

Les isolants fibreux à base de silice ou de bois.

G. JEANDEL, A. KAEMMERLEN, G.
PARENT, F. ASLLANAJ et D. LACROIX.

LEMTA, Nancy-Université, CNRS



Plan de l'exposé

- Objectifs et études menées par notre équipe
- Morphologie et caractérisation des milieux étudiés
- Modélisation du transfert de chaleur par rayonnement et conduction
- Transfert de chaleur dans les nanomatériaux
- Conclusions et perspectives.



Etudes en cours dans notre équipe dans le domaine de l'isolation thermique

Bilan des compétences :

- Les résultats de tomographie et la détermination de l'indice optique des composants permet la résolution des équations de Maxwell ([G. Parent et S. Fumeron](#)) et l'étude par Monte Carlo ([D. Lacroix](#)).
- La mesure, au Lemta, des transmissions bidirectionnelles permet la connaissance des propriétés des matériaux par méthodes inverses ([B. Monod, F. Asllanaj et G. Jeandel](#)).
- Modélisation du transfert de chaleur en régime transitoire ([F. Asllanaj et G. Jeandel](#)).
- Protection incendie ([P. Boulet](#))

ETUDES EN COURS

ANR ECOTEP 2006-2008

PARTENAIRES :

- **LEMTA** (nombreuses thèses sur fibres et infibrés)
- **CETHIL** (nombreuses études sur les mousses)
- **CSTB** (dispositifs de caractérisation d'isolants)
- **CEA** (super-isolants)
- **ISOROY** (isolants fibreux)
- **Dow Chemical** (fabricant de mousses)

Etudes en cours

- Couplage transfert de chaleur et de masse dans le bois (ANR déposée par le CRITT Bois, le LERMAB et le LEMTA)
- Modélisation de la conductivité thermique de films très minces (D. Lacroix en collaboration avec le LET et le CETHIL)
- Etude du transfert de chaleur par rayonnement par FDTD (G. Parent et S. Fumeron)



Plan de l'exposé

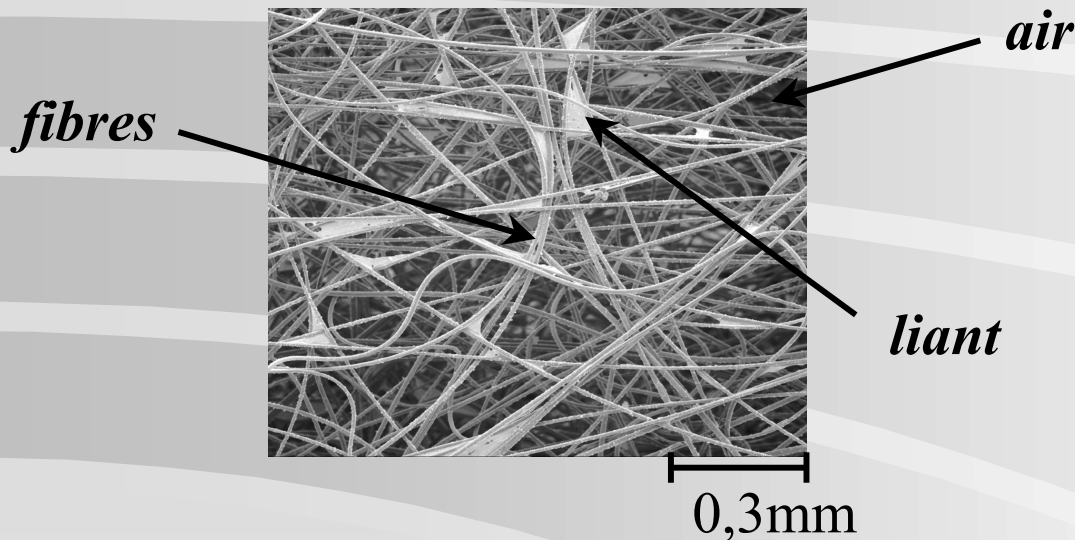
- Objectifs et études menées par notre équipe
- **Morphologie et caractérisation des milieux étudiés**
- Modélisation du transfert de chaleur par rayonnement et conduction
- Transfert de chaleur dans les nanomatériaux
- Conclusions et perspectives.



Transferts thermiques au sein d'un milieu fibreux

Isolant fibreux à base de silice

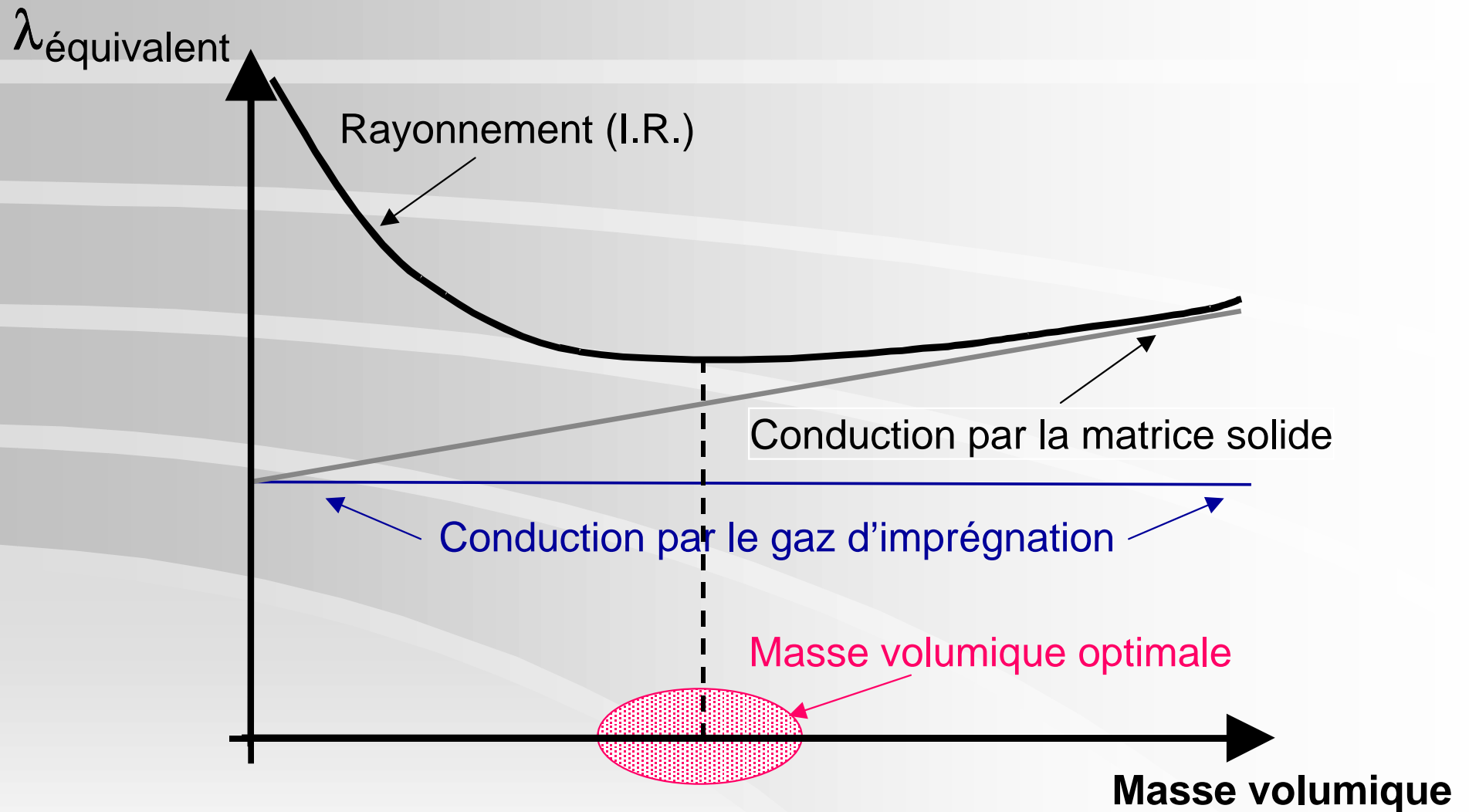
Isolant fibreux à base de bois



- Transfert de chaleur par conduction et rayonnement
- Un milieu fibreux est un MST : il **absorbe**, **diffuse** et **émet** le rayonnement

Transfert thermique dans les poreux

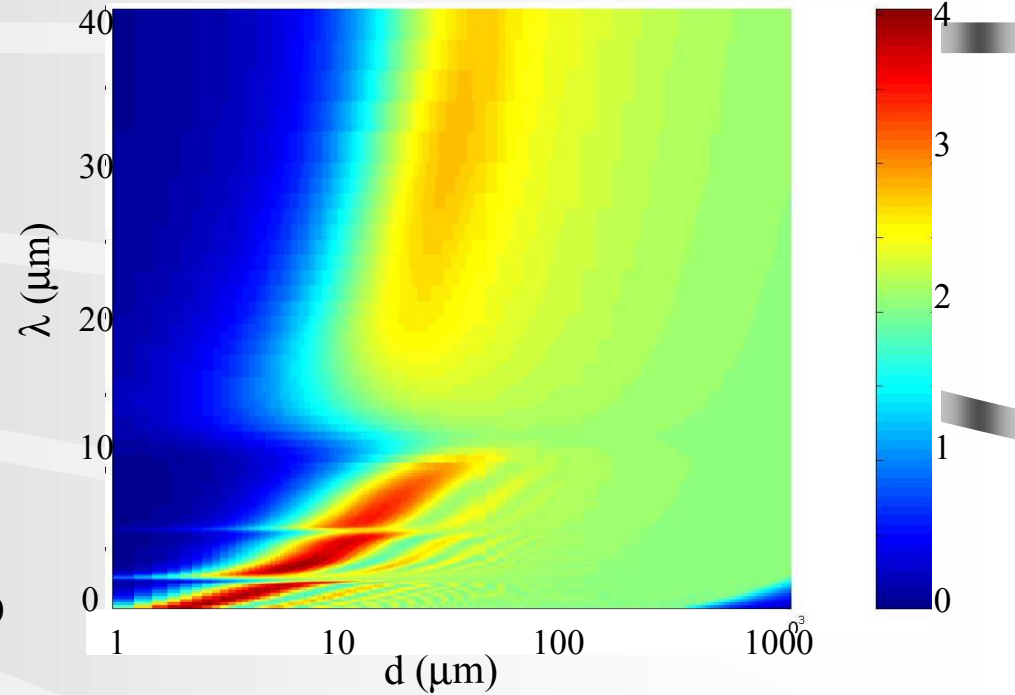
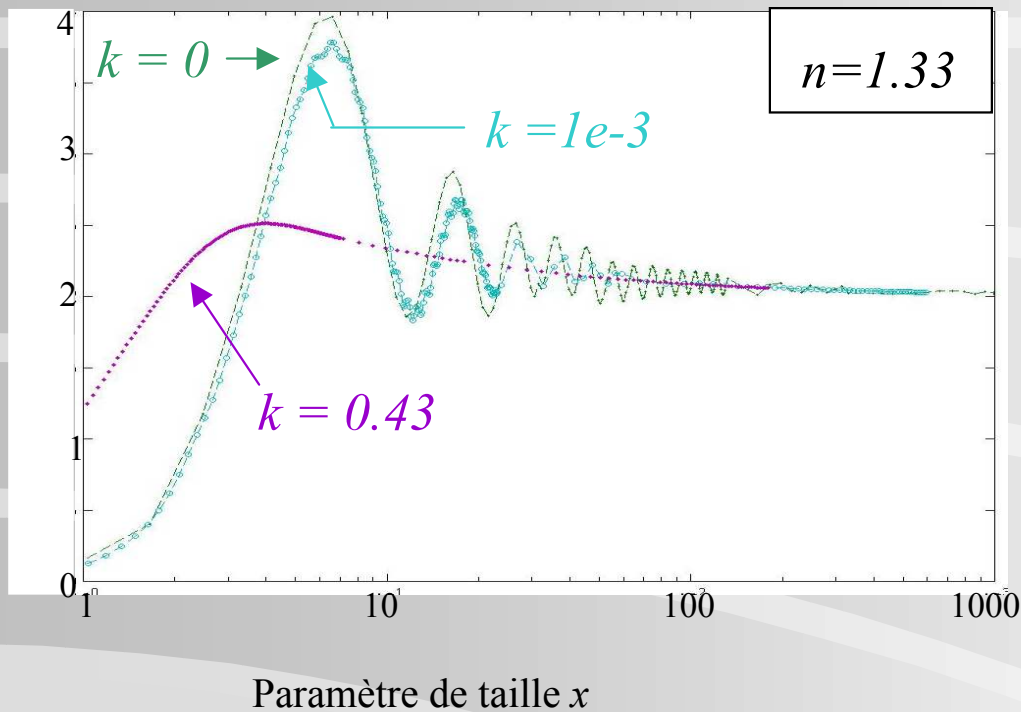
Principe des isolants



Ne pas oublier l'influence de la composition chimique et du " diamètre "

Détermination de l'efficacité d'extinction :

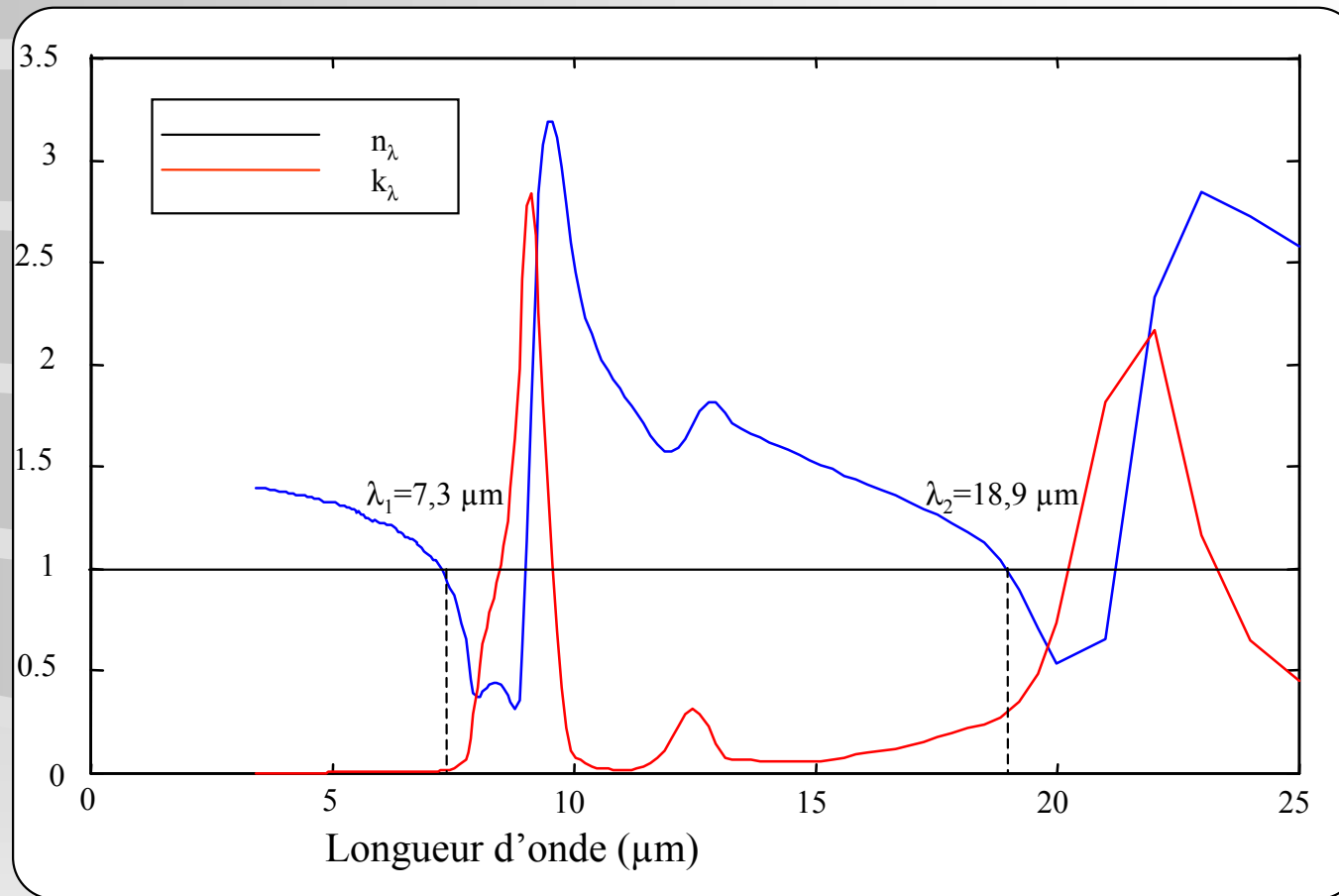
Nécessité d'utiliser l'optique Physique...



Efficacité d'extinction
 Q_{ext} en fonction du
 paramètre de taille

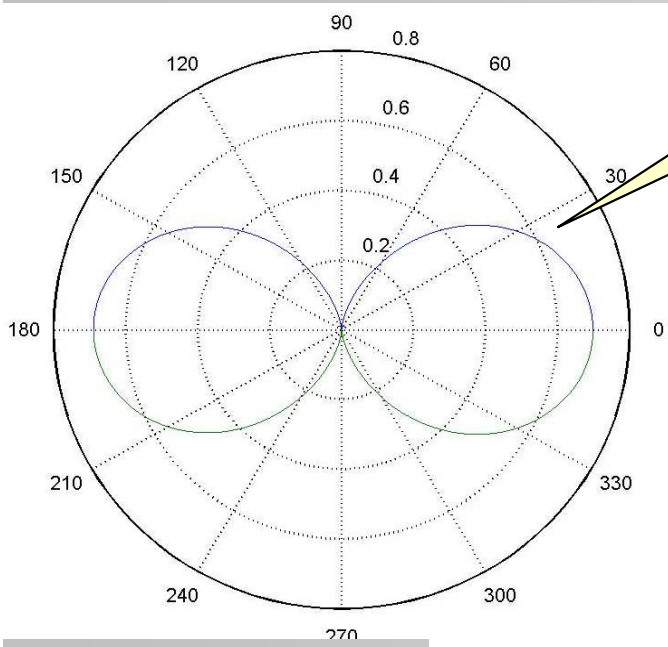
Efficacité d'extinction
 Q_{ext} en diagramme $d - \lambda$

Indices optiques de la silice

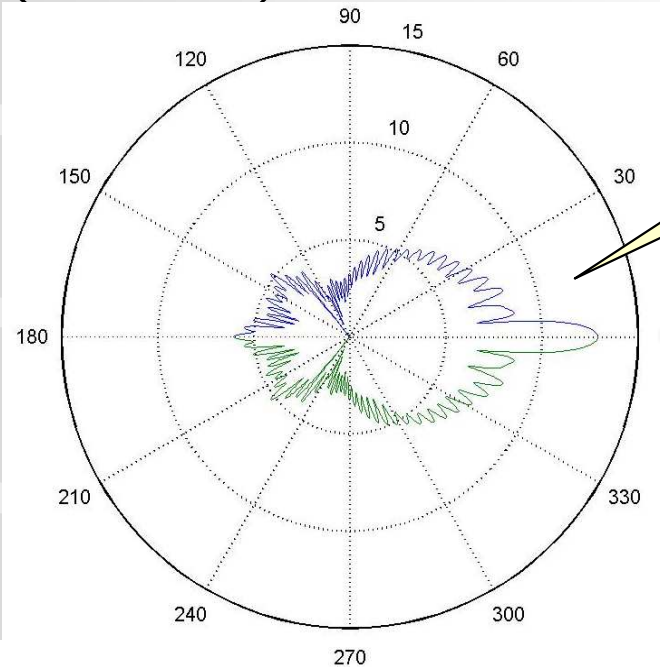


- 9,3 μm : mode d'étirement des liaisons (mouvements O)
- 12,5 μm : mode d'étirement des liaisons (mouvements Si)
- 22,3 μm : mode de déformation des angles Si-O-Si

Fonction de phase de diffusion (MIE)

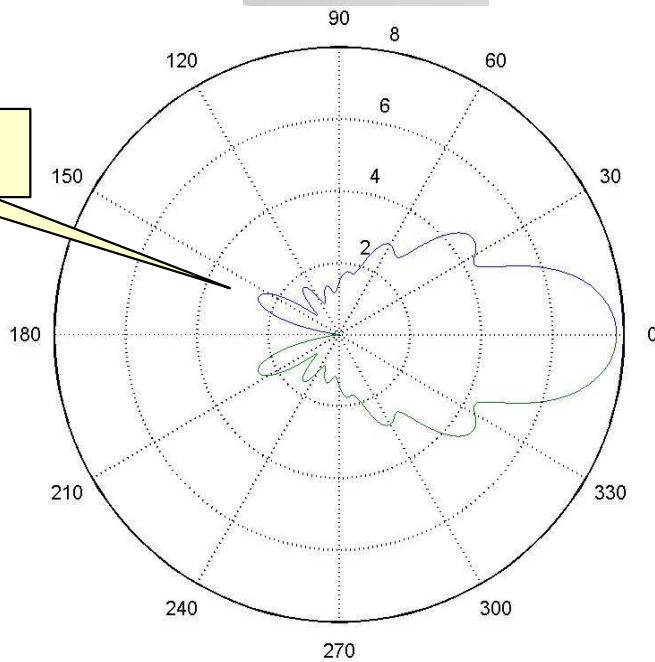


$x = 0,73$

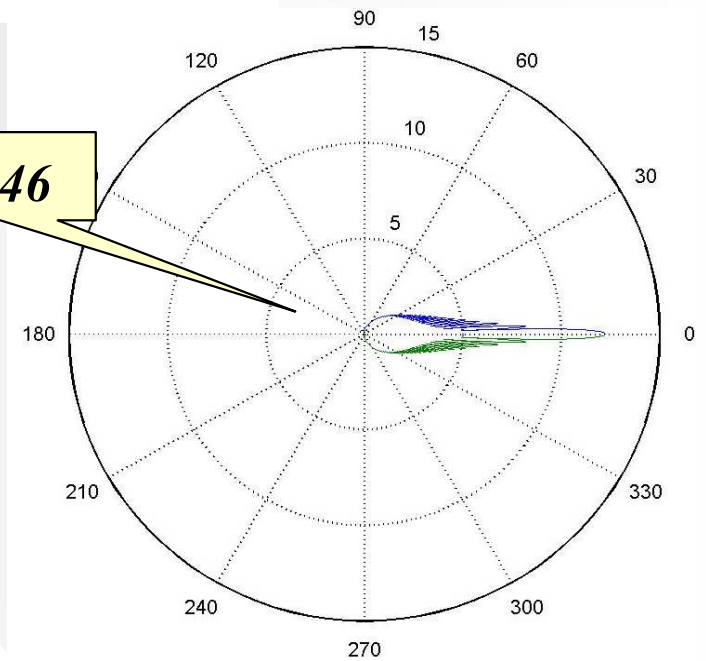


$x = 36,5$

$x = 7.3$



$x = 146$





Plan de l'exposé

- Objectifs et études menées par notre équipe
- Morphologie et caractérisation des milieux étudiés
- **Modélisation du transfert de chaleur par rayonnement et conduction**
- Transfert de chaleur dans les nanomatériaux
- Conclusions et perspectives.

Equation du transfert radiatif et équation de l'énergie (couplage)

Variation de la
luminance

Pertes par
absorption

Pertes par
diffusion

Gain par
émission propre

Gain par
diffusion

$$\frac{dL_{\lambda}(s, \vec{\Omega})}{ds} = -\kappa_{\lambda} \cdot L_{\lambda}(s, \vec{\Omega}) - \sigma_{\lambda} L_{\lambda}(s, \vec{\Omega}) + n_{\lambda}^2 \kappa_{\lambda} \cdot L_{\lambda}^0(T(s)) + \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega'=4\pi} \sigma_{\lambda} P_{\lambda}(\vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) \cdot L_{\lambda}(s, \vec{\Omega}') d\Omega'$$

Equation de l'énergie en régime stationnaire:

$$0 = -\vec{\nabla} \cdot (\vec{q}_c + \vec{q}_r)$$

\vec{q}_c est le flux conductif :

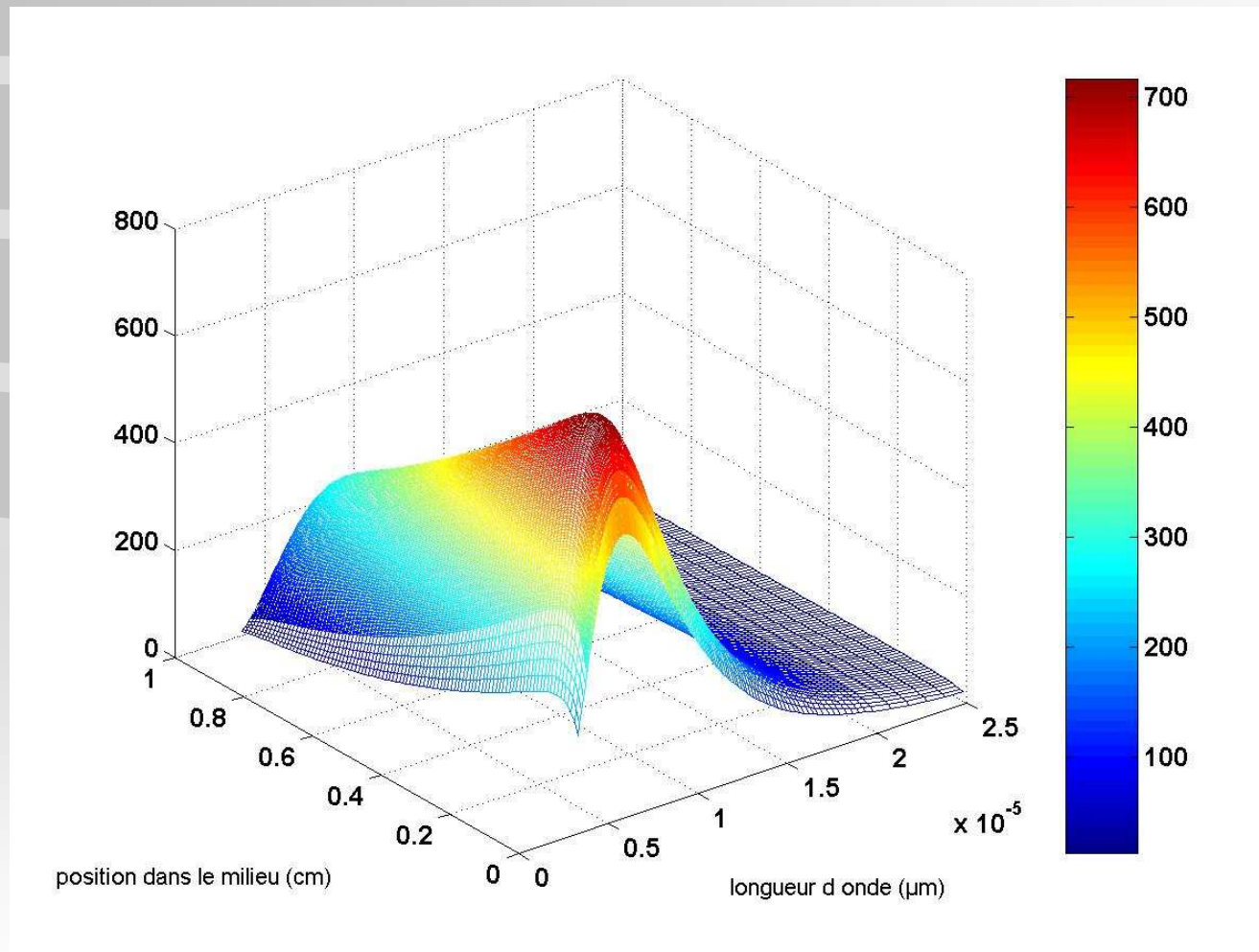
$$\vec{q}_c = -\lambda_c \text{grad}T$$

\vec{q}_r est le flux radiatif :

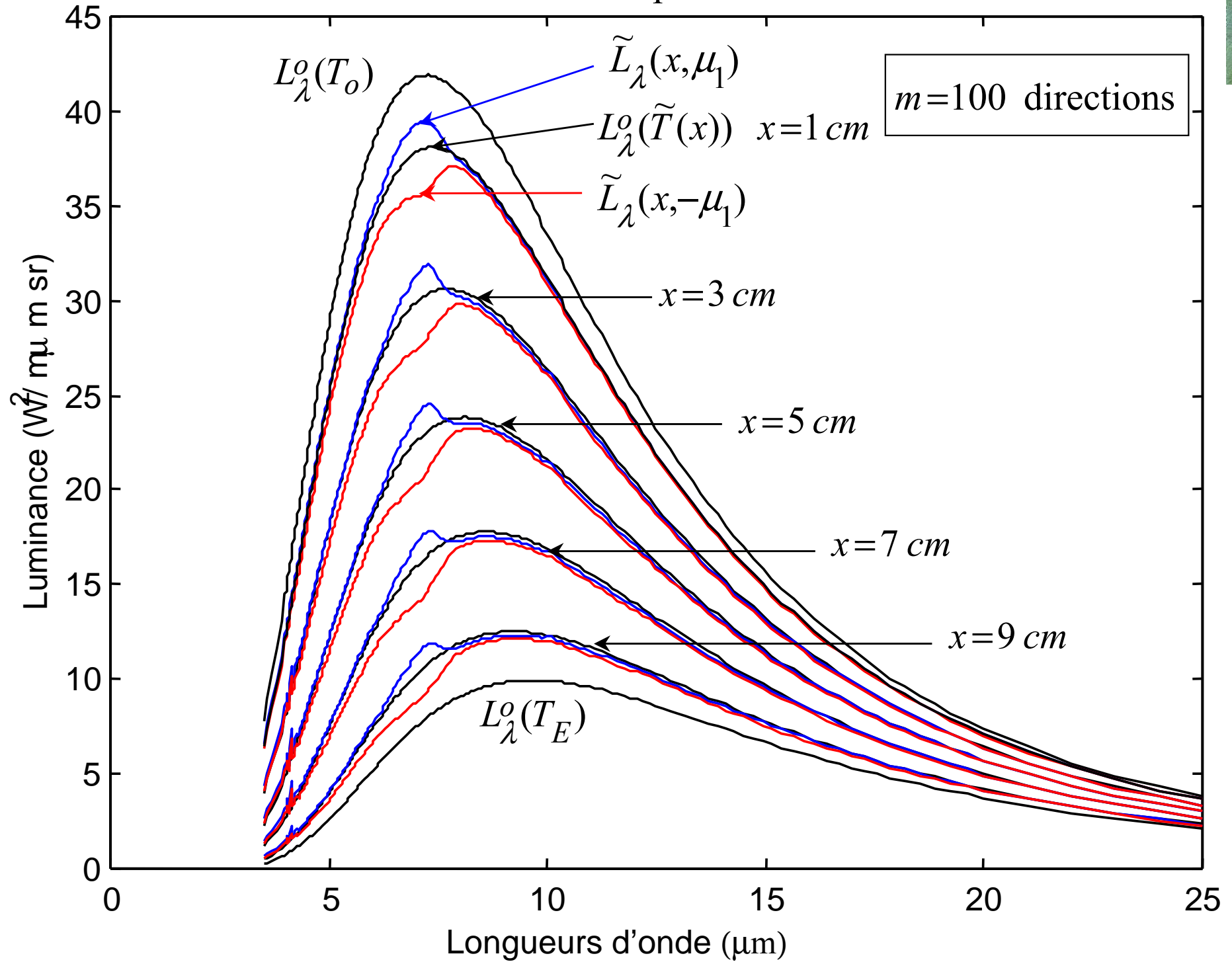
$$\vec{q}_r(s) = \int_0^{\infty} \int_{\Omega=4\pi} L_{\lambda}(s, \vec{\Omega}) \cdot \vec{\Omega} \cdot d\Omega \cdot d\lambda$$



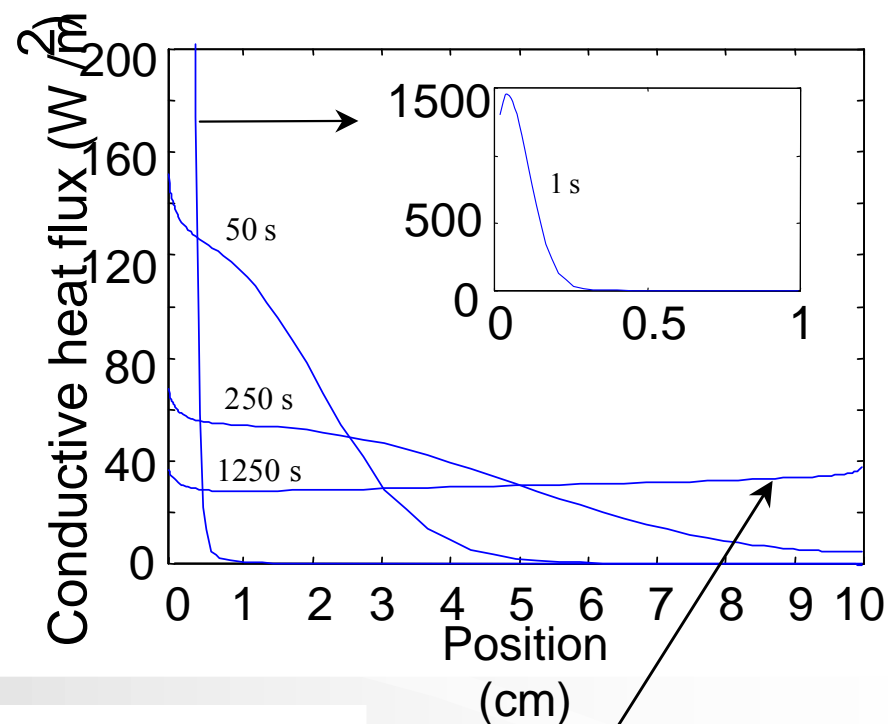
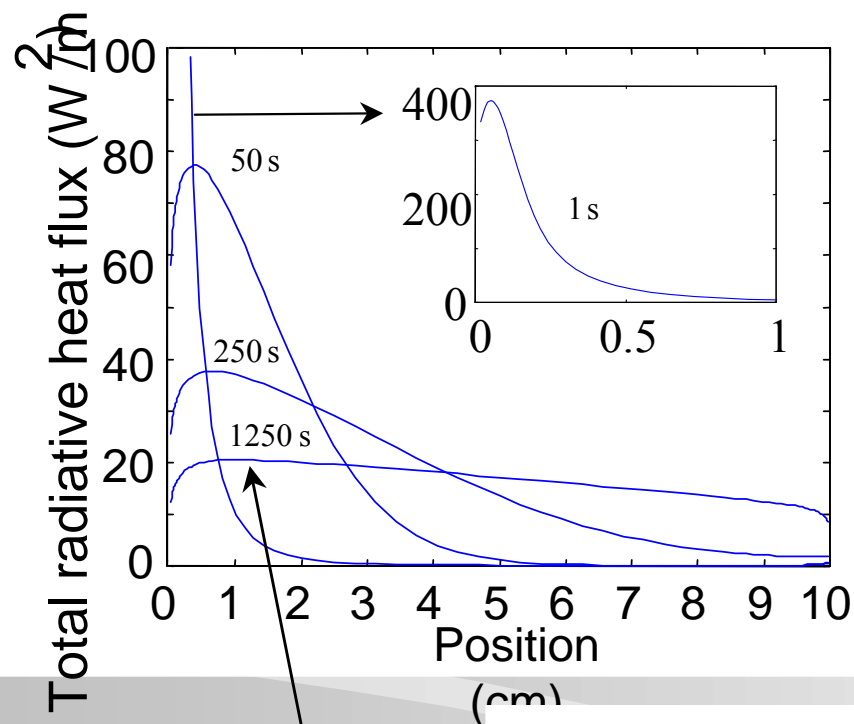
Approximation par un coefficient de Fourier radiatif.



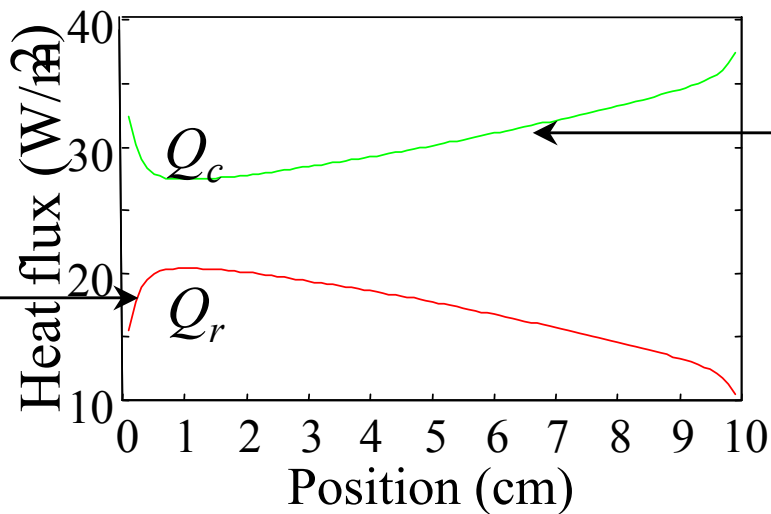
Luminance spectrale



Evolution du transfert de chaleur dans un isolant fibreux

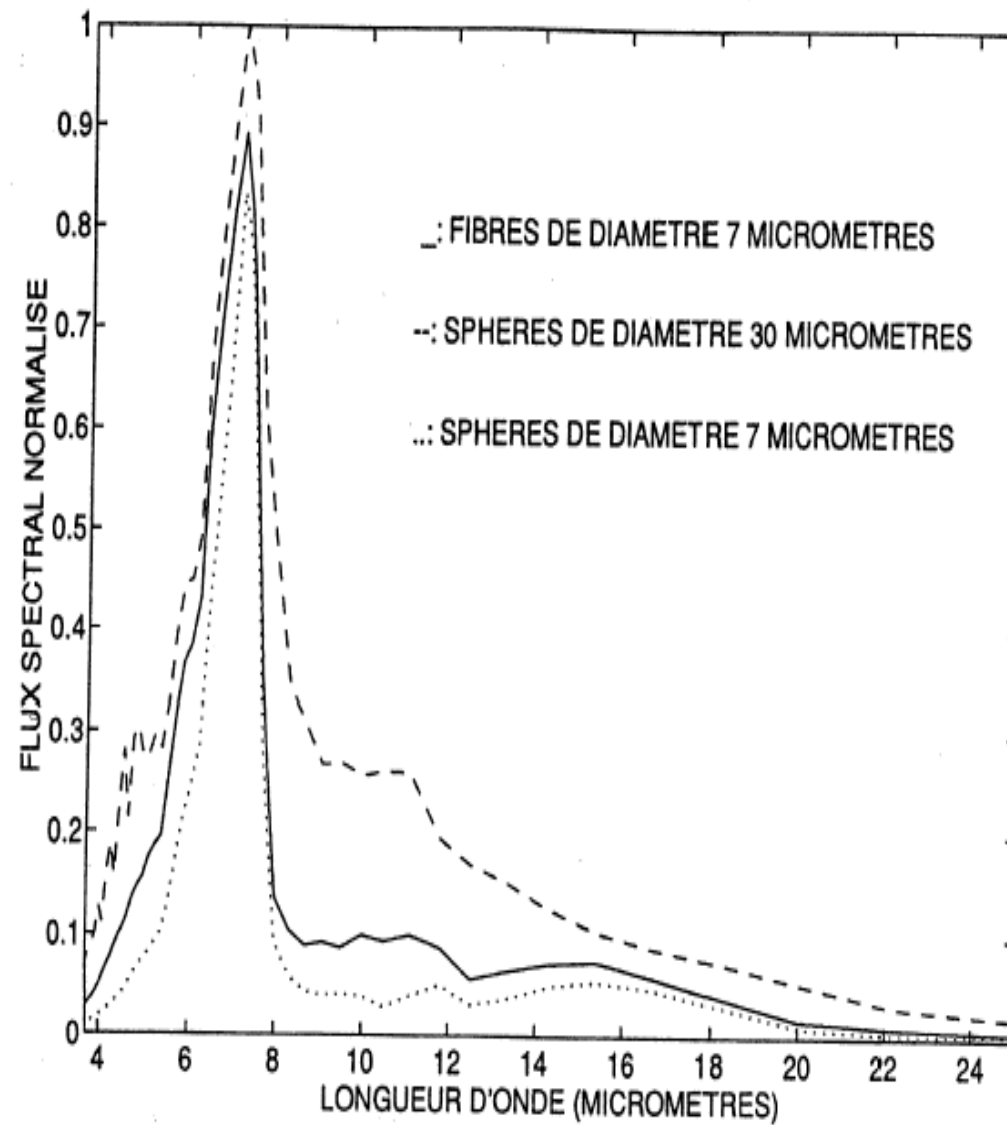


Convergence du flux
 radiatif total vers le
 régime **stationnaire**.



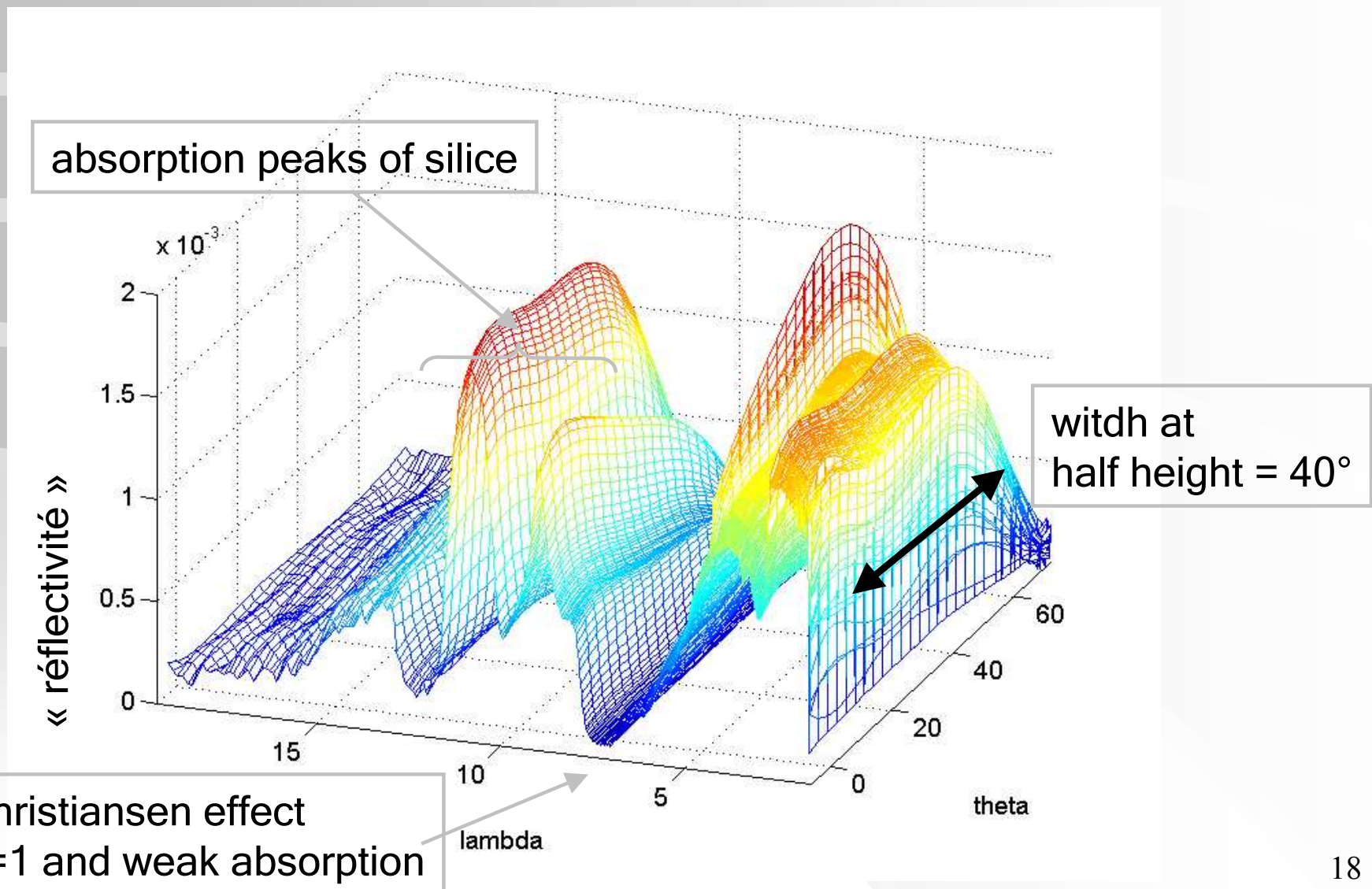
Convergence du flux
 conductif vers le
 régime **stationnaire**.

Comparaison des propriétés des cylindres et des sphères





Réflexion bidirectionnelle d'un isolant fibreux.



Caractéristiques thermiques

matériau	Masse volumique (kg/m ³)	Conductivité thermique (W/m ² . °C)	Diffusivité thermique (m ² /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)

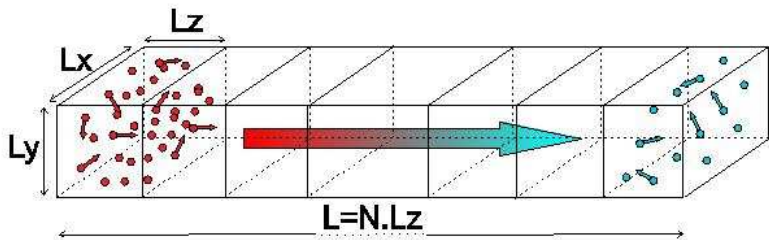


Plan de l'exposé

- Objectifs et études menées par notre équipe
- Morphologie et caractérisation des milieux étudiés
- Modélisation du transfert de chaleur par rayonnement et conduction
- Transfert de chaleur dans les nanomatériaux
- Conclusions et perspectives.

Thermique aux petites échelles de temps et d'espace

Transport de la chaleur à : $L < 1\mu\text{m}$ et $t \propto 1\text{ns}$

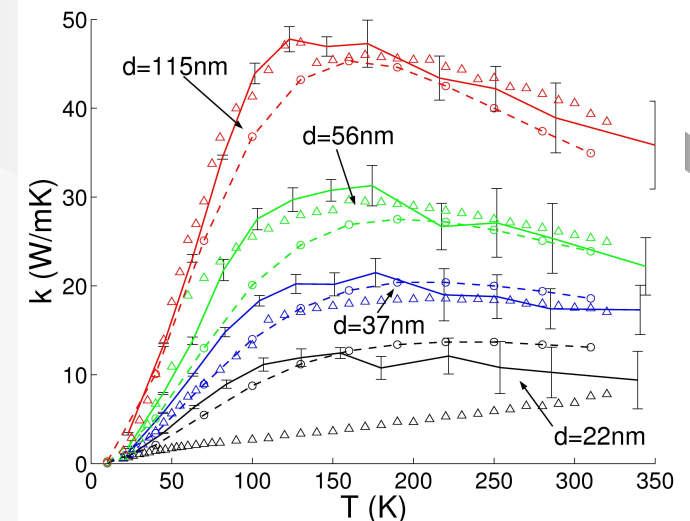


- Caractériser les échelles de temps et d'espace pour lesquelles la loi de Fourier n'est plus valide
- Déterminer les caractéristiques thermiques intrinsèques de nanostructures et de matériaux nanostructurés (nanofil, nanotube, super réseaux, ...)

Phonons et équation de Boltzmann pour la thermique

Outils mis en place :

- Simulation de l'éq. de Boltzmann avec une méthode de Monte Carlo
- Modèle spectral utilisant les relations de dispersion des matériaux
- Approche en temps de relaxation
- Modélisation statistique des phénomènes de réflexion
- Étude de nanostructures de type : nanofils et nanofilms

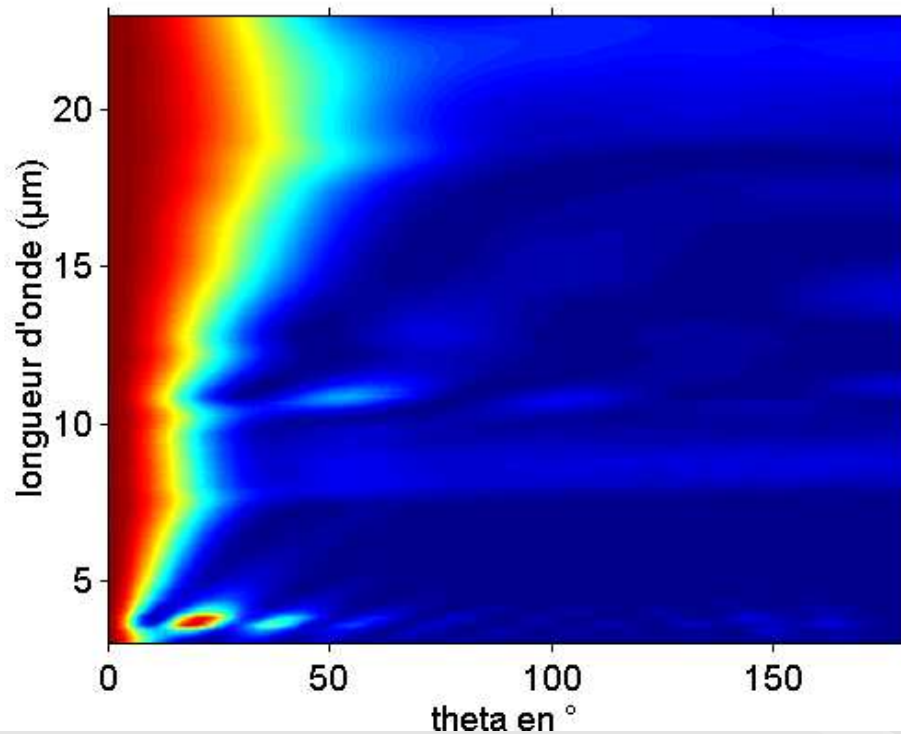


Validation de la méthode

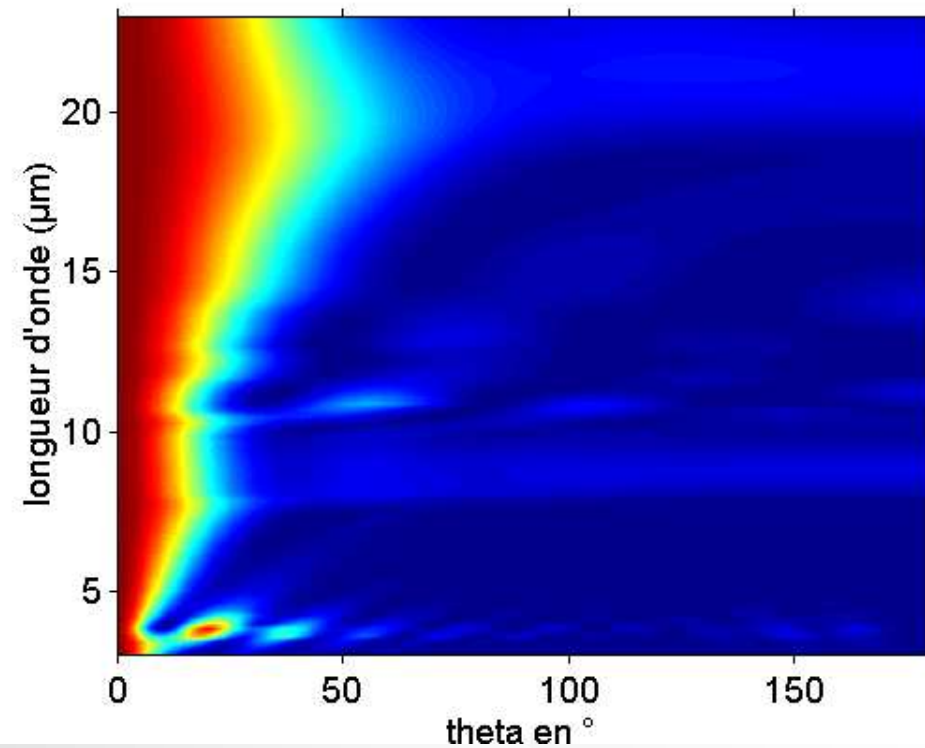
Application à une fibre et comparaison avec la théorie de Mie

Validation : Champ lointain diffracté

en fonction de l'angle et de la longueur d'onde (cylindre de silice de diamètre $12\ \mu\text{m}$)



FDTD



Mie

Très bon accord entre les résultats numériques (FDTD) et la théorie de Mie (exacte)

➔ Validation de la méthode FDTD dispersive et de la transformation champ proche - champ lointain

Diffusion dépendante

Travaux de Lee

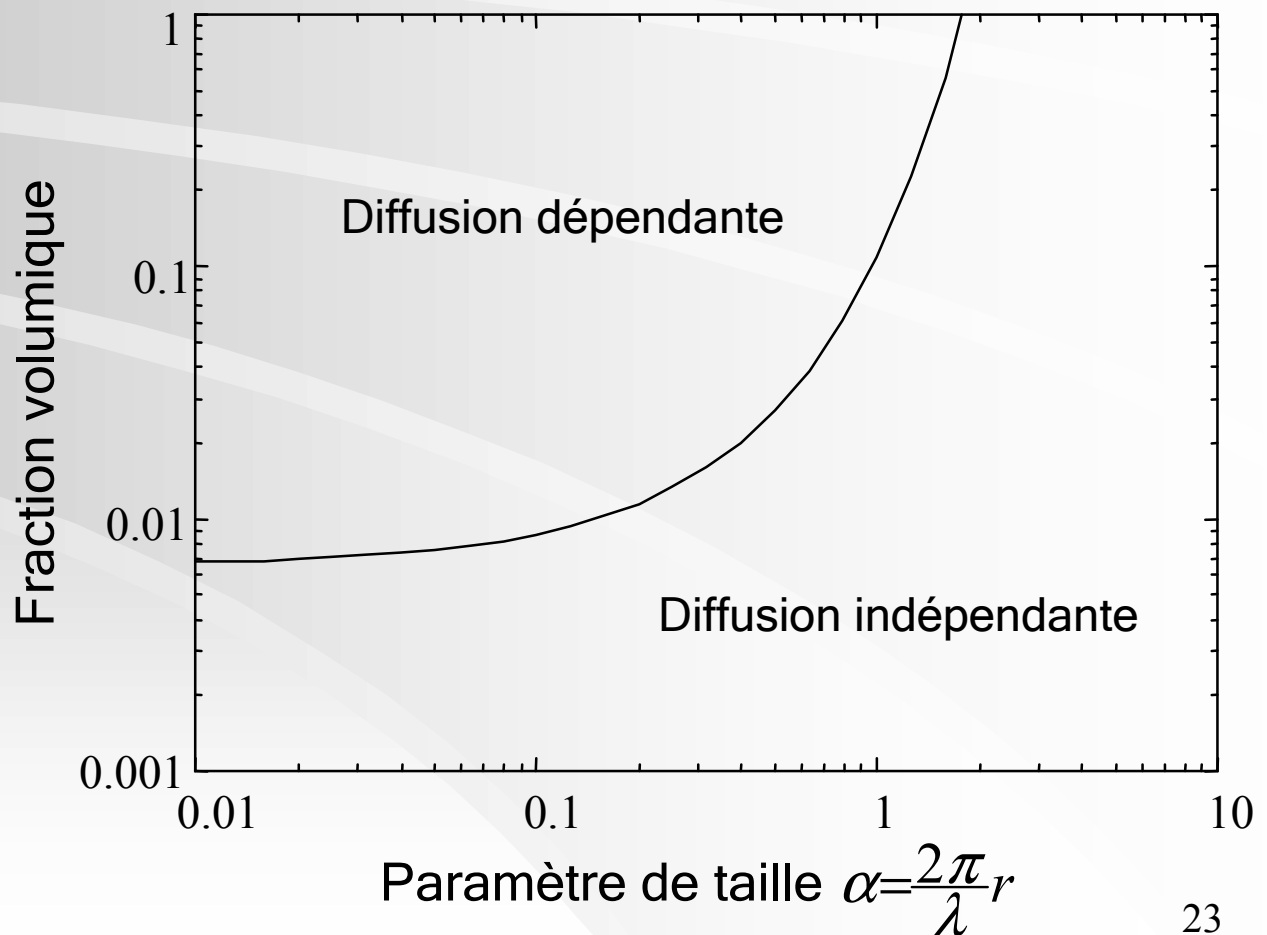
Cylindres : on peut exprimer le champ diffracté par un cylindre centré en r_i des fonctions de Bessel centrées sur une autre origine r_j (théorème d'addition-translation)

➔ travaux de Lee

Comparaison entre diffusion indépendante et calcul « exact » :

diffusion dépendante si déviation de plus de 5% par rapport à la diffusion indépendante

Ex : fibres d'indice 1,546
non absorbantes



Conclusion et perspectives

Nous allons chercher à optimiser le matériau en régime permanent et en transitoire en étudiant :

- l'influence de la nature du bois (résineux : pin des Landes, sapin... ou feuillus),
- l'Influence de la morphologie (principalement la taille des fibres),
- de la masse volumique,
- du taux d'humidité.

Il nous reste à :

- mieux prendre en compte le transfert de masse (eau) et les propriétés phoniques du milieu,
- réaliser de nouveaux isolants (bois + ... en cours avec ISOROY et Dow Chemical),
- réaliser des isolants avec des particules de bois de différentes tailles ...
- couplage conduction-rayonnement pour les nanomatériaux.