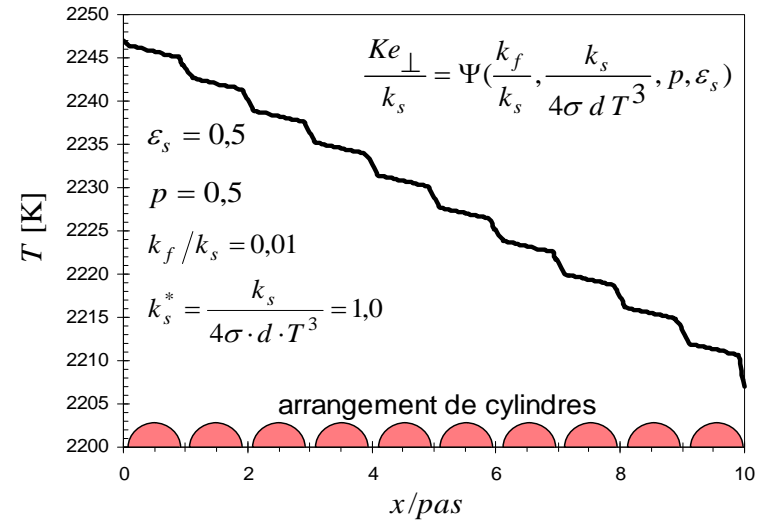
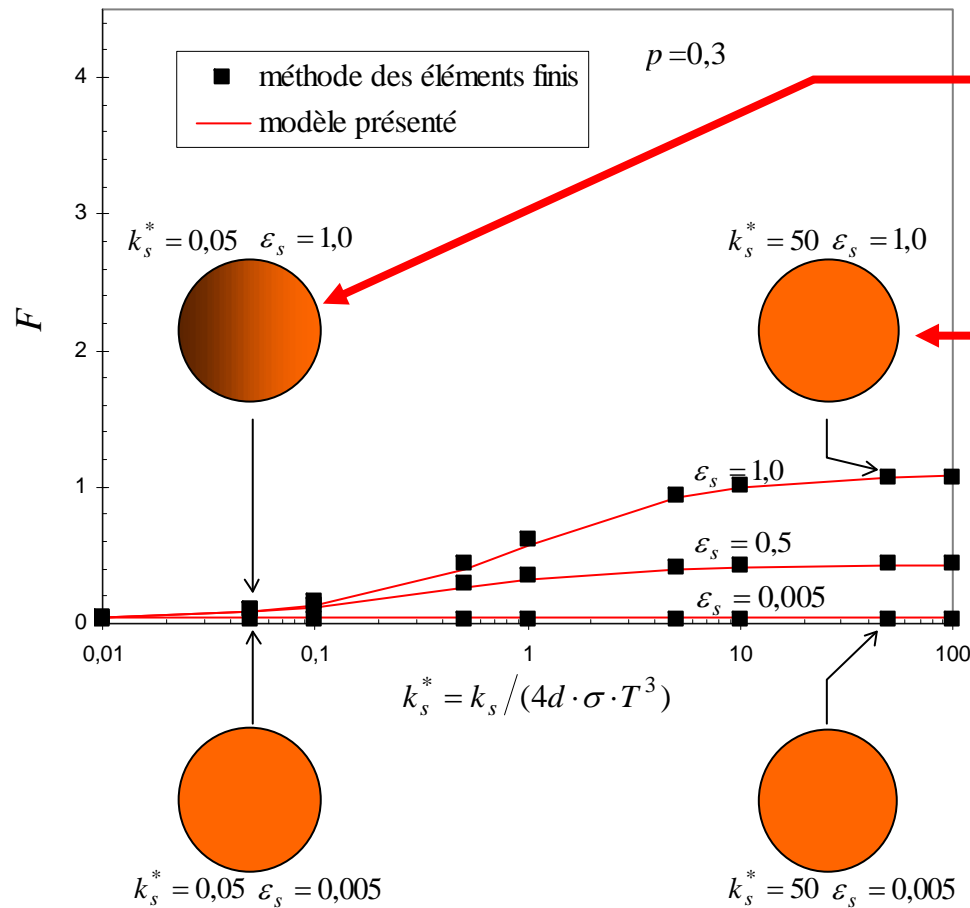
où les nouveaux coefficients optiques sont définis tels que :

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{a}_i = a_i(\varepsilon_s, p) \cdot [1 - \varphi(k_s^*, \varepsilon_s)] \\ \hat{r}_i = r_i(\varepsilon_s, p) + \varphi(k_s^*, \varepsilon_s) \cdot [r_i(\varepsilon_s=0, p) - r_i(\varepsilon_s, p)] \\ \hat{t}_i = t_i(\varepsilon_s, p) + \varphi(k_s^*, \varepsilon_s) \cdot [t_i(\varepsilon_s=0, p) - t_i(\varepsilon_s, p)] \end{array} \right.$$

- Et  $\varphi$  fonction de  $k_s^* = k_s / 4\sigma \cdot d \cdot [\langle T \rangle^s]^3$  est :

$$\varphi(k_s^*, \varepsilon_s) = \frac{1}{1 + \frac{2 \cdot k_s^*}{[1 - \bar{\alpha}_g (\langle T \rangle_{(r)}^f, \langle T \rangle_{(r)}^s)] \cdot \varepsilon_s}}$$

# Effet de la variation de la température à la surface des particules



# IMPLÉMENTATION

---

# Plusieurs étapes...

- Modélisation microscopique système hétérogène (Stage Beliera)



(a)



(b)



(c)

- Modélisation macroscopique du milieu poreux équivalent
- Introduction des effets du transfert radiatif
- Introduction des effets de changement de phase
- Calculs lors de conditions stationnaires et/ou transitoires

**Modèle multi-physique  
MSFR**

**SAMOFAR WP3**

Merci pour votre attention

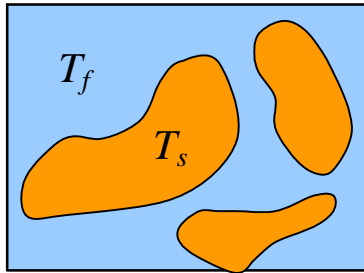
# ANNEXE

---

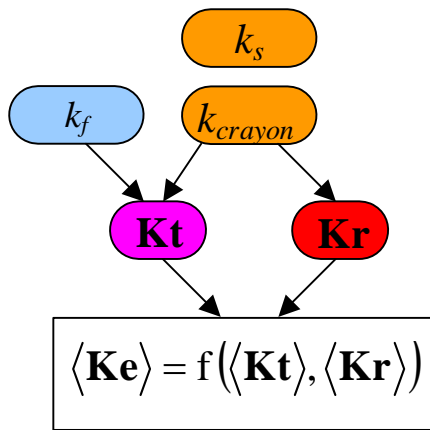


# Coefficients macroscopiques des équations de conservation de l'énergie

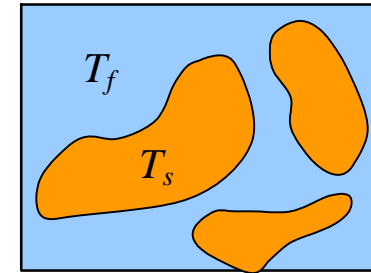
*Modèle à une seule température*



$$\langle T \rangle^s = \langle T \rangle^f$$

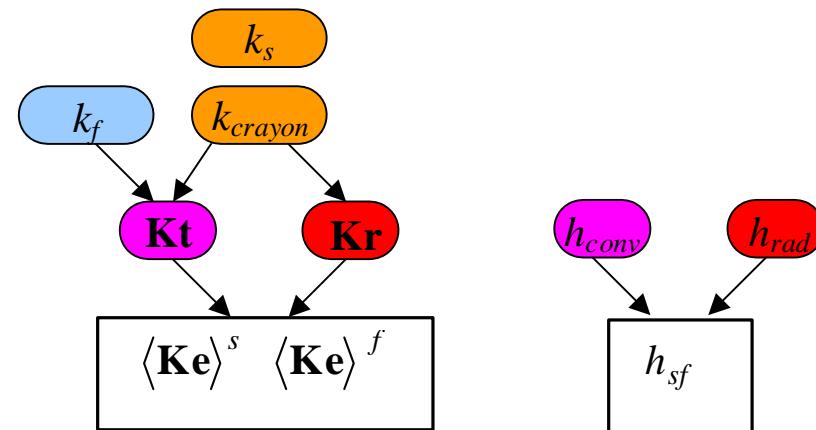


*Modèle à deux températures*



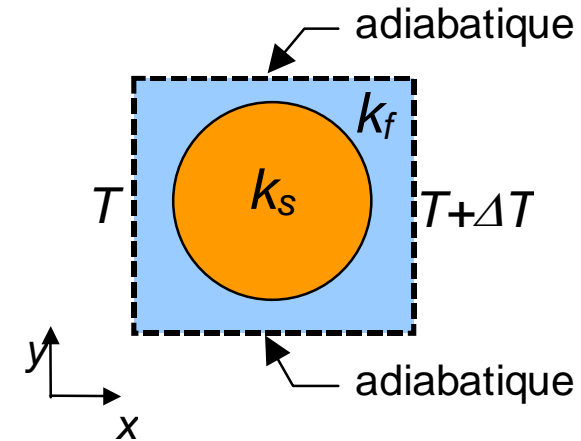
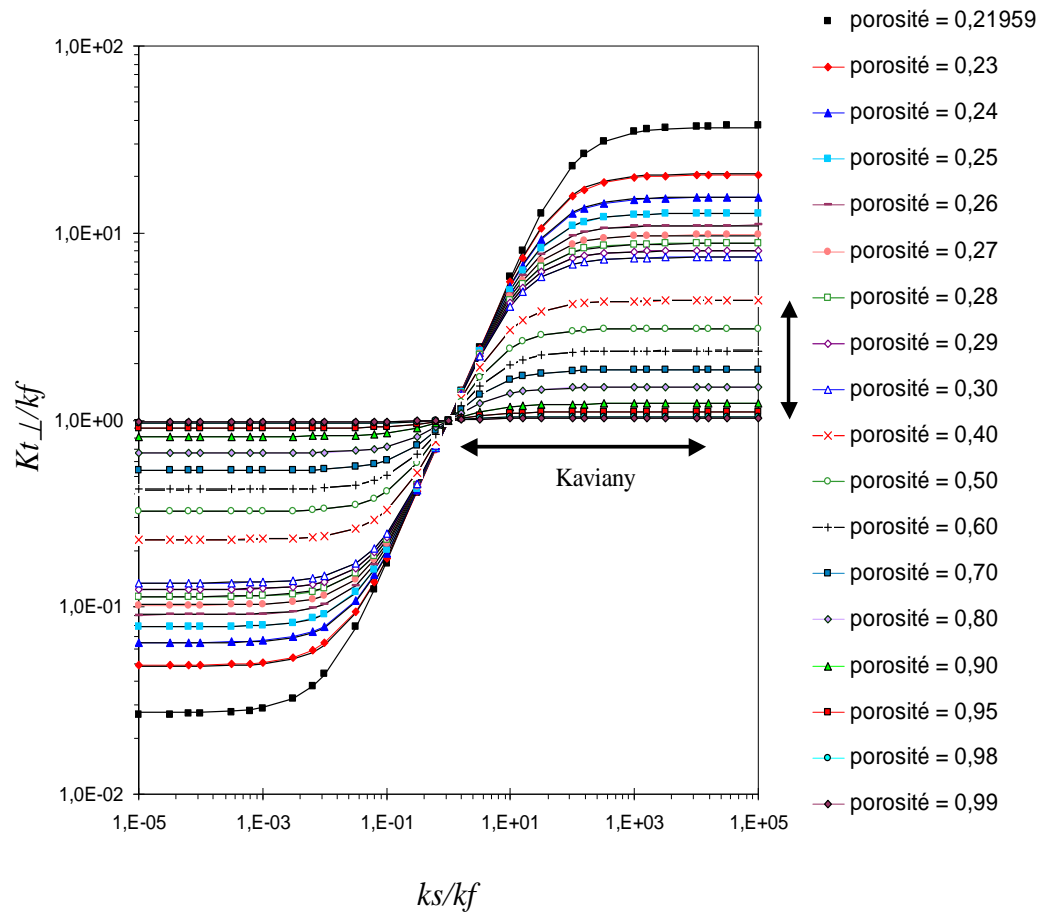
$$\langle T \rangle^s \neq \langle T \rangle^f$$

$$T'_s, T'_f \ll |\langle T \rangle^s - \langle T \rangle^f|$$



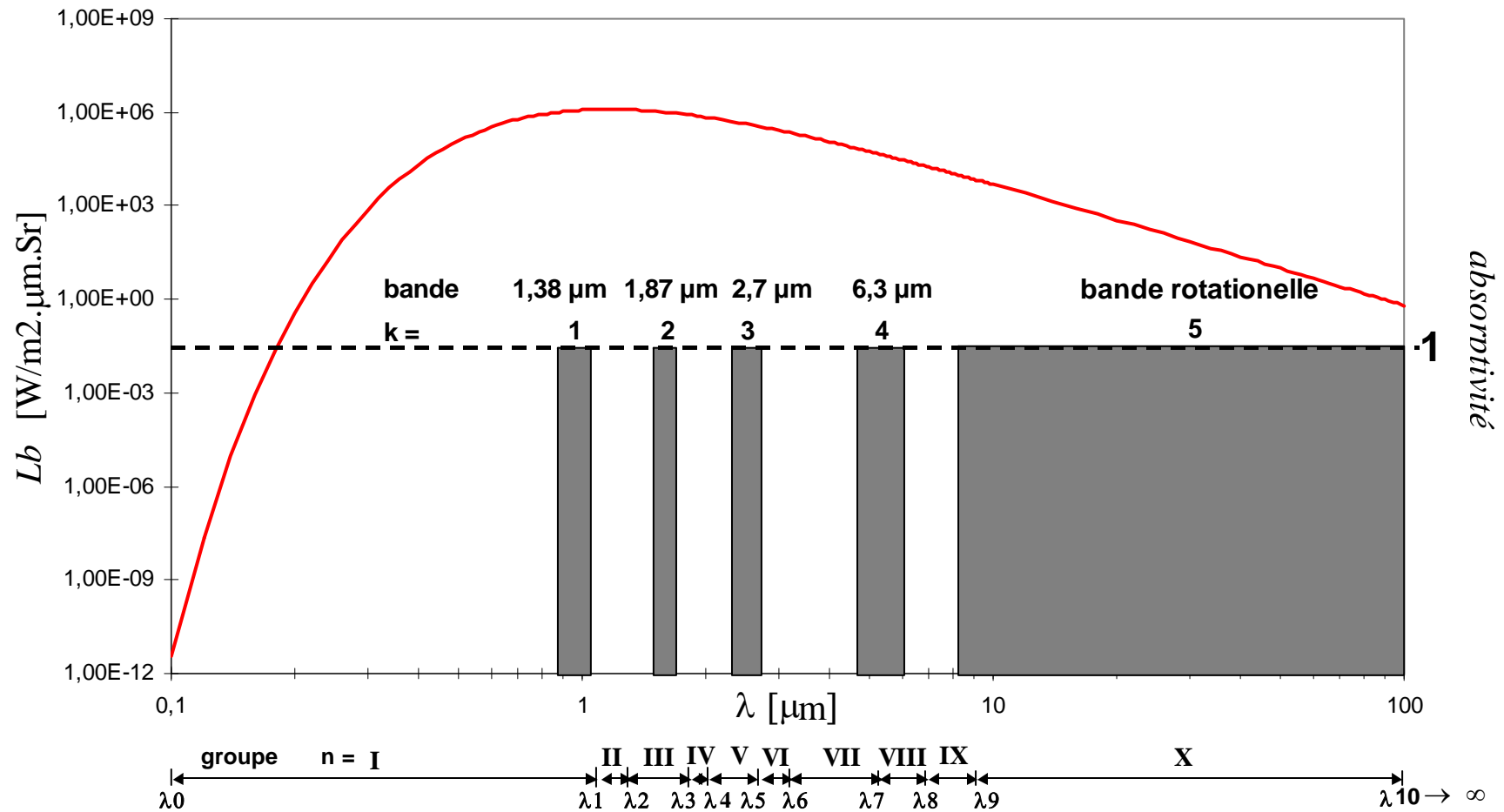
# Conductivité thermique du milieu

*cellule unité*



- Obtention du  $K_t$  pour un arrangement de cylindres à partir d'une cellule unité du milieu
- Obtention d'une corrélation à partir des calculs par éléments finis

# Modèle de bandes noires (vapeur d'eau)



# Températures macroscopiques et microscopiques

