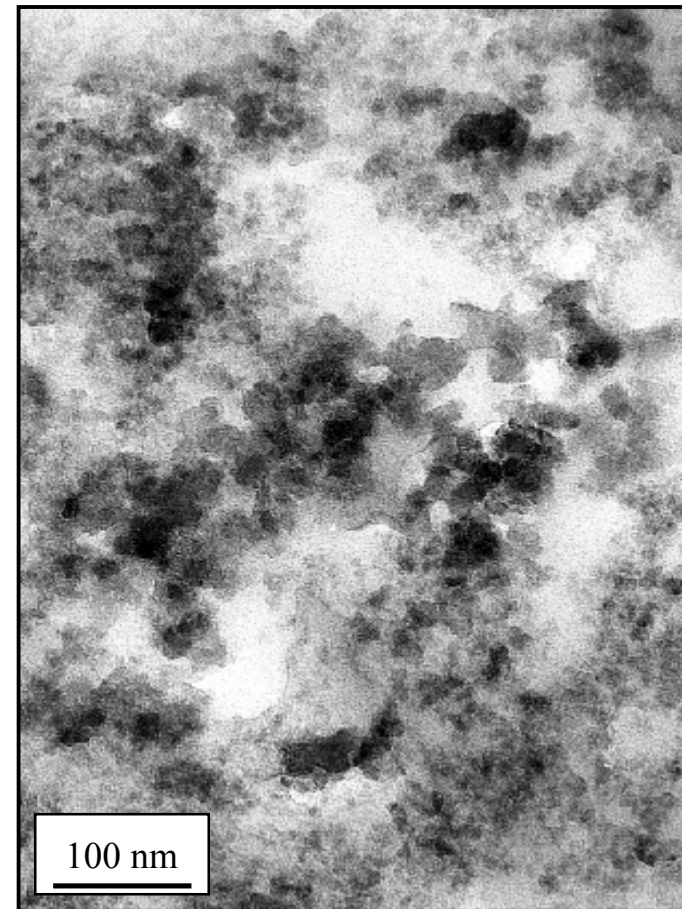
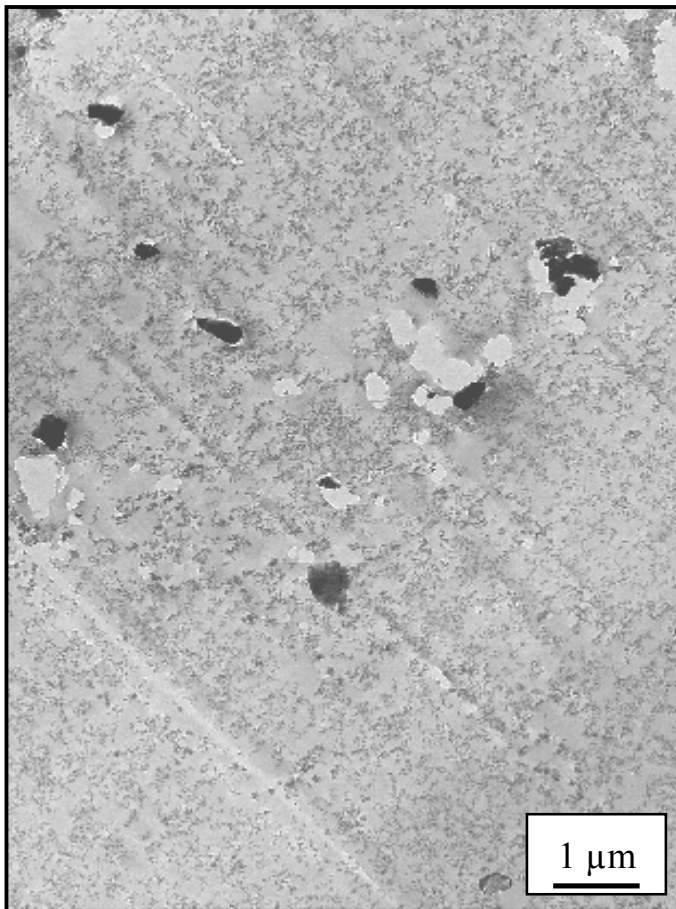


DESCRIPTION DE LA MICROSTRUCTURE DU MATERIAU A SES DEUX ECHELLES CARACTERISTIQUES



TRANSFERT RADIATIF : DEMARCHE DE MODELISATION

NOTION DE CONDUCTIVITE THERMIQUE RADIATIVE

hypothèse 1 : milieu optiquement épais : $\kappa_0 \gg 1$

hypothèse 2 : milieu à diffusion isotrope

$$\vec{q}_R = -\frac{4}{3} \left(\int_0^\infty \frac{1}{d} \frac{d(n^2 L^0(T))}{dT} dT \right) \vec{T}$$

conductivité thermique radiative (Rosseland) :

$$\begin{aligned} k^R(T) &= \frac{4}{3} \left(\int_0^\infty \frac{1}{d} \frac{d(n^2 L^0(T))}{dT} dT \right) d \\ &= \frac{16 n^2}{3} T^3 \quad \text{pour un MST gris} \end{aligned}$$



**PRISE EN COMPTE
DU CARACTERE SPECTRAL DES PROPRIETES RADIATIVES
ET DE L'ANISOTROPIE DU PHENOMENE DE DIFFUSION**

n et fonctions de :

$$R(T) = \frac{16}{3} n^2 T^3$$

$$R(T) = \frac{16}{3} \langle n^2 \rangle T^3 \quad \text{avec}$$

$$\langle n^2 \rangle = \frac{\int_0^\infty n^2 \frac{4 \exp \frac{h}{kT}}{\exp \frac{h}{kT} + 1} d}{\int_0^\infty \frac{4 \exp \frac{h}{kT}}{\exp \frac{h}{kT} + 1} d}$$

diffusion anisotrope du rayonnement thermique

[C. M. Chu *et al* , Trans. Antennas Propagation **AP-4** (1956) , 142-148] :

$$e = \langle \cos \theta \rangle \quad \text{avec} \quad \langle \cos \theta \rangle = \frac{\int_0^\pi \cos \theta P(\theta) d\theta}{\int_0^\pi P(\theta) d\theta}$$

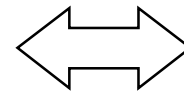
HOMOGENEISATION OPTIQUE ET RADIATIVE DU MILIEU MICROPOREUX



mélange hétérogène

{nano-particules + micro-particules + gaz}

$$\left(\begin{array}{l} \epsilon^i = (n^i - jk^i)^2, \\ \sigma^i = \epsilon^i \langle \cos^2 \theta \rangle^i \end{array} \right)$$

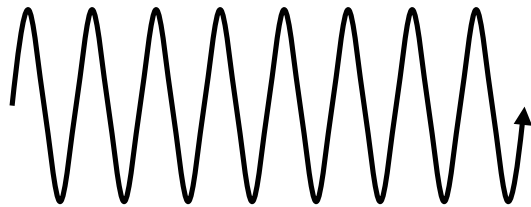


milieu homogène équivalent

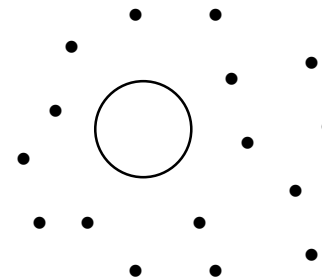
(n^H, k^H) : relation de Maxwell-Garnett généralisée $\left(\begin{array}{l} \epsilon^i \\ \sigma^i \end{array} \right)$

$$\epsilon^H = \sum_i \epsilon^i : \text{somme de sections efficaces}$$

CARACTERISTIQUES DE LA POPULATION DE DIFFUSEURS ET TYPE D'INTERACTION RAYONNEMENT-MATIERE (1/4)



rayonnement ()



plusieurs populations
de diffuseurs :
diamètre d^i
indice complexe $m^i()$
fraction volumique f_v^i

pour chaque population de diffuseurs ,

triplet caractérisant l'interaction rayonnement-matière :

- paramètre de taille $x^i() = \frac{d^i}{\lambda}$

- contraste d'indice complexe $|m^i() - 1|$

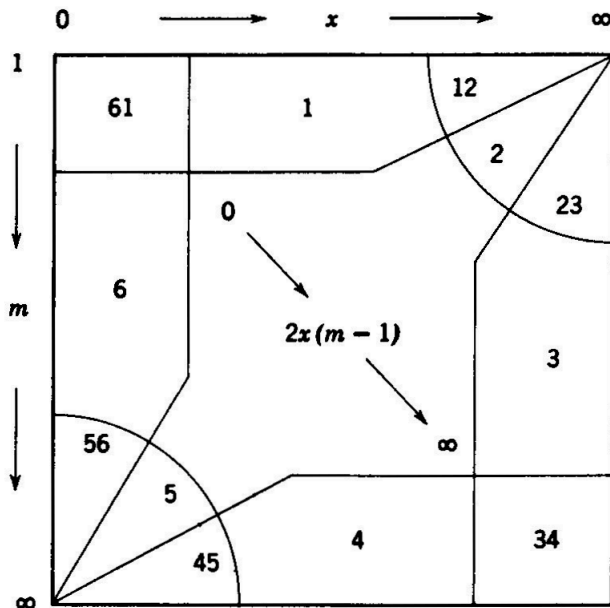
- fraction volumique f_v^i

CARACTERISTIQUES DE LA POPULATION DE DIFFUSEURS ET TYPE D'INTERACTION RAYONNEMENT-MATIÈRE (2/4)



type d'interaction rayonnement-matière
en fonction de la valeur du couple (x , m)

[H. C. van de Hulst , *Light Scattering by Small Particles* ,
Dover Publications , New York , 1981 , pages 132-133] :



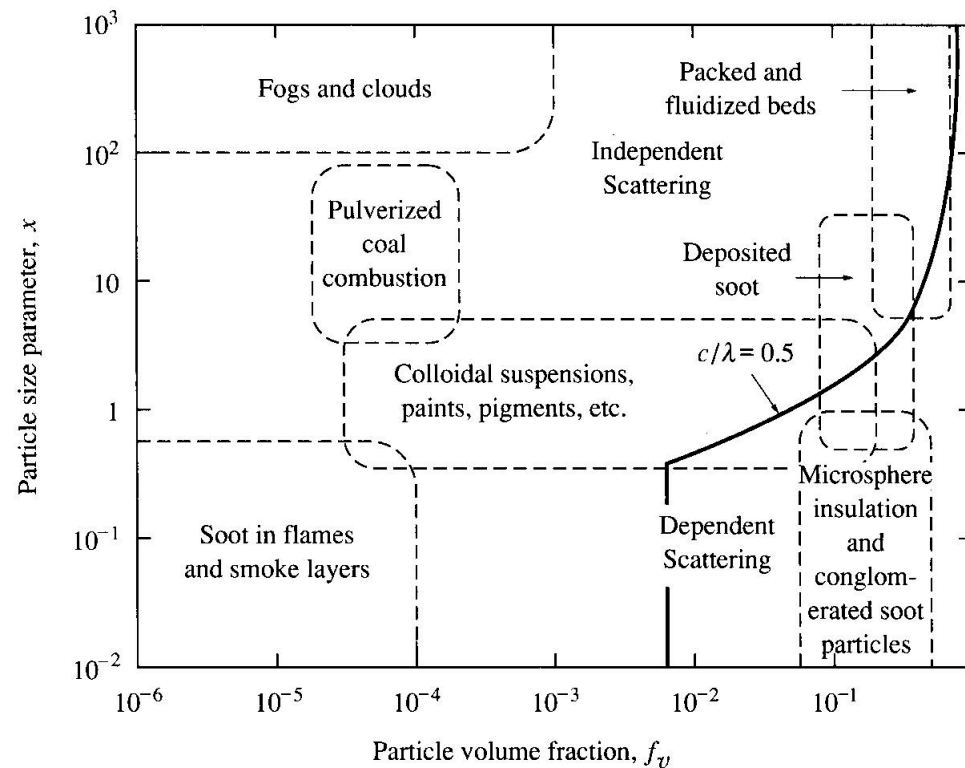
Region	x	$m-1$	$x(m-1)$	Chapter or Section	Extinction Formula
61	s	s	s		$Q = (32/27)(m-1)^2x^4$
1	arb	s	s	7.2 (Rayleigh-Gans)	
12	l	s	s		$Q = 2(m-1)^2x^2$
2	l	s	arb	11 (anomalous diffraction)	
23	l	s	l		$Q = 2$
3	l	arb	l	12 (large spheres)	
34	l	l	l		$Q = 2$
4	arb	l	l	10.6 (total reflector)	
45	s	l	l		$Q = (10/3)x^4$
5	s	l	arb	10.5 (optical resonance)	
56	s	l	s		$Q = (8/3)x^4$
6	s	arb	s	6.3 (Rayleigh scattering)	

CARACTERISTIQUES DE LA POPULATION DE DIFFUSEURS ET TYPE D'INTERACTION RAYONNEMENT-MATIERE (3/4)



caractère dépendant ou indépendant du phénomène
de diffusion en fonction de la valeur du couple (x, f_v)

[M. F. Modest , *Radiative Heat Transfer* ,
McGraw-Hill , New York , 1993 , page 385] :



CARACTERISTIQUES DE LA POPULATION DE DIFFUSEURS ET TYPE D'INTERACTION RAYONNEMENT-MATIERE (4/4)



interaction rayonnement (5 μm \blacklozenge 80 μm) - nano-particules de silice :

$\left\{ x \ll 1 ; |m - 1| \sim 1 ; f_v \sim 10\% \right\}$: **diffusion Rayleigh dépendante**

expressions analytiques de $\left(\begin{array}{c} \text{absorption} \\ \text{diffusion} \end{array} \right)$ et $\left(\begin{array}{c} \text{diffusion} \\ \text{absorption} \end{array} \right)$ pour 1 diffuseur ($\langle \cos \theta \rangle = 0$)

+ correction de Percus-Yevick pour gérer la diffusion dépendante

interaction rayonnement (5 μm \blacklozenge 80 μm) - micro-particules opacifiantes :

$\left\{ x \sim 1 \text{ ou } \ll 1 ; |m - 1| \text{ peut être grand } ; f_v \sim 1\% \right\}$

théorie générale de Mie ; diffusion faiblement dépendante indépendante

évaluations numériques de $\left(\begin{array}{c} \text{absorption} \\ \text{diffusion} \end{array} \right)$, $\left(\begin{array}{c} \text{diffusion} \\ \text{absorption} \end{array} \right)$ et $\langle \cos \theta \rangle$ pour 1 diffuseur

DOMAINE SPECTRAL D'INTERET POUR LE CALCUL DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE RADIATIVE (1/3)

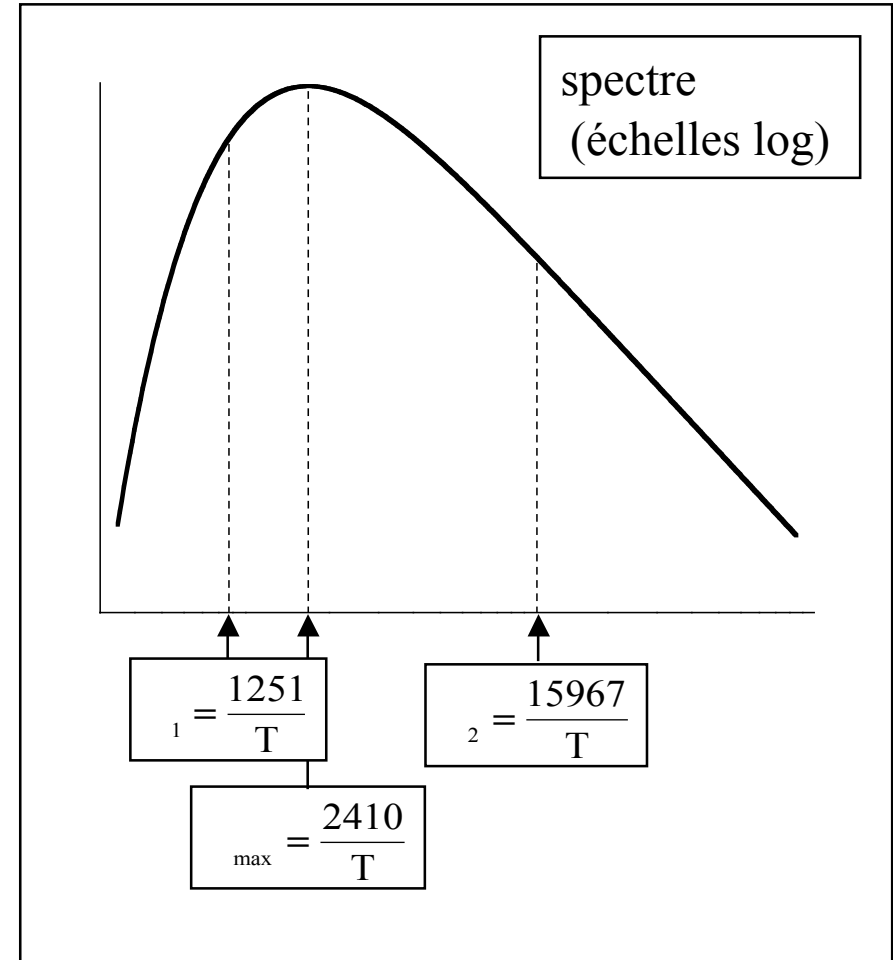


$$R(T) = \frac{16}{3} T^3 \frac{\int_0^{\infty} \frac{n^2 \exp\left(-\frac{C_2}{T\lambda}\right) d\lambda}{\exp\left(-\frac{C_2}{T\lambda}\right) + 1}}{\int_0^{\infty} \frac{\exp\left(-\frac{C_2}{T\lambda}\right) d\lambda}{\exp\left(-\frac{C_2}{T\lambda}\right) + 1}}$$

domaine spectral d'intérêt

$$= \frac{1251}{T} ; \frac{15967}{T} \quad (98\%)$$

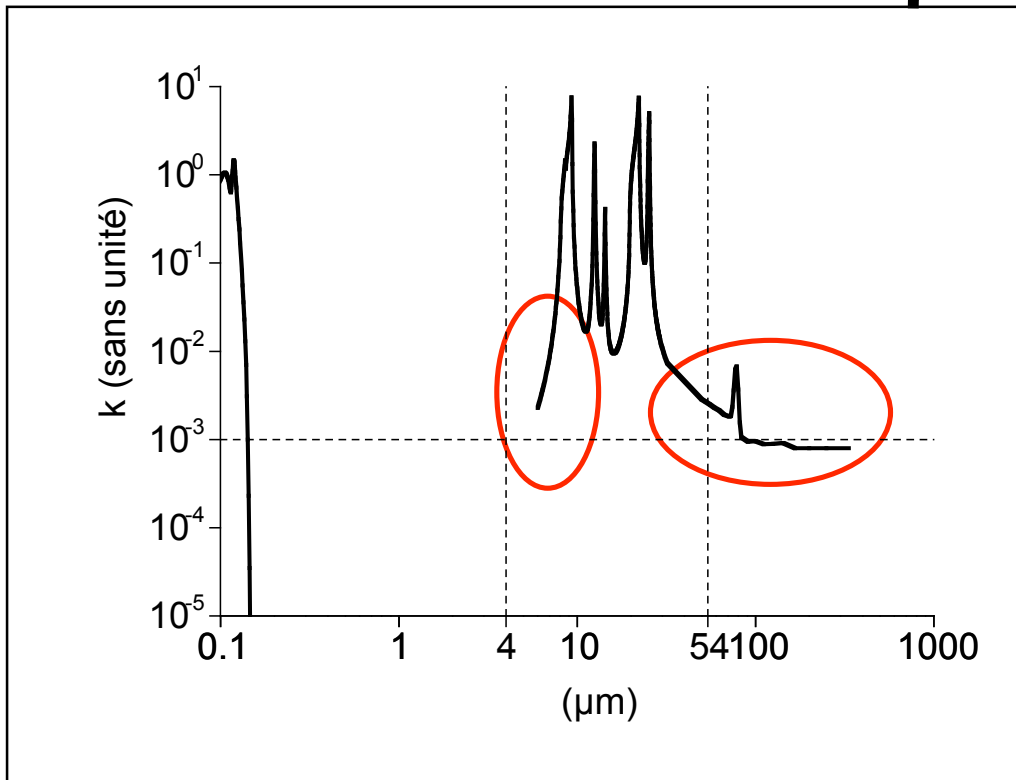
$$= \underline{4 \mu\text{m}} ; \underline{54 \mu\text{m}} \quad \text{pour } T = 300\text{K}$$



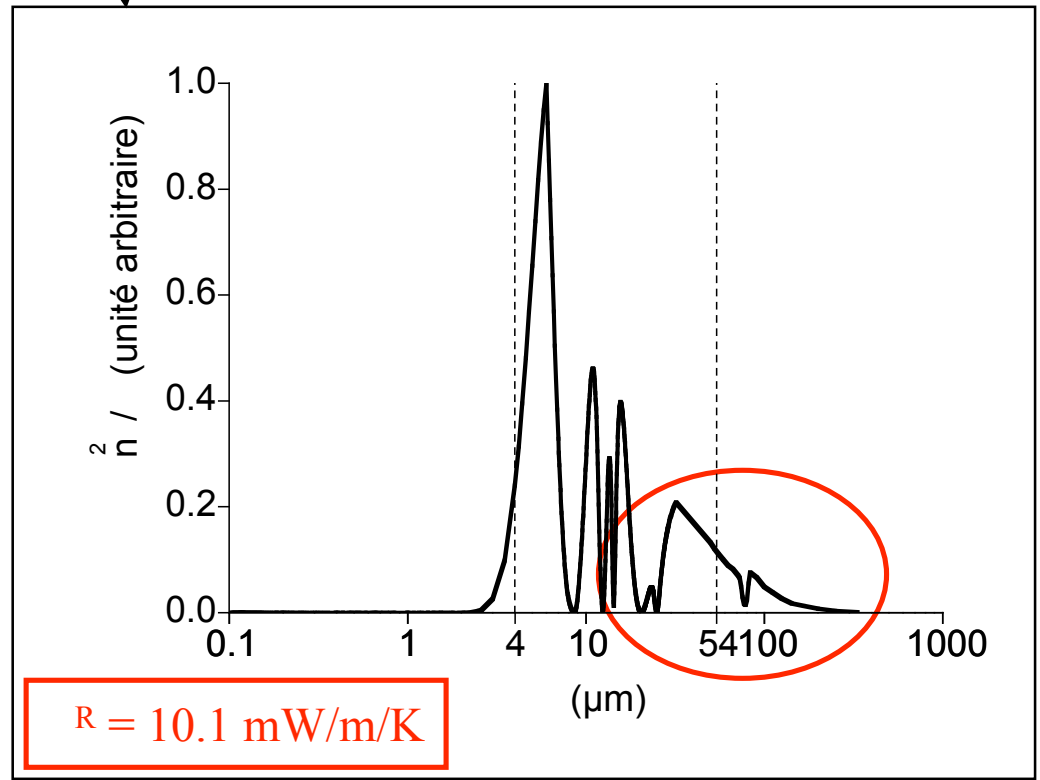
DOMAINE SPECTRAL D'INTERET POUR LE CALCUL DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE RADIATIVE (2/3) CAS DE SiO₂-quartz



spectre k de SiO₂-quartz



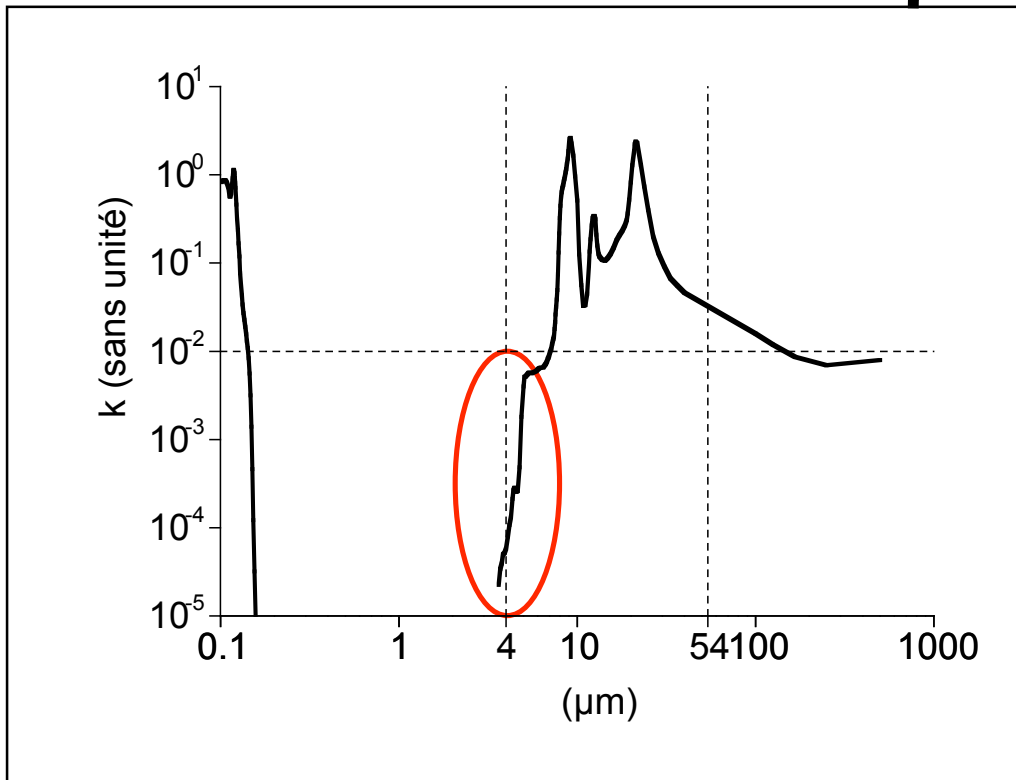
spectre n² / produit @ T = 300K par une population {SiO₂-quartz - d = 10 nm - f_v = 10%}



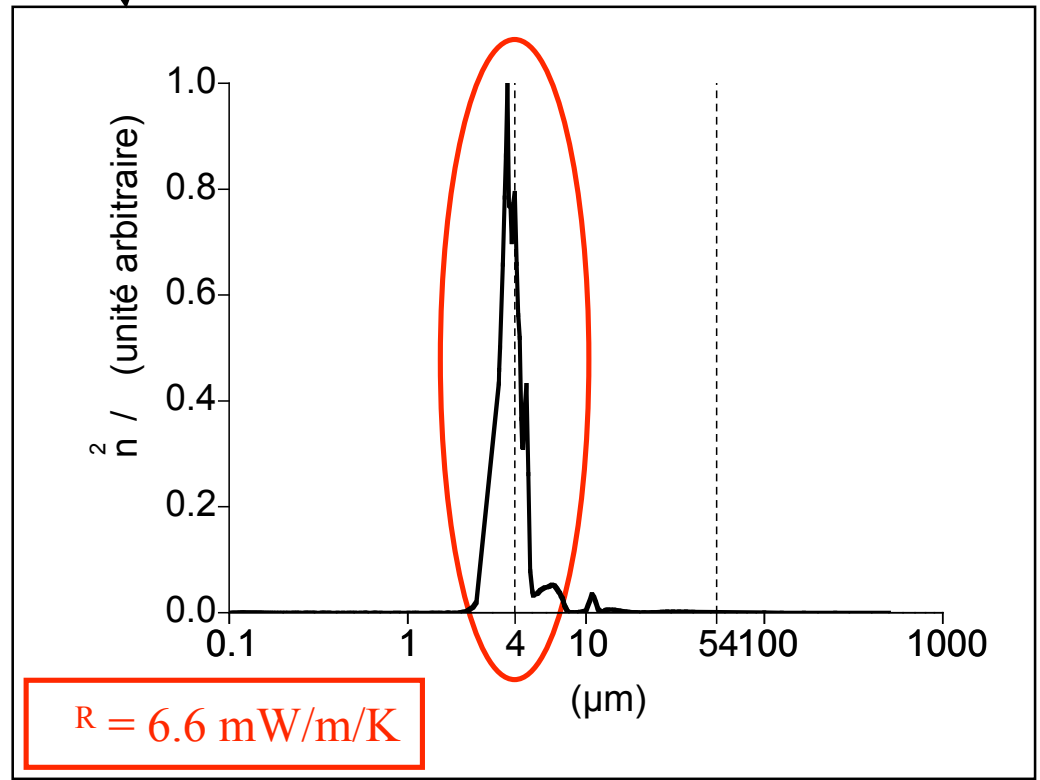
DOMAINE SPECTRAL D'INTERET POUR LE CALCUL DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE RADIATIVE (3/3) CAS DE SiO₂-amorphe



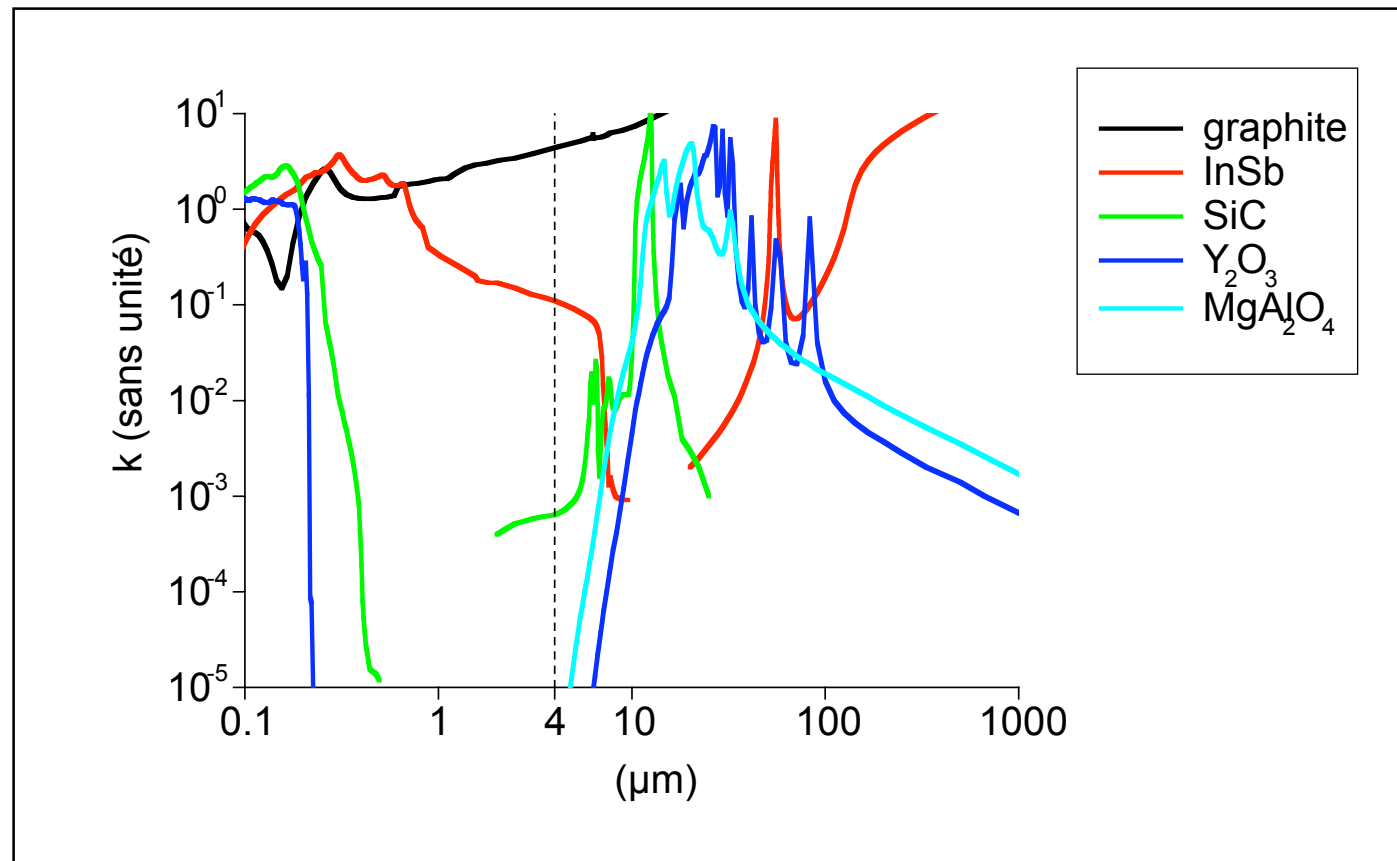
spectre k de SiO₂-amorphe



spectre $n^2 /$
produit @ T = 300K par une population
{SiO₂-amorphe – d = 10 nm – f_v = 10%}

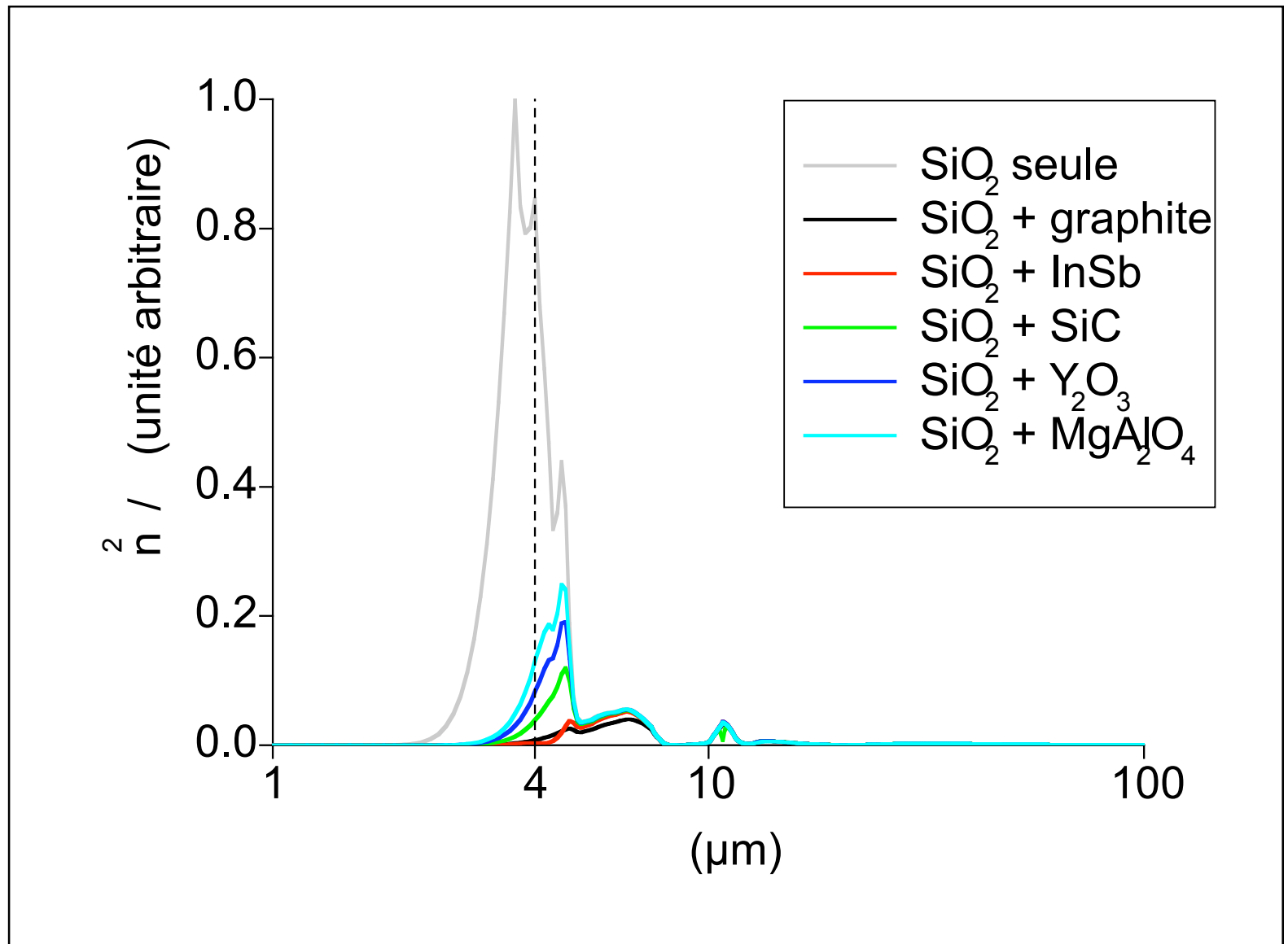


**SPECTRES D'INDICE D'EXTINCTION DE
DIFFERENTS MATERIAUX ENVISAGES COMME OPACIFIANTS**
[E. D. Palik , *Handbook of Optical Constants of Solids* ,
Academic Press , San Diego , 1998]





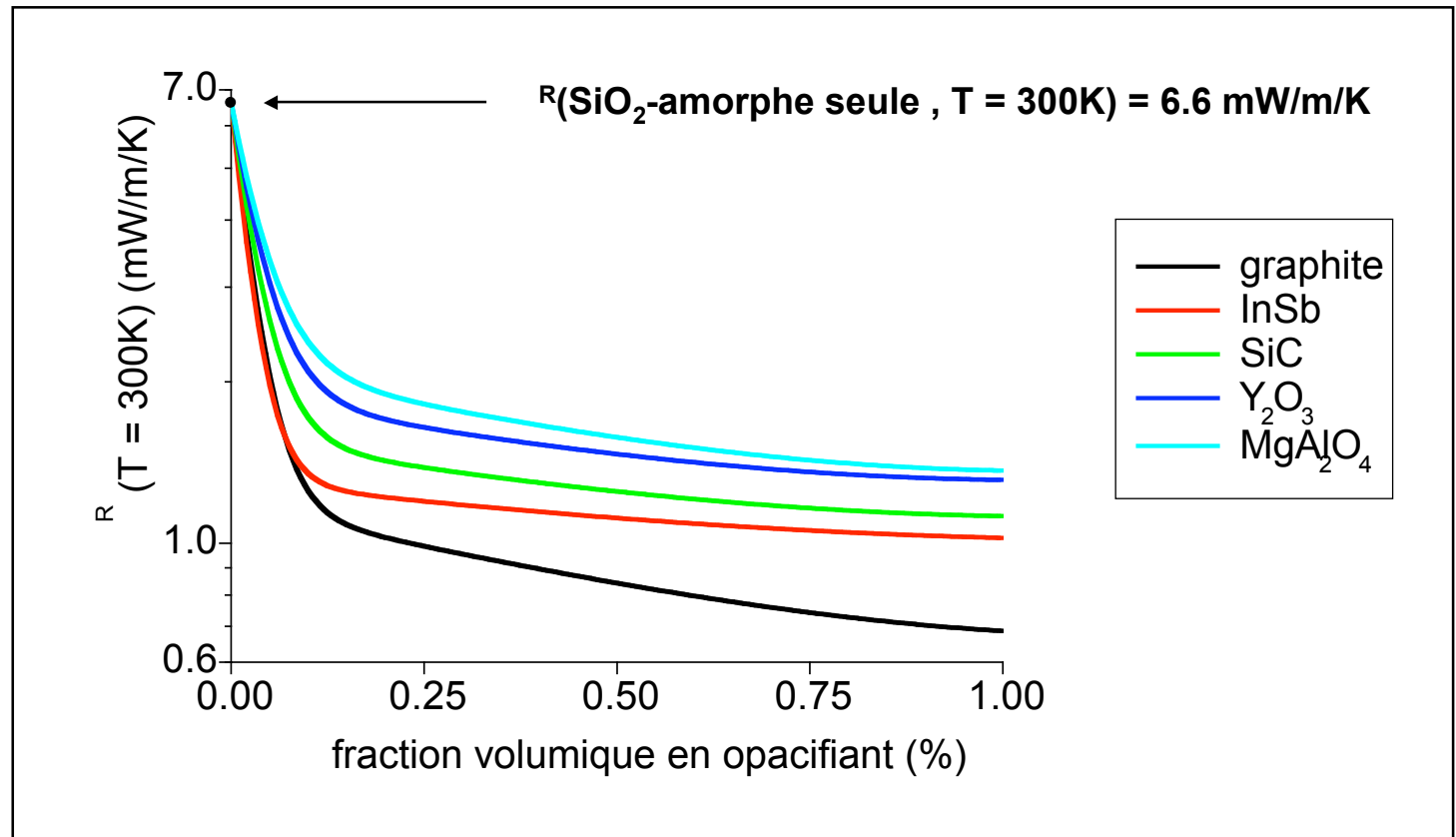
données :
nano-particules
de $\text{SiO}_2\text{-amorphe}$
($d = 10\text{ nm} - f_v = 10\%$)
+
micro-particules
d'opacifiant
de nature variable
($d = 1\ \mu\text{m} - f_v = 0.1\%$)



CONDUCTIVITES THERMIQUES RADIATIVES ISSUES DU MODELE « ROSSELAND NON GRIS DIFFUSANT »



données :
nano-particules
de SiO₂-amorphe
(d = 10 nm – f_v = 10%)
+
micro-particules
d'opacifiant
de nature variable
(d = 1 μm – f_v variable)

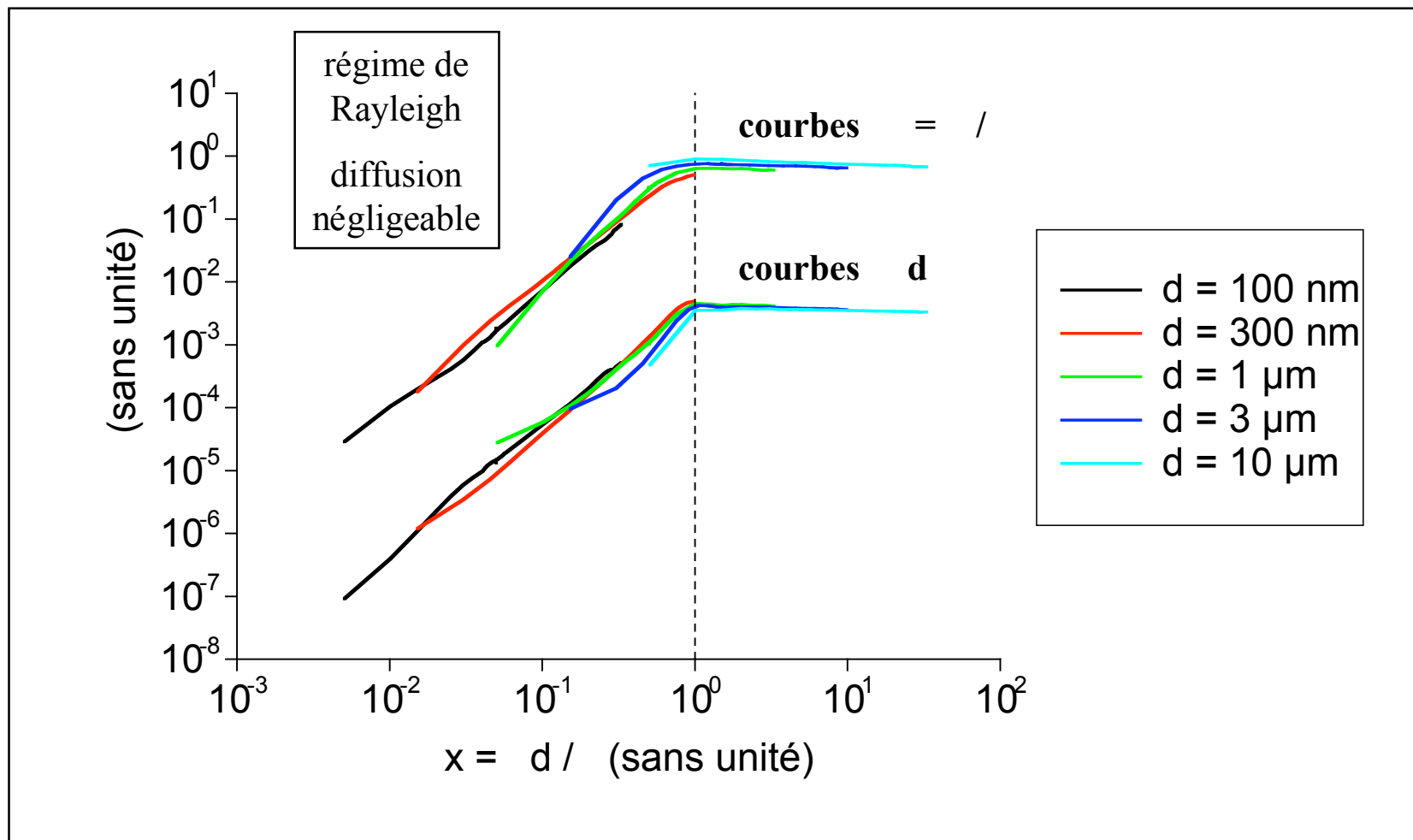


la présence d'un opacifiant à **une fraction volumique aussi faible que 0.1%**
peut se traduire par une chute sensible de la conductivité thermique radiative
hiérarchisation des opacifiants en terme de « blocage » des échanges radiatifs

IMPACT DU DIAMETRE DES PARTICULES DE GRAPHITE SUR L'INTERACTION RAYONNEMENT-MATIERE



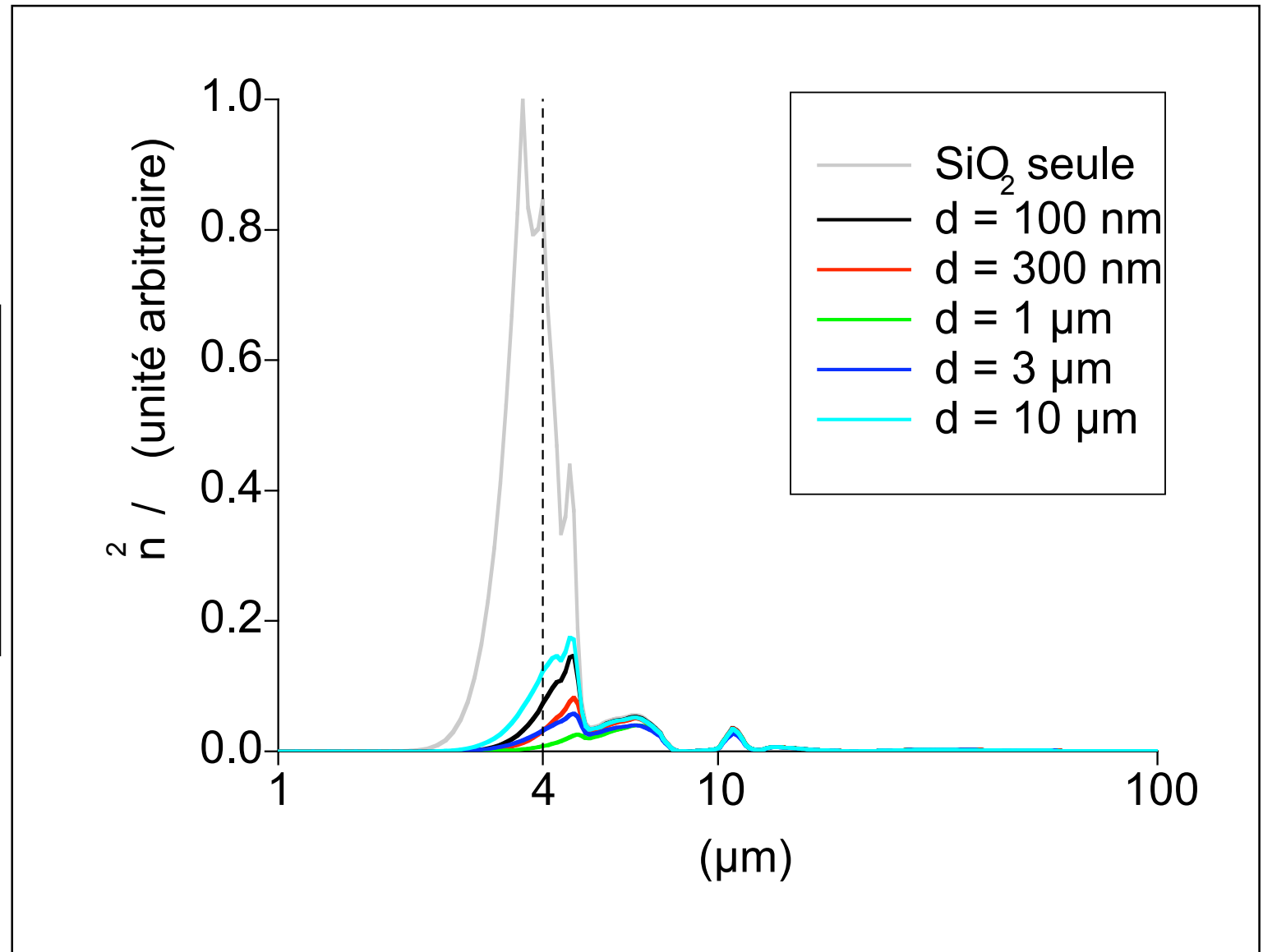
données :
particules
de graphite
(d variable –
 $f_v = 0.1\%$)



maximum pour **d minimum** et $x \approx 1$ *i.e.* $d \approx \frac{\pi}{4} \times 1 \mu\text{m}$ car traquée $4 \mu\text{m}$



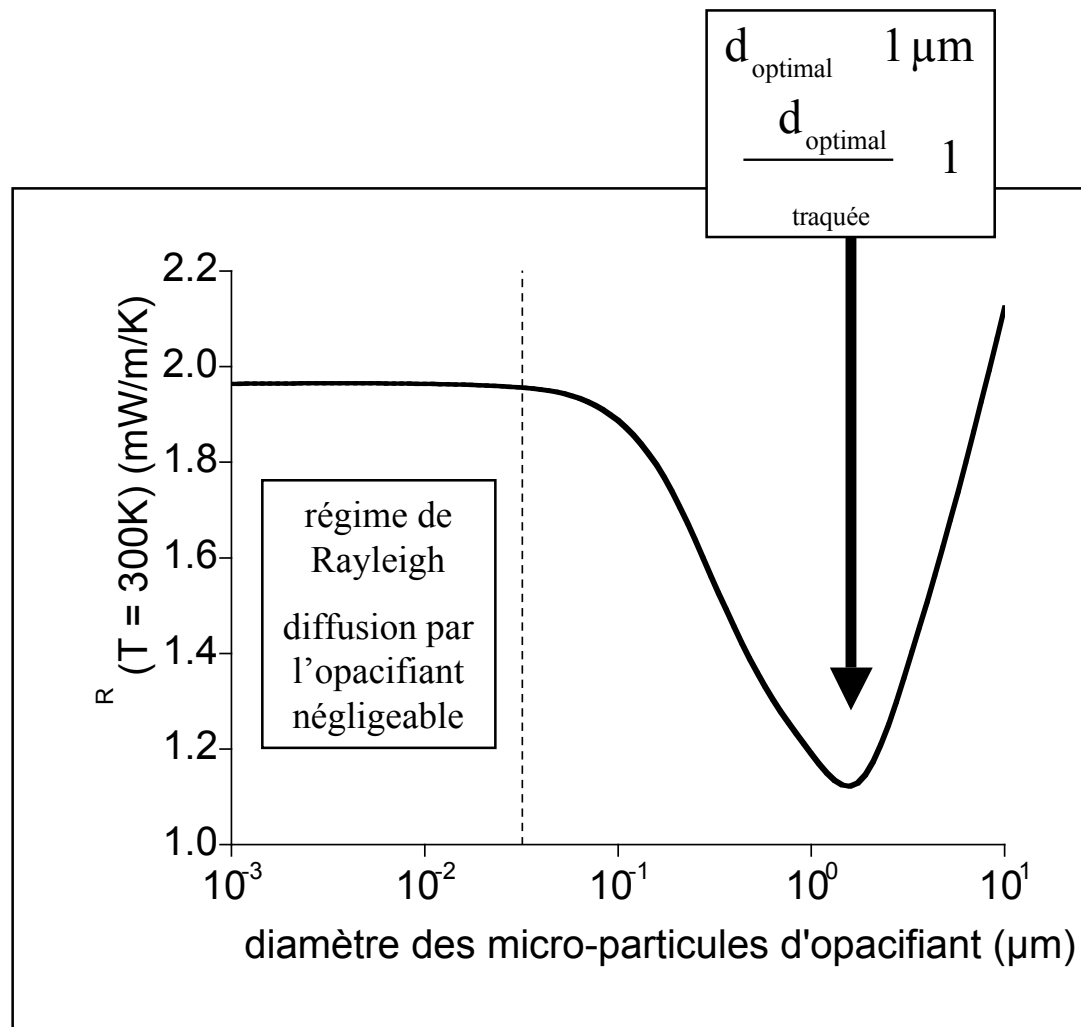
données :
nano-particules
de SiO₂-amorphe
($d = 10 \text{ nm} - f_v = 10\%$)
+
particules de graphite
(d variable – $f_v = 0.1\%$)



CONDUCTIVITES THERMIQUES RADIATIVES ISSUES DU MODELE « ROSSELAND NON GRIS DIFFUSANT »



données :
 nano-particules
 de SiO₂-amorphe
 (d = 10 nm – f_v = 10%)
 +
 particules de graphite
 (d variable – f_v = 0.1%)



LIMITATIONS ET QUESTIONS SOULEVEES PAR L'APPROCHE DE MODELISATION DECRITE CI-DESSUS



homogénéisation optique et radiative :

- **effet de taille sur la fonction diélectrique** () des nano-particules de SiO_2 (car $d \sim \bar{\ell}$ des phonons)
- **taille unique ou distribution de tailles** pour la population de nano-particules de SiO_2 ?
- **dépendance** de l'interaction rayonnement-matière (nano-particule / nano- ou micro- particule)
- **prise en compte des fibres** dans les propriétés radiatives d'ensemble

transfert radiatif en MST :

- MST non optiquement épais pour certaines valeurs de
- diffusion fortement anisotrope lorsque $d \sim$
- prise en compte des propriétés radiatives des frontières
- **couplage conduction - rayonnement** au lieu de l'approche R / phonique

approche ETR résolue en \diamond et \diamond
au lieu de l'approche Rosseland