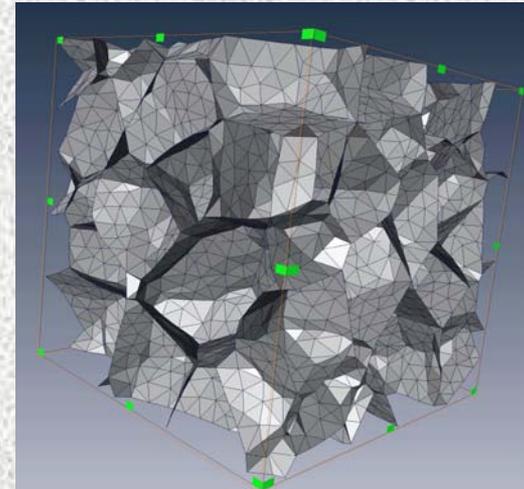
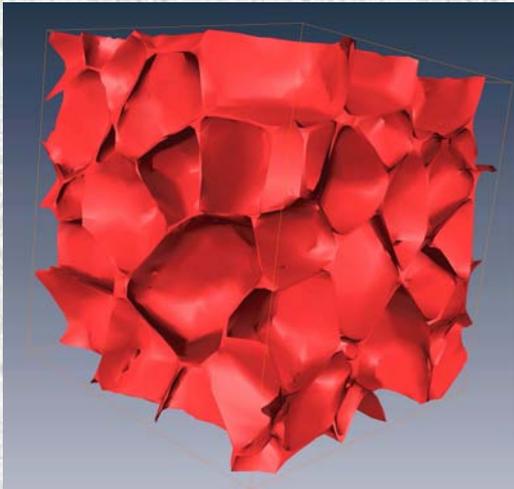


Évaluation des propriétés radiatives des mousses polymères à pores fermés à partir d'images tomographiques

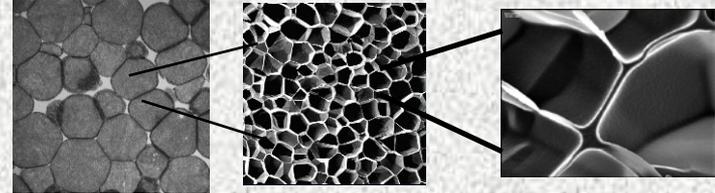
Rémi Coquard & Dominique Baillis



Contexte de l'étude

Mousses à pores fermés largement utilisées pour isolation thermique

➡ Secteur du bâtiment • **PSE/XPS**



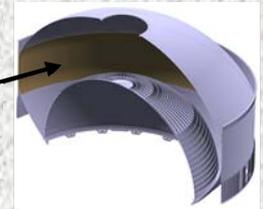
• **PolyUréthane**

➡ Aéronautique : **PVC**

ARIANE



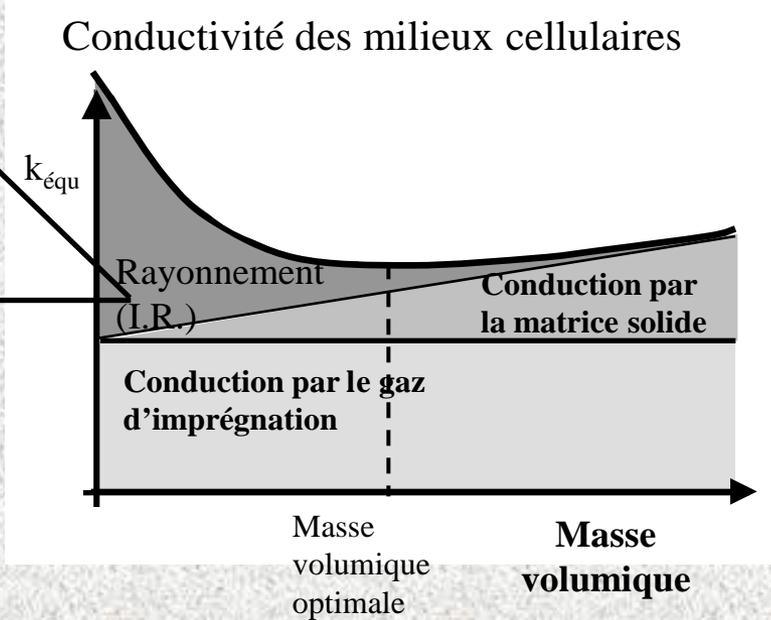
Mousse isolante



Objectifs

Prédire le transfert de chaleur couplé

Améliorer les caractéristiques thermiques (rayonnement)



Modélisation du transfert thermique couplé

Equation de l'énergie

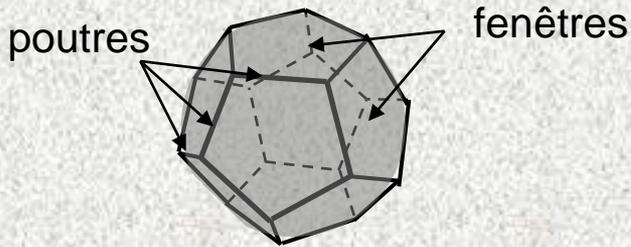
ETR :

$$\frac{\partial}{\partial z} (q_r + q_c) = 0$$

$$\left\{ \begin{aligned} \mu \frac{\partial L_\lambda}{\partial z} &= - \int_0^1 L_\lambda(\mu) d\mu + L_\lambda^0(T) + \frac{1}{2} \int_{-1}^1 \mathbf{P}_\bullet(\mu' \rightarrow \mu) L_\lambda d\mu' \\ q_r &= 2\pi \int_0^1 \int_{-1}^1 L_\lambda(\mu) \cdot \mu d\mu d\lambda \end{aligned} \right.$$

Modèles existants

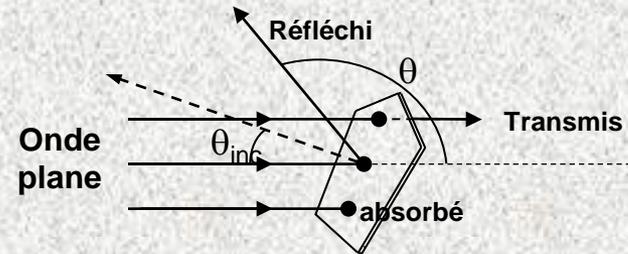
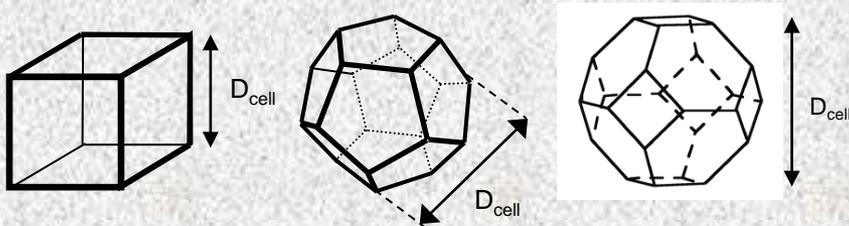
Glicksmann and Schuetz ; Kuhn et al.



MIE + Optique Géométrique
INDEPENDENT SCATTERING

$$\left\{ \begin{aligned} K_R &= \int_0^\infty \frac{1}{\beta_\lambda^*} \cdot \frac{\partial e_{b\lambda}}{\partial e_b} \\ k_r &= \frac{16 \cdot \sigma_{SB} \cdot T^3}{3 \cdot K_R} \end{aligned} \right.$$

Coquard, R., Baillis, D. and Quenard D., *J. Heat Transfer* Vol. 131, No. 1, 2009, 012702



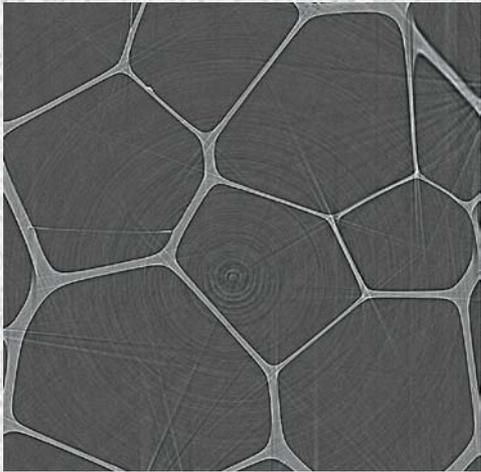
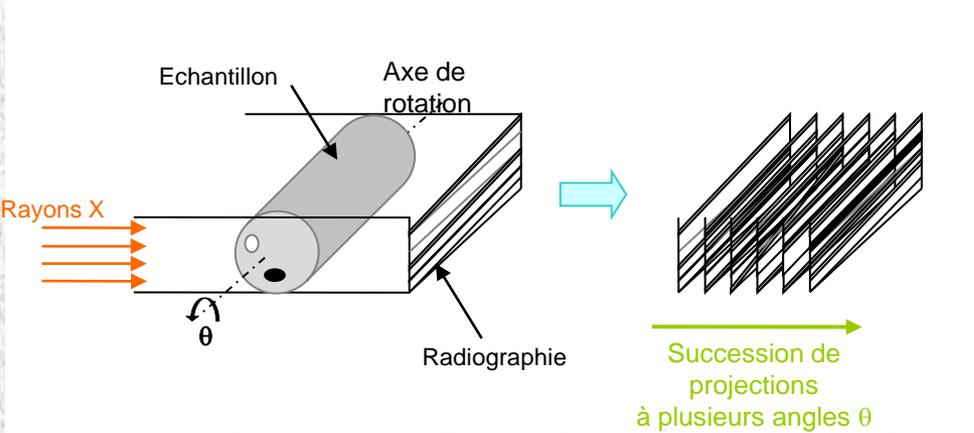
$$\beta_\lambda, \omega_\lambda \text{ et } P_\lambda(\theta)$$

- Forme des cellules ? Identiques ? Dodécaèdre ??

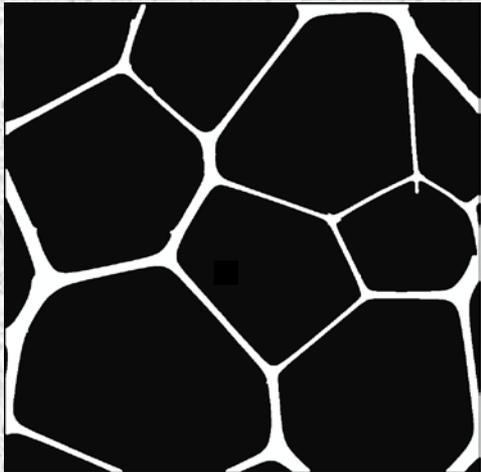
Limites :

- Distribution de taille ?
- Répartition du polymère dans la cellule ? Parois planes ?

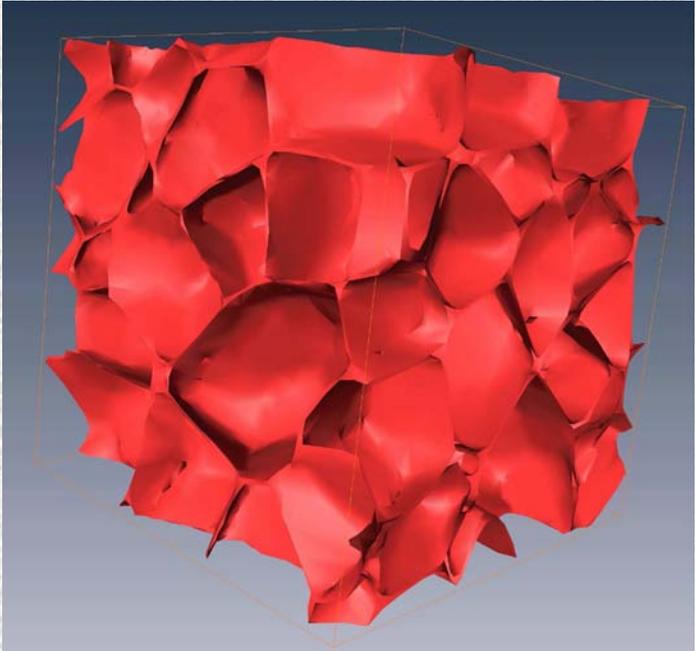
Imagerie tomographique



Coupe d'image « brute »



SEUILLAGE + FILTRAGE



RECONSTRUCTION 3-D
Logiciel Amira

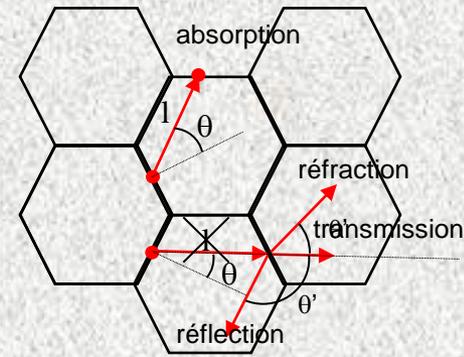
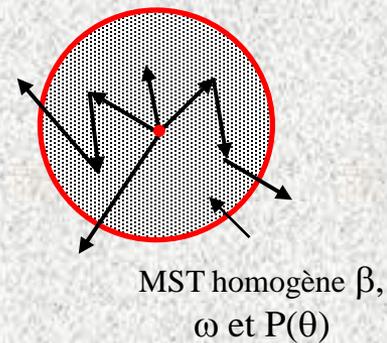
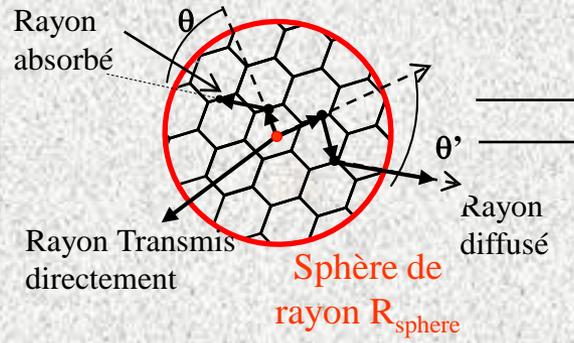
Modélisation des propriétés radiatives

$$x = \frac{\pi \cdot D}{\lambda} \gg 1 \quad \Rightarrow$$

Lancer des rayons

R. Coquard; D. Baillis "Radiative Characteristics of Opaque Spherical Particle Beds: A New Method of Prediction", JTHT, vol. 18, No. 2, 2004

Temps de calcul trop longs + propriétés non-directionnelles



Randrianalisoa and Baillis, "Radiative Transfer in Dispersed Media: Comparison Between Homogeneous Phase and Multiphase Approaches", J. Heat Transfer, Vol. 132, No. 2

$$\beta_\lambda = \frac{1}{l_{mean,\lambda}}$$

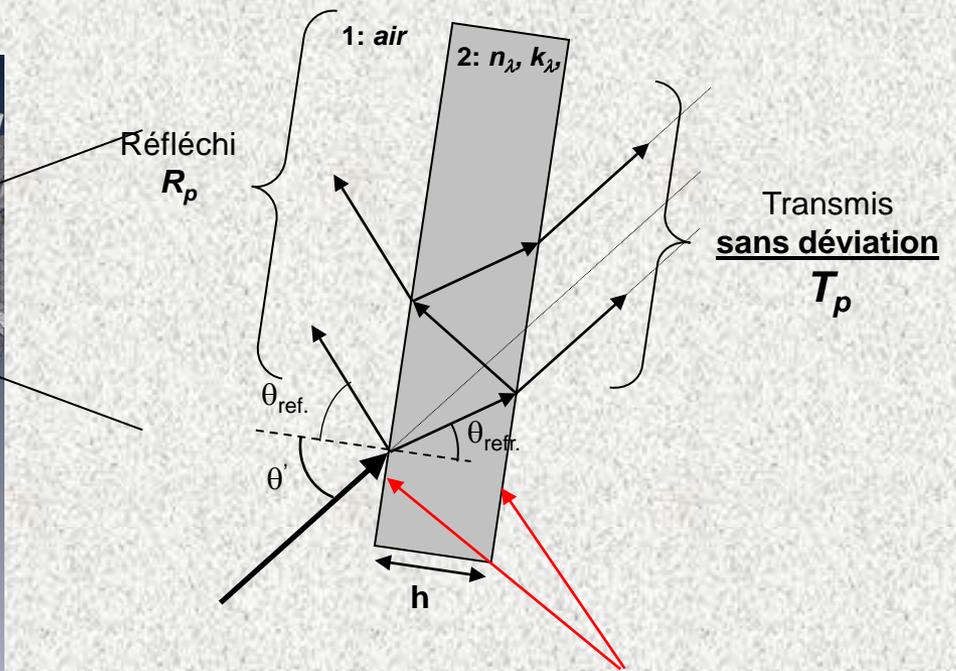
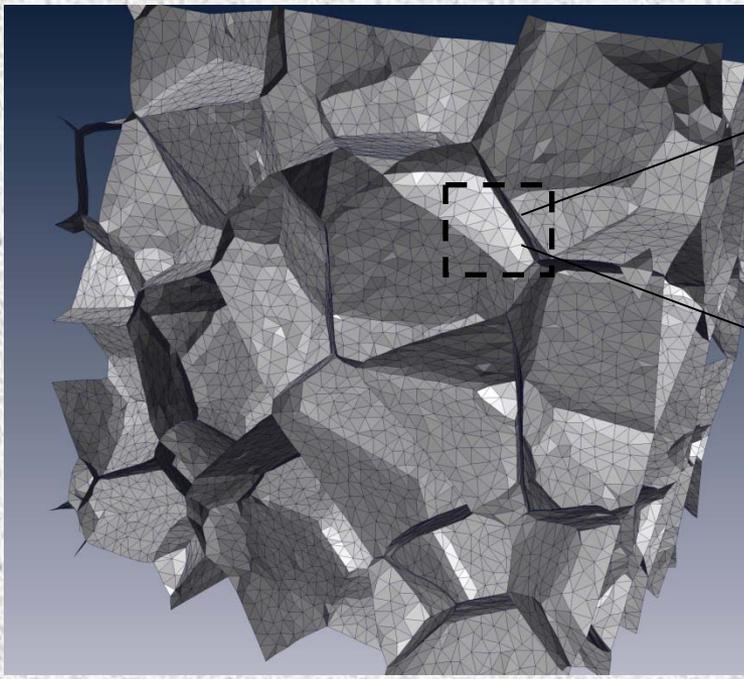
$$\omega_\lambda = \left(\frac{N_{sca}}{N_{abs} + N_{sca}} \right)_\lambda$$

$$P'_\lambda(\theta'_i) = \frac{D'_\lambda(\theta'_i)}{\sin(\theta_i) \frac{\pi^2}{90}}$$

Modélisation des propriétés radiatives

2 approches différentes

• Maillage « COQUE » des surfaces



Faces parallèles

$$R_p = R_{12} + T_{12} R_{21} T_{21} T_r^2 + T_{12} R_{21}^3 T_{21} T_r^4 + \dots = R_{12} + \frac{T_{12} R_{21} T_{21} T_r^2}{1 - R_{21}^2 T_r^2}$$

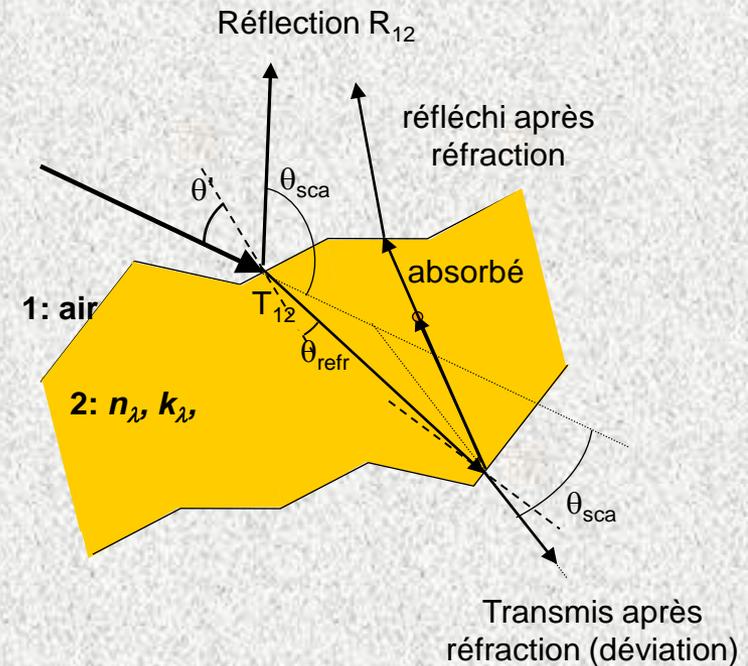
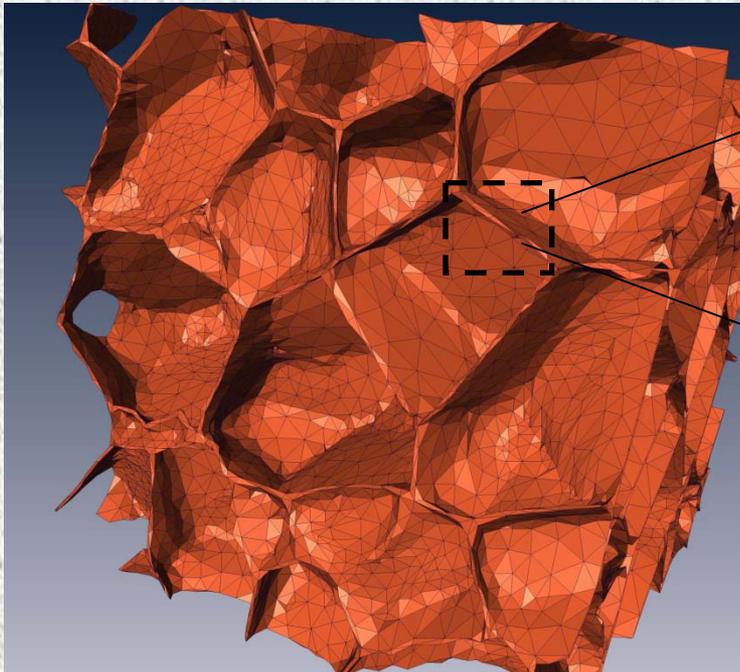
$$T_p = T_{12} T_{21} T_r + T_{12} R_{21}^2 T_{21} T_r^3 + \dots = \frac{T_{12} T_{21} T_r}{1 - R_{21}^2 T_r^2}$$

$$A_p = 1 - R_p - T_p$$

Lois de FRESNEL →

Modélisation des propriétés radiatives

- Maillage « volumétrique » des surfaces



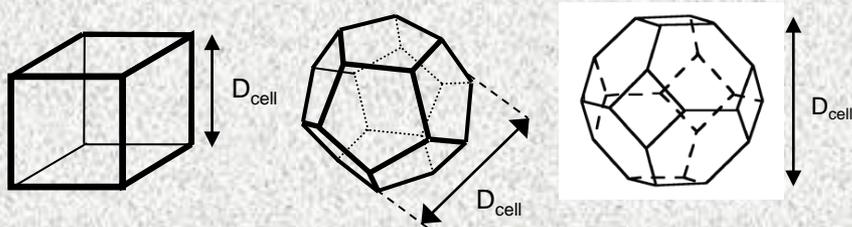
etc

Résultats

3 échantillons de mousses

Echantillon N°	N _{cell}	ε	<D _{cell,sphere} >	$\frac{\sigma_{D_{cell}}}{\langle D_{cell} \rangle}$	Max. D _{cell,sphere}	Min. D _{cell,sphere}
1	31	0.943	372 μm	0.495	627 μm	64 μm
2	50	0.907	296 μm	0.16	379 μm	215 μm
3	39	0.957	326 μm	0.653	803 μm	41 μm

Modèles analytiques antérieurs



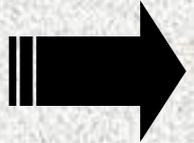
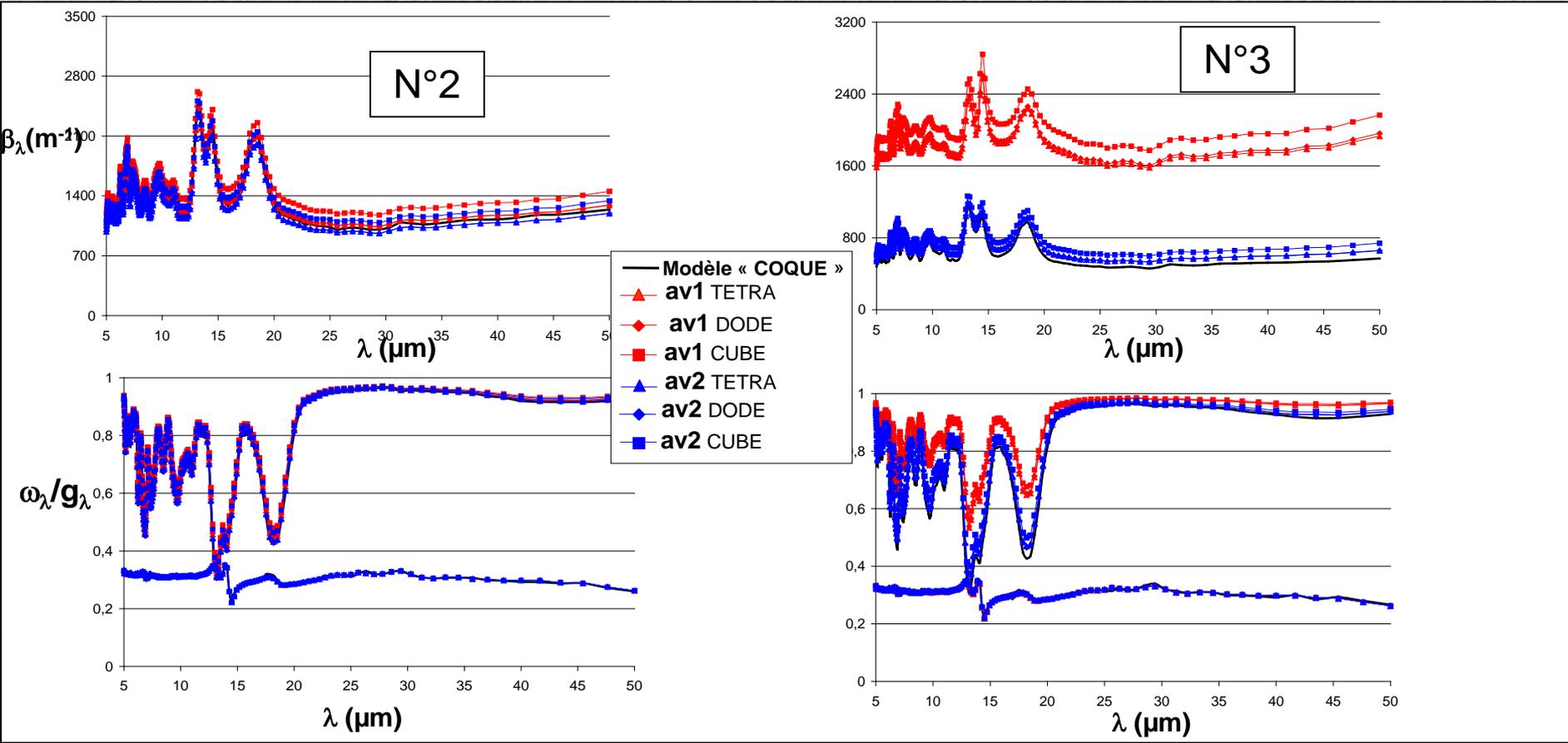
Moyenne arithmétique

$$\beta_{av1,\lambda} = \frac{\sum_{i=1, N_{cell}} \beta_{\lambda}(D_{cell,i})}{N_{cell}} \quad \omega_{av1,\lambda} = \frac{\sum_{i=1, N_{cell}} \omega_{\lambda}(D_{cell,i})}{N_{cell}}$$

Moyenne pondérée par les volumes

$$\beta_{av2,\lambda} = \frac{\sum_{i=1, N_{cell}} \beta_{\lambda}(D_{cell,i}) V_i}{\sum_{i=1, N_{cell}} V_i} \quad \omega_{av2,\lambda} = \frac{\sum_{i=1, N_{cell}} \omega_{\lambda}(D_{cell,i}) V_i}{\sum_{i=1, N_{cell}} V_i}$$

Résultats : Apport du modèle « COQUE »



Moyenne pondérée par les volumes + Cellules dodécaédriques-tétracaédraédriques
 Erreur globale < 10% sur les coefficients d'extinction-diffusion-absorption

Résultats : Apport du modèle « Volumétrique »

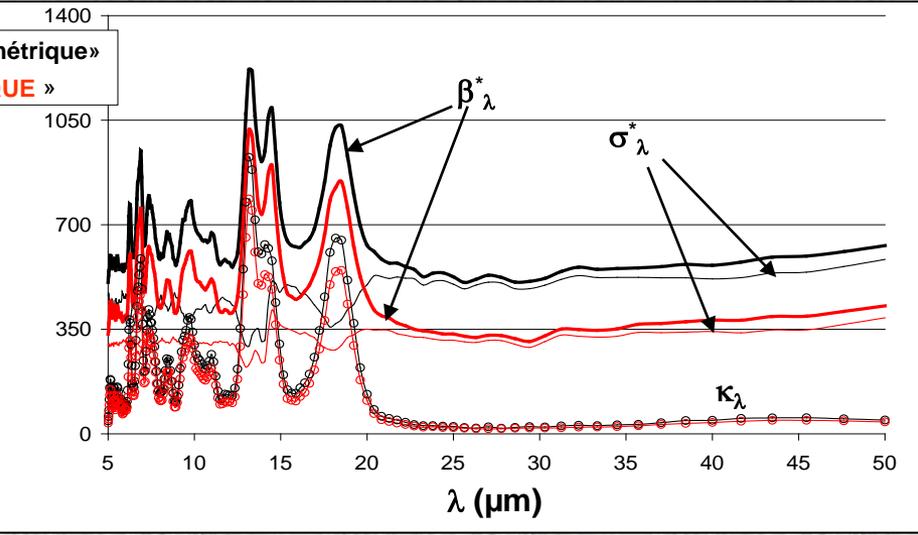
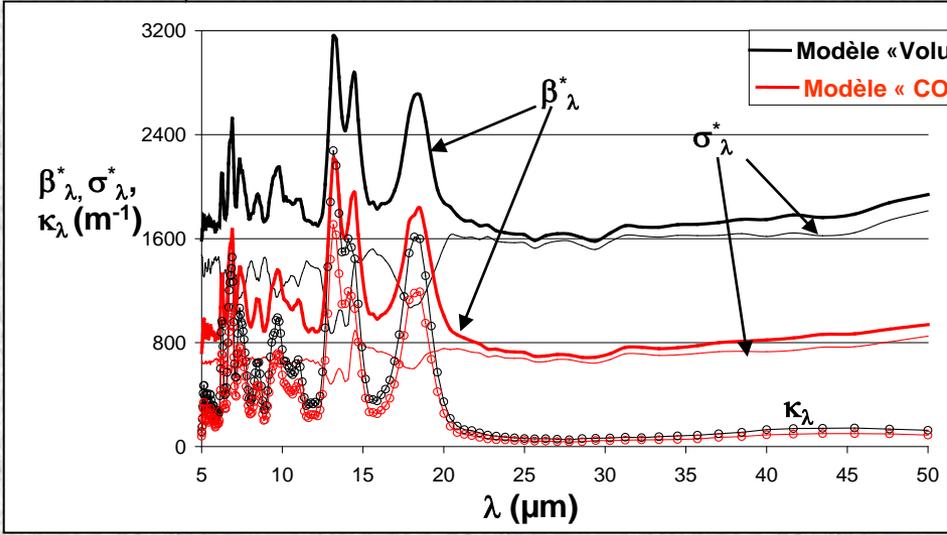


Comparaisons sur

$$\underline{\sigma}_\lambda^* = \sigma_\lambda \cdot (1 - g_\lambda),$$

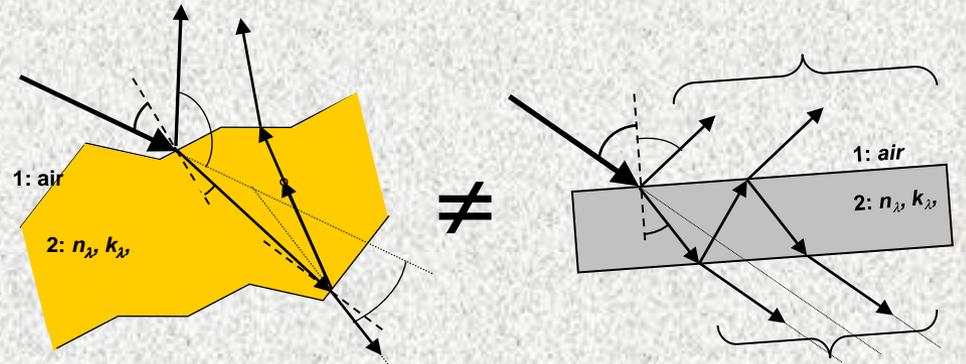
κ_λ et

$$\underline{\beta}_\lambda^* = \underline{\sigma}_\lambda^* + \kappa_\lambda$$



N°	différence κ (%)	différence σ^* (%)	différence β^* (%)
1	+7.3	+45.5	+29.5
2	+13.1	+67.4	+45.2
3	+5.4	+24.8	+17

Sous estimation de la diffusion par réfraction



Conclusions :

- Développement d'un modèle de propriétés radiatives de mousses pores fermés à partir d'images tomographiques
 - 1^{ère} étude de ce genre
- Mise en évidence des modèles analytiques les mieux adaptés et de leurs limites :
 - # Forme des cellules
 - # Distribution de taille
 - # Répartition du polymère
- Mise en évidence des limites de l'hypothèse des parois plane-parallèles
- Perspectives :
 - # Validation expérimentale : → n_λ , k_λ du PVC ?
 - Découpe épaisseur suffisamment fine difficile
 - # Application à d'autres mousses polymères (PSE/XPS)