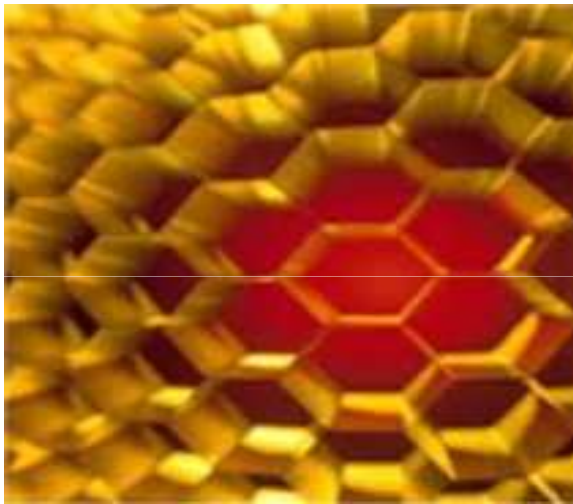


Modélisation du Transfert de Chaleur dans les Structures Poreuses en Nid d'Abeille



Dominique Baillis, Rémi Coquard, Matthieu Thomas & Bruno Estebe



PLAN de L'EXPOSÉ

Introduction

1. Description des structures « NIDA » pour isolation thermique -Phénomène de couplage Conduction-Rayonnement
 - Résolution Numérique du Couplage
 - Évaluation des propriétés conductives
 - Évaluation des propriétés radiatives
2. Validation Expérimentale
3. Etude Paramétrique : Évolution de la conductivité équivalente

Conclusion

Contexte / Programme européen



Seventh Framework Programme - Aeronautics And Air Transport

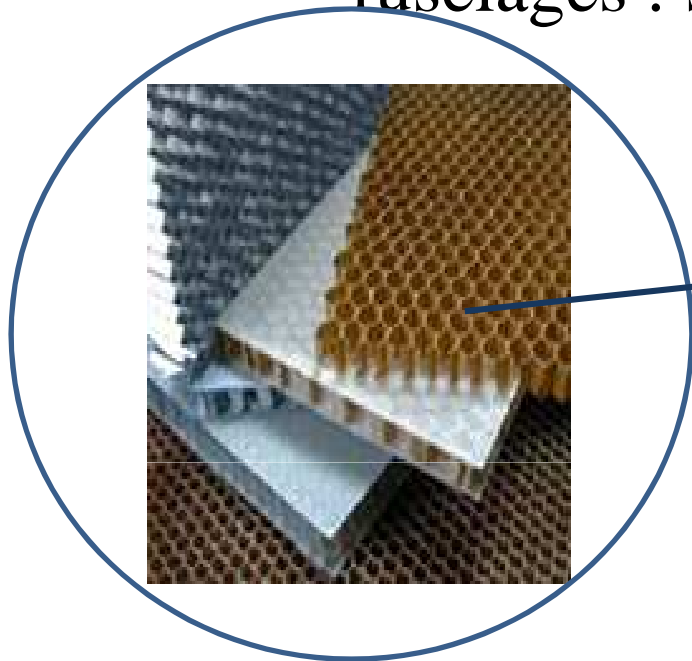


MORE AFFORDABLE AIRCRAFT THROUGH EXTENDED,
INTEGRATED AND MATURE NUMERICAL SIZING

- Programme "transport (including aeronautics)" (Avril 09 – Mars 2013)
- 58 partenaires
- Porteur du projet AIR BUS
- Porteur à l'INSA : Alain Combescure

Utilisation des nids d'abeilles

fuselages : structure sandwich en NIDA



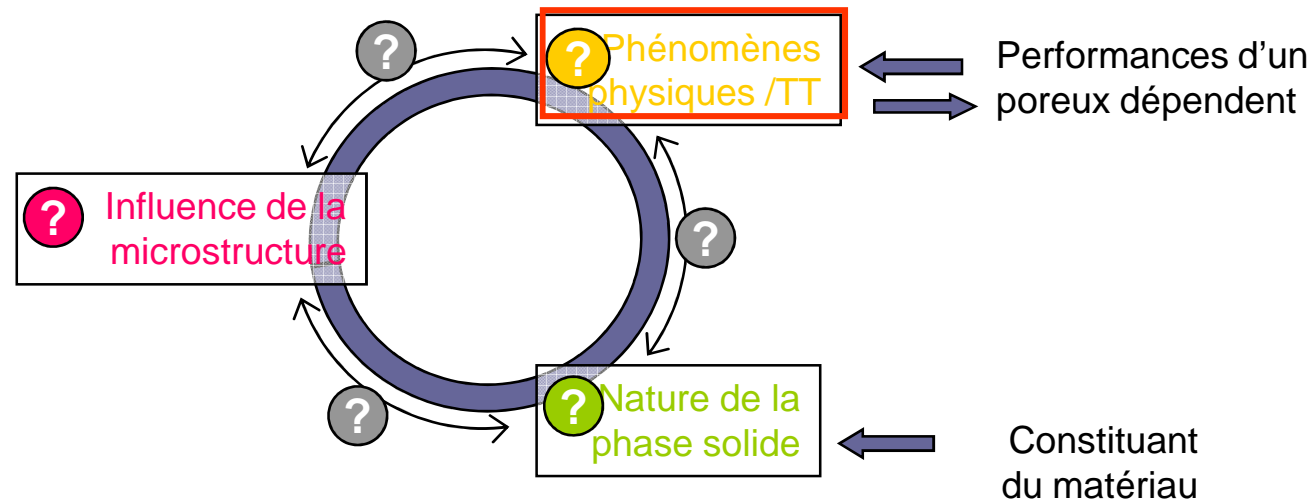
Utilisation multifonctionnelle en aéronautique:

-**Léger**

-**bouclier thermique**

-**renfort mécanique** (bonne tenue à la fatigue due aux vibrations soniques)

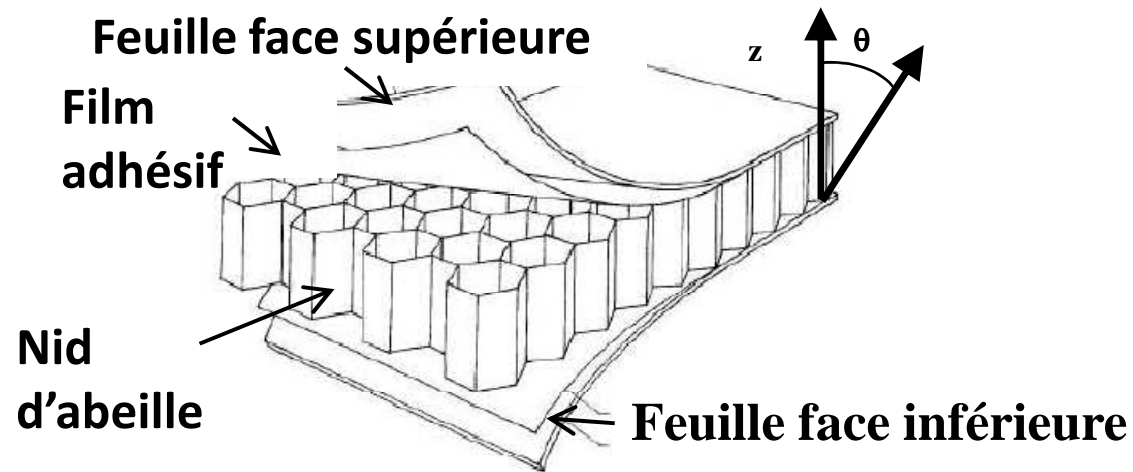
Optimisation thermique des nids d'abeilles



=>modéliser les TT à partir de leur microstructure

=> analyse paramétrique des dimensions structurales
et des propriétés physiques des constituants

Les propriétés thermiques radiatives des nida restent relativement inexplorées.

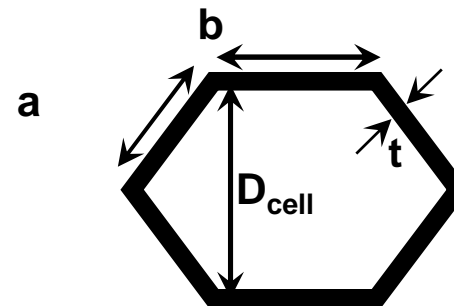


Nid d'abeille :

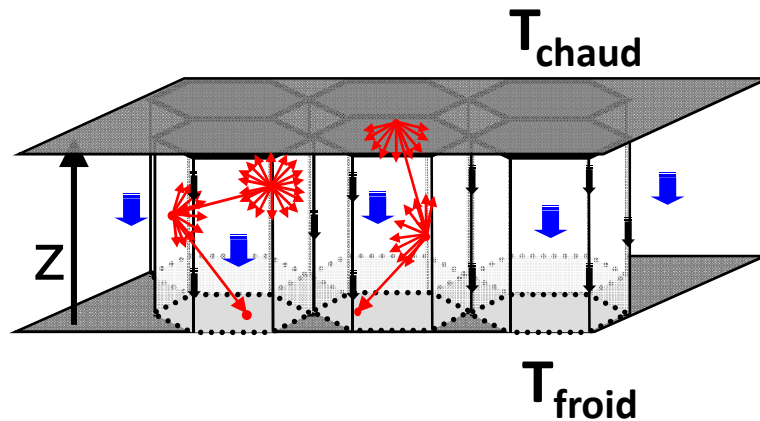
Forte porosité ($\approx 95\%$) → **Faible masse volumique ($< 100 \text{ kg/m}^3$)**

Structure cellulaire régulière*

anisotrope



Transfert de chaleur dans les « NIDA »



Investigations expérimentales et théoriques sur le TT à travers des matériaux NIDA Morris et al. (1976), Hollands et al. (1984,1993), Arulanantham et Kaushika (1996), Suehrcke et al. (2004)

Conduction solide

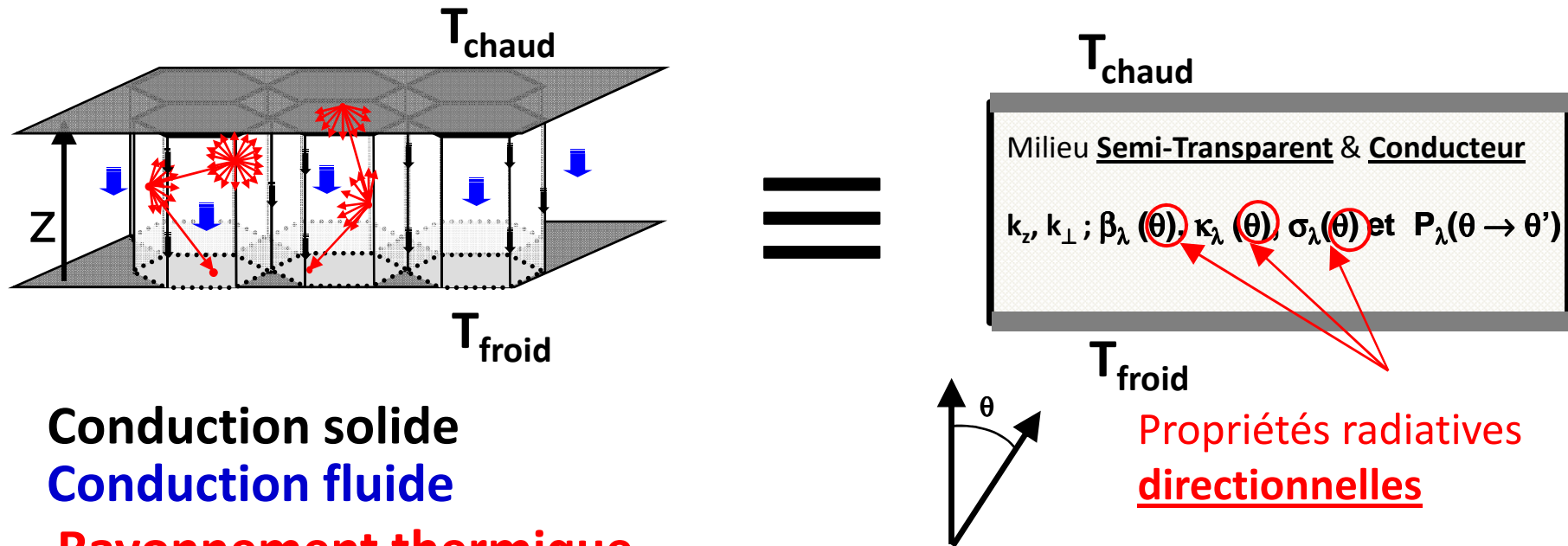
Conduction fluide

Rayonnement thermique

La convection thermique est généralement négligée

couplage conduction - rayonnement

Transfert de chaleur dans les « NIDA »



Conduction solide
 Conduction fluide
 Rayonnement thermique

Propriétés radiatives
directionnelles

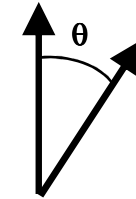
couplage conduction – rayonnement

Milieu confiné entre des parois chaude et froide (1D)

Résolution Numérique du Couplage

Équation de l'énergie en 1-D :

$$\frac{\delta q_c^z}{\delta z} + \frac{\delta q_r^z}{\delta z} = 0 \Leftrightarrow -k_z(T) \cdot \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} + \int_0^\infty \kappa_\lambda(\mu) \left[4\pi \cdot I_\lambda^0 - \int_{\Omega=4\pi} I_\lambda(z, \mu) \cdot d\Omega \right] \cdot d\lambda = 0$$



+ Équation du transfert radiatif en 1-D :

$$\mu \frac{\delta I_\lambda(z, \mu)}{\delta z} = -\beta_\lambda(\mu) I_\lambda(z, \mu) + \kappa_\lambda(\mu) I_\lambda^0(T) + \frac{\sigma_\lambda(\mu)}{4\pi} \int_{\Omega=4\pi} \Phi_\lambda(\mu' \rightarrow \mu) I_\lambda(z, \mu') d\Omega'$$

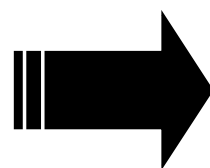
Avec les C.L :

$$\begin{cases} I_\lambda(0, \bar{\Delta}_{\mu>0}) = \epsilon_{c,\lambda} I_\lambda^0(T_{chaud}) + 2 \times (1 - \epsilon_{c,\lambda}) \cdot \int_{\mu'<0} I_\lambda(0, \bar{\Delta}') \cdot \bar{\Delta}' d\Omega' \\ I_\lambda(L, \bar{\Delta}_{\mu<0}) = \epsilon_{f,\lambda} I_\lambda^0(T_{froid}) + 2 \times (1 - \epsilon_{f,\lambda}) \cdot \int_{\mu'>0} I_\lambda(L, \bar{\Delta}') \cdot \bar{\Delta}' d\Omega' \end{cases}$$

ptés radiatives spectrales & directionnelles

Résolution par méthodes Numériques :

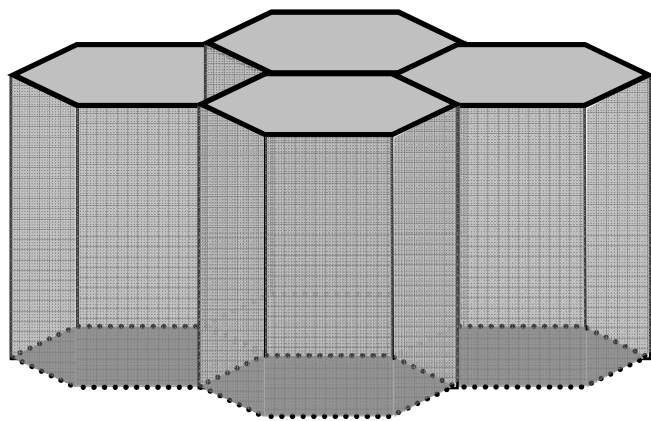
Méthodes des Ordonnées Discrètes pour l'ETR + Méthode des Volumes de Contrôle pour Équation de l'Énergie



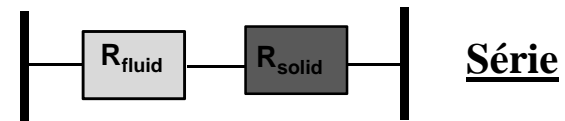
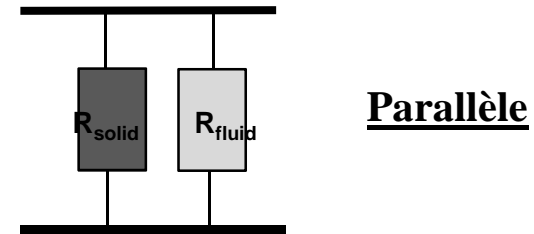
$$k_{equ} = \frac{(q_c^z + q_r^z) \cdot L}{(T_{chaud} - T_{froid})}$$

Évaluation de la Conductivité Effective k_z

Analogie électrique



≡



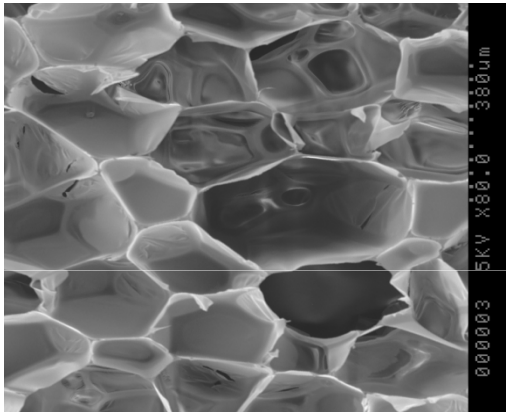
$$\frac{1}{R_z} = \frac{1}{R_{fluid}} + \frac{1}{R_{solid}} \Rightarrow k_z = k_{air} \times \varepsilon + k_s \times (1 - \varepsilon)$$

$$R_{\perp} = R_{fluid} + R_{solid} \Rightarrow k_{\perp} = \frac{k_{air} \times k_s}{\varepsilon \times k_s + (1 - \varepsilon) \times k_{air}}$$

Évaluation des $P^{tés}$ Radiatives/Poreux cellulaires

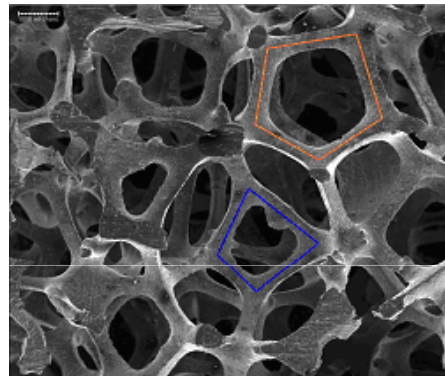
Matériaux cellulaires très étudiés : mousses

Pores fermés

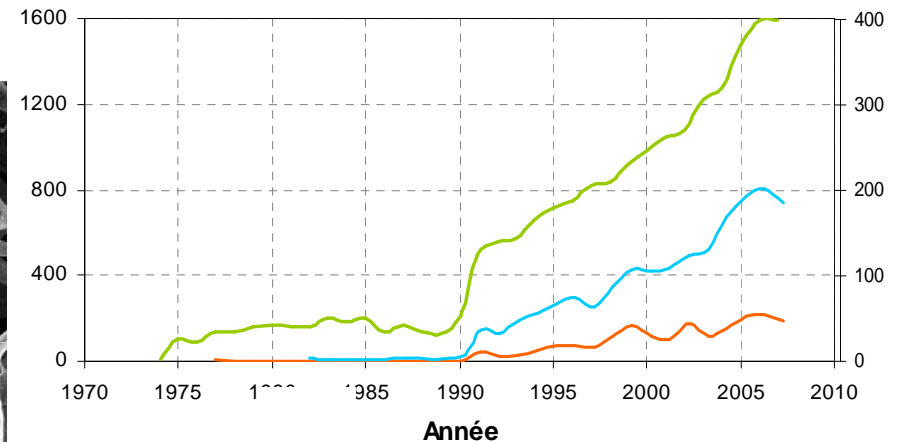


Kuhn *et al.* (1992)
Glicksman *et al.* (1992)
Coquard and Baillis (2006)
Coquard *et al.* (2009)
Kaemmerlen *et al.* (2010)

Pores ouverts



Hendricks and Howell (1996),
Zhao (2004),
Tseng and K.-T Kuo (2002)
Baillis *et al.* (1999), (2000)),
Loretz *et al.* (2008)
Rousseau *et al.* (2008)
Zeghondy *et al.* (2006^{a,b})),
Petrasch *et al.* (2007)



pHD M Loretz 2008

Nombre de travaux publiés sur les **matériaux cellulaires de type mousse**

Nombre de travaux publiés sur les transferts **par conduction** and **par rayonnement** dans les mousses

Évaluation des P^{tés} Radiatives/Poreux cellulaires

NIDA

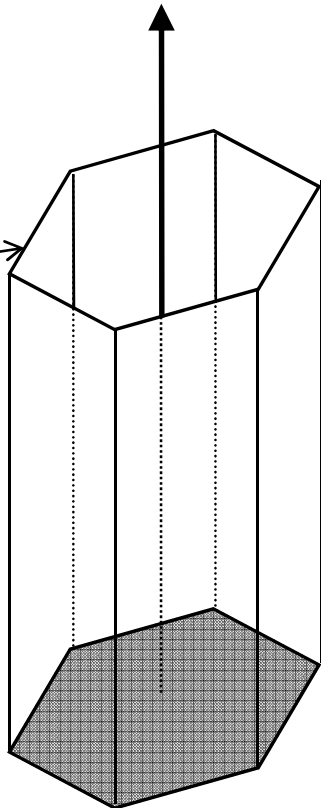


$$x = \frac{\pi \cdot D}{\lambda} \approx \frac{1 \text{ mm}}{10 \mu\text{m}} \gg 1$$



Approximation de l'optique géométrique ;
interaction rayonnement matière

Feuille partiellement transparente



Évaluation des P^{tés} Radiatives/Poreux cellulaires

NIDA



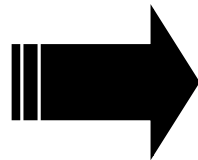
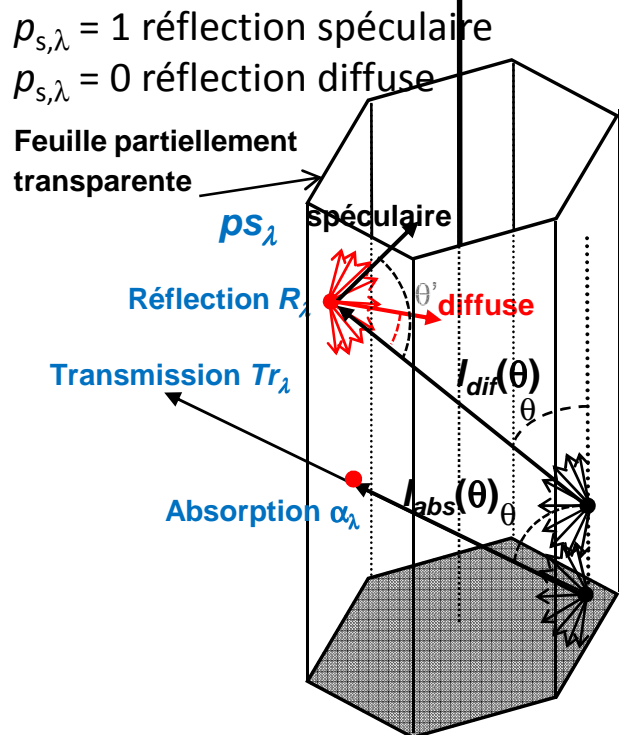
$$x = \frac{\pi \cdot D}{\lambda} \approx \frac{1 \text{ mm}}{10 \mu\text{m}} \gg 1$$



Approximation de l'optique géométrique ;
interaction rayonnement matière

Approche Lancer de rayons basée sur des travaux sur les mousses Coquard et al. (2011)

Randrianalisoa and Baillis, JQSRT, 2010



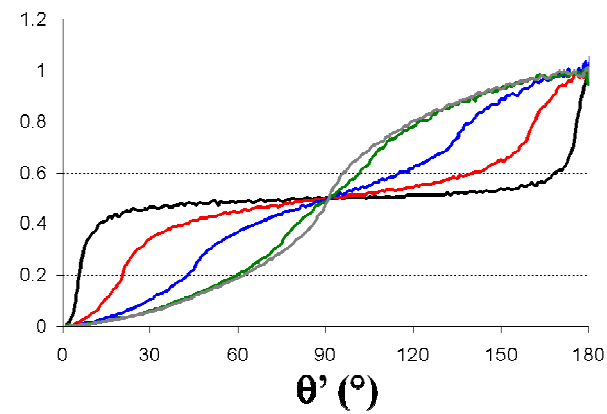
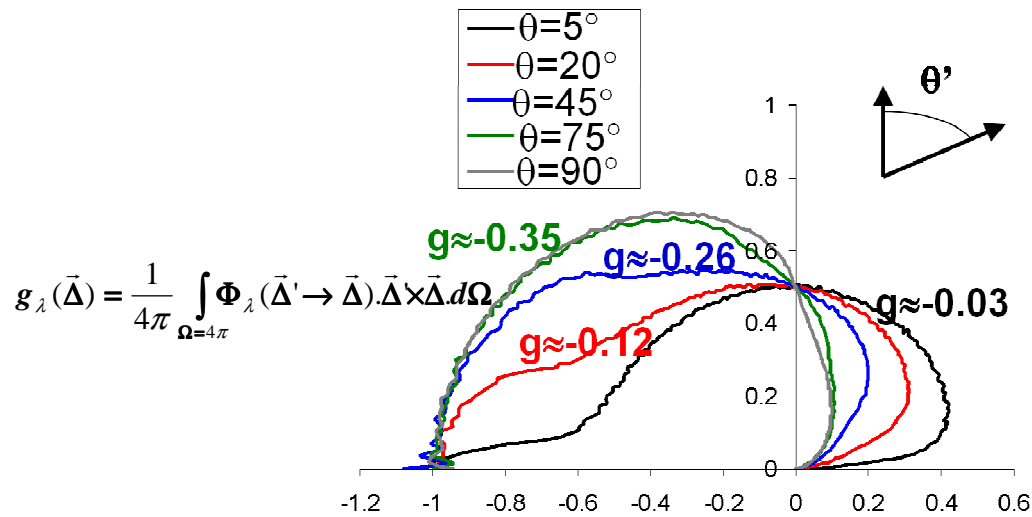
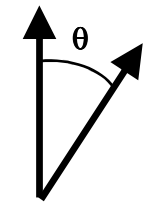
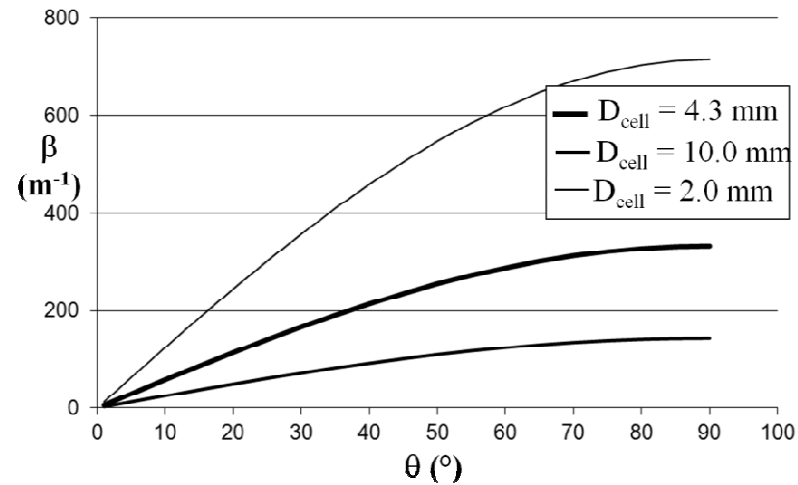
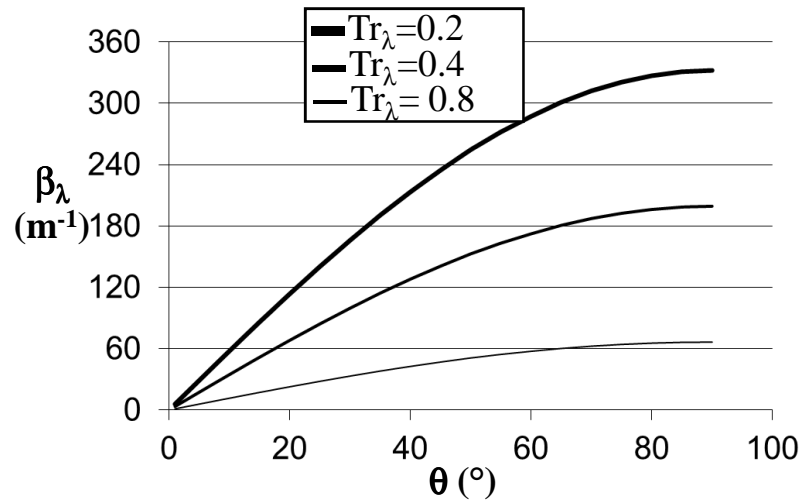
$$\left\{ \begin{aligned} \kappa(\theta) &= \frac{1}{\langle l_{abs}(\theta) \rangle}; & \sigma(\theta) &= \frac{1}{\langle l_{dif}(\theta) \rangle}; \\ \beta(\theta) &= \sigma(\theta) + \kappa(\theta) = \frac{1}{\langle l_{ext}(\theta) \rangle} = \frac{1}{\langle l_{abs}(\theta) \rangle} + \frac{1}{\langle l_{dif}(\theta) \rangle} \\ \Phi(\theta, \theta') &= \frac{W(\theta, \theta')}{\frac{1}{2} \int_{\mu'=-1}^1 W(\theta, \theta') \mu' d\mu'} \end{aligned} \right.$$

$W(\theta, \theta')$: Distribution des directions de diffusion

Résultats : Variation des propriétés radiatives



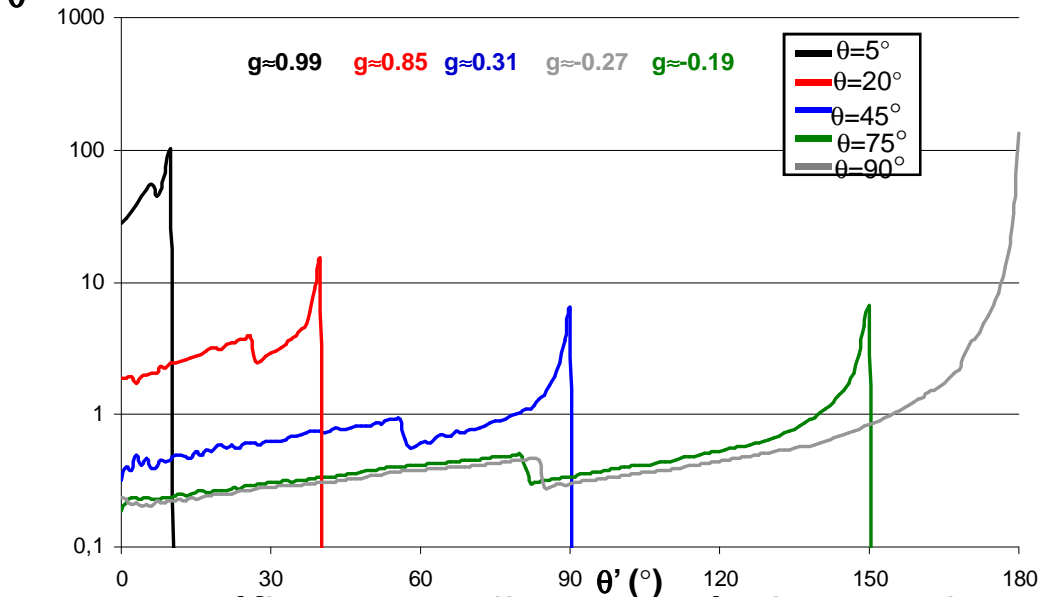
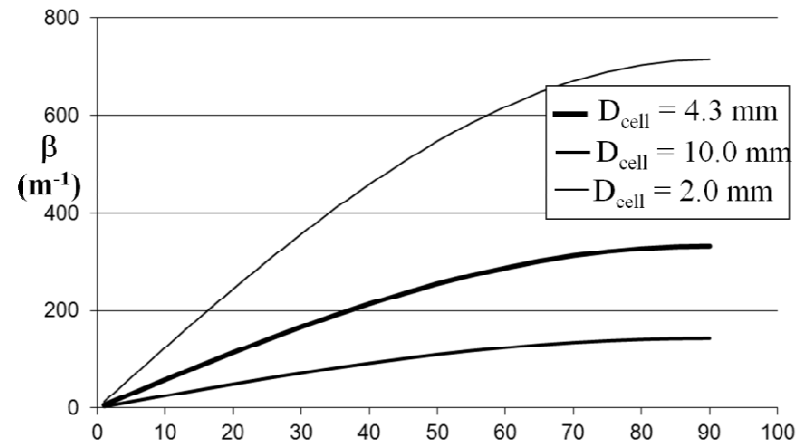
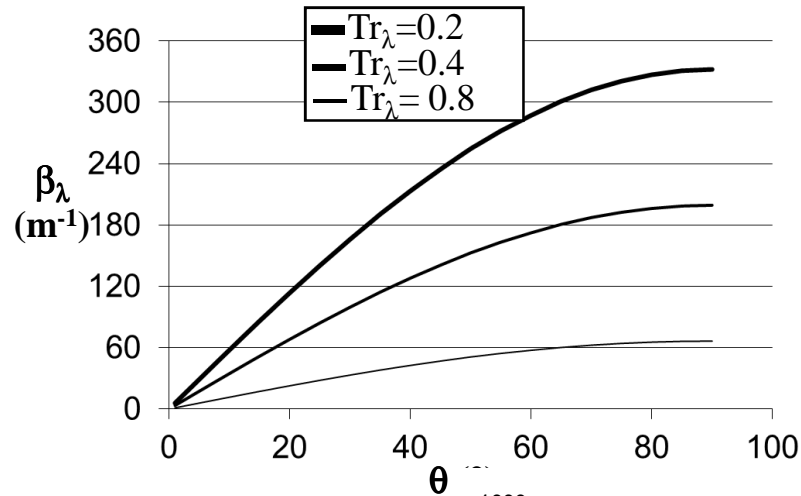
Analyse l'ANISTROPIE



$\Phi_\lambda(\theta, \theta')$ Réflexion totalement diffuse par les parois ($p_s=0$)

Résultats : Variation des propriétés radiatives

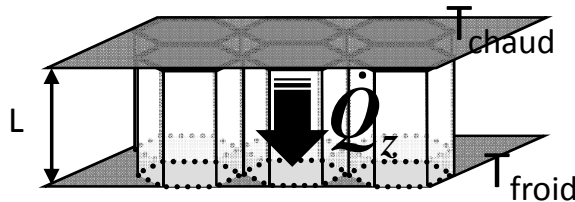
Analyse l'ANISTROPIE



$\Phi_\lambda(\theta, \theta')$ Réflexion totalement spéculaire par les parois ($p_s=1$)

2. Validation expérimentale

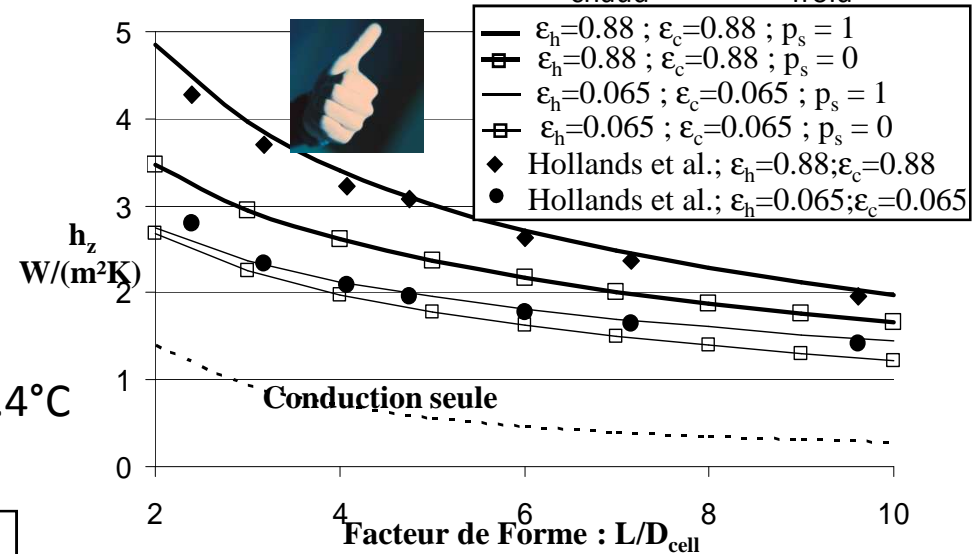
Validation expérimentale des modèles théoriques



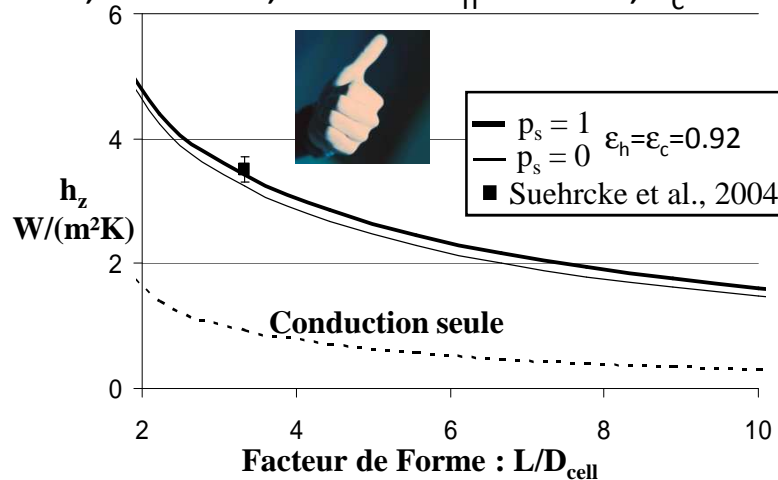
$$h_z = \frac{\dot{Q}_z}{S.(T_{chaud} - T_{froid})}$$

$$Tr \approx 0.4, R \approx 0.3, \alpha \approx 0.3 \quad T_{chaud} = 306 \text{ K} \quad T_{froid} = 298 \text{ K}$$

Hollands, et al. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 27 (1984) pp.2119–2131



$$Tr \approx 0.2, R \approx 0.15, \alpha \approx 0.65 \quad T_h = 51.1^\circ\text{C}, T_c = 26.4^\circ\text{C}$$

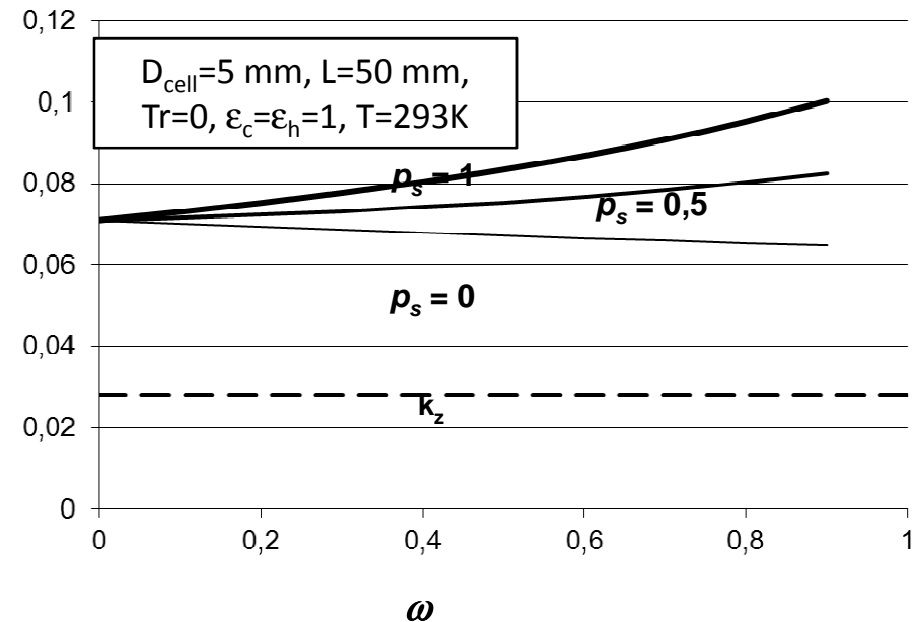
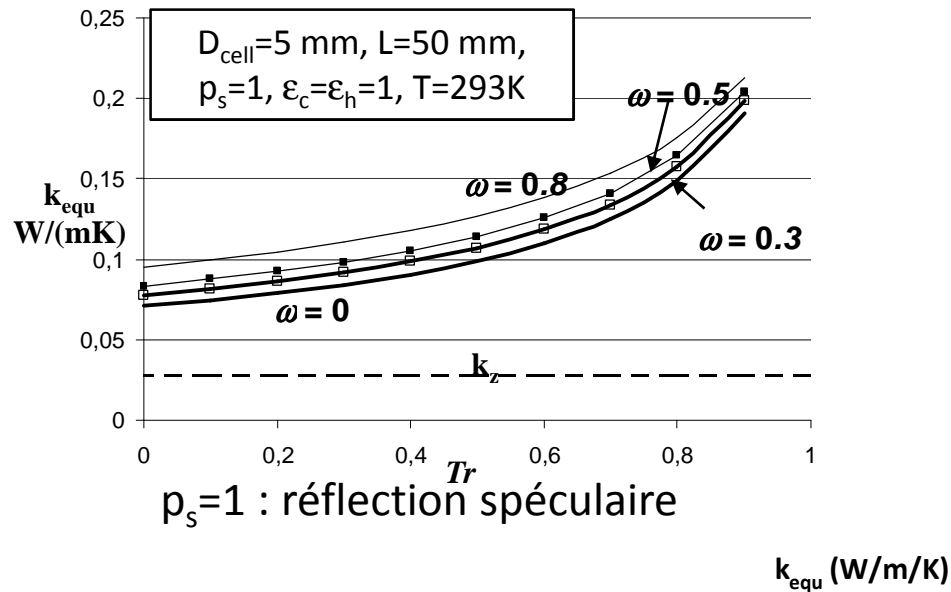


Suehrcke H. et al. *Solar Energy*, vol. 76 (2004) pp.351–358

3. Etude paramétrique

Évolution de la conductivité équivalente k_{equ}

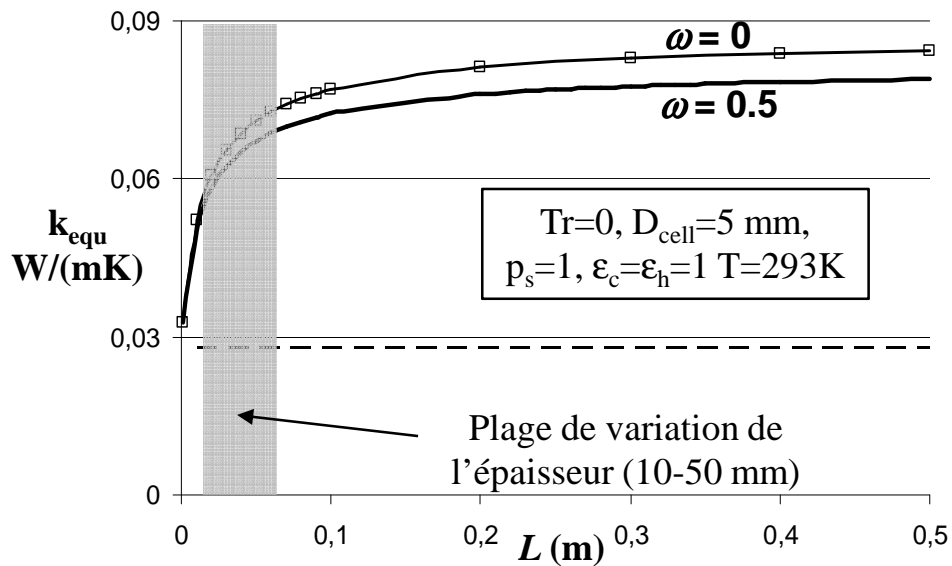
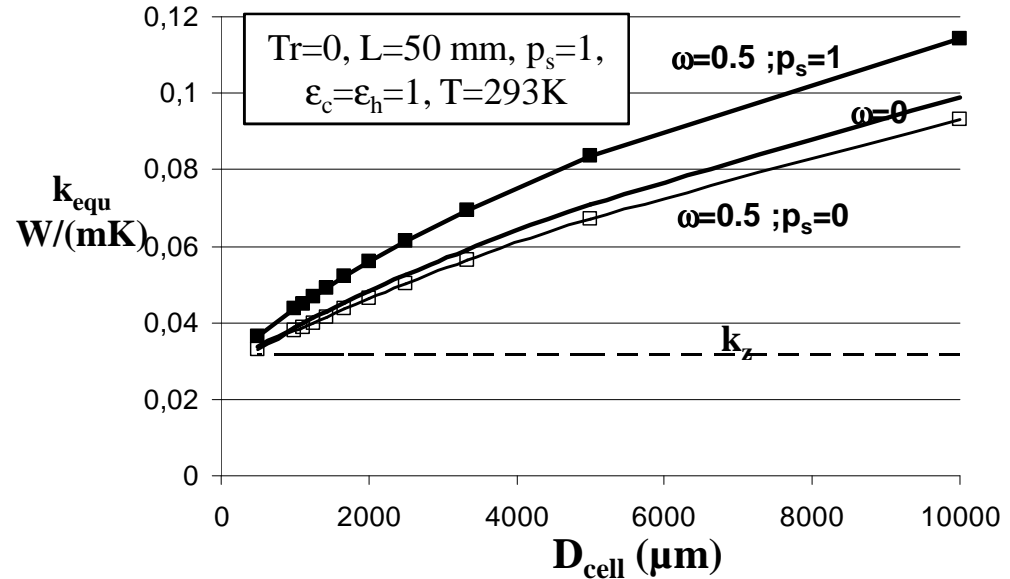
Influence des propriétés optiques Tr_λ , α_λ , R_λ , ρ_s
Compréhension par l'analyse des propriétés radiatives équivalentes



3. Etude paramétrique

Évolution de la conductivité équivalente k_{equ}

Influence de la taille des cellules D_{cell}

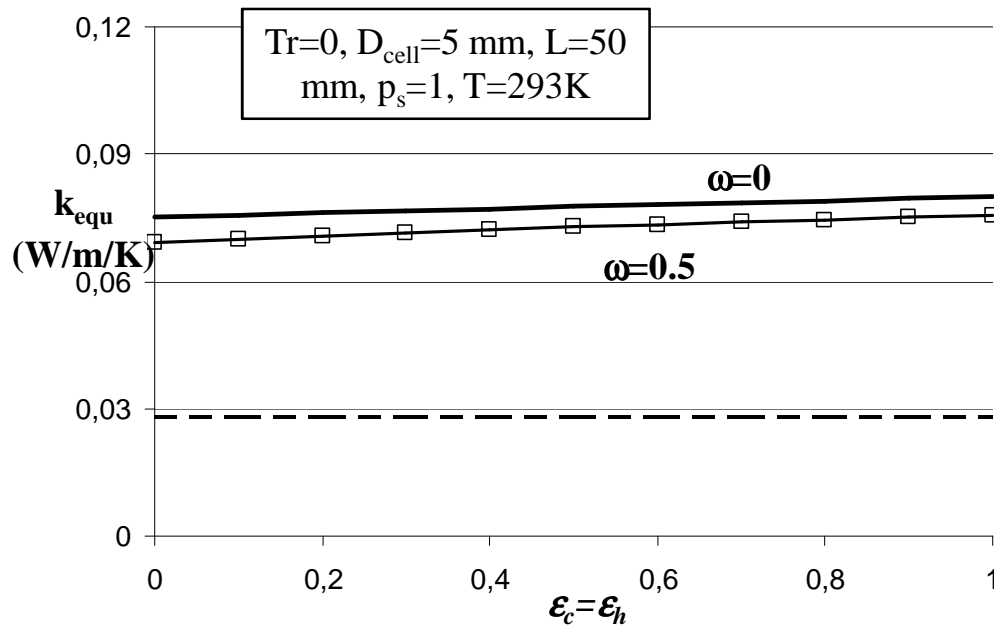
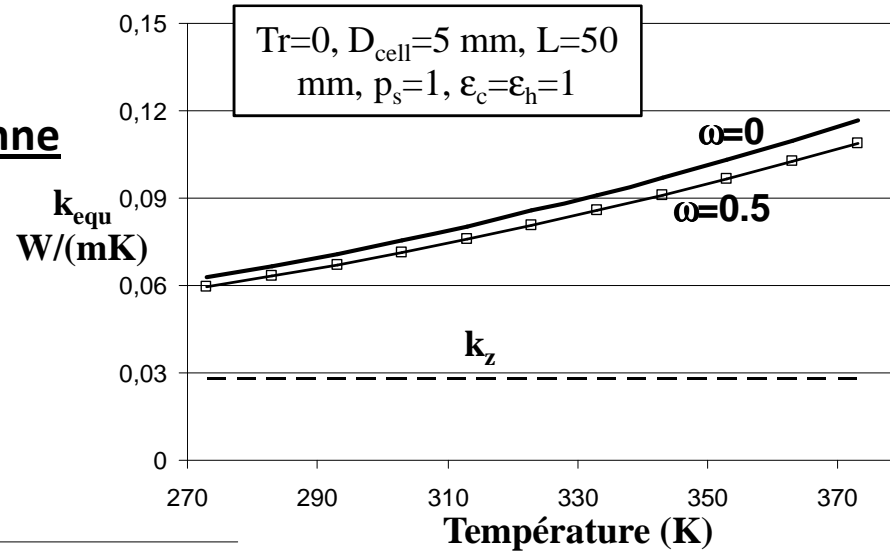


Influence de l'épaisseur d'isolant L

3. Etude paramétrique

Évolution de la conductivité équivalente k_{equ}

Influence de la Température moyenne



Influence de l'émissivité des frontières $\epsilon_c = \epsilon_h$

Conclusion

- **Première étude détaillée** sur le transfert thermique **couplé** dans les matériaux poreux en **Nid d'Abeilles**
- Hypothèse d'un milieu **semi-transparent conducteur homogène**
 - ✓ Propriétés conductives **k_z, k_\perp** par analogie électrique
 - ✓ Propriétés radiatives **$\beta_\lambda, \kappa_\lambda, \sigma_\lambda, \Phi_\lambda(\theta, \theta')$** par lancer de rayon
- **Validé** expérimentalement
- Analyse du comportement thermique **fortement anisotropes**
- Mise en évidence des **paramètres les plus influents** sur les performances **isolantes** : propriétés structurelles (D_{cell}, L, T), propriétés des constituants (conductivité, propriétés optiques)

Évaluation des P^{tés} Radiatives

Coquard et al. (2011)

MC Ray Tracing Algorithm
(Randrianalisoa and Baillis, JQSRT, 2010)

For each ray 1 to N:

1 Determine the location of extinction and the ray direction after extinction, Δ

2 Track the ray path until new extinction and store the path length of the ray, $dist_i$

3 Determine the type of extinction:

- If absorption:

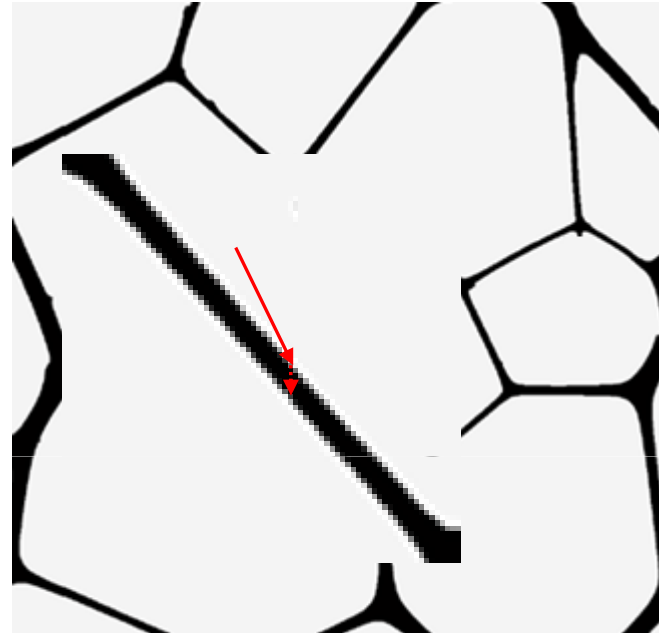
increment the number of absorption events, $n_a = n_a + 1$

- If scattering:

draw the new scattering direction, Δ'
calculate the scattering angle $\Theta_i = (\Delta, \Delta')$;

increment the number of scattering of angle Θ_i , $N(\Theta_i)$

increment the number of scattering events, $n_s = n_s + 1$



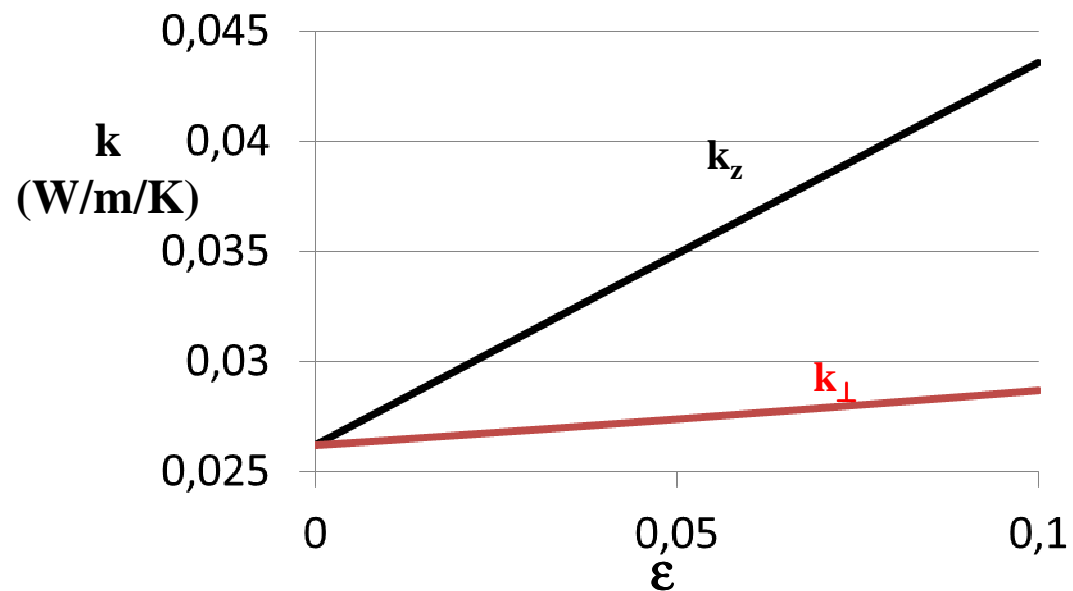
Formulas of radiative properties

$$\beta = \alpha + \sigma = \frac{n_a + n_s}{\sum_{i=1}^N dist_i} \quad \alpha = \frac{n_a}{\sum_{i=1}^N dist_i} \quad \sigma = \frac{n_s}{\sum_{i=1}^N dist_i}$$

$$\omega = \frac{\sigma}{\alpha + \sigma} = \frac{n_s}{n_s + n_a}$$

$$\Phi(\Theta_i) = \frac{N(\Theta_i)}{\frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^{n_\theta} N(\Theta_i) \Delta\Theta_i}$$

Résultats : Variation de la conductivité phonique



$$\omega_{\lambda} = R_{\lambda} / (a_{\lambda} + R_{\lambda})$$