

# 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

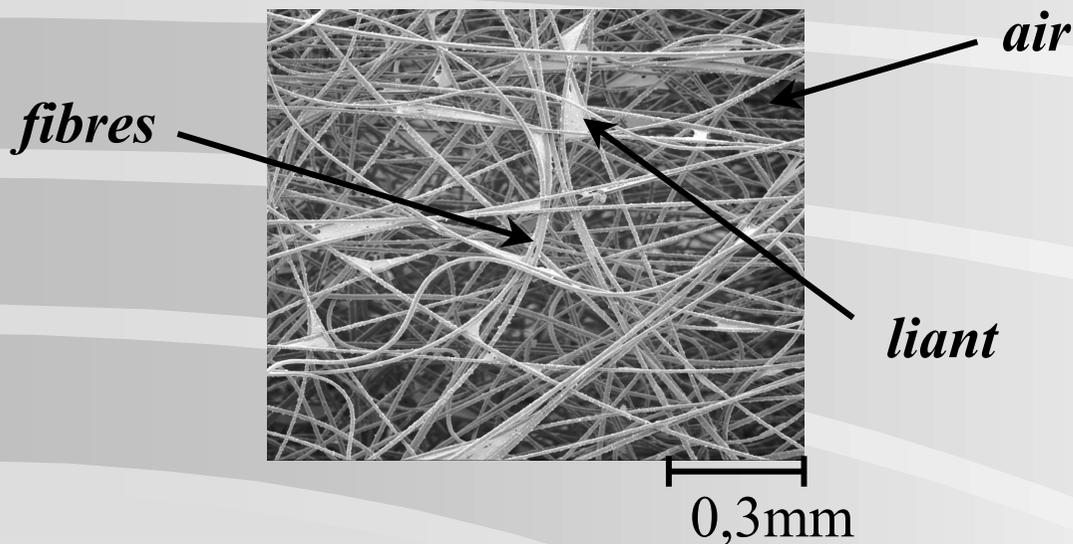
- Objectifs et études menées par notre équipe
- **Morphologie et caractérisation des milieux étudiés**
- Modélisation du transfert de chaleur par rayonnement et conduction
- Transfert de chaleur dans les nanomatériaux
- Conclusions et perspectives.



# Transferts thermiques au sein d'un milieu fibreux

Isolant fibreux à base de silice

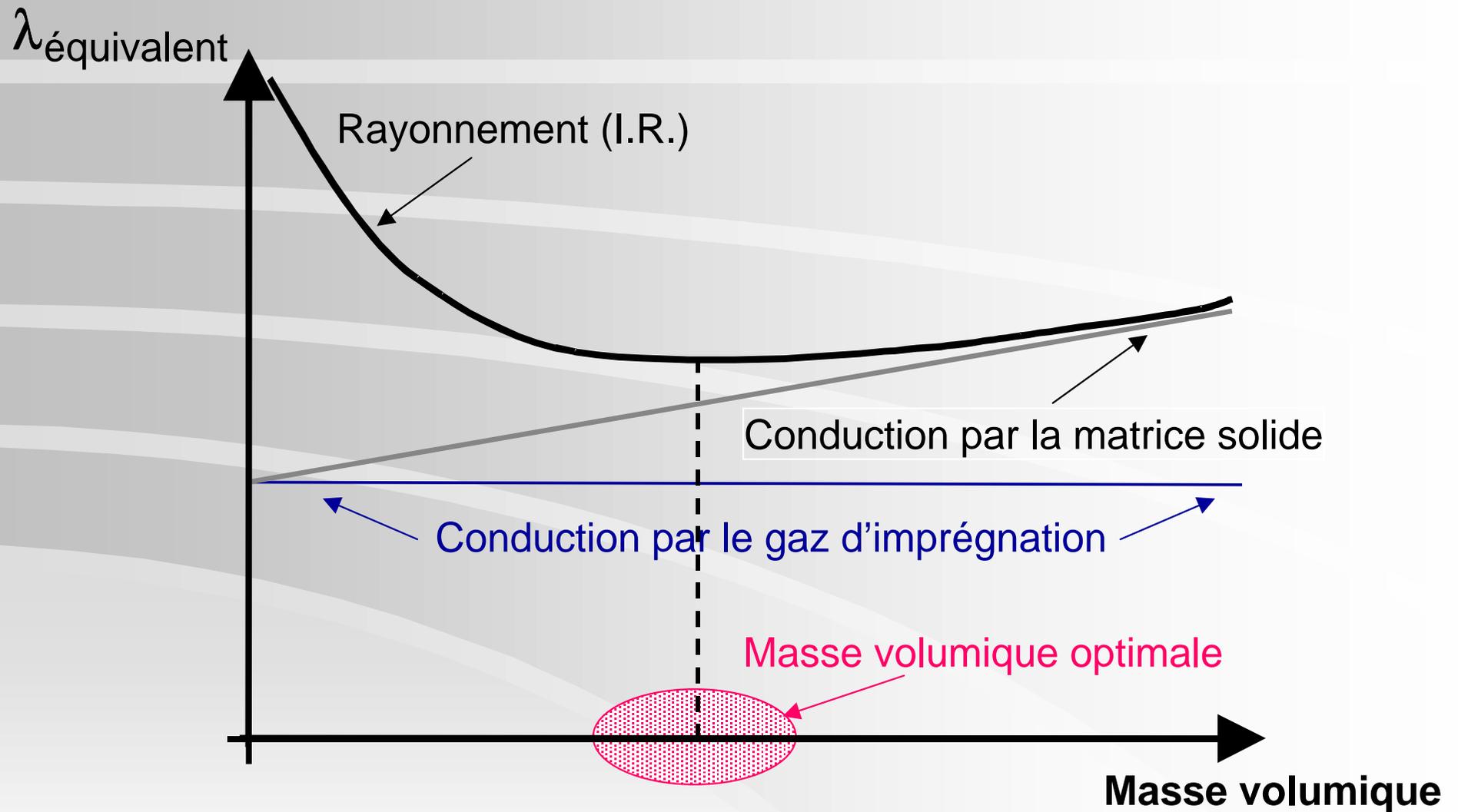
Isolant fibreux à base de bois



- 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

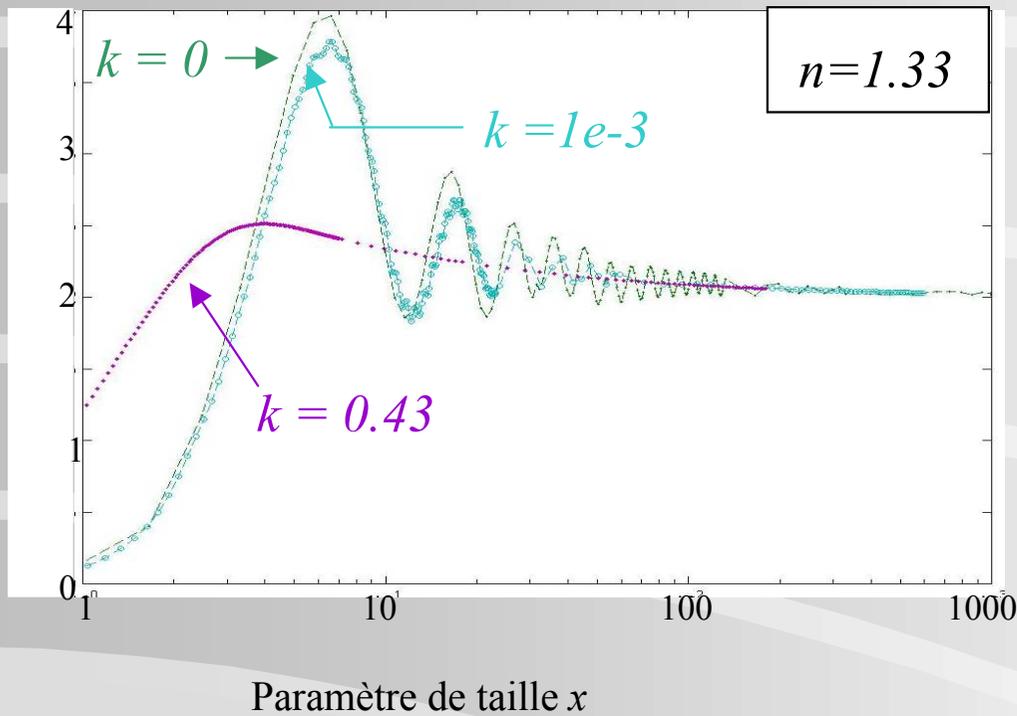
## Principe des isolants



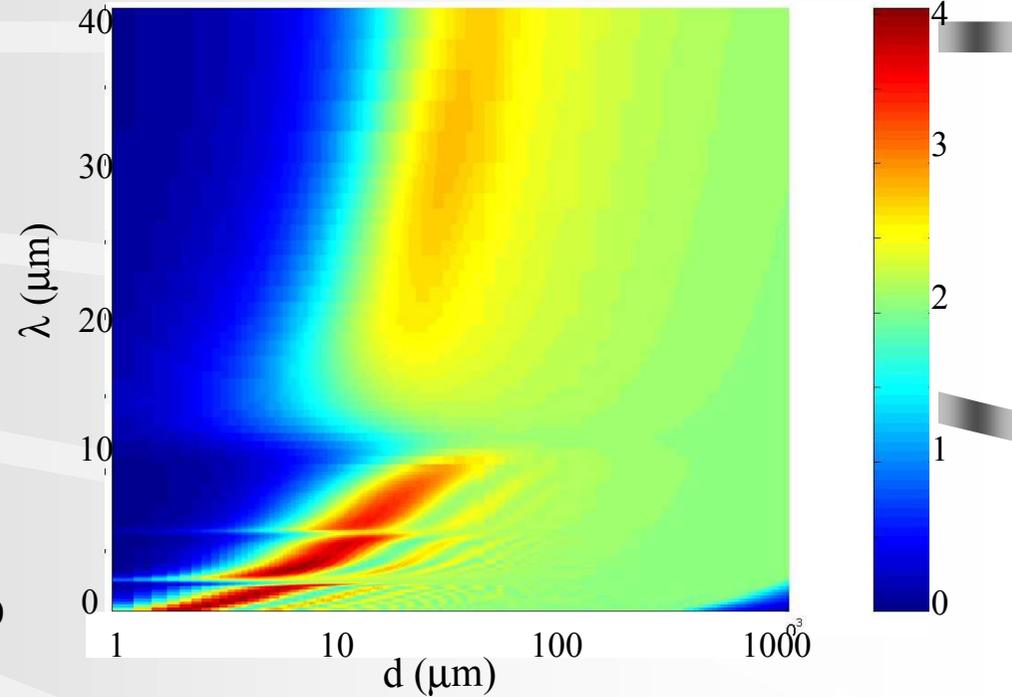
Ne pas oublier l'influence de la composition chimique et du " diamètre "

# Détermination de l'efficacité d'extinction :

## Nécessité d'utiliser l'optique Physique...

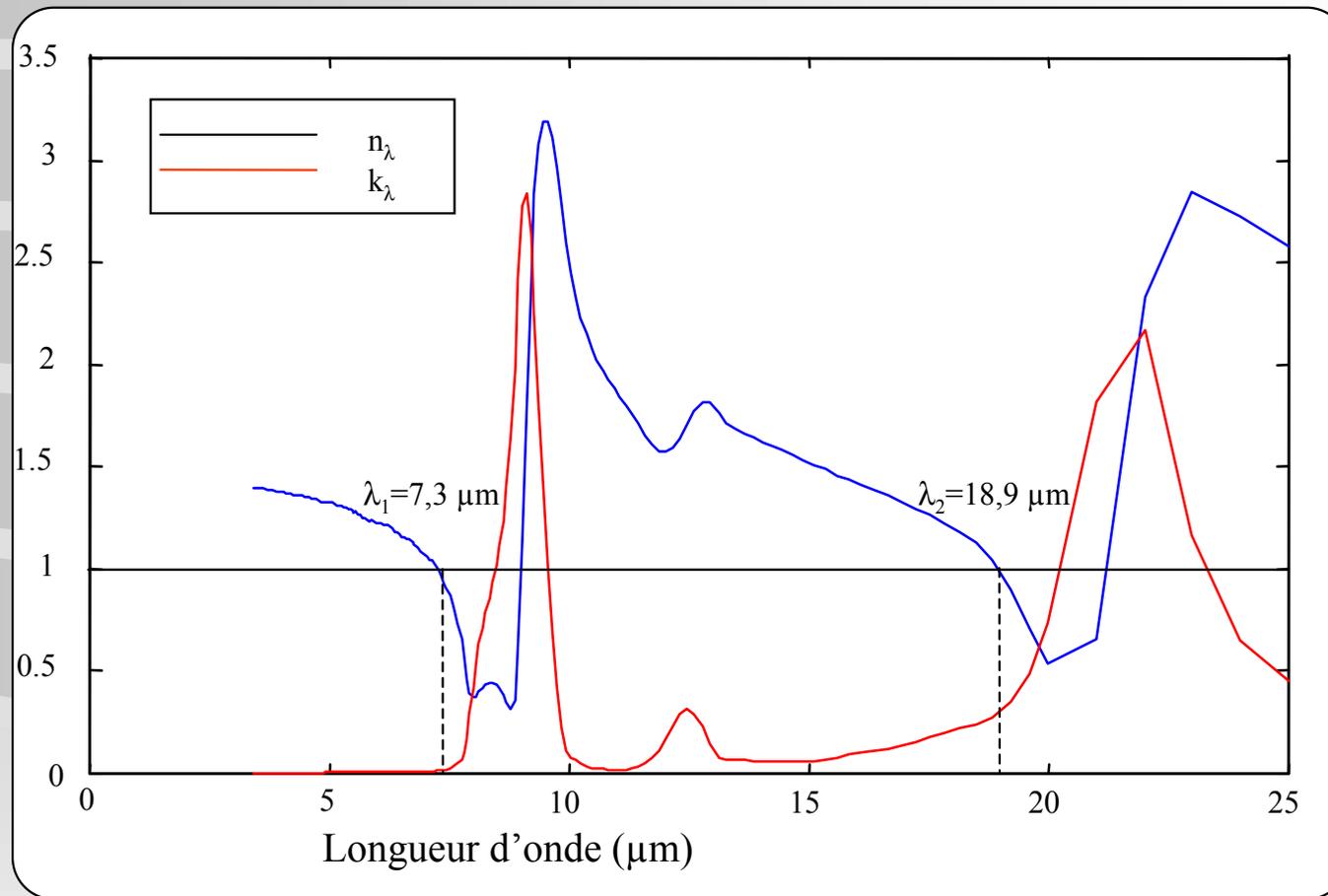


Efficacité d'extinction  
 $Q_{\text{ext}}$  en fonction du  
 paramètre de taille



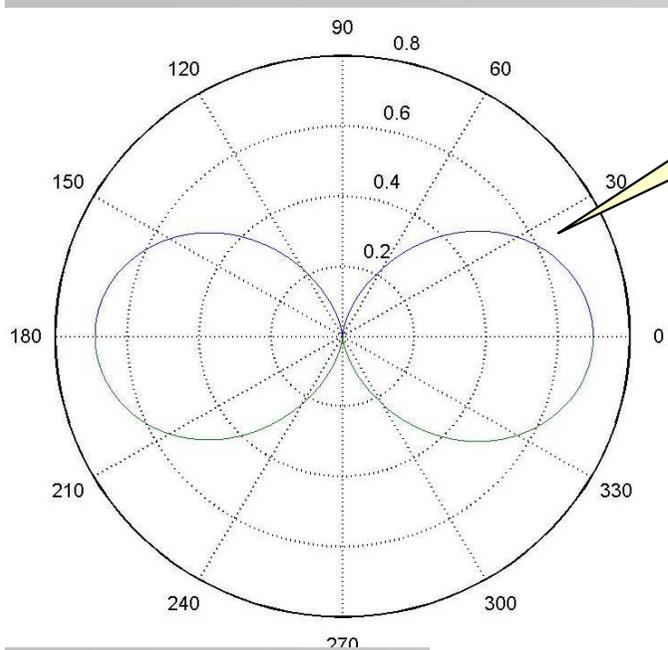
Efficacité d'extinction  
 $Q_{\text{ext}}$  en diagramme  $d - \lambda$

# Indices optiques de la silice

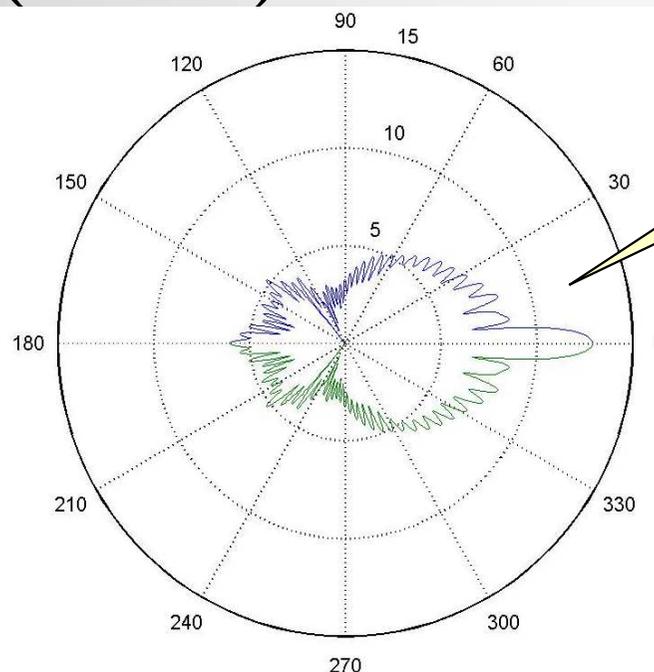


- 9,3 $\mu\text{m}$  : mode d'étirement des liaisons (mouvements O)
- 12,5 $\mu\text{m}$  : mode d'étirement des liaisons (mouvements Si)
- 22,3 $\mu\text{m}$  : mode de déformation des angles Si-O-Si

# Fonction de phase de diffusion (MIE)

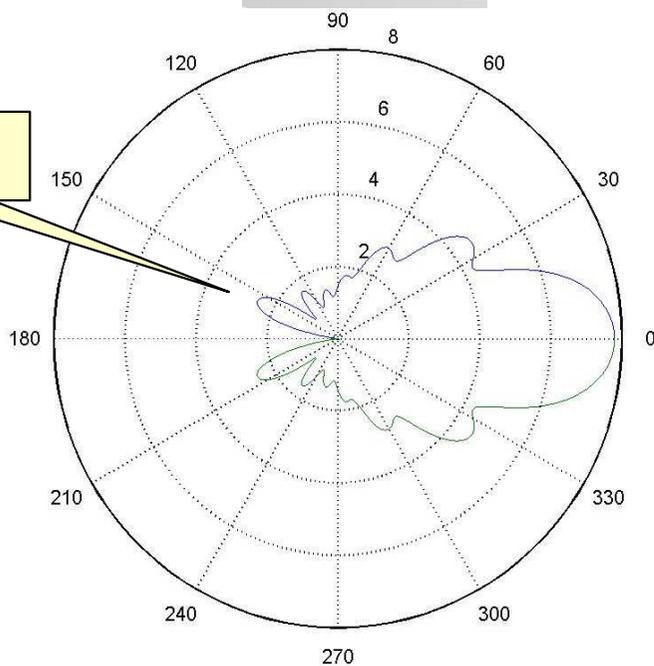


$x = 0,73$

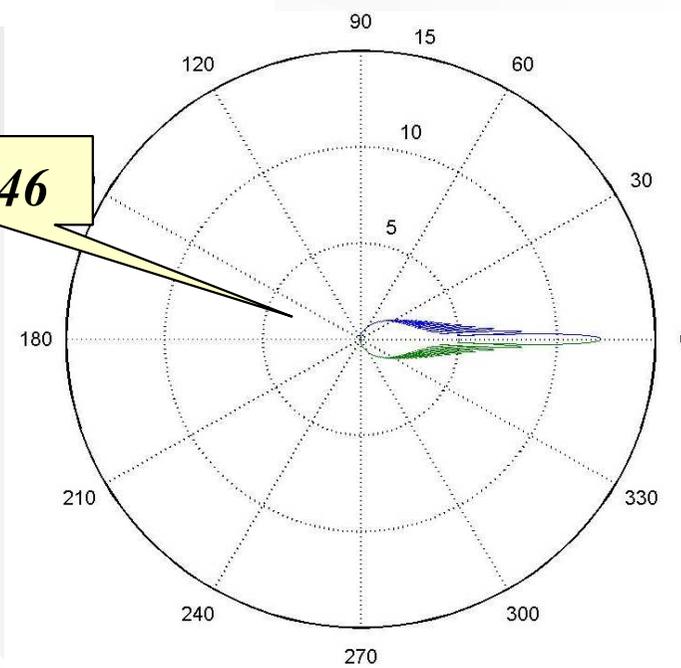


$x = 36,5$

$x = 7.3$



$x = 146$





# 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 :

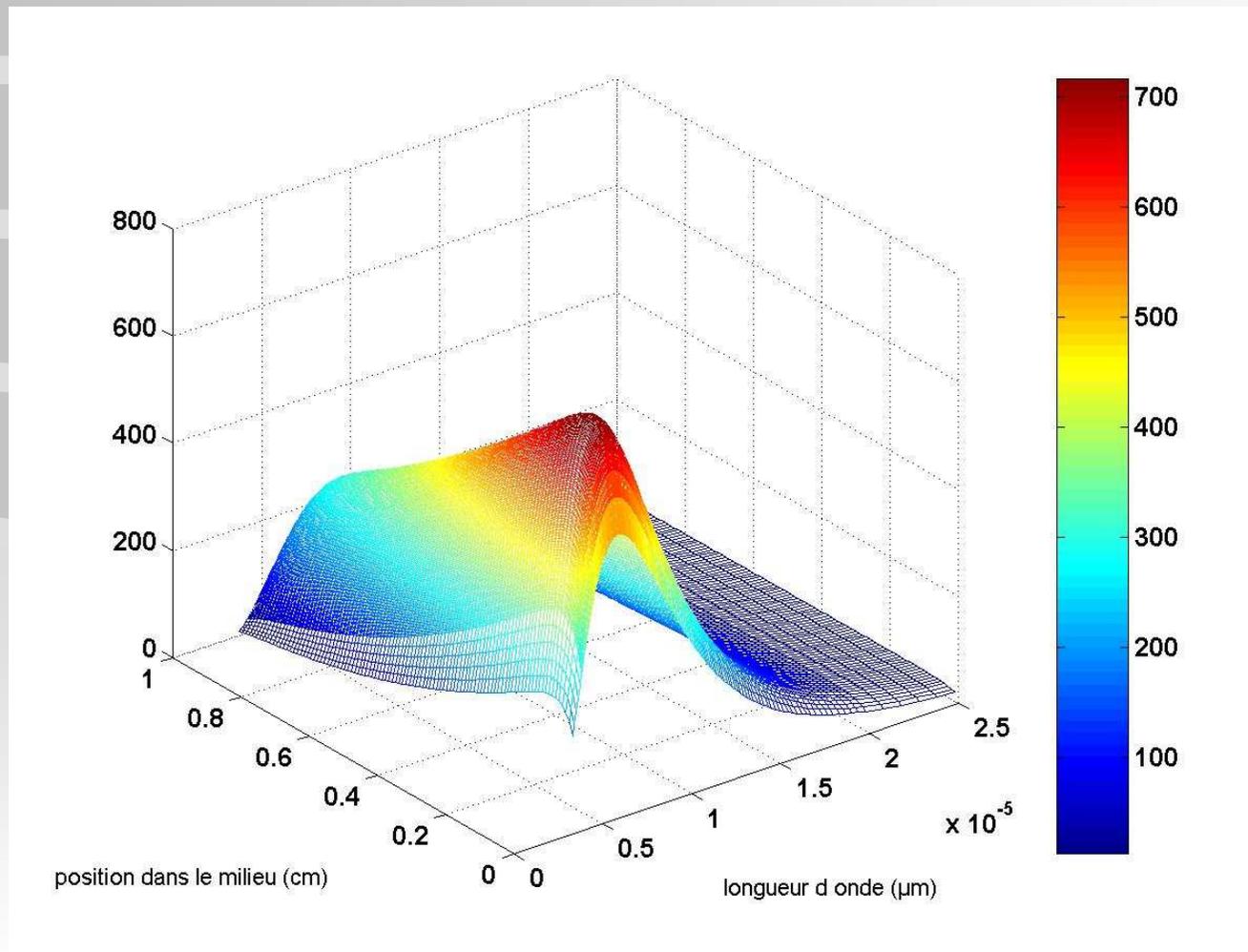
$$\vec{q}_c = -\lambda_c \text{grad}T$$

$\vec{q}_r$  est le flux radiatif :

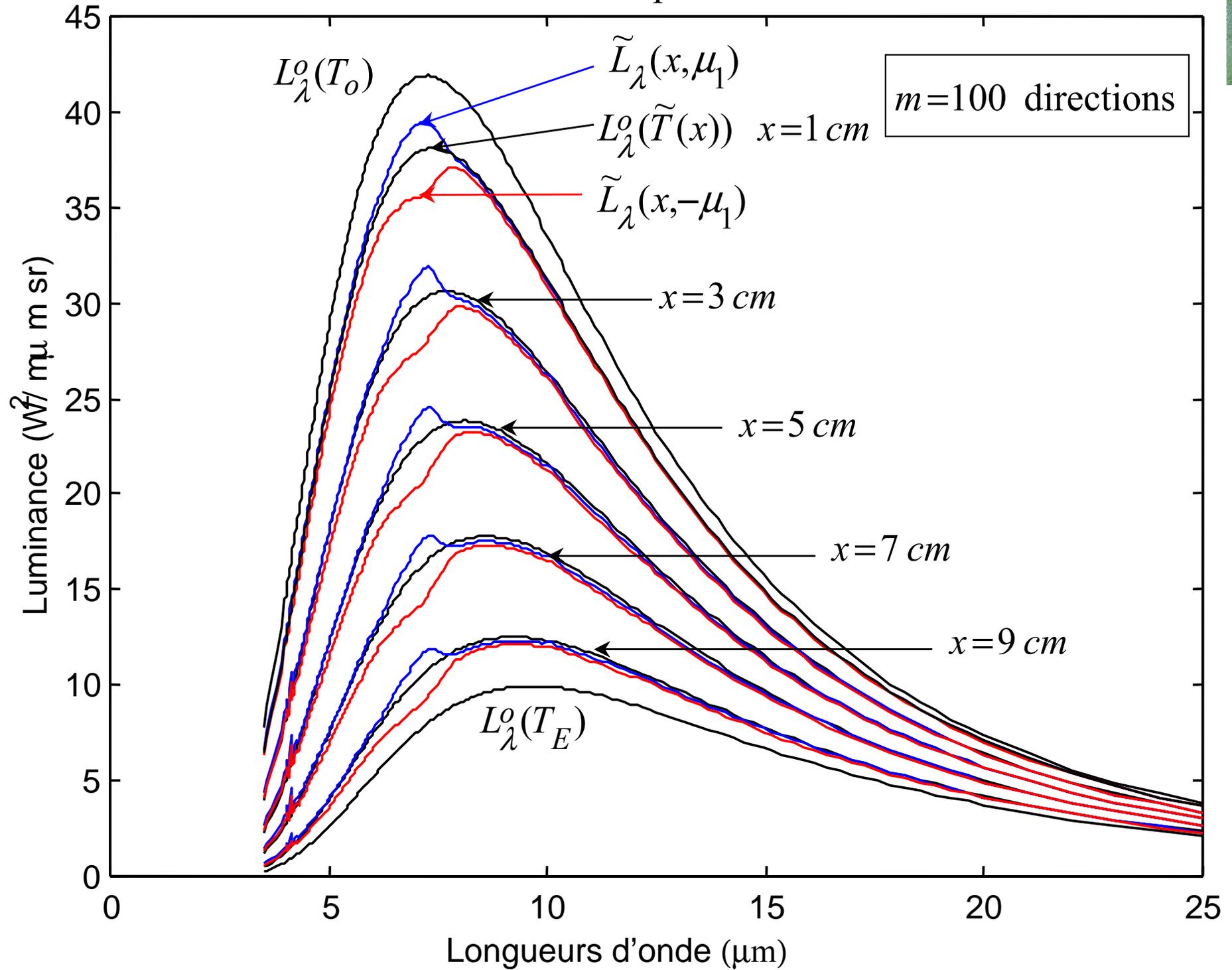
$$\vec{q}_r(s) = \int_0^{\infty} \int_{\Omega=4\pi} L_{\lambda}(s, \vec{\Omega}) \cdot \vec{\Omega} \cdot d\Omega \cdot d\lambda$$



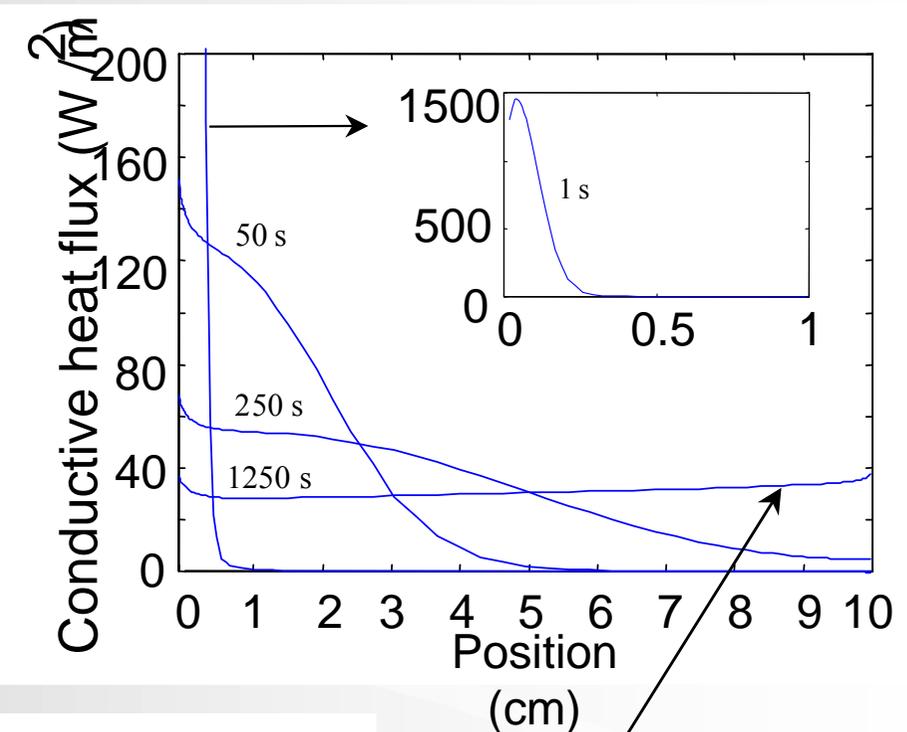
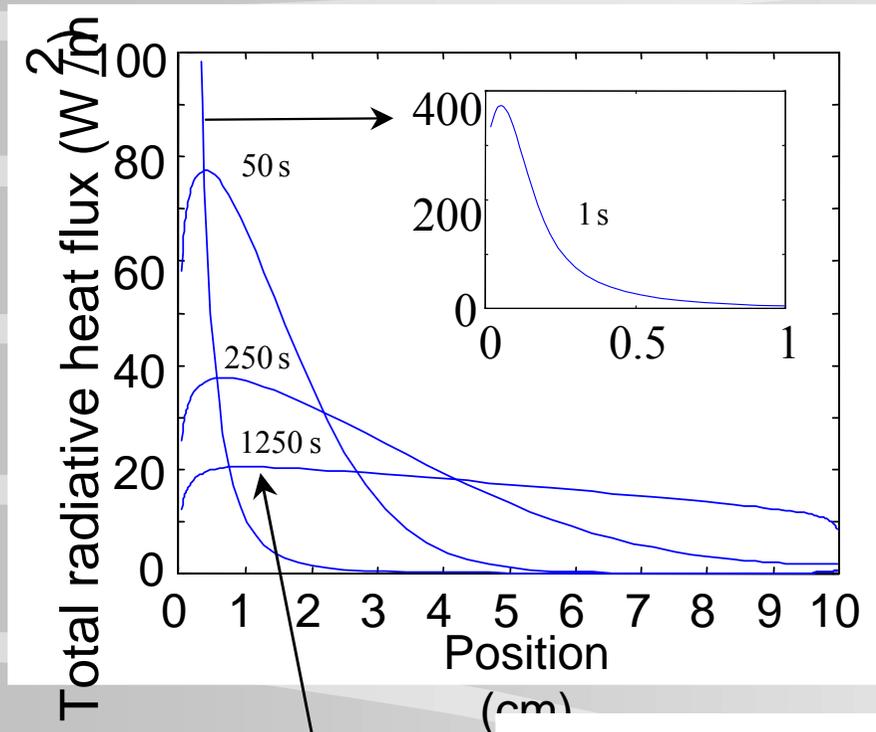
# Approximation par un coefficient de Fourier radiatif.



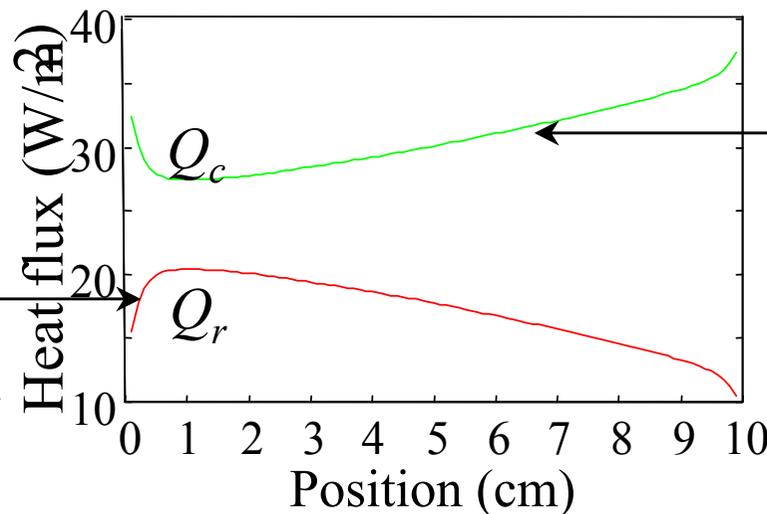
# Luminance spectrale



# Evolution du transfert de chaleur dans un isolant fibreux

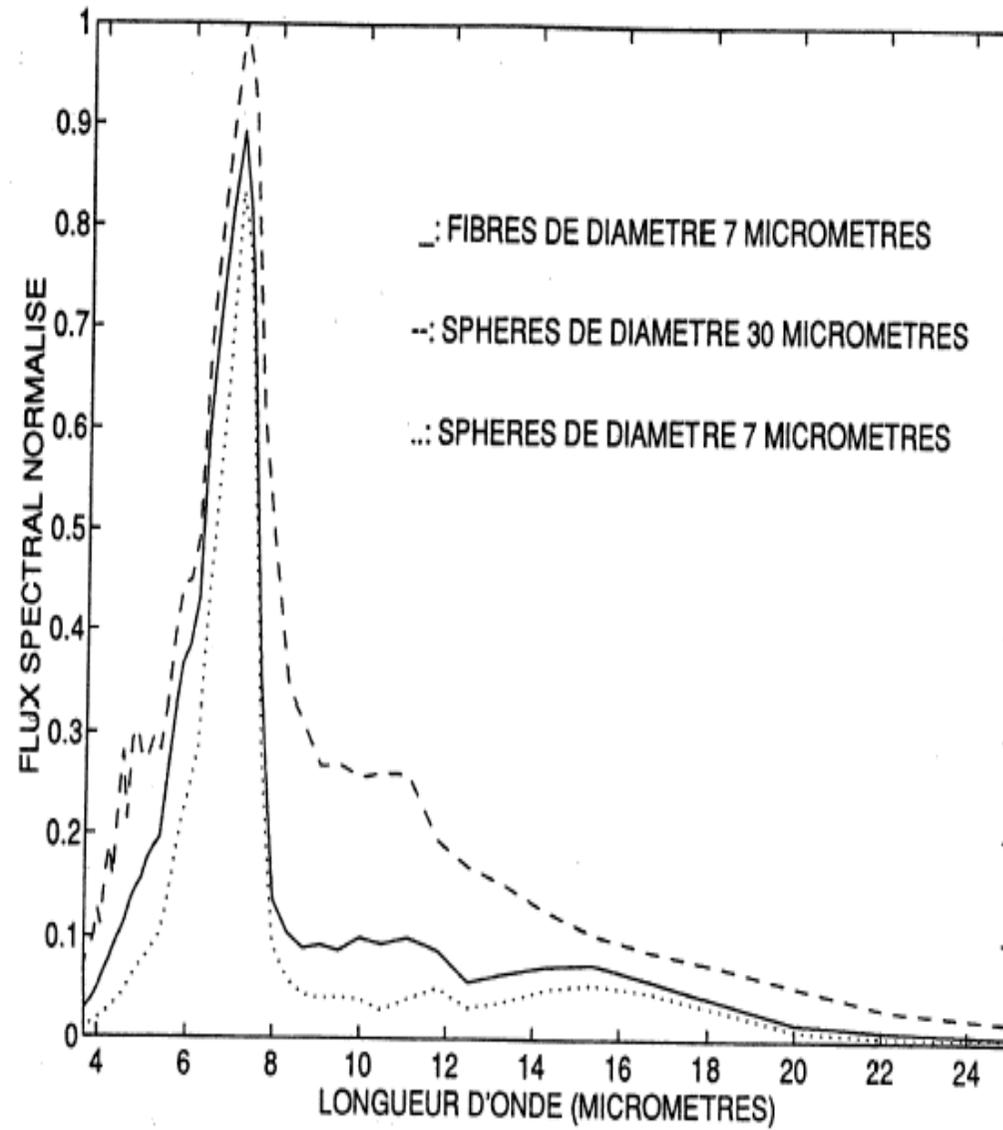


Convergence du flux  
 radiatif total vers le  
 régime **stationnaire**.



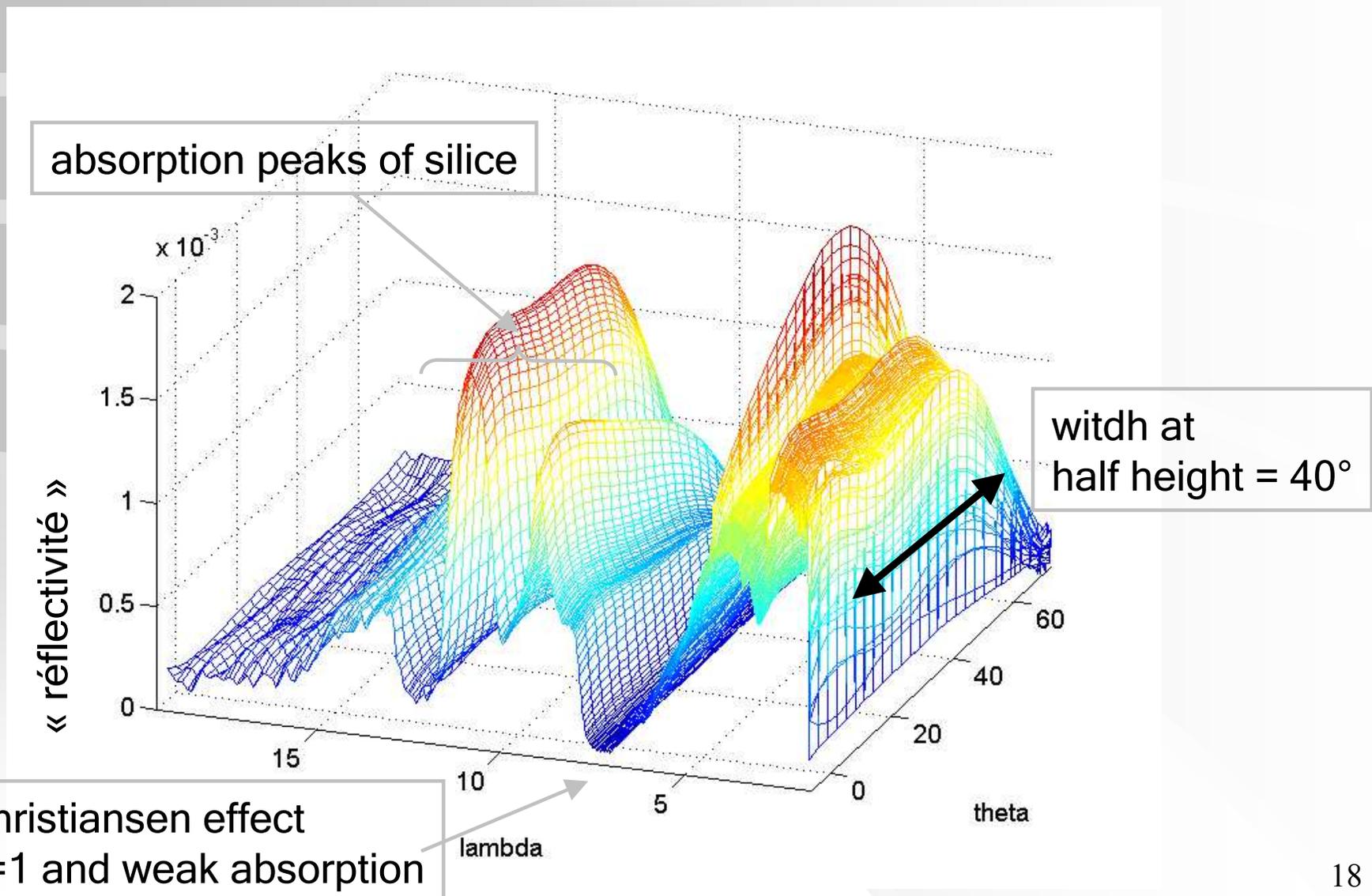
Convergence du flux  
 conductif vers le  
 régime **stationnaire**.

# Comparaison des propriétés des cylindres et des sphères





# Réflexion bidirectionnelle d'un isolant fibreux.



# Caractéristiques thermiques

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

Air immobile :  $\lambda = 0,024$  (W/m<sup>2</sup> . °C)

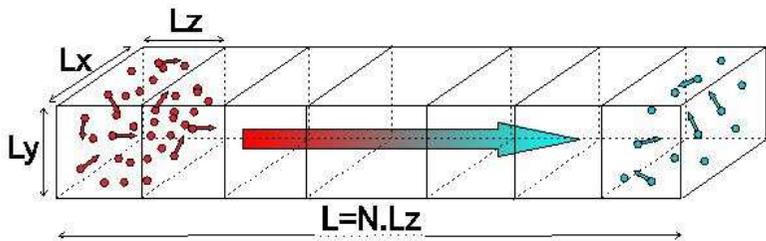


# Plan de l'exposé

- 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  $t \propto 1\text{ns}$

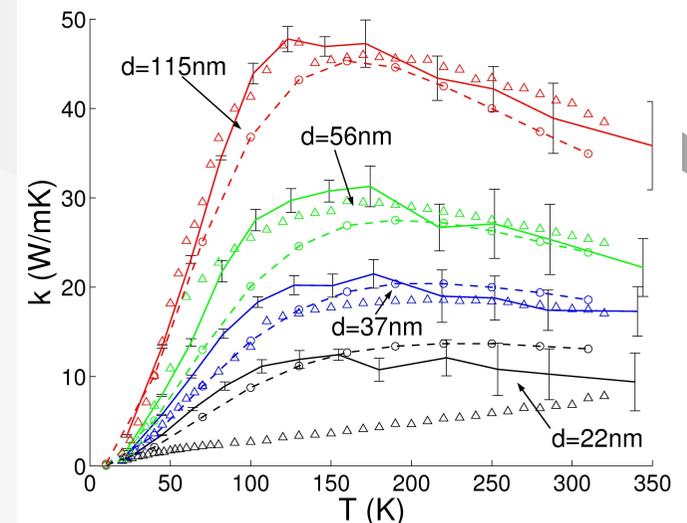


- Caractériser les échelles de temps et d'espace pour lesquelles la loi de Fourier n'est plus valide
- Déterminer les caractéristiques thermiques intrinsèques de nanostructures et de matériaux nanostructurés (nanofil, nanotube, super réseaux, ...)

## 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

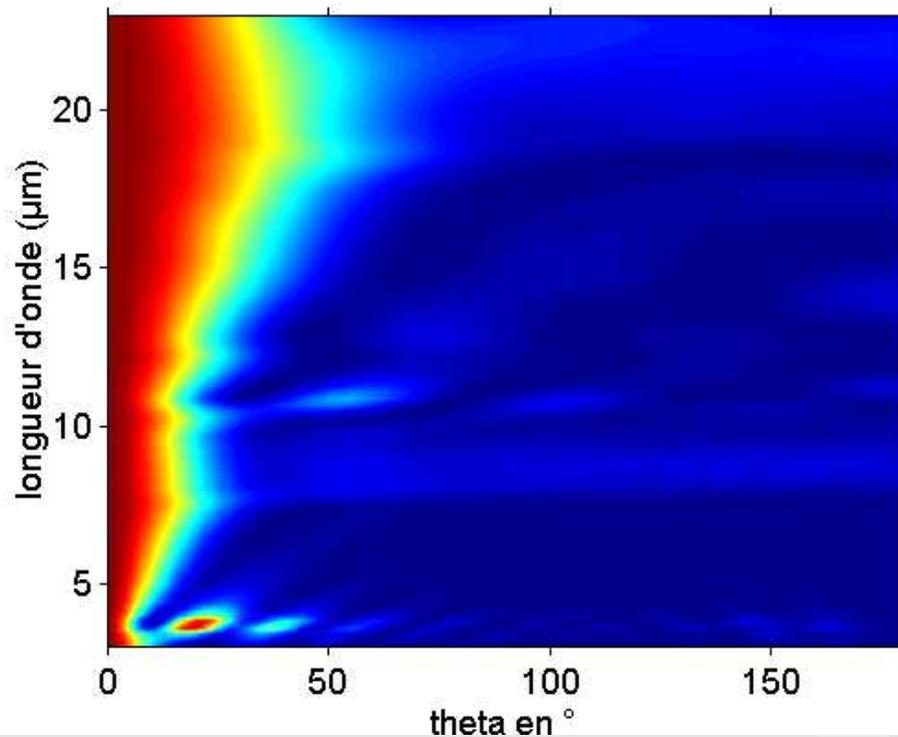


# Validation de la méthode

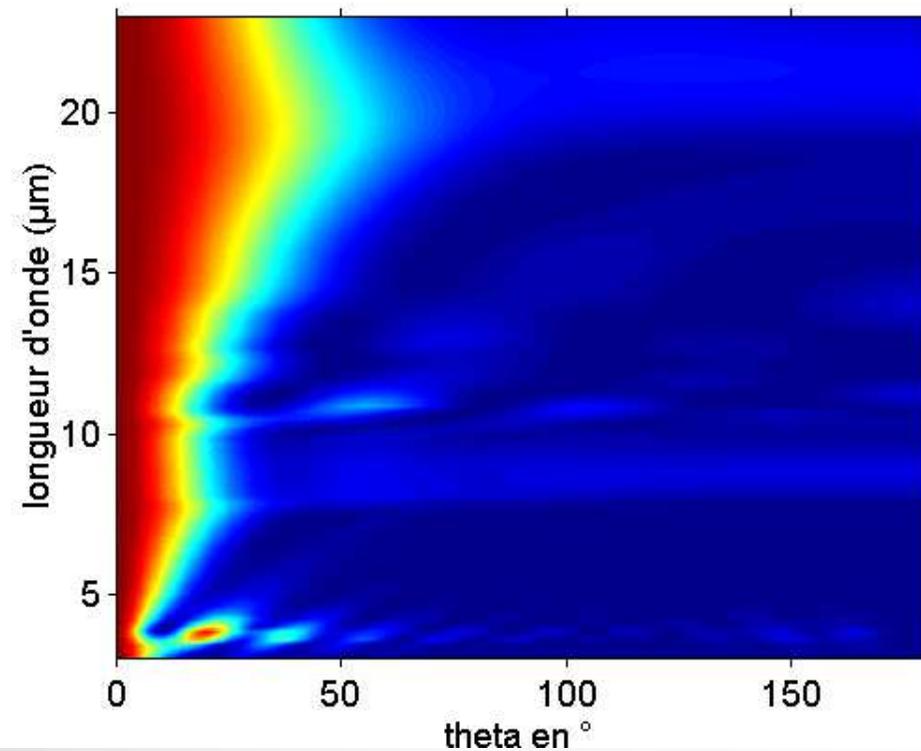
## Application à une fibre et comparaison avec la théorie de Mie

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



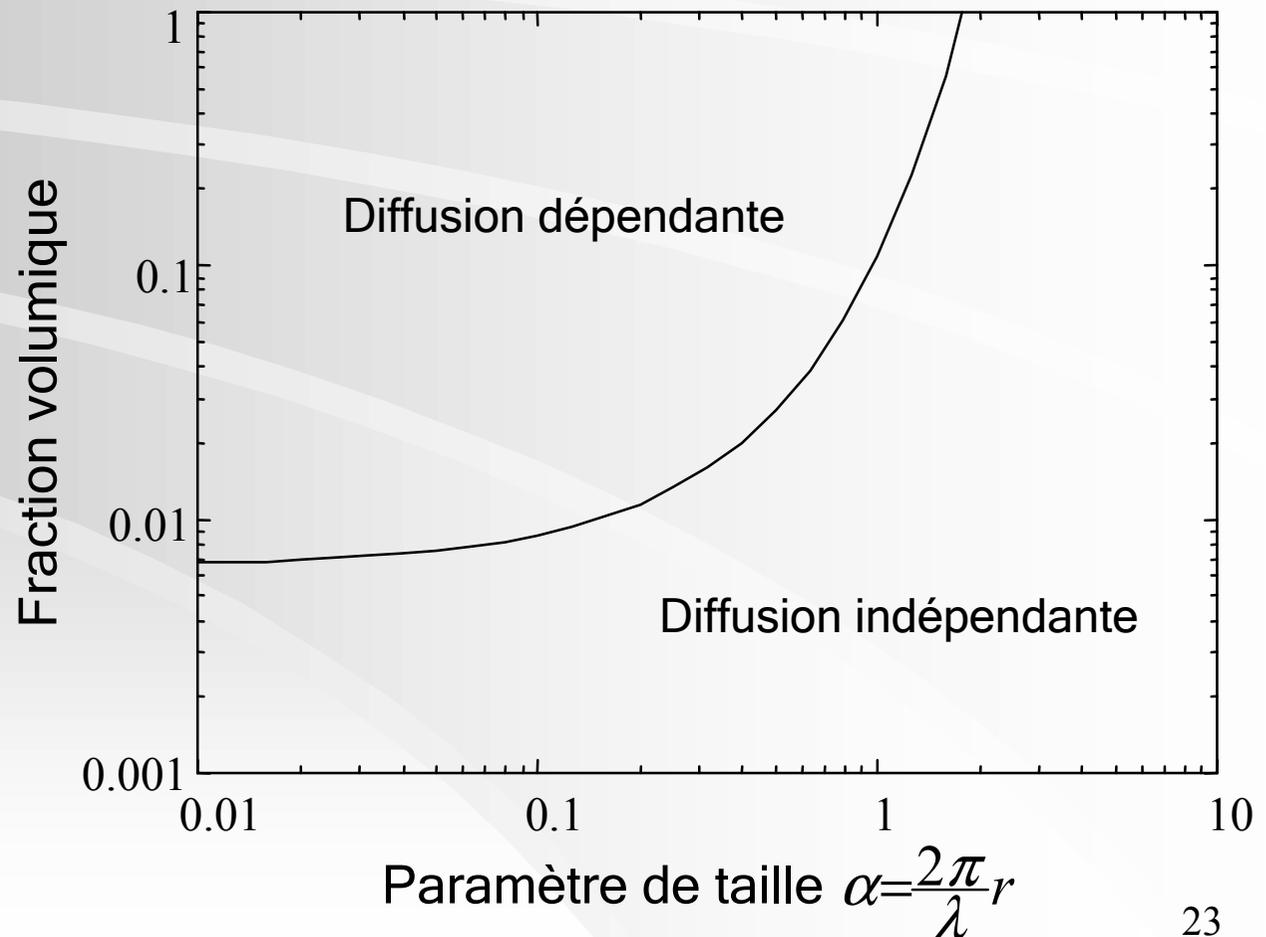
Cylindres : on peut exprimer le champ diffracté par un cylindre centré en  $r_i$  des fonctions de Bessel centrées sur une autre origine  $r_j$  (théorème d'addition-translation)

➔ 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.