

ECOTEP *

* Etude, Caractérisation et Optimisation des Transferts Énergétiques dans la Paroi : conception et mise en œuvre de nouveaux isolants en régimes permanent et transitoire.

PARTENAIRES

- LEMTA (Nancy-Université, CNRS), coordinateur G. JEANDEL (A. KAEMMERLEN, J. SABIL, F. ASLLANAJ, B. MONOD, G. PARENT)
- CETHIL (INSA de Lyon), D. BAILLIS (A. KAEMMERLEN, R. COQUARD, S. LALLICH, J. RANDRIANALISOA)
- CSTB – Grenoble, D. QUENARD (H. SALLEE)
- CEA le Ripault, F. ENGUEHARD (S. LALLICH)
- Dow Chemical, C. VO.
- ISOROY, J. Ch. CRUENAS

Dossier suivi à l'ADEME par S. KHERROUF

PLAN DE L'EXPOSE

I) LES MATERIAUX ETUDIES

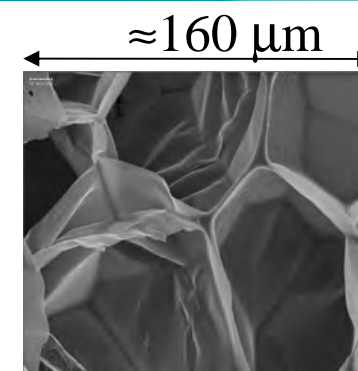
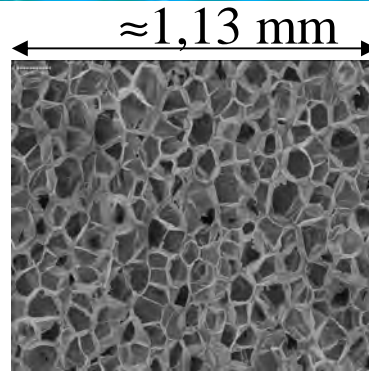
II) CARACTERISATION DES ISOLANTS EXISTANTS

III) NOUVEAUX MATERIAUX PROPOSES

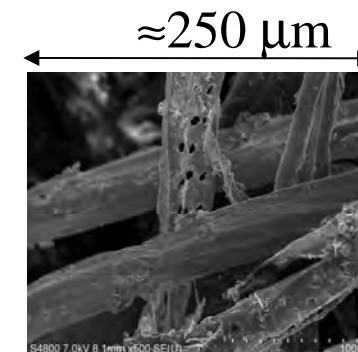
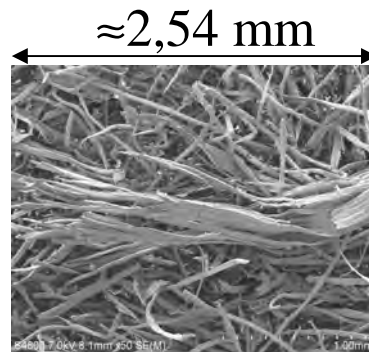
IV) CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

TYPES DE MATERIAUX ETUDIES

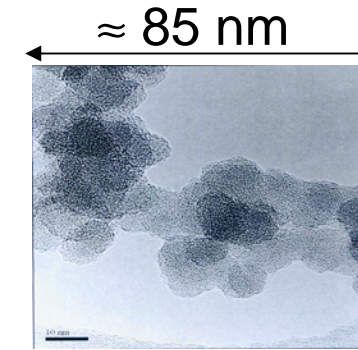
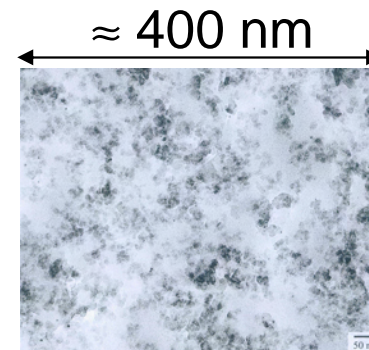
- MOUSSES



- ISOLANTS A BASE DE FIBRES DE BOIS



- SUPER-ISOLANTS



TYPES DE MATERIAUX ETUDIES : super-isolants

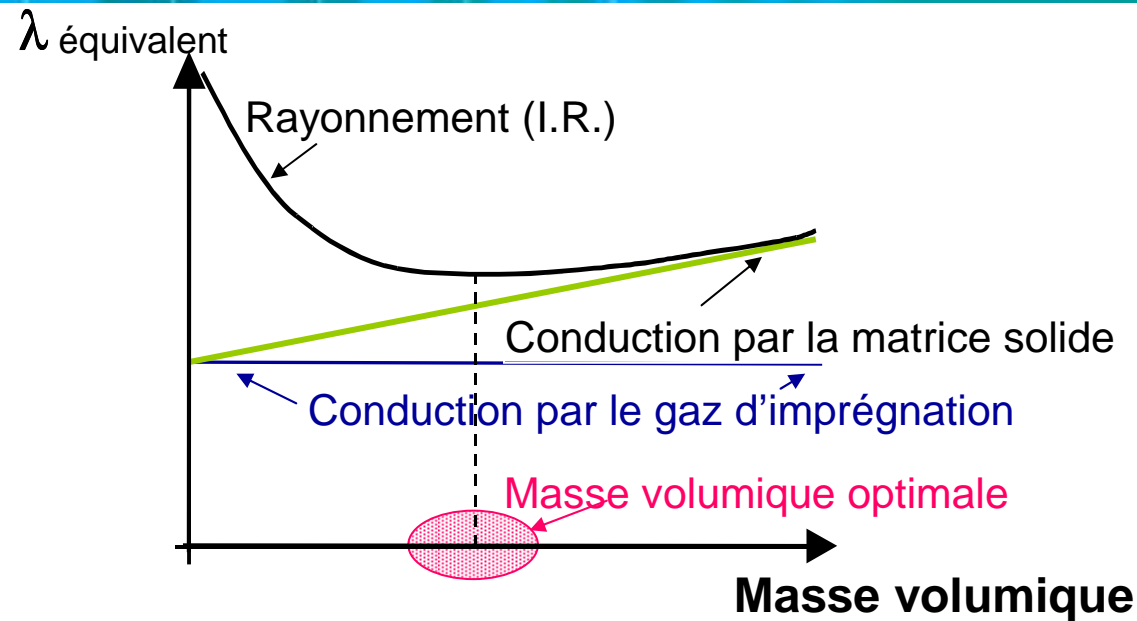
Composition typique de ces matériaux :

- Matrice à base de nanoparticules de silice pyrogénée (95% de la fraction solide, diamètre entre 7 et 15 nm).
- Fibres (renforcement mécanique)
- Particules micrométriques (opacité infrarouge)

TYPES DE MATERIAUX ETUDIES : mousses et fibres de bois

- **Les mousses de polystyrène extrudé (XPS)**
 - Mousses plus homogènes et plus denses que le polystyrène expansé
 - Cellules à pores fermés avec des parois fines et possédant des jonctions entre les cellules
 - Fabrication des mousses XPS par Dow Chemical
 - ⇒ Possibilité d'obtenir **différentes morphologies** de cellules selon le process
- **Les Fibres de bois**
 - Répartition « aléatoire » dans des plans parallèles aux frontières
 - Les fibres sont poreuses
 - La composition chimique de la fibre n'est pas homogène.

CARACTERISATION DES ISOLANTS EXISTANTS



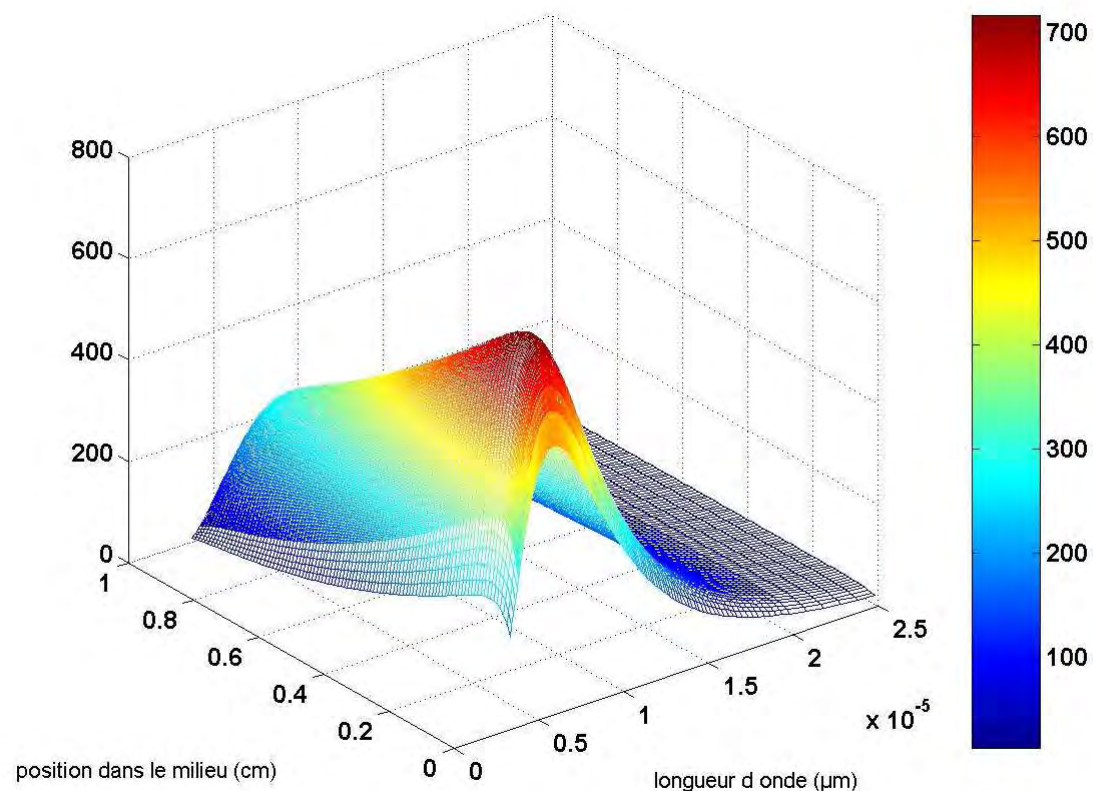
Pour les isolants poreux classiques, dans la gamme de température du bâtiment (-20°C,+40°C) avec une porosité de 90%, la contribution de chaque mode représente environ :

- Conduction gazeuse : 55%
- Conduction solide : 10%
- **Rayonnement : 35%**

➔ **Optimisation du rayonnement**

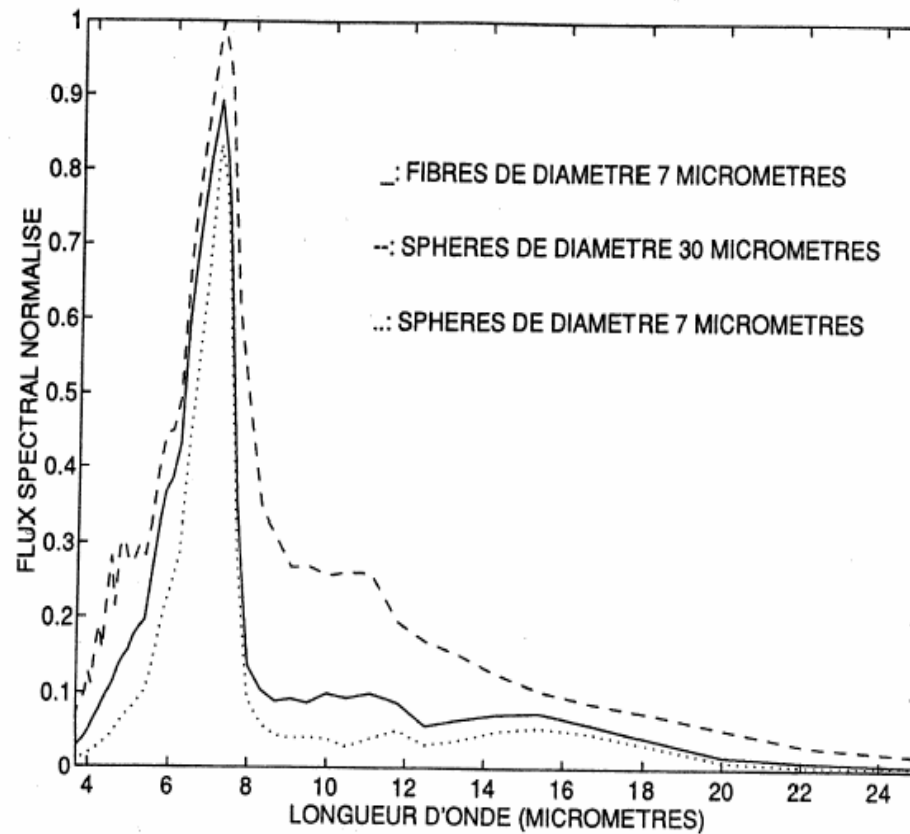
CARACTERISATION DES ISOLANTS EXISTANTS

Approximation par un coefficient de Fourier radiatif pour un isolant à base de fibres de verre.



CARACTERISATION DES ISOLANTS EXISTANTS

Comparaison des propriétés des cylindres et des sphères en silice



CARACTERISATION DES ISOLANTS EXISTANTS

Nous adoptons la même démarche pour l'étude de tous les matériaux :

- Étude des propriétés optiques,
- Modélisation du transfert de chaleur par rayonnement et étude de sensibilité,
- Mesure du transfert de chaleur (influence de la T, de l'humidité...),
- Proposition d'optimisation du matériau (régime permanent et régime transitoire).

CARACTERISATION DES ISOLANTS EXISTANTS

Nous adoptons la même démarche pour l'étude de tous les matériaux :

- Étude des propriétés optiques, (**Super-isolants**)
- Modélisation du transfert de chaleur par rayonnement et étude de sensibilité, (**Mousses**)
- Mesure du transfert de chaleur (influence de la T, de l'humidité...), (**Fibreux**)
- Proposition d'optimisation du matériau (régime permanent et régime transitoire).

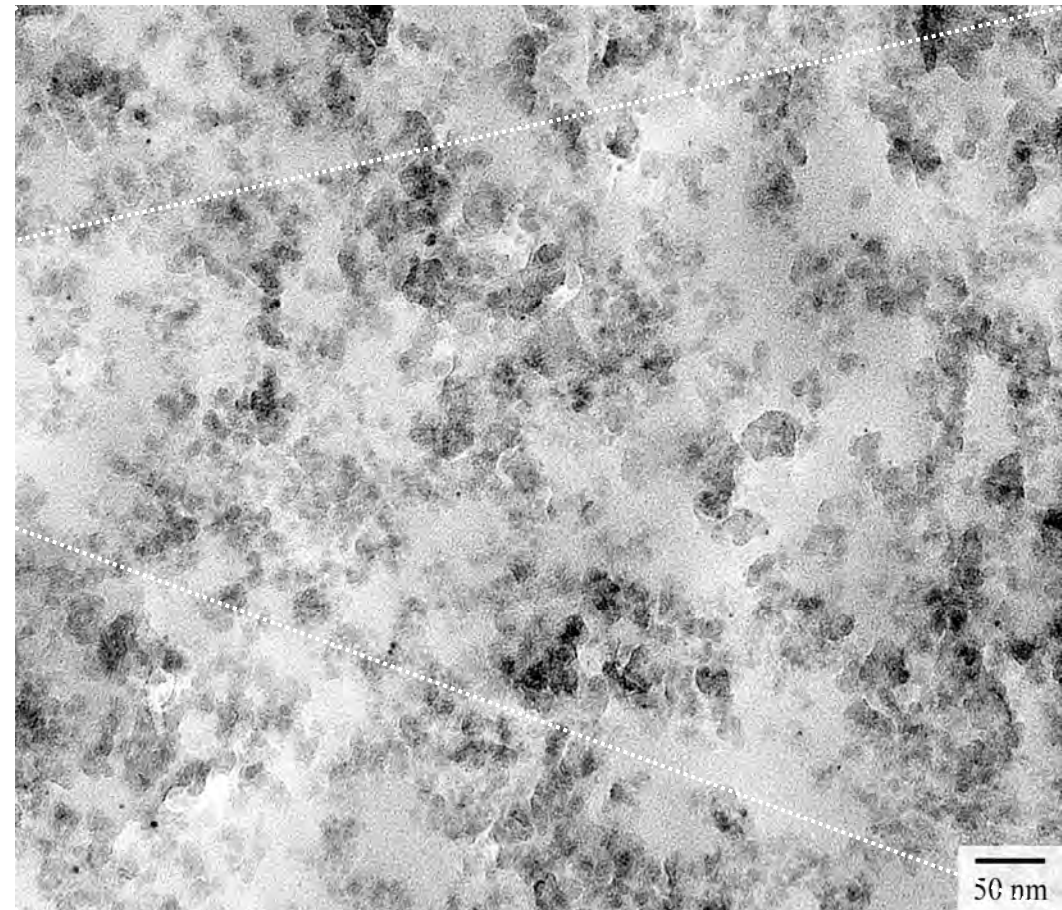
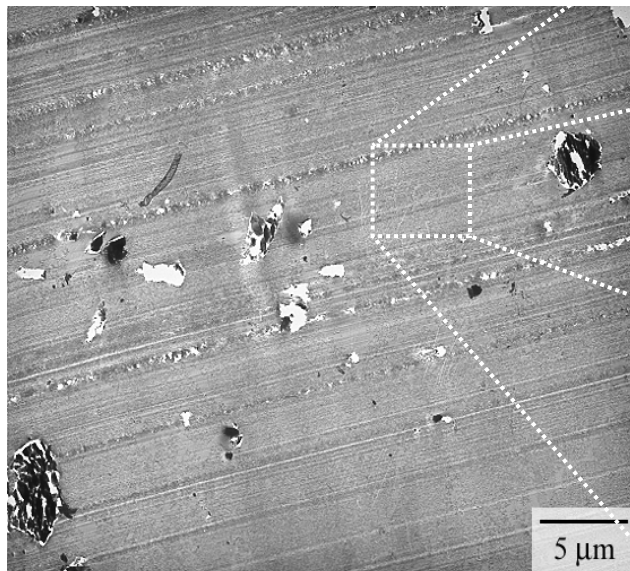
CARACTERISATION DES ISOLANTS EXISTANTS

Étude des propriétés optiques des super-isolants



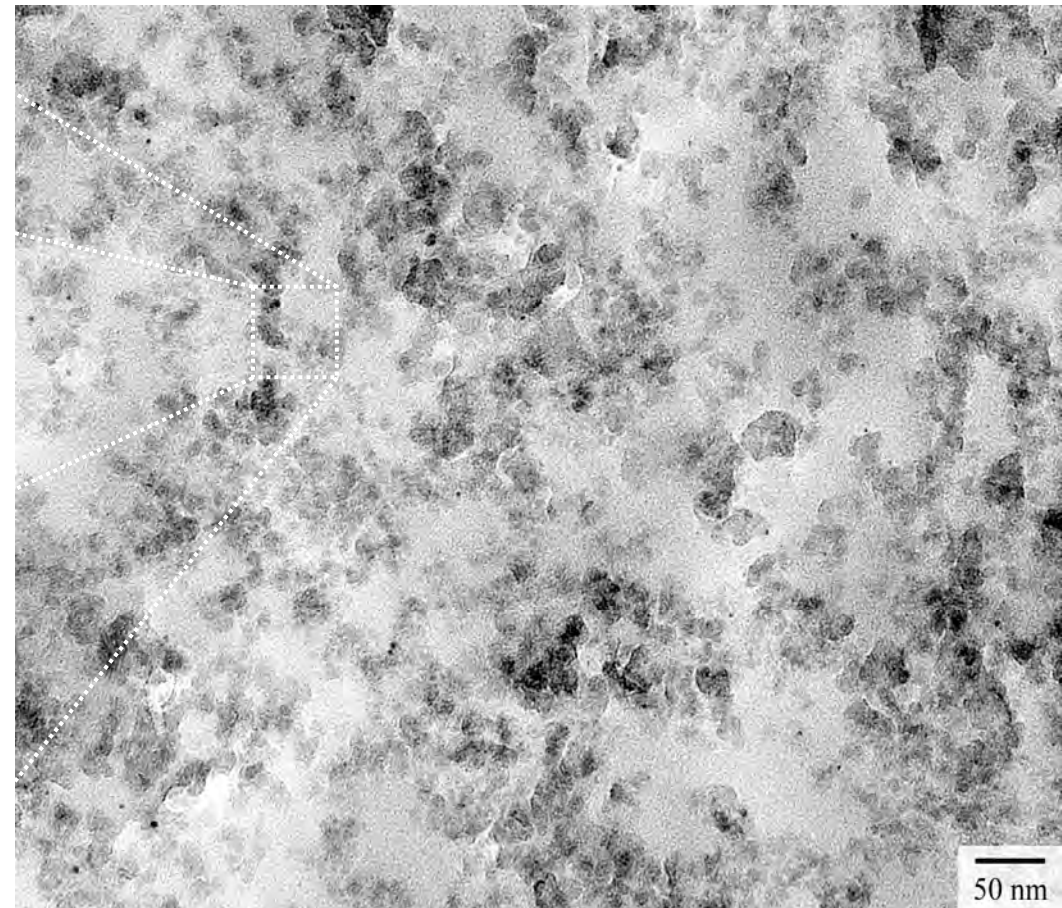
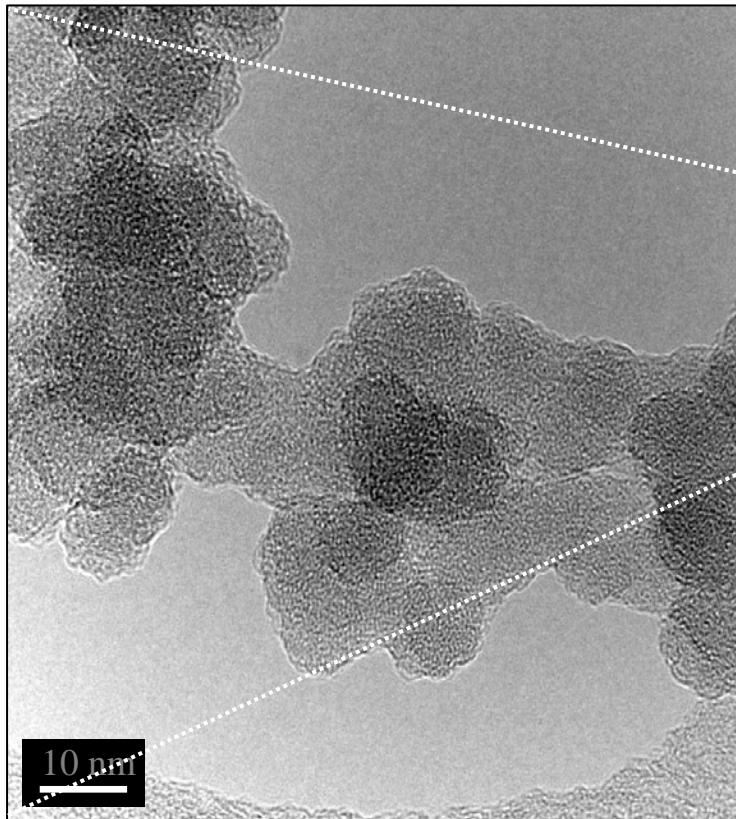
CARACTERISATION DES ISOLANTS EXISTANTS

Étude des propriétés optiques des super-isolants



CARACTERISATION DES ISOLANTS EXISTANTS

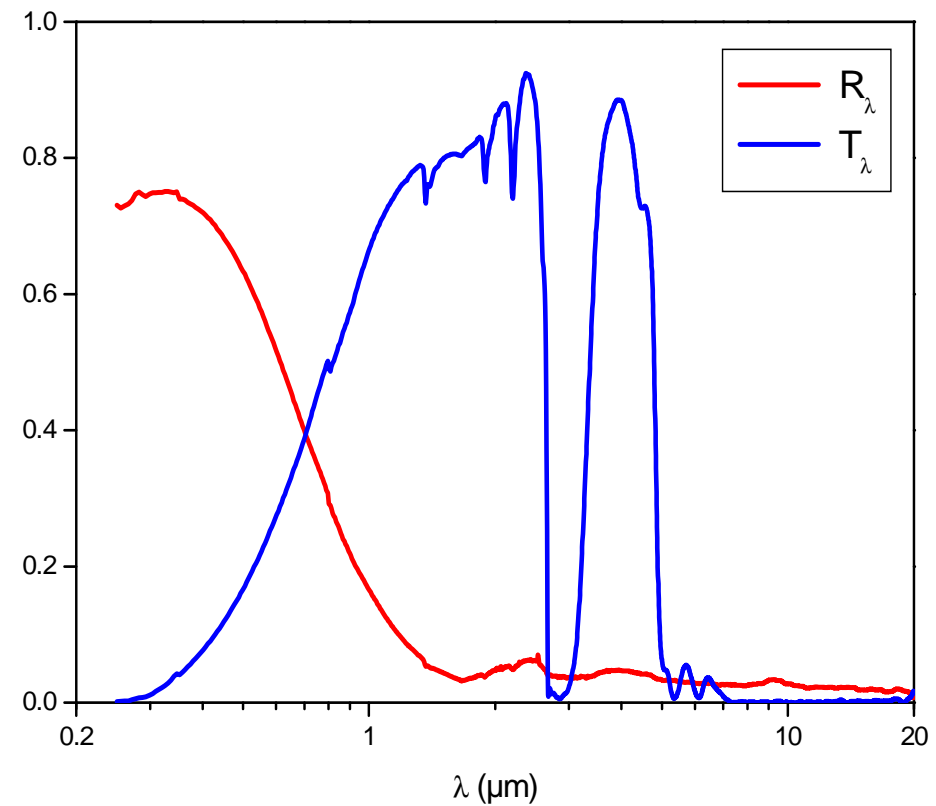
Étude des propriétés optiques des super-isolants



CARACTERISATION DES ISOLANTS EXISTANTS

Étude des propriétés optiques des super-isolants

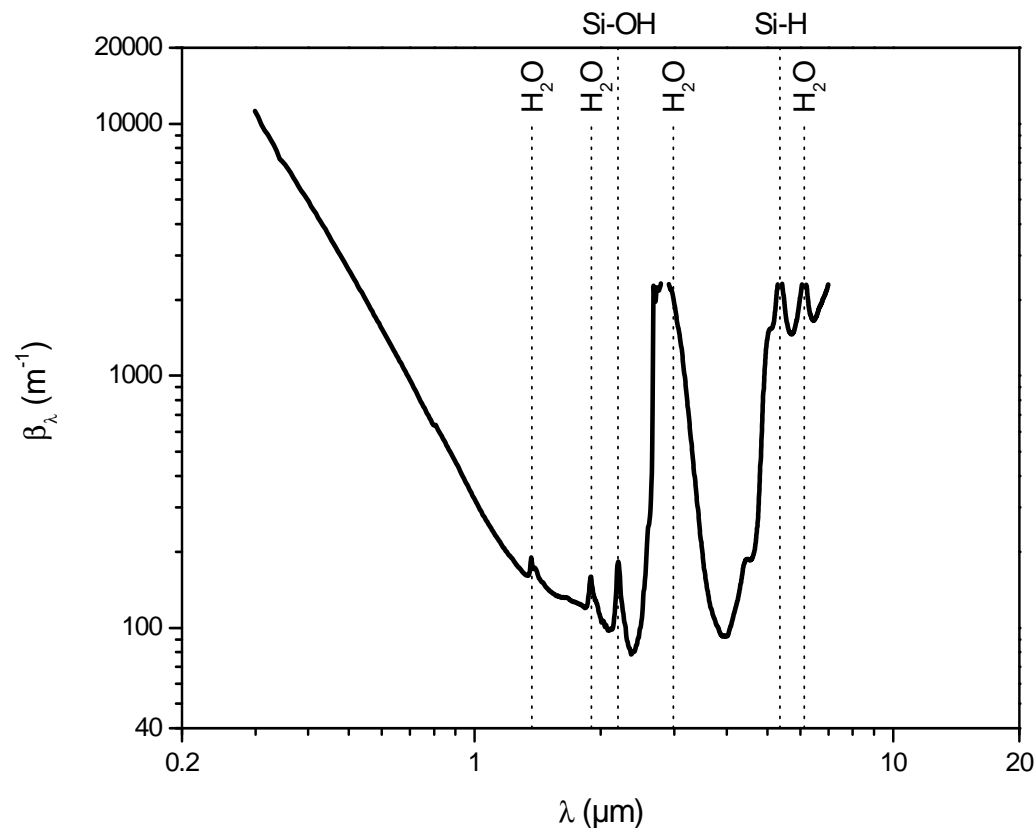
détermination **expérimentale** des spectres R_λ et T_λ d'échantillons de matrices nanoporeuses entre 0.2 et 20 μm :



CARACTERISATION DES ISOLANTS EXISTANTS

Étude des propriétés optiques des super-isolants

déduction des spectres β_λ et ω_λ des matrices nanoporeuses
par inversion de l'équation du transfert radiatif :

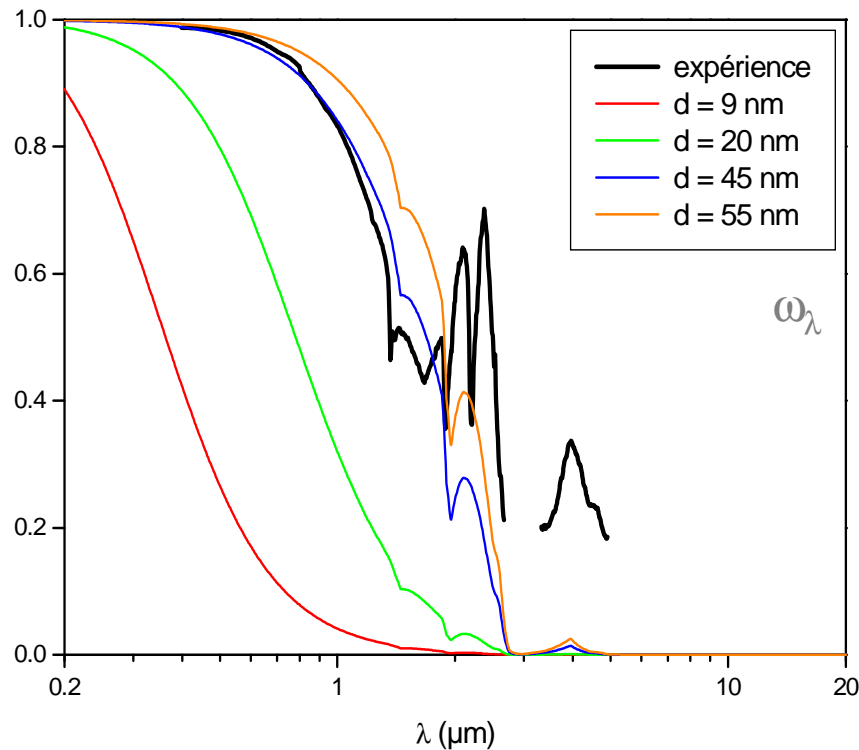


[S. Lallich *et al* , actes du Congrès Français de Thermique SFT-2007 , 483-488 (2007)]

CARACTERISATION DES ISOLANTS EXISTANTS

Étude des propriétés optiques des super-isolants

étude de la **capacité prédictive** de la théorie de Mie :



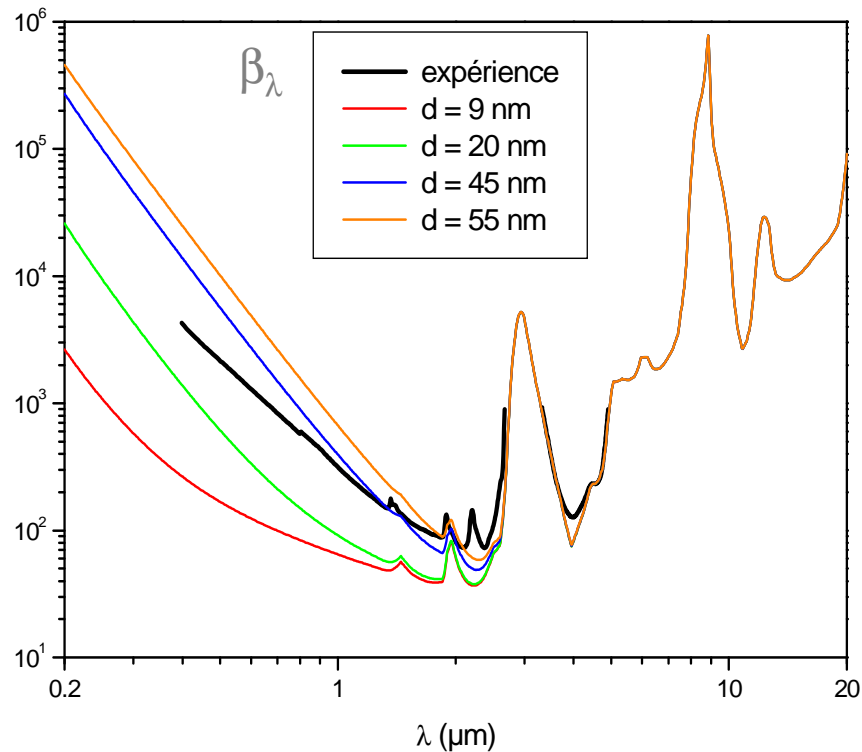
notion de
volume matériel représentatif
(ici : boule de diamètre $D = 45 \text{ nm}$)

[S. Lallich *et al* , *International Journal of Thermophysics* (2008) (accepté)]

CARACTERISATION DES ISOLANTS EXISTANTS

Étude des propriétés optiques des super-isolants

étude de la **capacité prédictive** de la théorie de Mie :



aux faibles λ :
Mie peu prédictif :
le rayonnement sonde
l'agencement matériel

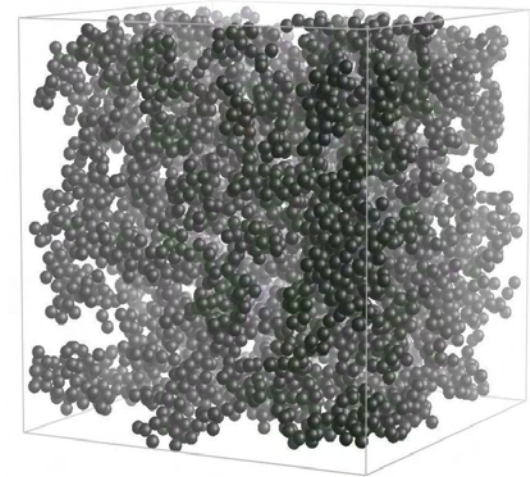
[S. Lallich *et al* , *International Journal of Thermophysics* (2008) (accepté)]

CARACTERISATION DES ISOLANTS EXISTANTS

Étude des propriétés optiques des super-isolants

modélisation de l'interaction entre un rayonnement électromagnétique et une matrice nanoporeuse de silice *via* l'approximation dipolaire discrète (DDA) :

- ↳ génération informatique d'un agrégat de nanoparticules représentatif (Π, Σ, D_f) (**Diffusion Limited Cluster Cluster Agregation**)
- ↳ principe de l'approximation dipolaire discrète (DDA) :
particule en \vec{r}_i éclairée par $\vec{E}_{\text{incident}}$ \Leftrightarrow dipôle oscillant induit \vec{P}_i :



$$\vec{P}_i = \alpha_i \left(\vec{E}_{\text{incident}, i} + \sum_{j \neq i} \underbrace{[A_{j \rightarrow i}]}_{\text{champs rayonnés}} \cdot \vec{P}_j \right)$$

polarisabilité :

$$\alpha = 3 \epsilon_0 v \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \quad (\text{Clausius-Mossotti})$$

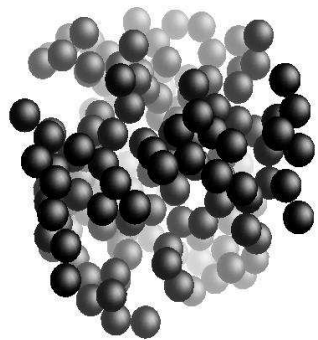
champ rayonné par \vec{P}_j en \vec{r}_i :

$$\frac{\exp(ikr_{i,j})}{4\pi\epsilon_0 r_{i,j}^3} \left\{ k^2 [(\vec{r}_{i,j} \wedge \vec{P}_j) \wedge \vec{r}_{i,j}] + \frac{1 - ikr_{i,j}}{r_{i,j}^2} [3(\vec{r}_{i,j} \cdot \vec{P}_j)\vec{r}_{i,j} - r_{i,j}^2 \vec{P}_j] \right\}$$

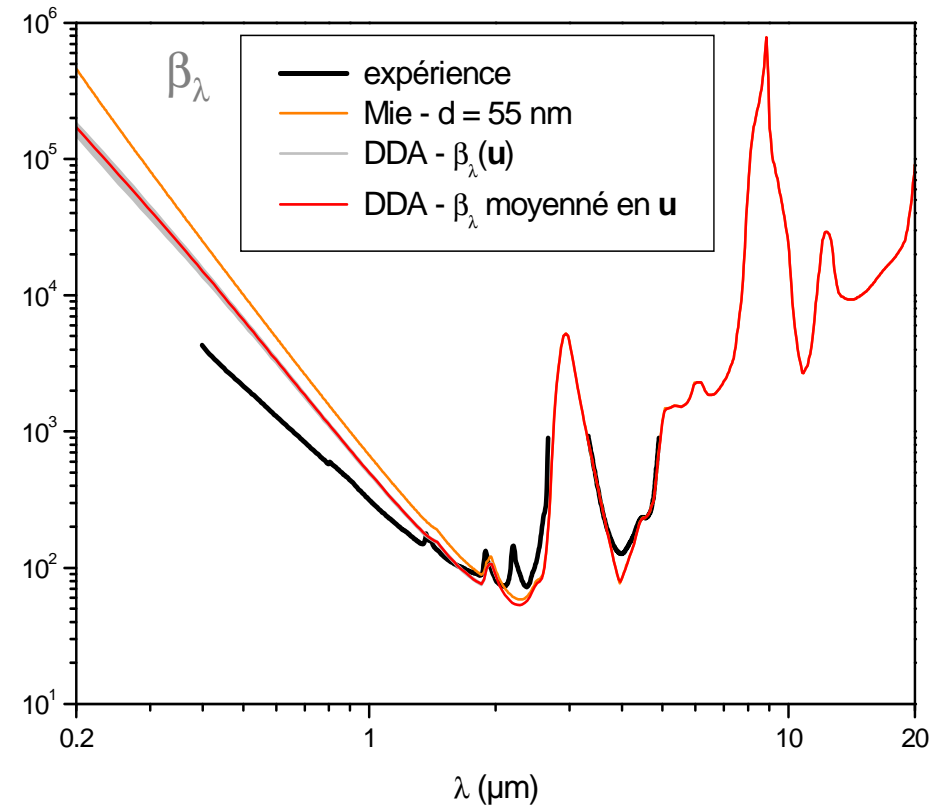
CARACTERISATION DES ISOLANTS EXISTANTS

Étude des propriétés optiques des super-isolants

calcul DDA avec un agrégat **représentatif DLCCA** :



$$\beta(\mathbf{u}) = \frac{C_{\text{ext}}^{\text{NP}}(\mathbf{u})}{V}$$



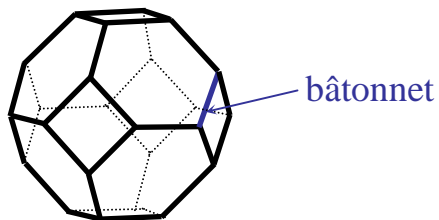
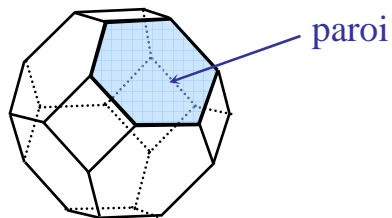
[S. Lallich *et al* , Congrès Français de Thermique SFT-2008 (accepté)]

CARACTERISATION DES ISOLANTS EXISTANTS

Transfert de chaleur et étude de sensibilité pour les mousses

- Modélisation de la **structure** des mousses XPS par des cellules de forme polyédrique

Cellules élémentaires



Dimension des
particules

Optique
géométrique
(parois infinies)

λ

DDA (approximation
dipolaire discrète)
&
Théorie de Mie-Kerker
(cylindres infinis)

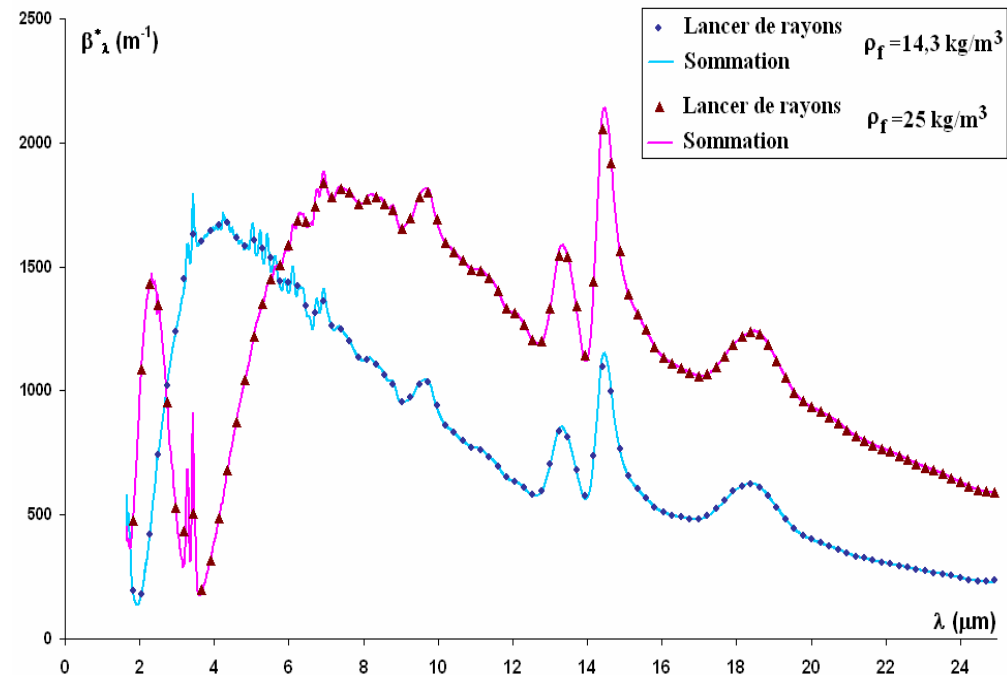
CARACTERISATION DES ISOLANTS EXISTANTS

Transfert de chaleur et étude de sensibilité pour les mousses

Deux modèles ont été utilisés et comparés :

- **Calcul de sommation des effets des particules** via un calcul intégral (Modèle de Placido - 2005)
- **Méthode de lancer de rayons** sur des particules orientées aléatoirement dans le milieu (Modèle de Coquard - 2006)

⇒ Résultats entre modèles très proches avec des avantages et inconvénients pour chacun :

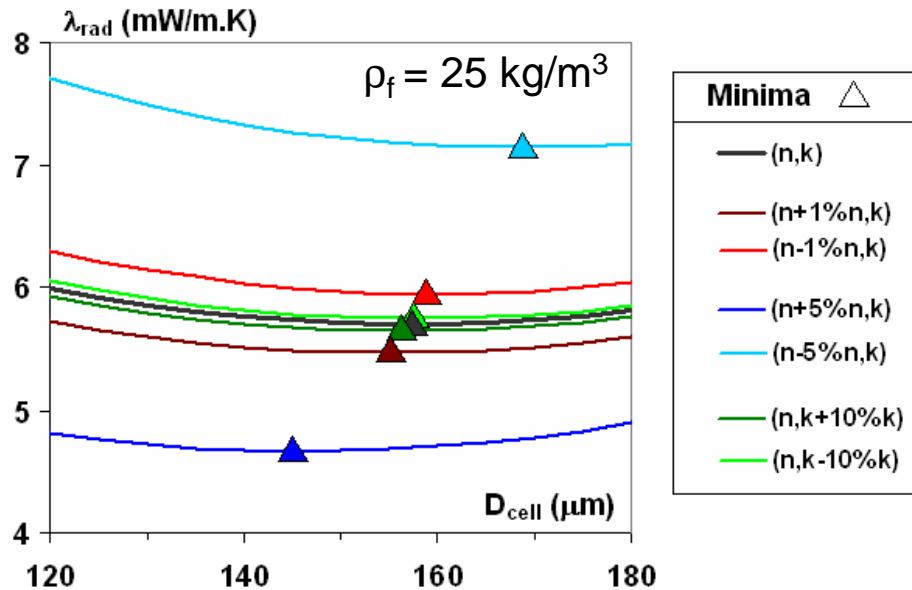


CARACTERISATION DES ISOLANTS EXISTANTS

Transfert de chaleur et étude de sensibilité pour les mousses

Sensibilité à l'indice de réfraction complexe du polystyrène ($\tilde{n}=n-ik$)

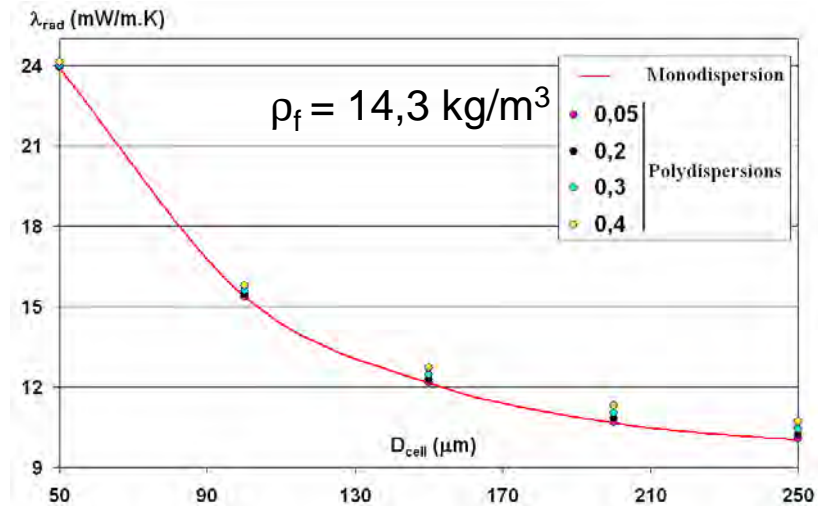
Conclusion : Grande importance de la partie réelle n sur l'épaisseur optimale des parois qui minimise le transfert de chaleur par rayonnement



Sensibilité à la distribution des épaisseurs des parois

Hypothèse : distribution log-normale

Conclusion : Les propriétés radiatives d'une mousse peuvent être déterminées en considérant une épaisseur des parois constante



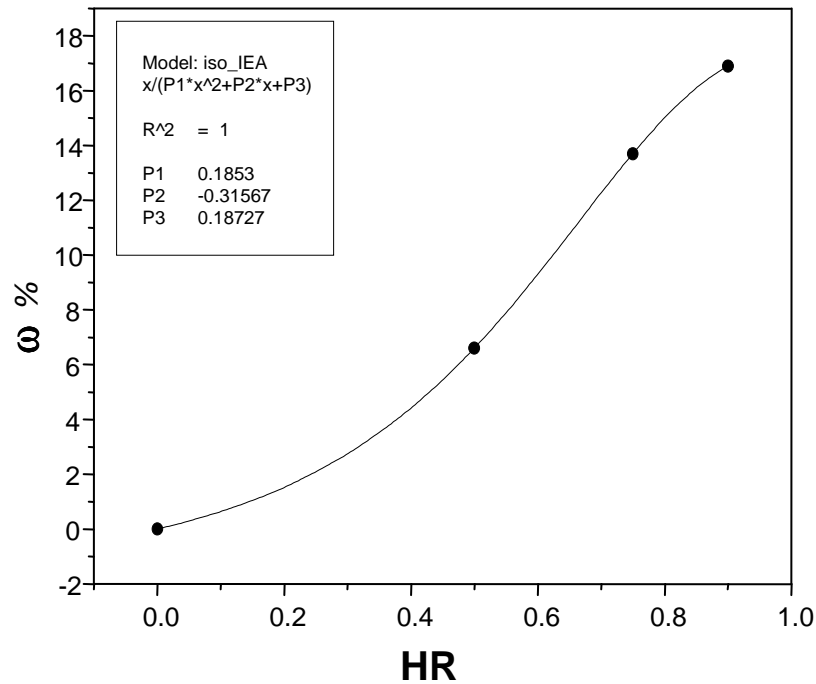
CARACTERISATION DES ISOLANTS EXISTANTS

matériau	Masse volumique (kg/m ³)	Conductivité thermique (W/m ² . °C)	Diffusivité thermique (m²/h)	Temps que mettra un front de chaleur à traverser 20cm d'isolant
isolant en polystyrène	18	0,04	0,0056	3 h 40 min
isolant en laine de verre ou de roche	15	0,04	0,0114	2 h 35 min
isolant en laine de bois	150	0,04	0,00035	14 h 45 min

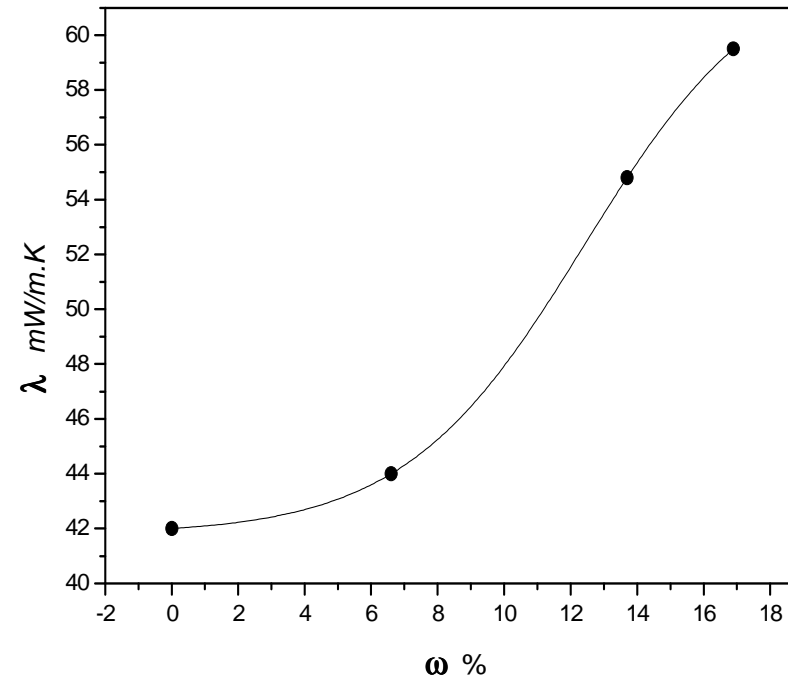
Air immobile : $\lambda = 0,024$ (W/m² . °C)

CARACTERISATION DES ISOLANTS EXISTANTS

Transfert de chaleur dans les fibreux



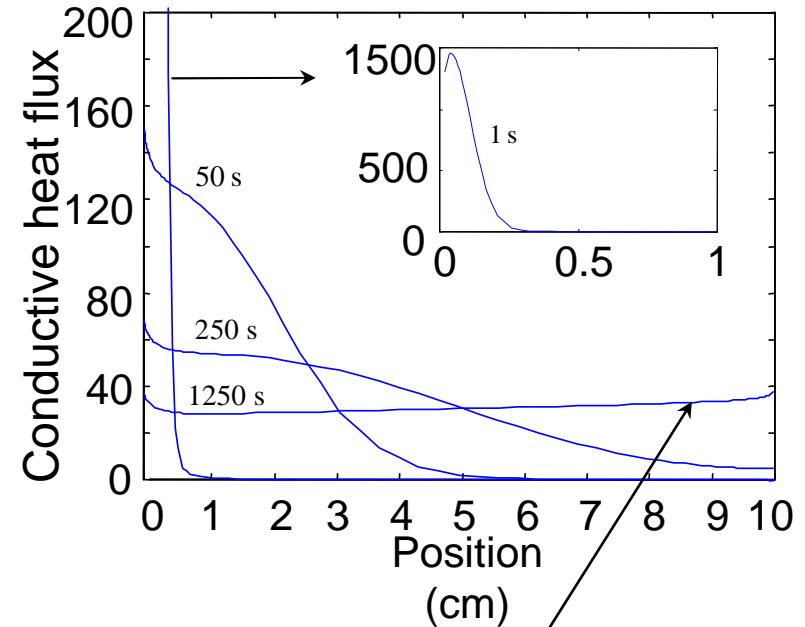
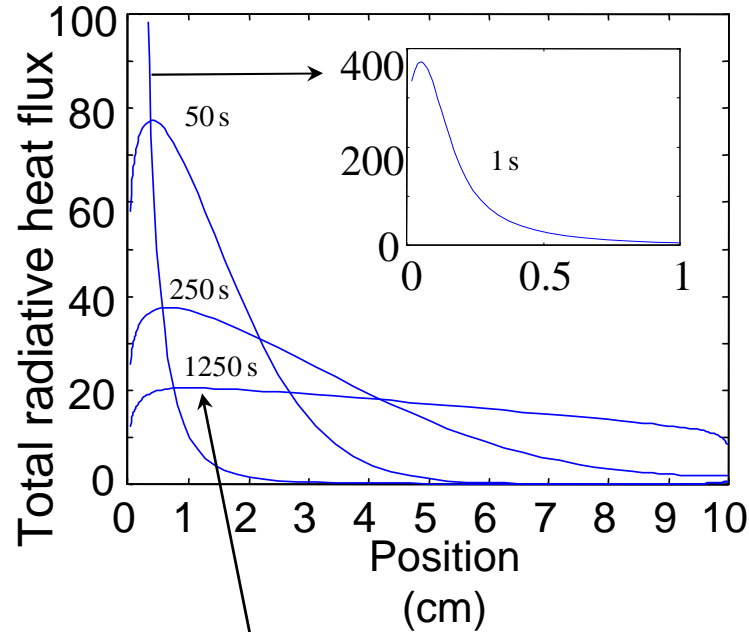
Isotherme du THERMISOREL
(17% en poids dans une ambiance
à 90% d'humidité relative)



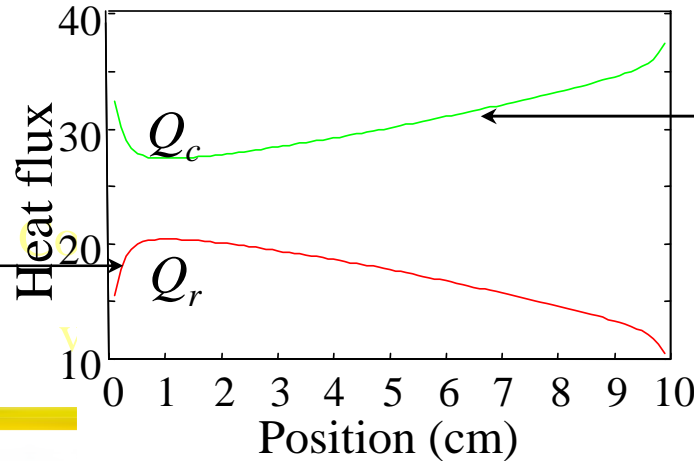
Evolution de la conductivité thermique
du THERMISOREL avec sa teneur en eau

CARACTERISATION DES ISOLANTS EXISTANTS

Transfert de chaleur dans les fibreux en régime transitoire



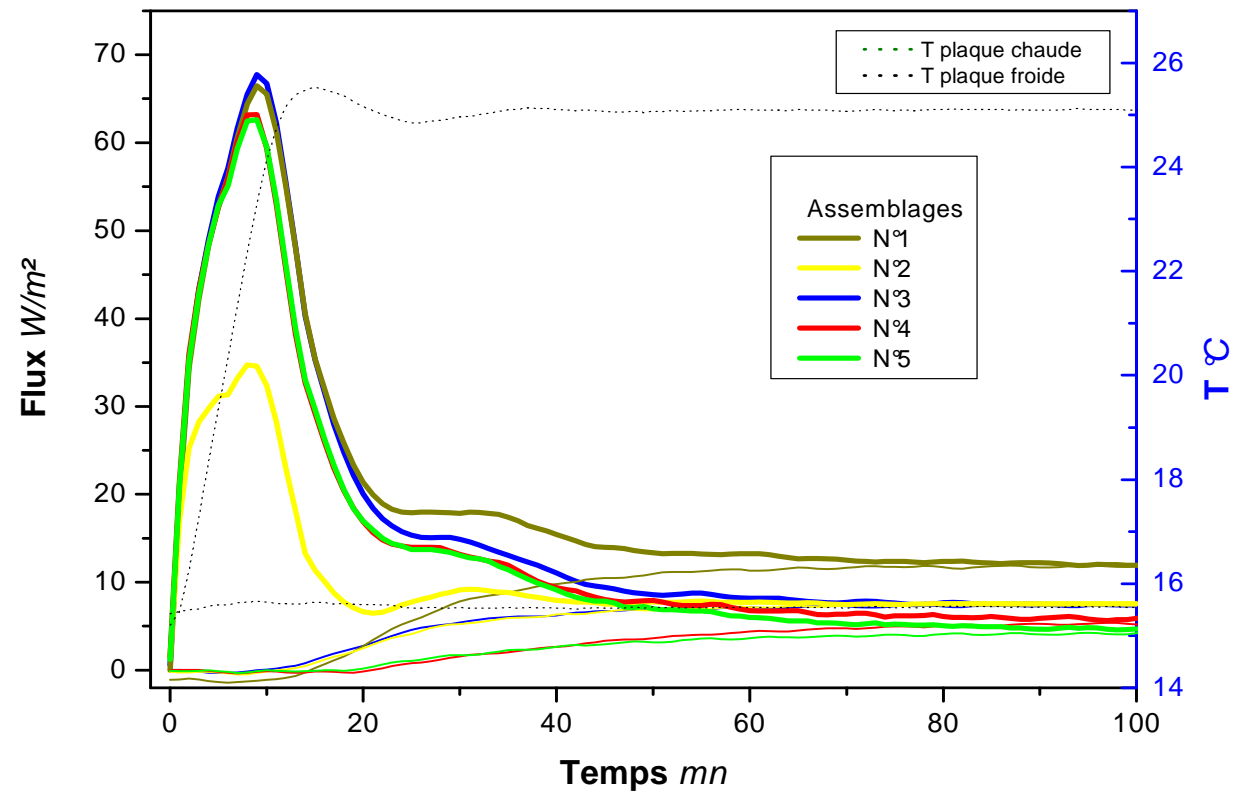
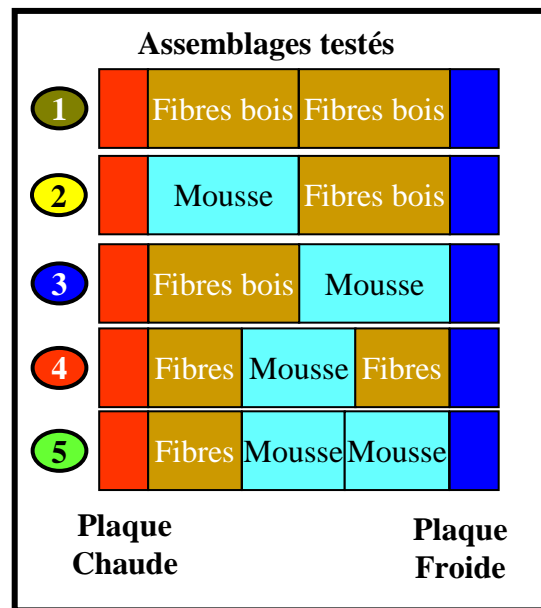
Convergence du flux radiatif total vers le régime **stationnaire**.



Convergence du flux conductif vers le régime **stationnaire**.

CARACTERISATION DES ISOLANTS EXISTANTS

Proposition d'optimisation.



Conclusions et perspectives

- Conclusions

- Identification des propriétés radiatives à partir des mesures de transmissions et réflexions directionnelles-hémisphériques et bidirectionnelles,
- Détermination de la sensibilité des différents paramètres,
- Mesures et modélisation de la conductivité équivalente en régime permanent et en transitoire.

- Perspectives

- Détermination de la structure des agrégats par microtomographie pour les superisolants,
- Prise en compte de l'anisotropie des matériaux,
- Optimisation des isolants en fonction des conditions aux limites (Évolution des températures imposées, morphologie),
- Réalisation de multicouches permettant une meilleure isolation thermique.