

Étude expérimentale et modélisation des transferts dans un récepteur volumique solaire à haute température



Cyril Caliot^a, Zhiyong Wu^{a,b}, Zhifeng Wang^b, Gilles Flamant^a

^a Laboratoire Procédés, Matériaux, et Energie Solaire, PROMES CNRS, 7 Rue du Four Solaire, 66120 Font-Romeu, France

^b The Key Laboratory of Solar Thermal Energy and Photovoltaic System, Institute of Electrical Engineering, CAS, Beijing, China

Plan

- Introduction
- Expériences
 - Description
 - Résultats
- Modélisation
 - Approche à l'échelle du pore
 - Approche du milieu poreux équivalent
- Conclusion et perspectives

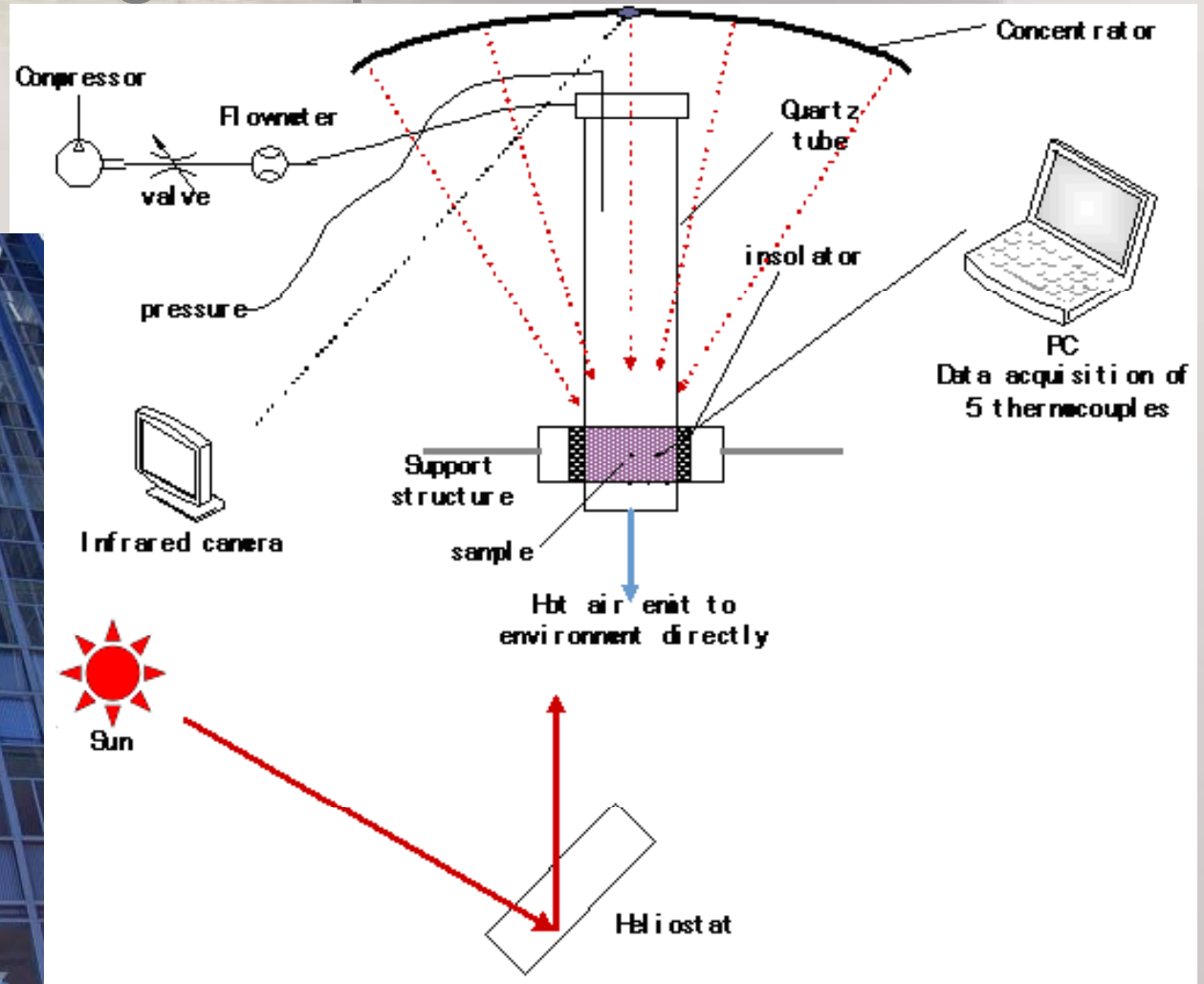
Introduction

- **Objectif** : Concevoir, optimiser et tester des récepteurs volumiques poreux en céramique (haute température)
- **Démarche** :
 - Première série d'expériences
 - Post-traitement des résultats expérimentaux
 - Développement de modèles et simulations
 - Conception et optimisation par simulation
 - Deuxième série d'expériences pour tester de nouveaux récepteurs

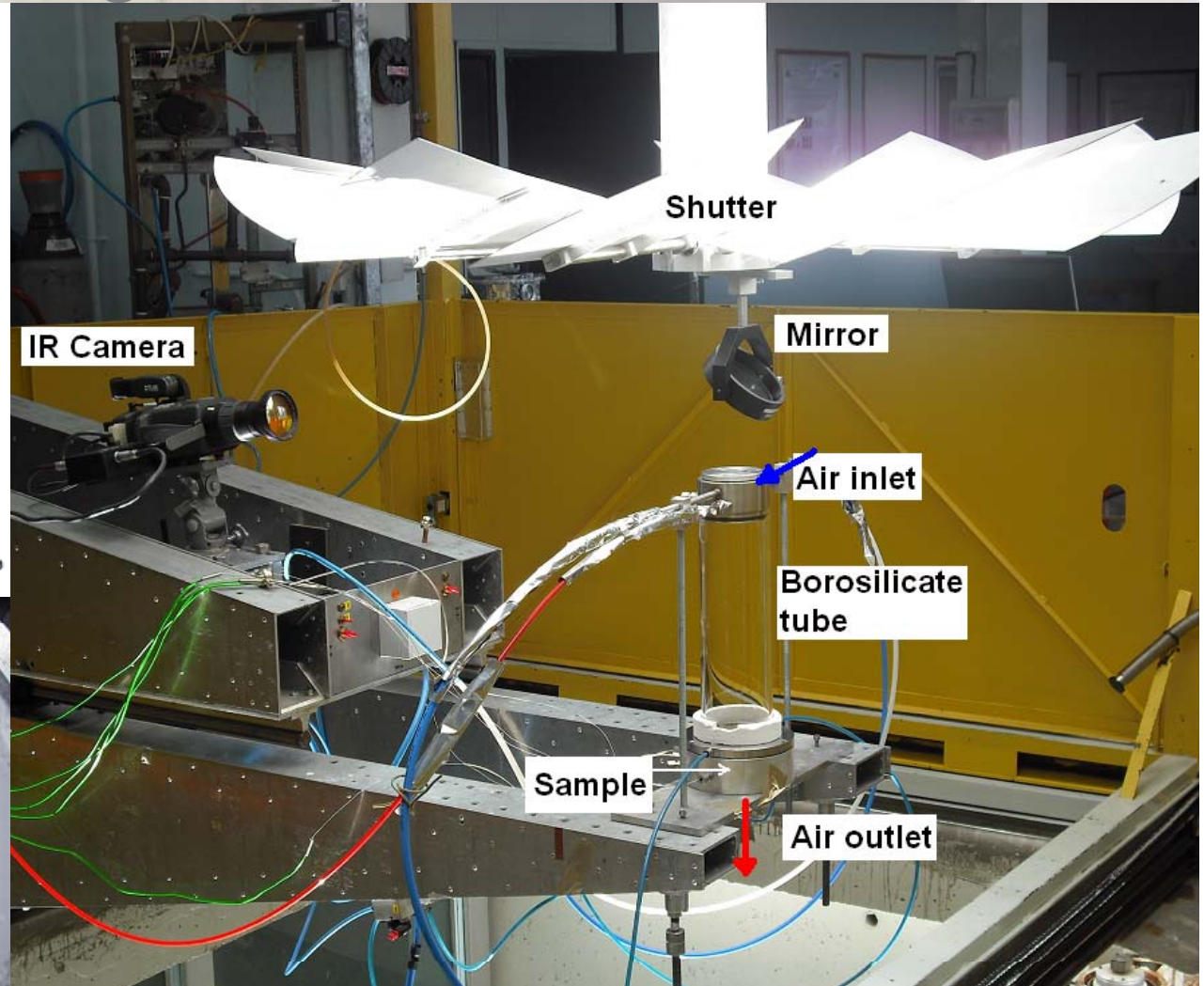
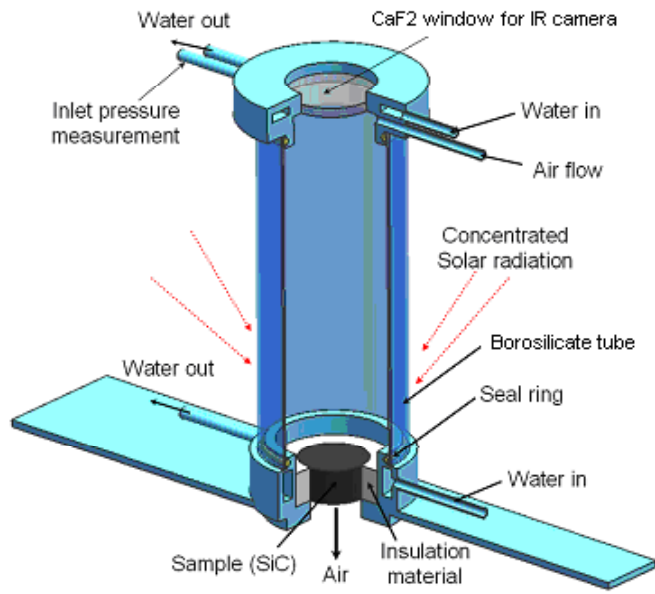
Plan

- Introduction
- **Expériences**
 - Description
 - Résultats
- Modélisation
 - Approche à l'échelle du pore
 - Approche du milieu poreux équivalent
- Conclusion et perspectives

Montage Expérimental

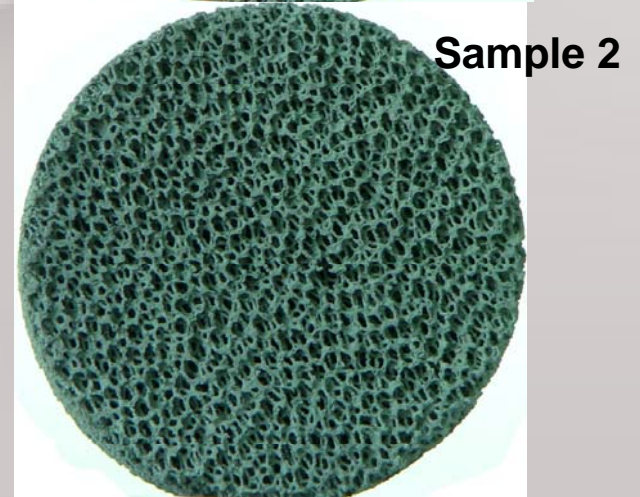
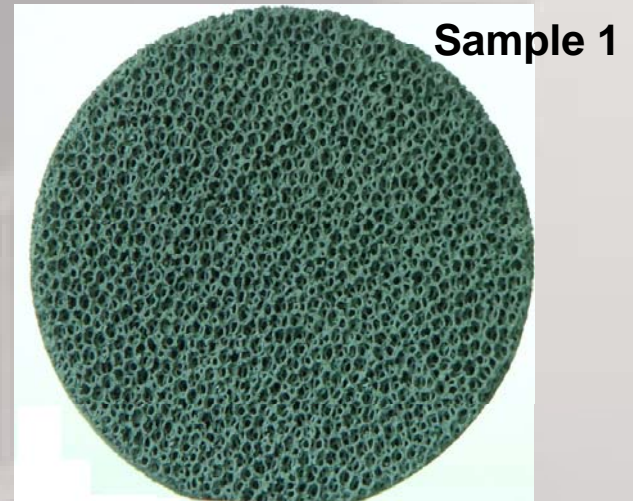
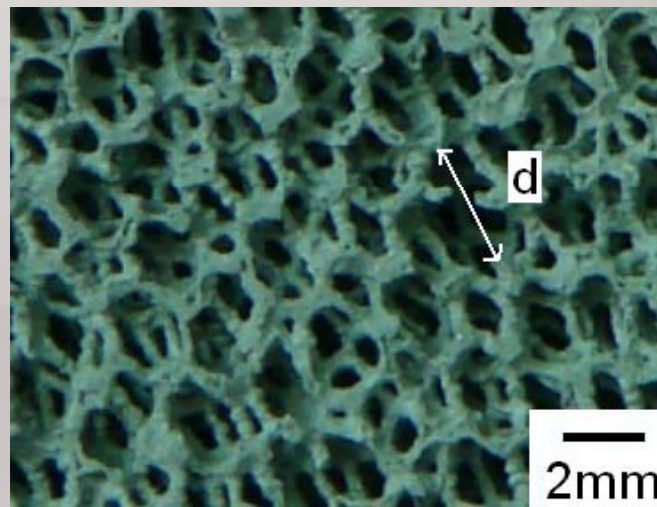


Montage Expérimental



Échantillons RPC SiC

Sample	Porosity ε / ϕ	Cell size (mm) d	Thickness (mm)
1	0.7	1.6	50
2	0.7	2.23	50
3	0.8	1.56	50
4	0.8	2.07	50



Mesures

- Flux solaire concentré incident (Calorimètre, Φ_0 , W)
- Débit d'air (rotamètre, Q, Nm³/h)
- Chute de pression due à la mousse (Mano dif, ΔP , Pa)

Mesures de Températures

- Température de la surface irradiée (IR cam, T_0 , K)
- Température de l'air Entrée/Sortie (TC1,TC2,TC3, K)
- Températures radiales à mi-profondeur (TC4,TC5, K)



Thermacam FLIR SC1000

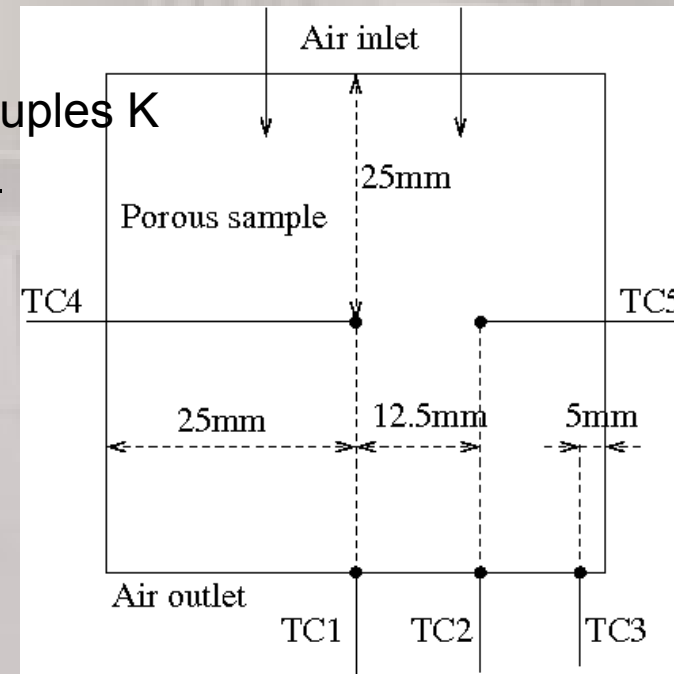
Filtre étroit *Solar Blind* à 4.9 μ m

Détecteur PtSi / CMOS

256*256 ; 3.5 – 5 μ m ;

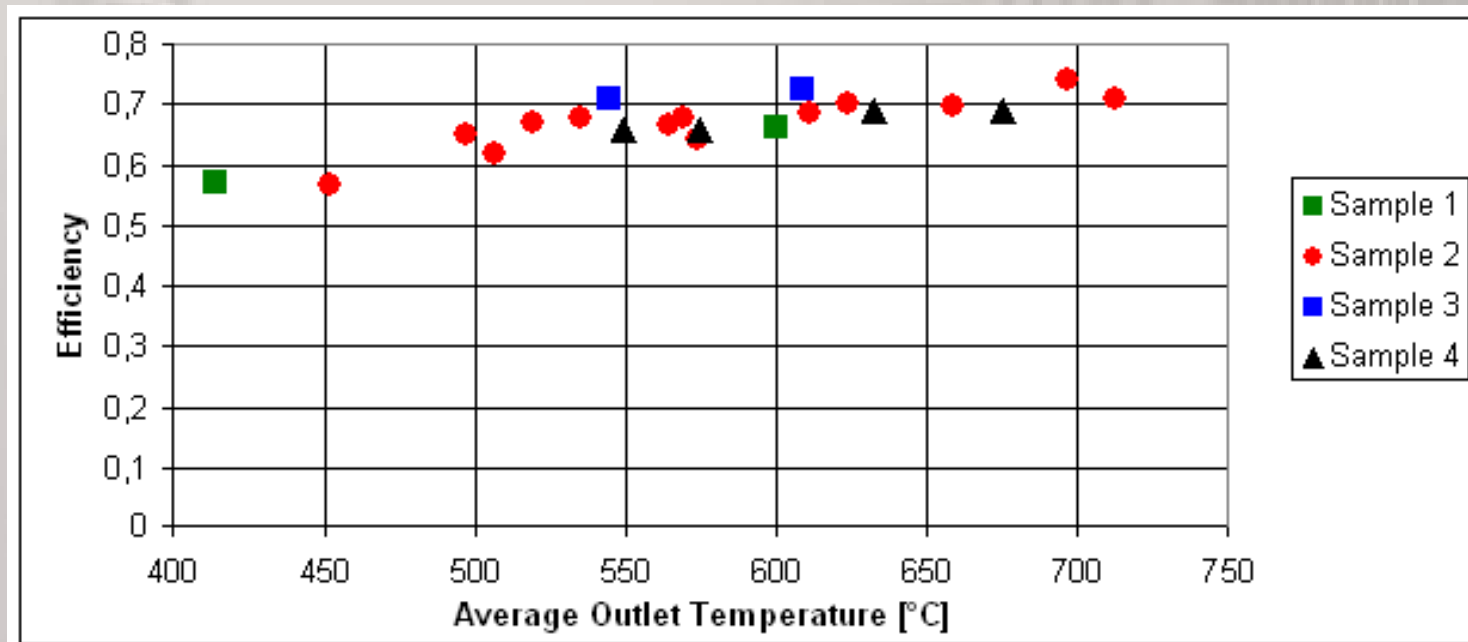
$T < 1500^\circ\text{C}$

Thermocouples K
 $T < 1350^\circ\text{C}$



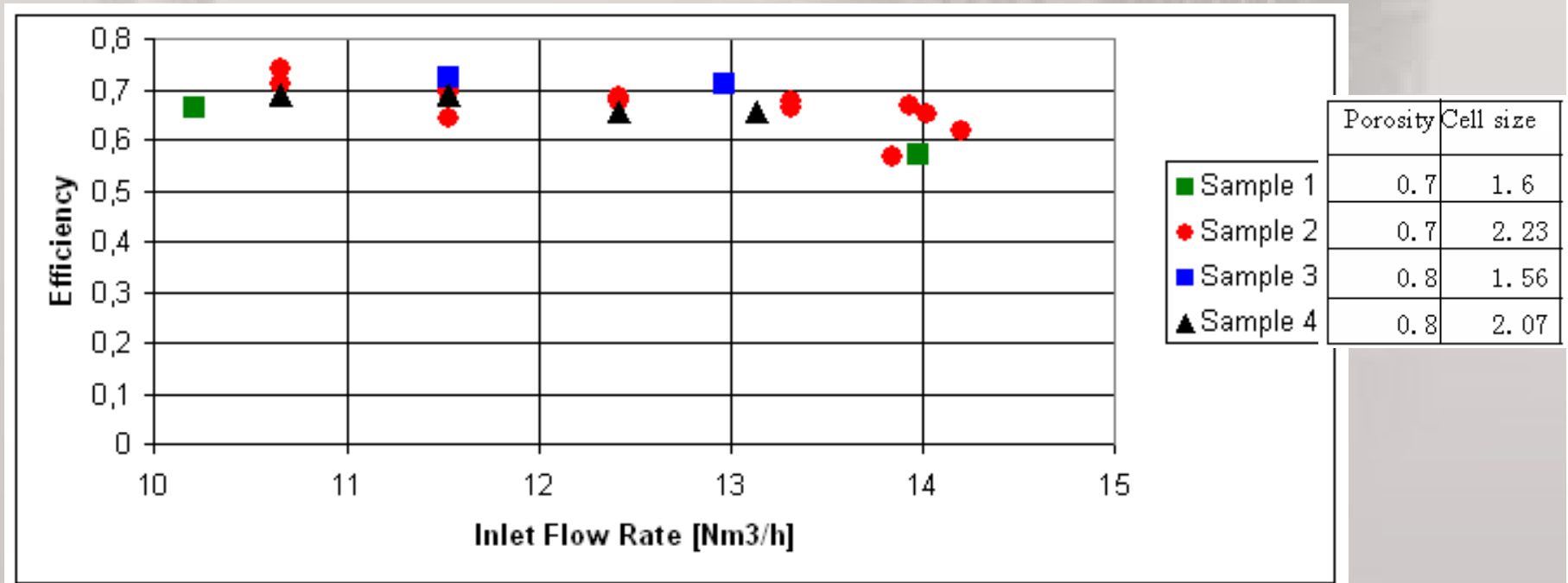
Efficacités Expérimentales

$$E = \frac{\Delta H_{air}}{\phi^o} = \frac{\dot{m}_{air} \left(C_{p,air}(\overline{T}_{out})\overline{T}_{out} - C_{p,air}(T_{in})T_{in} \right)}{\phi^o}$$



Efficacités Expérimentales

$$E = \frac{\Delta H_{air}}{\phi^o} = \frac{\dot{m}_{air} \left(C_{p_{air}}(\overline{T}_{out})\overline{T}_{out} - C_{p_{air}}(T_{in})T_{in} \right)}{\phi^o}$$

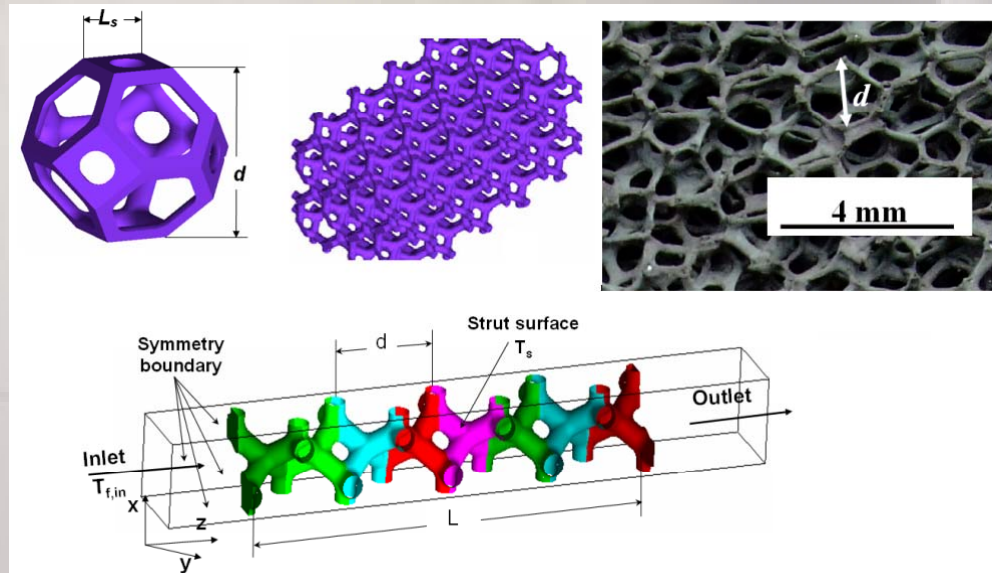


Plan

- Introduction
- Expériences
 - Description
 - Résultats
- Modélisation
 - Approche à l'échelle du pore
 - Approche du milieu poreux équivalent
- Conclusion et perspectives

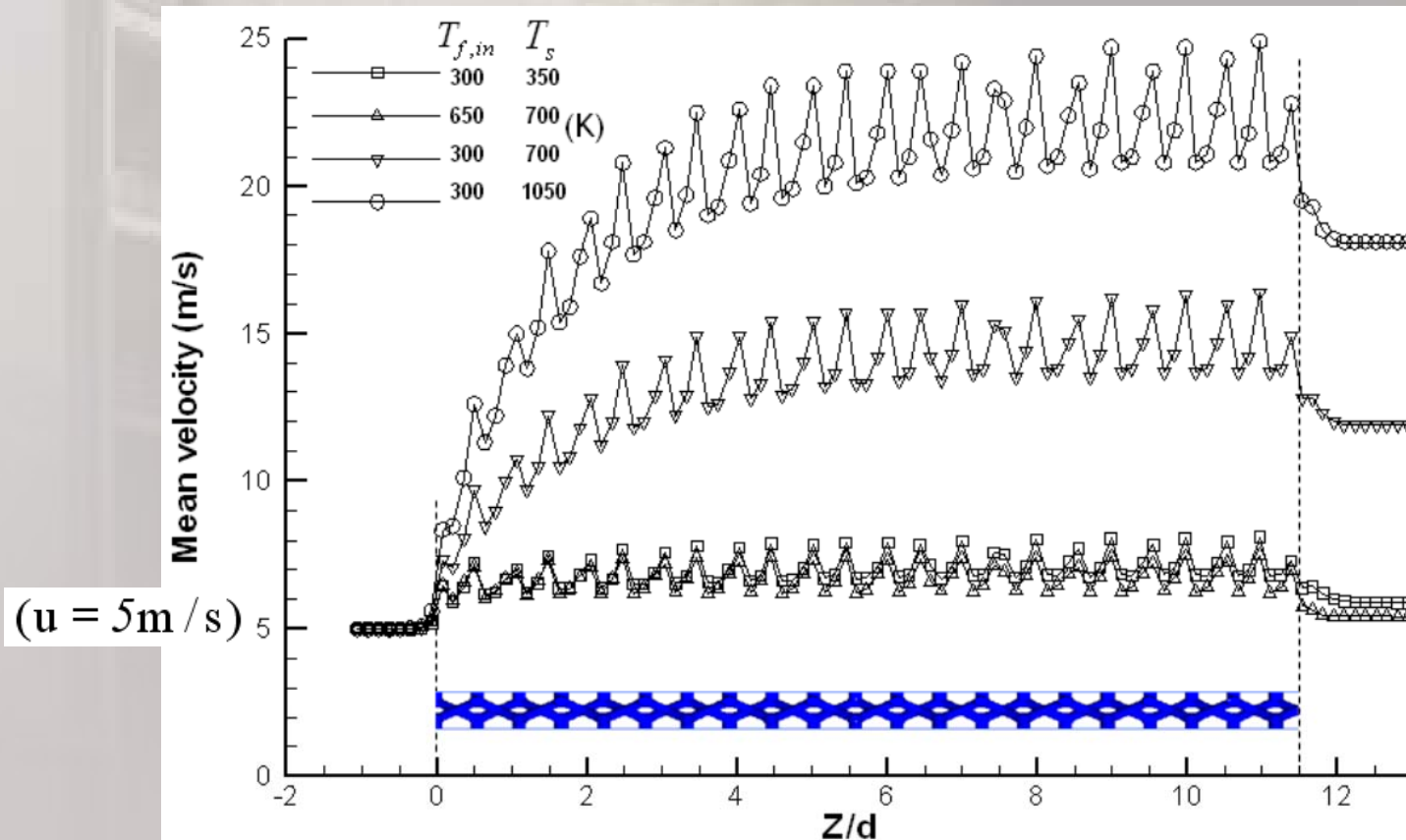
Approche à l'Échelle du Pore (1)

- Géométrie 3D de pores (tetrakaidécaèdre, Tomo., etc.)

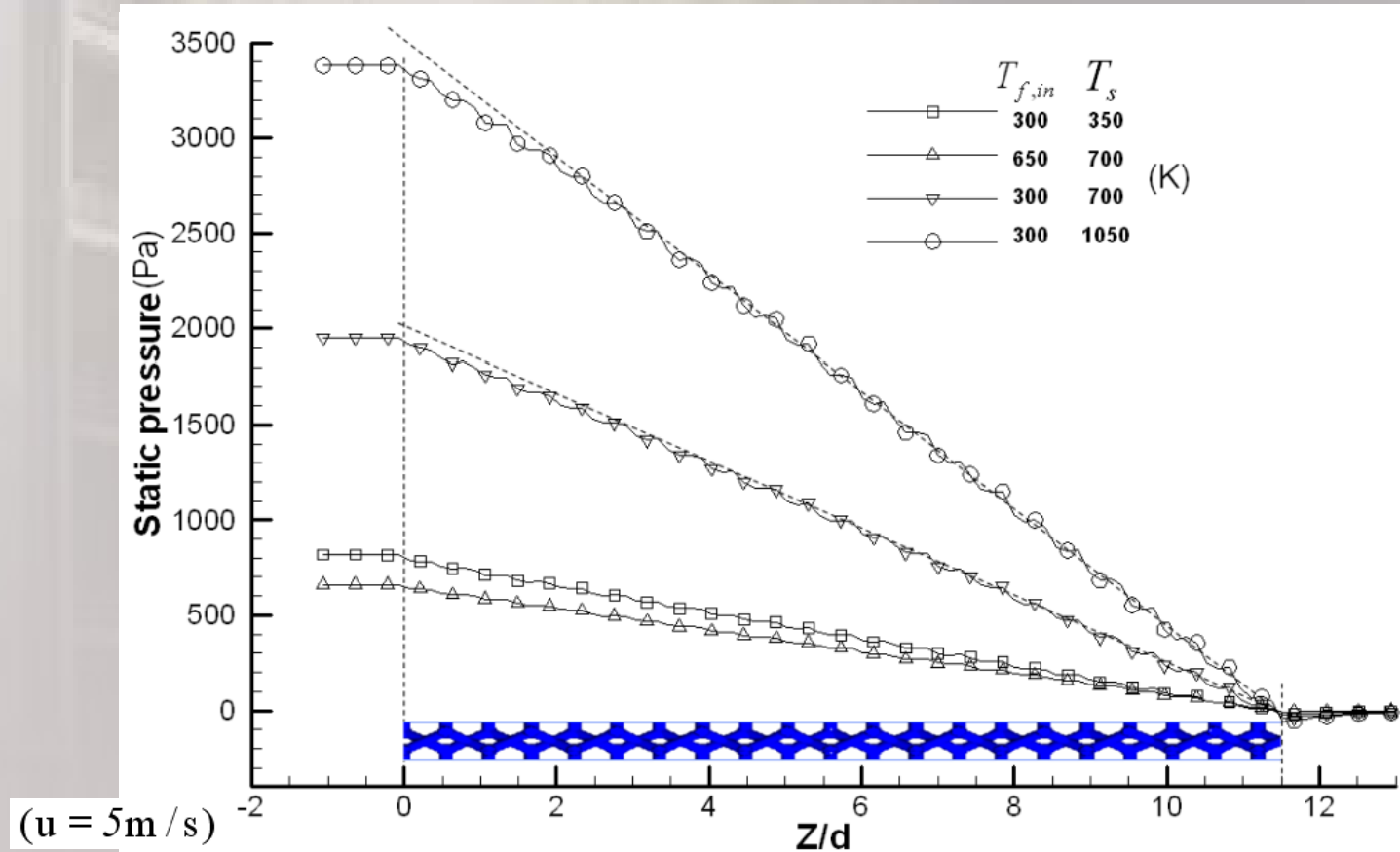


- Calculs de dynamique des fluides et transferts
 - calcul de l'écoulement : modèle laminaire/turbulent
 - transferts conducto-convectifs (T imposée à la paroi)

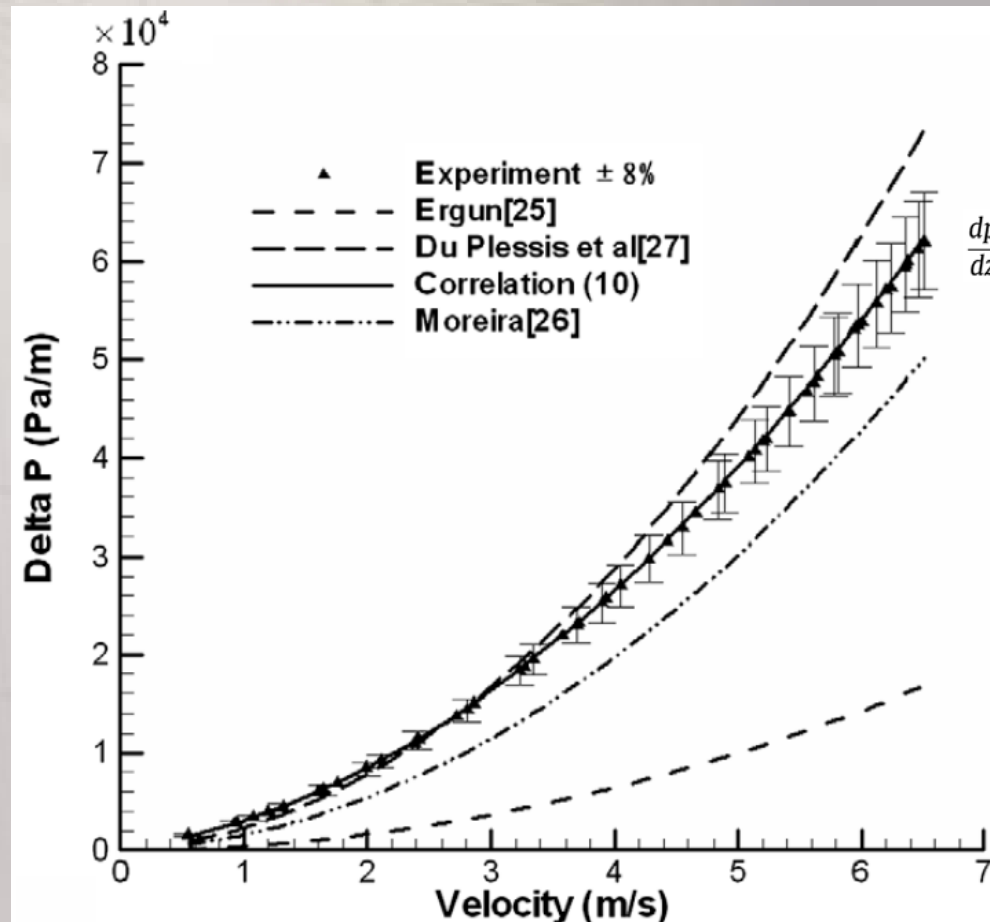
Vitesse Moyenne



Pression Statique



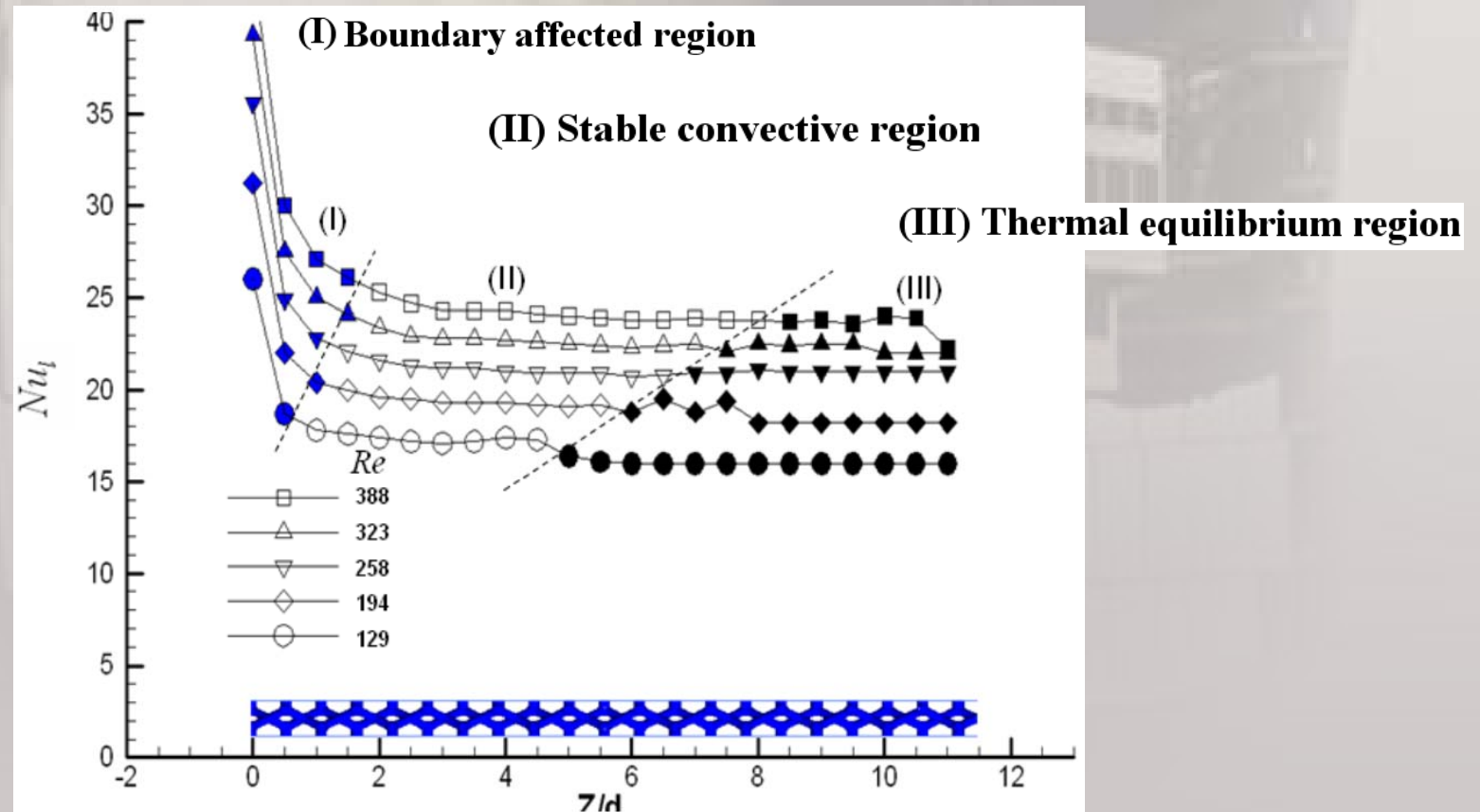
Gradient de Pression



$$\frac{dp}{dz} = \frac{(1039 - 1002\varepsilon)}{d^2} \mu u + \frac{0.5138\varepsilon^{-5.739}}{d} \rho u^2$$

$d = 1.35 \text{ mm}$
 $\varepsilon = 0.85$

Nombre de Nusselt



Approche à l'Échelle du Pore (2)

- Post-traitement :
 - obtention du gradient de pression (modèle de Forchheimer)

$$\frac{dp}{dz} = \frac{(1039 - 1002\varepsilon)}{d^2} \mu u + \frac{0.5138\varepsilon^{-5.739}}{d} \rho u^2$$

- et du coefficient d'échange conducto-convectif

$$Nu_{iv} = \frac{h_{iv} d^2}{\lambda_i} = 2.0696\varepsilon^{0.38} d a_v Re^{0.438}$$

Approche du Milieu Poreux Équivalent (écoulement)

- Modèle de Darcy-Forchheimer pour l'écoulement laminaire

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}}_D = 0$$

$$\rho_f \left[\nabla \cdot \left(\frac{\bar{\mathbf{u}}_D \bar{\mathbf{u}}_D}{\phi} \right) \right] = -\nabla \cdot \left(\phi \langle \bar{P} \rangle^i \right) + \mu \nabla^2 \bar{\mathbf{u}}_D - \phi F$$

$$F = \vec{\mathbf{x}} \left\langle \left(\frac{1039 - 1002\varepsilon}{d^2} \mu u + \frac{0.5138\varepsilon^{-5.739}}{d} \rho u^2 \right) \right\rangle$$

Approche du Milieu Poreux Équivalent (thermique)

- Modèle à deux équations pour le bilan d'énergie

- phase solide

$$0 = \nabla \cdot \left(\lambda_{eff,s} \cdot \nabla \langle \overline{T_s} \rangle^i \right) - h_v \left(\langle \overline{T_s} \rangle^i - \langle \overline{T_f} \rangle^i \right) - \nabla \cdot \vec{q}_r$$

- phase fluide

$$(\rho C_p)_f \nabla \cdot \left(\bar{u}_D \langle \overline{T_f} \rangle^i \right) = \nabla \cdot \left(\lambda_{eff,f} \cdot \nabla \langle \overline{T_f} \rangle^i \right) + h_v \left(\langle \overline{T_s} \rangle^i - \langle \overline{T_f} \rangle^i \right)$$

- coefficient d'échange conducto-convectif

$$Nu_{iv} = \frac{h_v d^2}{\lambda_i} = 2.0696 \varepsilon^{0.38} d a_v Re^{0.438}$$

- conductivités équivalentes

$$\lambda_{eff,f} = \phi \lambda_f \quad \lambda_{eff,s} = \frac{1}{3} (1 - \phi) \lambda_s$$

- terme source radiatif pour la phase solide (air transparent)

$$\nabla \cdot \vec{q}_r = k_a (4\pi I_b - G)$$

Simulations

- Utilisation de Fluent pour résoudre les équations de bilan
- Utilisation de User-Defined-Functions pour
 - Le terme de Darcy-Forchheimer
 - Les conductivités équivalentes
 - Le coefficient conducto-convectif
 - Les modèles radiatifs
- Développement de codes radiatifs (reg. Stationnaire)
 - Algorithme de Monte Carlo Inverse
 - Approximation de la Diffusion
 - Approximation de Rosseland

Résolution des Transferts Radiatifs

Équation de transfert radiatif :

$$\nabla I(\vec{r}, \vec{\Omega}) = -\beta(\vec{r})I(\vec{r}, \vec{\Omega}) + k_a I_b(\vec{r}) + k_d \int_{4\pi} d\vec{\Omega}' I(\vec{r}, \vec{\Omega}') p(\vec{r}, \vec{\Omega}, \vec{\Omega}')$$

$$\beta = k_a + k_d$$

Propriétés radiatives de la phase solide poreuse
(optique géométrique)

$$k_a = \varepsilon(3/2d)(1 - \phi)$$

$$k_d = (2 - \varepsilon)(3/2d)(1 - \phi)$$

Conductivité radiative dans l'approximation de Rosseland

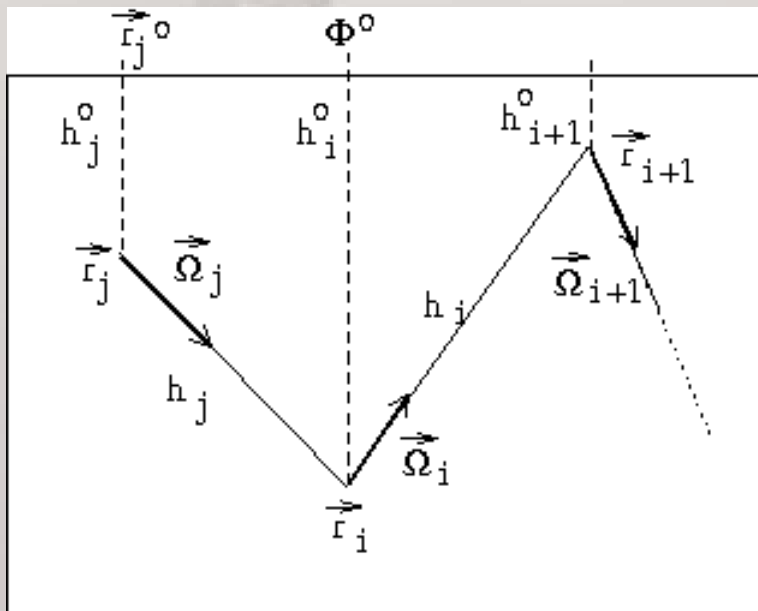
$$\vec{q}_r = -k_R \nabla T = -\frac{16\sigma T^3}{3\beta} \nabla T$$

Monte Carlo Inverse avec Source Collimatée

- Éclairement total (à calculer)

$$G(\vec{r}_j) = G_b(\vec{r}_j) + G_s(\vec{r}_j)$$

- Éclairement balistique provenant d'une source collimatée



$$G_b(\vec{r}_j) = \int_{4\pi} d\vec{\Omega}_j \int_{A^o} dA^o \frac{1}{A^o} \Phi^o(\vec{r}^o, \Omega^o) \delta(\vec{\Omega}_j - \vec{\Omega}^o) \exp\left[-\int_0^{h_j^o} \beta ds\right]$$

$$G_b(\vec{r}_j) = \Phi^o(\vec{r}_j^o) \exp\left[-\int_0^{h_j^o} \beta ds\right]$$

$$\begin{aligned} \delta(x) &\neq 0, x = 0 \\ \delta(x) &= 0, x \neq 0 \end{aligned}$$

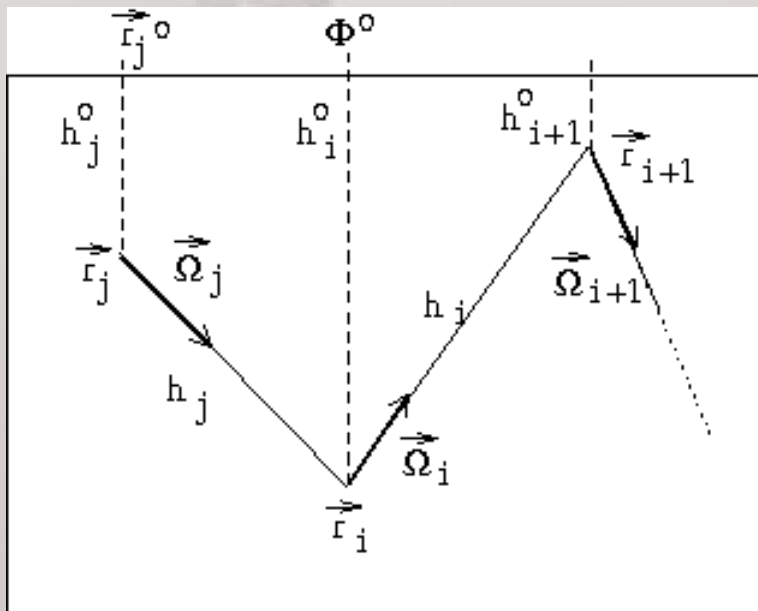
Monte Carlo Inverse

- Éclairement diffus

$$G_s(\vec{r}_j) = \int_{4\pi} d\vec{\Omega}_j \int_0^{h_j} ds \exp[-\beta s] \left[k_a(s) I_b(s) + k_d(s) \left(G_b(\vec{r}_i) p(\vec{r}_i, -\vec{\Omega}_j, \vec{\Omega}^o) + \right. \right.$$

$$\int_{4\pi} d\vec{\Omega}_i p(\vec{r}_i, -\vec{\Omega}_j, \vec{\Omega}_i) \int_0^{h_i} ds' \exp[-\beta s'] \left[k_a(s') I_b(s') + k_d(s') \left(G_b(\vec{r}_{i+1}) p(\vec{r}_{i+1}, -\vec{\Omega}_i, \vec{\Omega}^o) + \right. \right.$$

$$\left. \left. \int_{4\pi} d\vec{\Omega}_{i+1} p(\vec{r}_{i+1}, -\vec{\Omega}_i, \vec{\Omega}_{i+1}) \int_0^{h_{i+1}} ds'' \exp[-\beta s''] \dots \right) \right] \right]$$



Approximation de Diffusion (DA)

- Ray. solaire incident collimaté

- Diffusion isotrope $g = 0$

$$g = \int_{4\pi} (\vec{\Omega} \cdot \vec{\Omega}') p(\vec{\Omega}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}'$$

$$G(\vec{r}_j) = G_b(\vec{r}_j) + G_s(\vec{r}_j)$$

- Éclairement balistique

$$G_b(\vec{r}_j) = \Phi^o(\vec{r}_j^o) \exp\left[-\int_0^{h_j^o} \beta ds\right]$$

- Équation sur l'éclairement diffus (à résoudre)

$$\nabla \left(D \nabla G_s(\vec{r}_j) \right) = k_a(\vec{r}_j) \left[G_s(\vec{r}_j) - 4\pi I_b(\vec{r}_j) \right] - k_d \Phi^o \exp[-\beta h_j^o]$$

$$D = \frac{1}{3\beta}$$

Conditions Limites DA

- Flux radiatifs diffus aux frontières (\vec{n} , normale sortante)

$$\vec{q}_s \cdot \vec{n} = -D \nabla G_s \cdot \vec{n}$$

- Condition à la frontière : condition de Marshak

$$\frac{G_s}{4} + \frac{D}{2} \nabla G_s \cdot \vec{n} = \int_{(\vec{n} \cdot \vec{\Omega}) < 0} d\vec{\Omega} |\vec{\Omega} \cdot \vec{\Omega}'| F_w$$

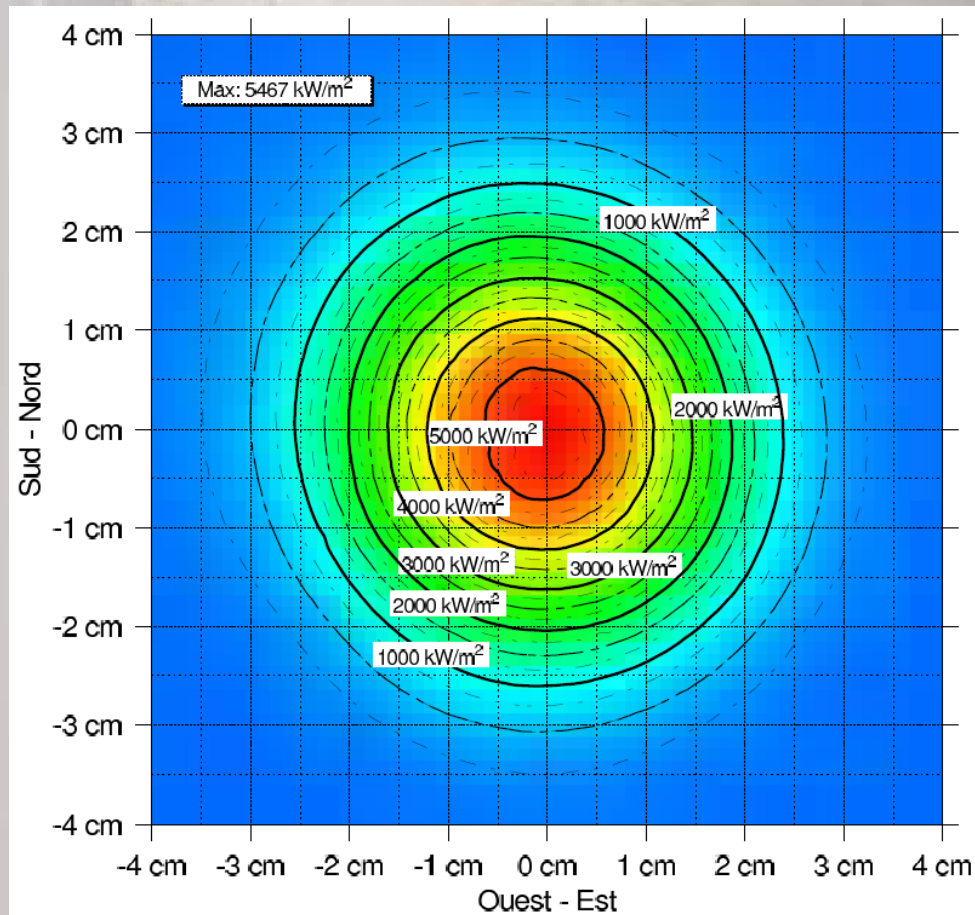
- Condition à la frontière : paroi opaque grise

$$D \nabla G_s \cdot \vec{n} = \frac{\epsilon_w}{2(2 - \epsilon_w)} (4\pi I_{bw} - G_s)$$

- Condition à la frontière libre

$$\frac{G_s}{4} + \frac{D}{2} \nabla G_s \cdot \vec{n} = 0 \quad D \nabla G_s \cdot \vec{n} = -\frac{G_s}{2}$$

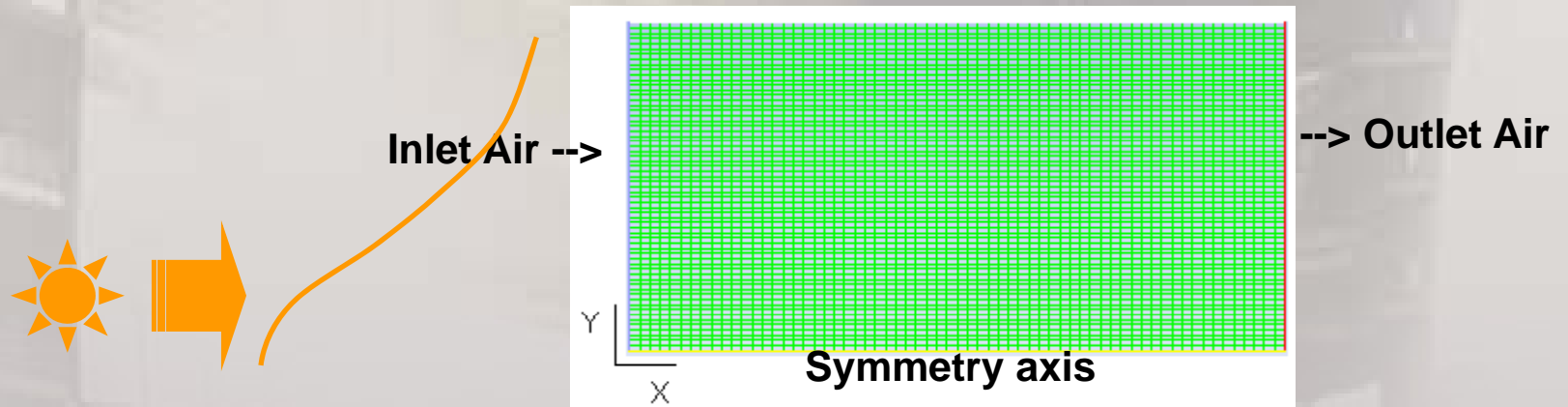
Flux Solaire Concentré Incident



- Approximation par
une gaussienne

$$POS = 5429 \cdot \exp\left[-2560 \cdot r^2\right] \frac{\overline{DNI}}{1000}$$

Géométrie 2D axisymétrique



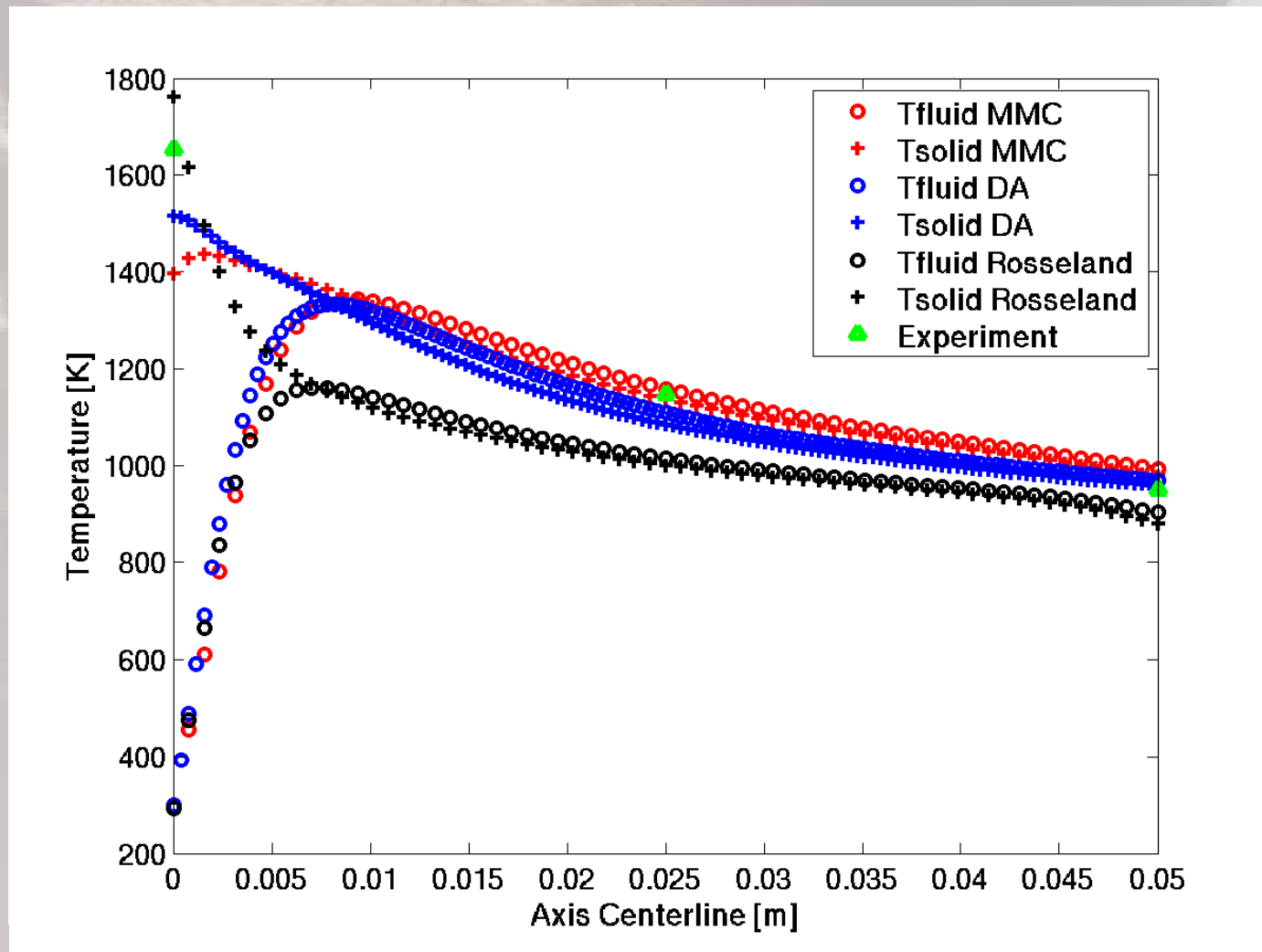
Mesh : 64x64 ; Y : [0, 0.025m] ; X: [0, 0.05m]

Sample 2: porosity 0.7, Cell size 2.23mm, Total hemi. Reflectivity 0.08

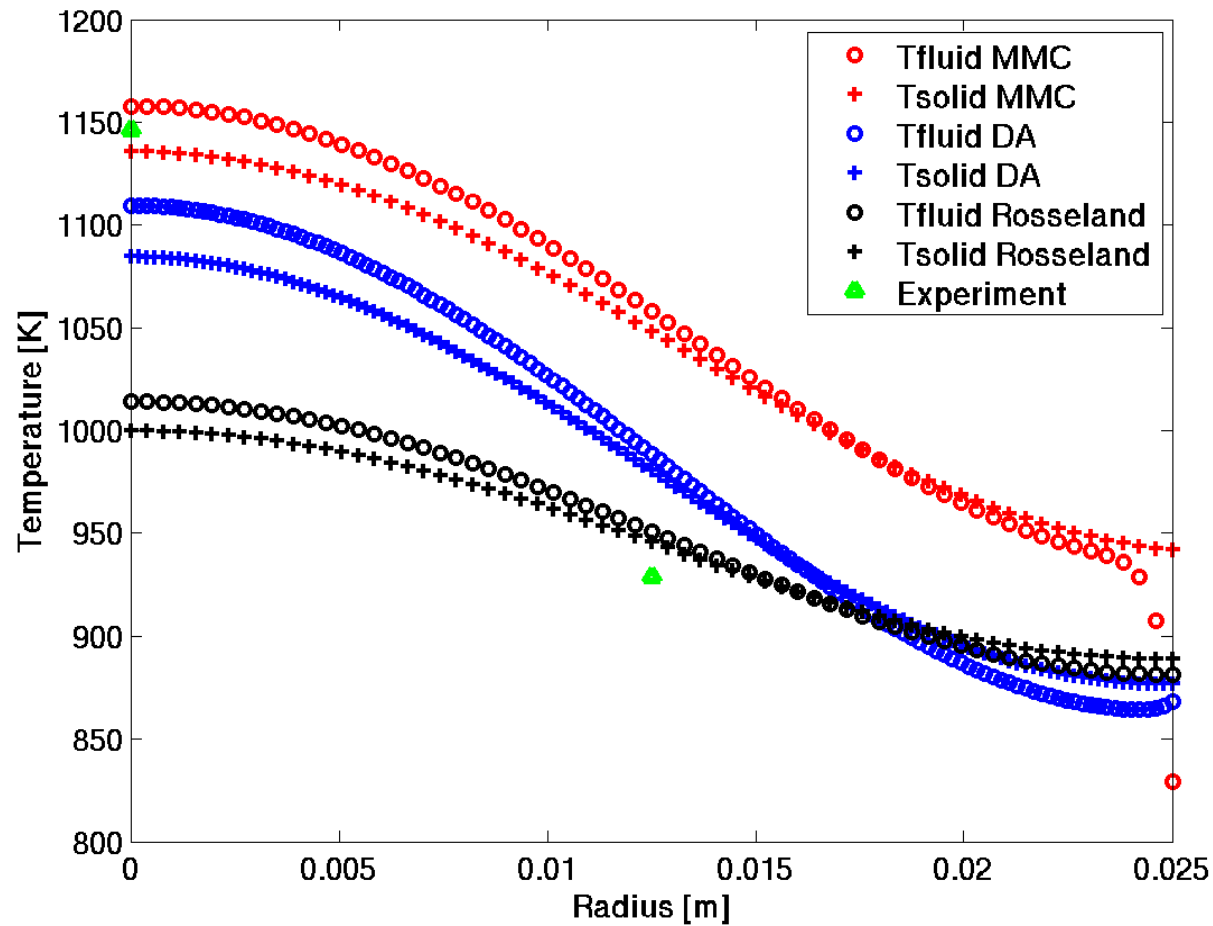
MFR : 0.004 kg/s ; Wall emissivity 0.3 ; $k_a=186\text{m}^{-1}$; $k_d=218\text{m}^{-1}$

Collimated incident solar flux (gaussian distrib.)

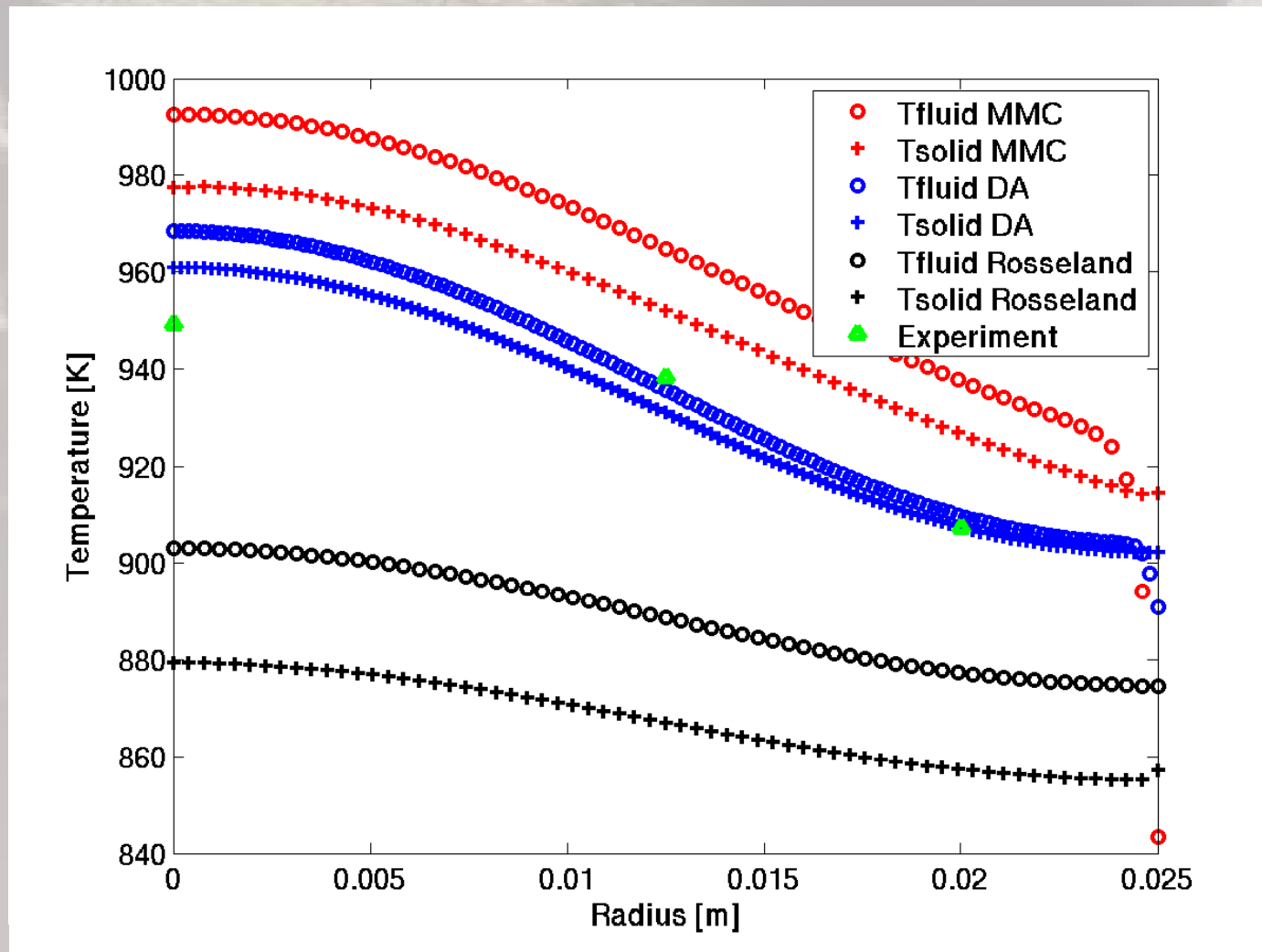
Profils de Température à l'Axé



Profils de Température à Mi-Profondeur



Profils de Température en Sortie



Conclusion et Perspectives

- **Conclusion**
 - Banc expérimental disponible pour une deuxième série de mesures
 - Développement d'une approche à l'échelle du pore pour calculer le gradient de pression et le coefficient d'échange thermique.
 - Développement d'une approche d'un milieu équivalent et de modèles de transferts radiatifs
- **Perspectives**
 - Affiner les modèles (DA et eq. nrj)
 - Conception et optimisation par simulation : Réalisation d'études de sensibilité aux paramètres du solide et de l'écoulement
 - Tester de nouveaux échantillons
 - Réaliser un banc de mesure des propriétés radiatives des mousses