

# Transferts de chaleur par rayonnement dans les matériaux composites micro et nanostructurés

Habilitation à diriger des recherches

Philippe Ben-Abdallah

Laboratoire de Thermocinétique UMR CNRS 6607



# Collaborations

- Vital Ledez, Karl Joulain (LET-Poitiers), Jean-Yves Dusquesnes (INSP-Paris), Sébastien Fumeron (LEMTA, Nancy), Cécile Reynaud (CEA-Saclay, projet ANR), Gilberto Domingues (LTN-Nantes), Michel Jezegou (LTN-Nantes)
- André Charette (Chicoutimi), Bo Ni (Shanghai), Nadine Aubry (Newark), Zhuomin Zhang (Atlanta)

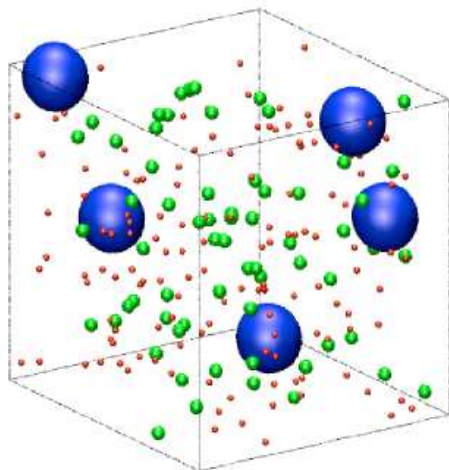
sans oublier :

- Maxim Palliy (Post-Doc), Jérémie Drevillon (Doc), Clément Le Goff (Doc)

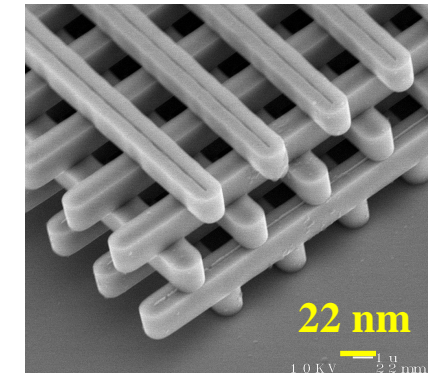
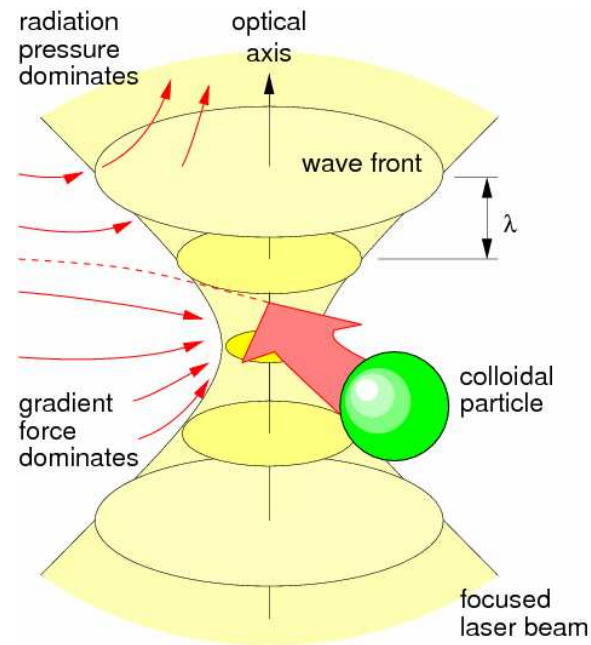
et tous ceux qui ont participé à ma réflexion...

# Activités de recherche :

## Manipulation optique



Nanocolloides

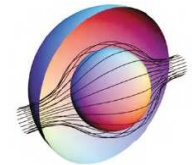


Nanocomposites  
(transferts radiatifs)

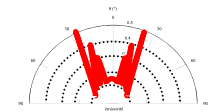
Transport de chaleur et de quantité de mouvement à l'échelle des corrélations spatiales ou temporelles des porteurs d'énergie

# Plan de l'exposé

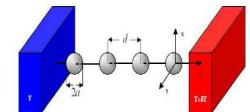
- Transferts radiatifs dans les matériaux à gradient de permittivité diélectrique



- Micro et nanostructures planes à émission thermique cohérente en champ lointain

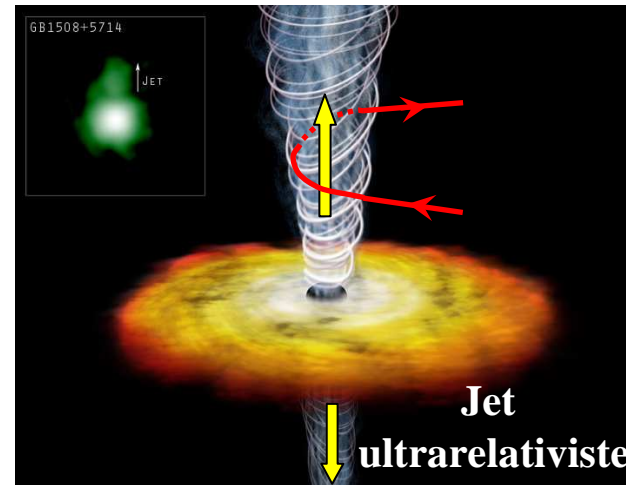


- Transferts de chaleur en champ proche par hybridation de plasmon de surface



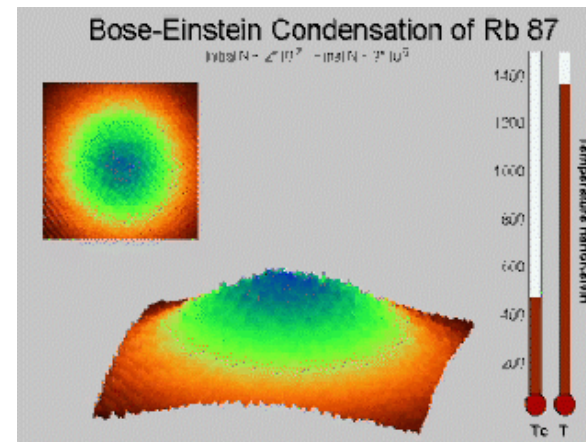
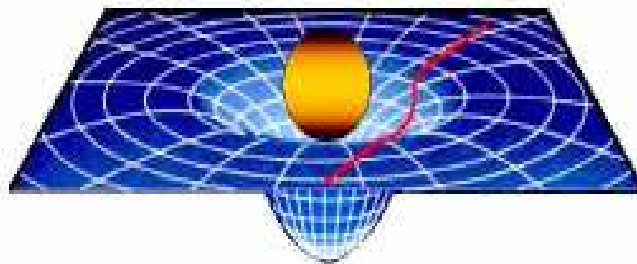
**Transfert radiatif**  
**dans les matériaux à**  
**gradient de permittivité diélectrique**

# Courbure des trajets optiques (phoniques) due à ...



un diélectrique en  
mouvement  
JQSRT 73, 2002  
JOSA 2001,2002

une déformation de l'espace-temps



un BEC  
ou un  
Superfluide  
JOSA B 18, 2001

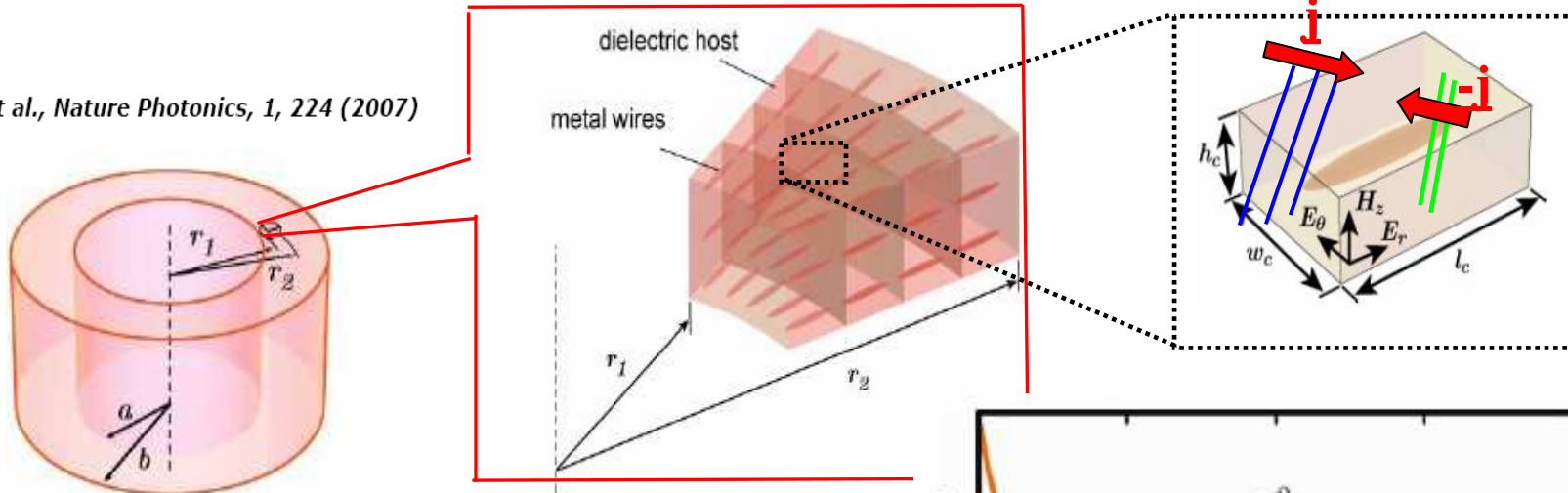
Etc...

Peut-on modeler les trajets optiques (lignes de flux) dans la matière ?

# Oui, il faut structurer la matière à échelle sub-longueur d'onde

Leonhard, Pendry et Schuring 2006...

Cai, et al., *Nature Photonics*, 1, 224 (2007)

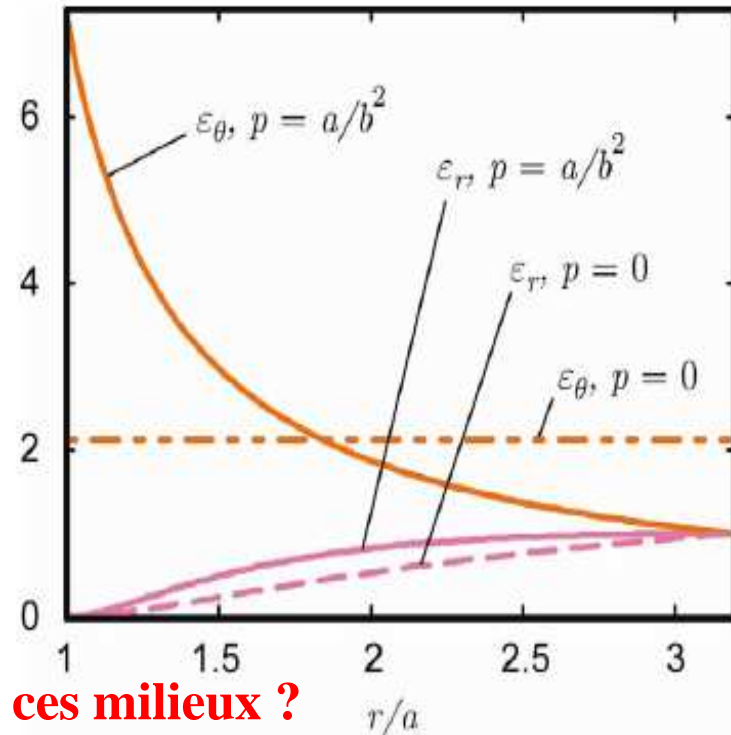


Permittivité effective (théorie de Bruggman) :

Facteur de remplissage

$$f(r) \frac{\epsilon_i - \epsilon_{eff}(\mathbf{j})}{\epsilon_i + \kappa \epsilon_{eff}(\mathbf{j})} + [1 - f(r)] \frac{\epsilon_h - \epsilon_{eff}(\mathbf{j})}{\epsilon_i + \kappa \epsilon_{eff}(\mathbf{j})} = 0$$

Écrantage du champ (lié aux électrons) :

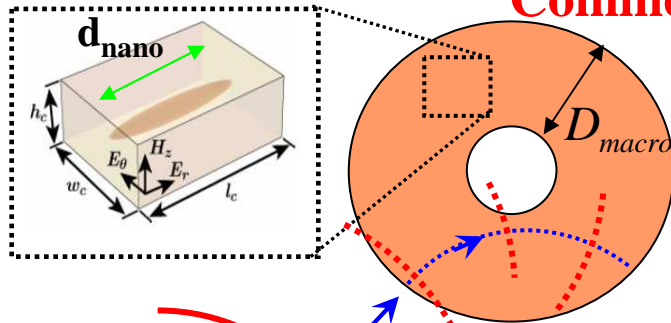


Comment se propagent les ondes dans ces milieux ?

# Géométrie effective (métrique) associée aux matériaux nanostructurés

## Comment se déforme le front d'onde ?

JOSA B,18, 2001



Equations de Maxwell dans un espace courbe :

$$\begin{cases} D_\alpha F_{\beta\gamma} + D_\beta F_{\gamma\alpha} + D_\gamma F_{\alpha\beta} = 0 \\ D_\beta F^{\alpha\beta} = 0 \end{cases}$$

Solution dans l'approximation de l'optique géométrique

$$(d_{nano} \ll \lambda \ll D_{macro})$$

$$F_{\alpha\beta} = A_{\alpha\beta} \exp[iS]$$



Relation de dispersion dans le milieu :

$$g^{00} \left(\frac{v_{phase}}{c}\right)^2 + 2g^{0\alpha} \frac{v_{phase}}{c} k_\alpha + g^{\alpha\beta} k_\alpha k_\beta = 0$$

Quadrivecteur d'onde :

$$K_\nu = \left(\frac{\omega}{c}, -\mathbf{K}\right) = -\partial_\nu S$$

Tenseur métrique :

$$g^{\mu\nu} = \text{diag}(\varepsilon_{eff}(j)/c^2, -1, -1, -1)$$

$$v_{phase}(\mathbf{j}) = \frac{\omega}{|\mathbf{K}|} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{eff}(\mathbf{j})}}$$

(modèle de Brugman)  
lorsque le milieu est  
faiblement dissipatif

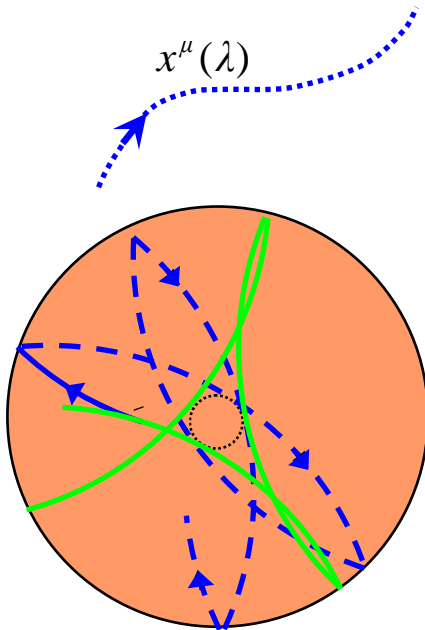


# Quelques propriétés optiques

Trajets optiques stationnaires (principe de Fermat)

$$\delta \left( \int g_{\mu\nu} \frac{dx^\mu}{d\lambda} \frac{dx^\nu}{d\lambda} d\lambda \right) = 0$$

Applied Optics 2001  
JQSRT 73, 2002



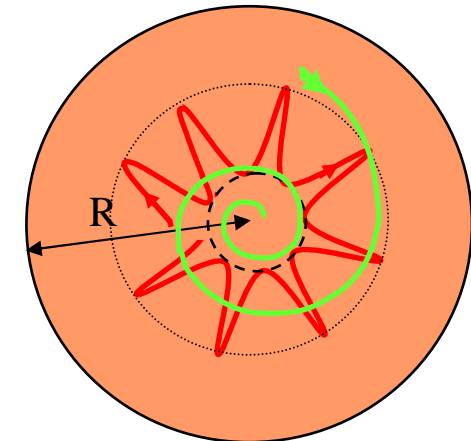
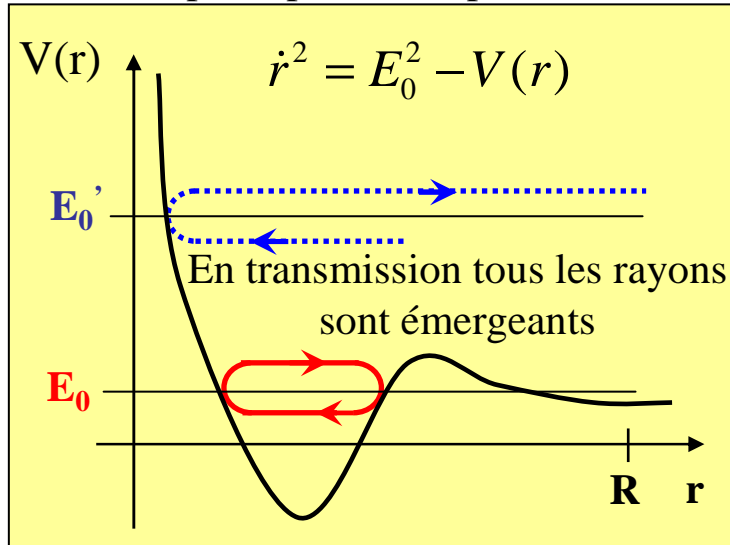
Trajets émergents

(courbure tournée vers les indices effectifs les plus petits)



Interaction directe des photons avec l'environnement

Trajectoires de particules de masse unité dans un potentiel de force  $1/2V(r)=f(\epsilon_{\text{eff}})$  (principe de Maupertuis)



Trajets confinés

(piégeage ou confinement)



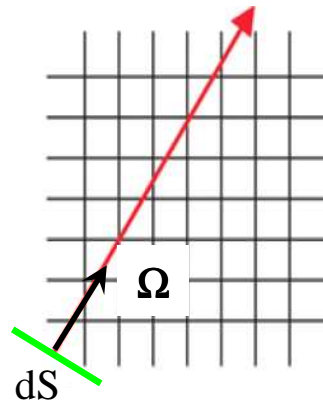
Pas d'échange direct avec l'environnement

**Bilan radiatif ?**

# Transfert radiatif dans un matériau nanostructuré non dissipatif

JOSA B,18, 2001

Milieu homogène :



Invariant géodésique :

$$I_\nu(\mathbf{x}, \boldsymbol{\Omega}) = \frac{h\nu N(\mathbf{x}, \boldsymbol{\Omega}, \nu)}{d^2 S dt d\nu d\Omega}$$

$$\frac{N(\mathbf{x}, \boldsymbol{\Omega}, \nu)}{d^6 V} = cte \text{ (Liouville)}$$

$$\text{avec } d^6 V = \left(\frac{h}{c}\right)^3 \nu^2 d\nu d\Omega d^2 S dt$$

Clausius classique :

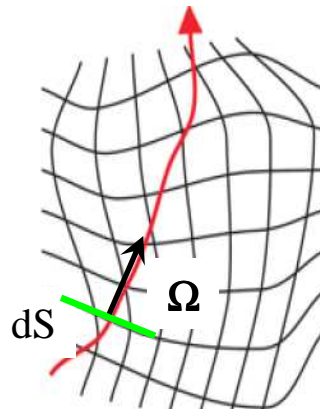
$$\frac{I_\nu(\mathbf{x}, \boldsymbol{\Omega})}{\nu^3} = cte$$

dilatation :

$$\mathbf{x}' = \mathbf{x}$$

$$t' = n_g^2 t$$

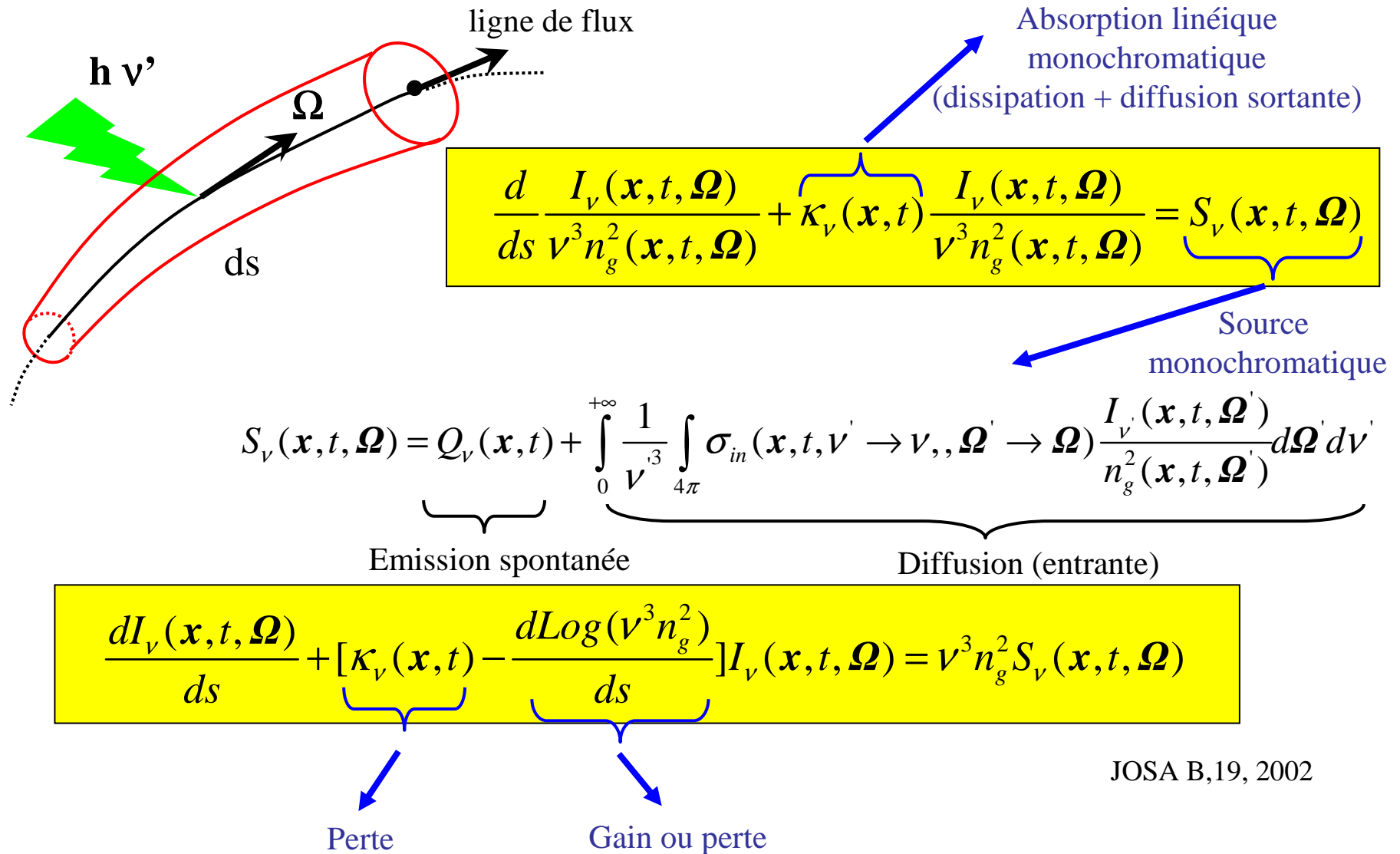
Milieu hétérogène :



Clausius généralisée :

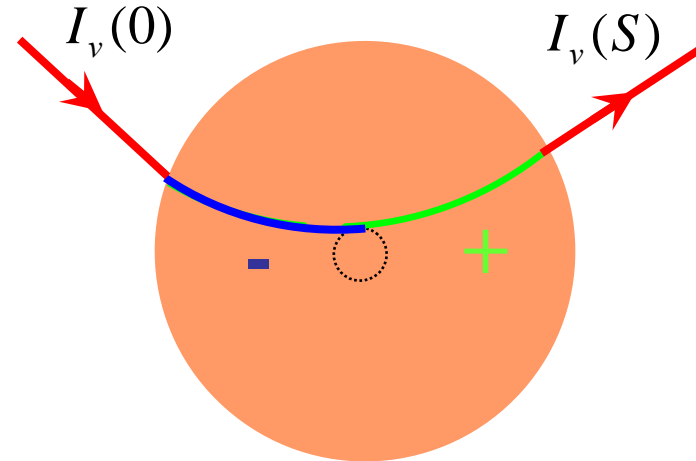
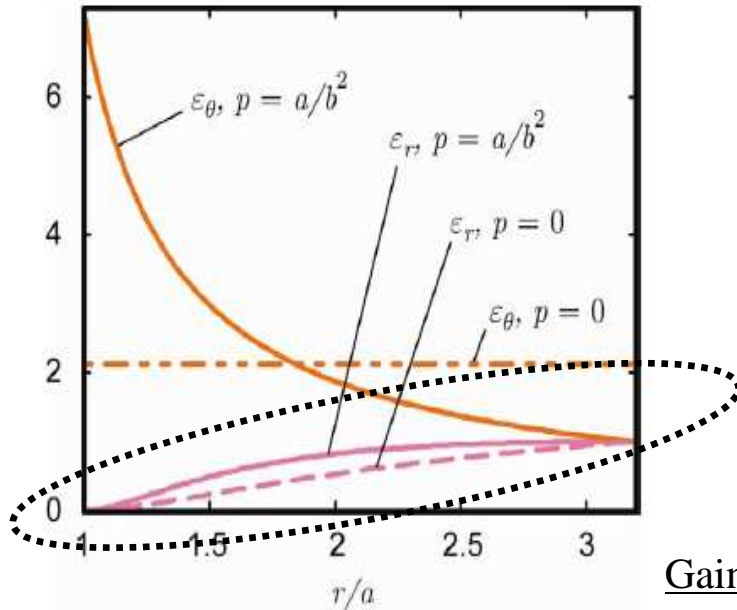
$$\frac{I_\nu(\mathbf{x}', \boldsymbol{\Omega})}{n_g^2 \nu^3} = cte$$

# Transfert radiatif dans un matériau nanostructuré participant



# Effet de lentille

JOSA B,19, 2002



Gain de luminance :

$$G(s) = \frac{I_v(s)}{I_v(0)} = G_a G_g$$

Cet effet persiste en présence de diffraction  
JQSRT 78, 2003

$$G_a = \exp\left(-\int_0^s \kappa_v d\tau\right) < 1$$

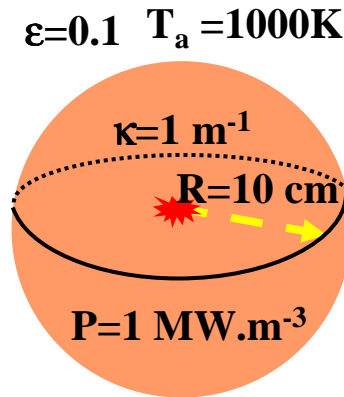
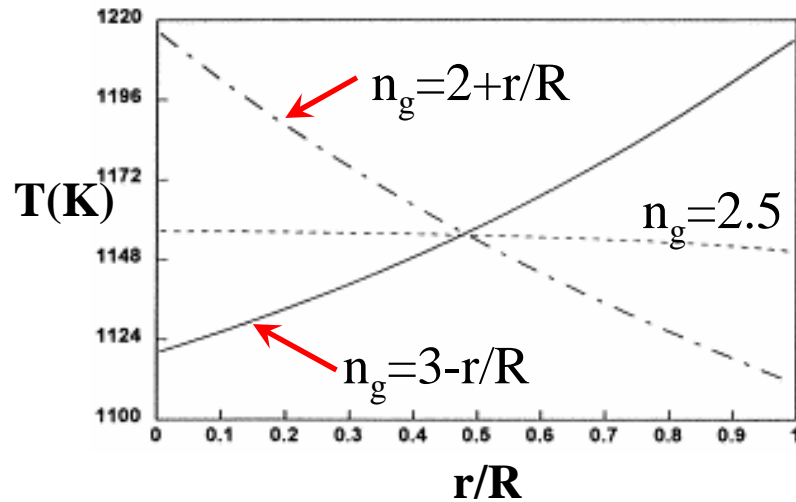
Atténuation classique

$$G_g = \frac{\nu^3 n_g^2}{\nu_0^3 n_{g0}^2} = \exp\left(\int_0^s \frac{d \log(n_g^2 \nu^3)}{d\tilde{s}}\right) d\tau$$

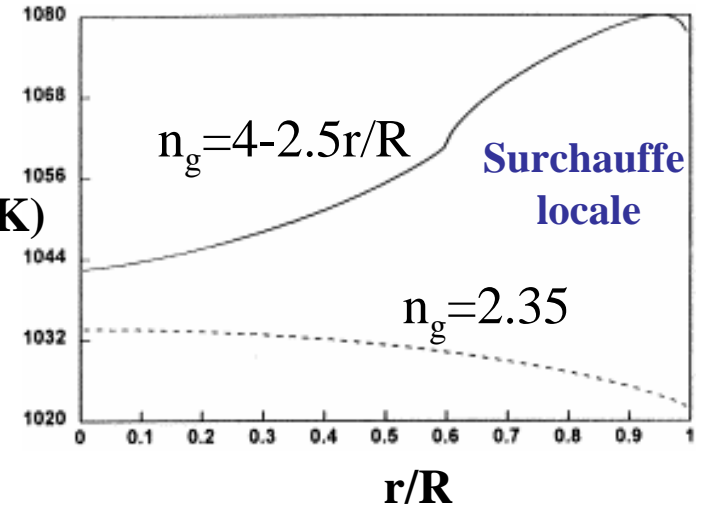
Gain géométrique

Pas de création d'énergie , ouf !!

# Conséquences thermiques : champ de température



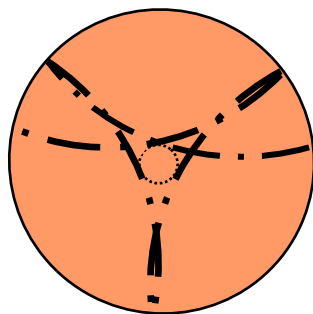
JQSRT, JHT, Applied Optics 2000-2001



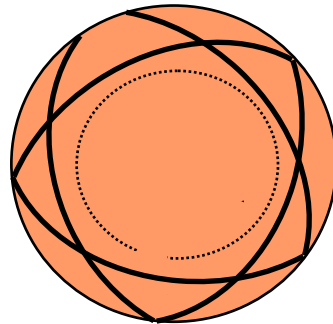
$$\text{div}(\mathbf{q}_r) + P = 0$$

$$\text{div}(\mathbf{q}_r) = \kappa(r) \left[ 4n^2(r) \sigma T^4(r) - \int_{\Omega=4\pi} I(r, \boldsymbol{\Omega}) d\boldsymbol{\Omega} \right]$$

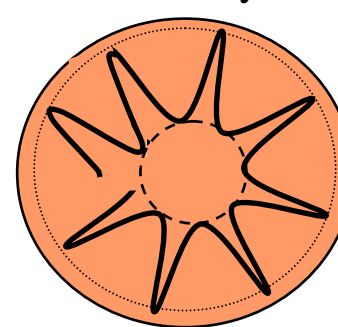
Résolution de l'ETR par lancer de rayon



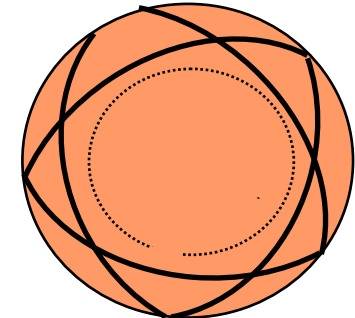
$n_g = 2 + r/R$



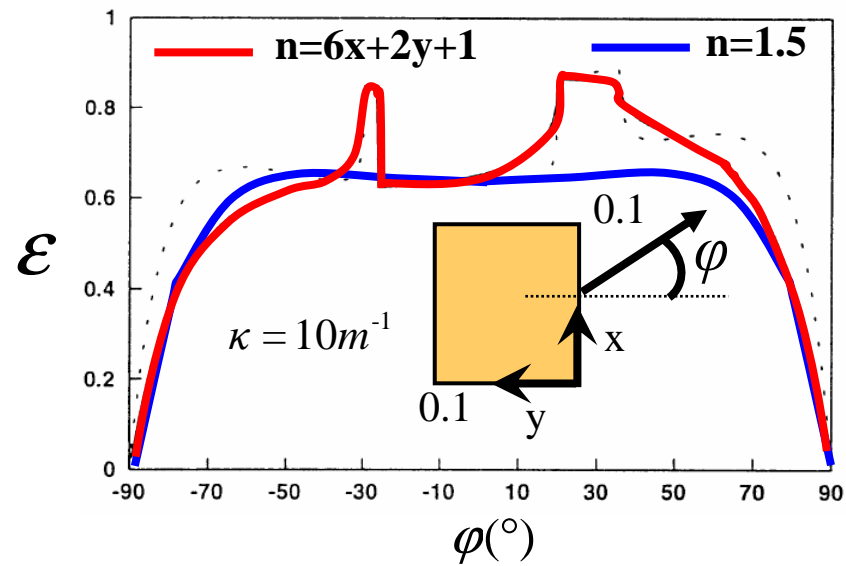
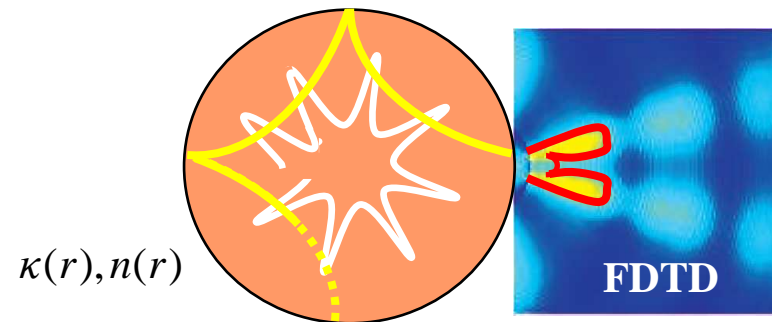
$n_g = 3 - r/R$



$n_g = 4 - 2.5r/R$



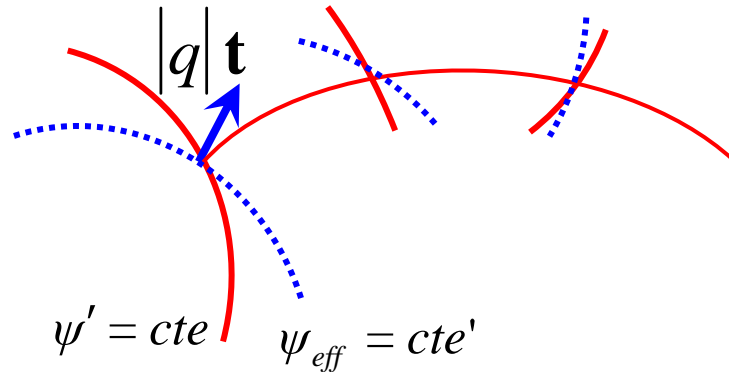
# Conséquences thermiques : émission cohérente



JQSRT Vol. 66 et 67, 2000  
Applied Optics 39, 2000

# Diffraction en théorie de champs scalaires

Corrélations spatiales du champ et absorption  $\rightarrow$  Diffraction



$$\Delta u + k_0^2 (n + ik)^2 u(r) = 0$$

$$u(\mathbf{r}) = \sum_{m=0}^M \frac{A_m(\mathbf{r})}{(ik_0)^m} \exp(ik_0 \psi(\mathbf{r})) + O\left(\frac{1}{k_0^{M+1}}\right)$$

$$\begin{aligned} (\nabla \psi)^2 &= [n(r) + ik(r)]^2 \\ 2(\nabla A_0 \cdot \nabla \psi) + A_0 \Delta \psi &= 0 \\ 2(\nabla A_1 \cdot \nabla \psi) + A_1 \Delta \psi &= -\Delta A_0 \\ \dots & \\ 2(\nabla A_m \cdot \nabla \psi) + A_m \Delta \psi &= -\Delta A_{m-1} \end{aligned}$$

Kravtsov et al. (1999)

$$\mathbf{q} \equiv \frac{i}{k_0} [u \nabla u^* - u^* \nabla u]$$

$$\mathbf{q} = \underbrace{2 \exp(-2k_0 \psi'') |A_0|^2 \nabla \psi'}_{\text{optique géométrique}} + \underbrace{\frac{2}{k_0} \exp(-2k_0 \psi'') [(A_0' \nabla A_0'' - A_0'' \nabla A_0') + 2(A_0' A_1'' - A_0'' A_1') \nabla \psi']}_{\text{diffraction}} + \dots$$

optique géométrique

diffraction

$$\mathbf{q}^\infty \nabla \psi_{eff} \rightarrow n_{eff} = |\nabla \psi_{eff}|$$

# Quelques perspectives...

- Ingénierie du champ proche et étude des effets de cohérence

$$A^\alpha = \int G_{\beta}^{\alpha}(x, x') j^{\beta}(x') \sqrt{-\det g} d^4 x'$$

Potentiel vecteur

Densité de courant

Electrodynamique fluctuacionnelle  
mais dans un espace courbe

- Réponse optique :  $g^{\mu\nu} \nabla_{\mu} \nabla_{\nu} A^{\mu} - R_{\nu}^{\mu} A^{\nu} = -4\pi j^{\mu}$  (équation des ondes)

- Corrélations spatio-temporelles des champs:  $\langle E(\mathbf{x}, t), E^*(\mathbf{x}', t') \rangle$  (interférométrie)

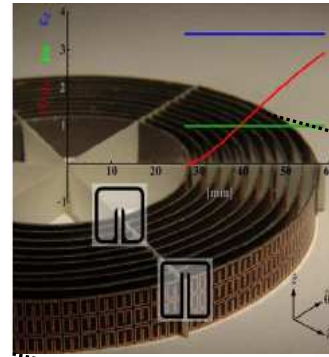
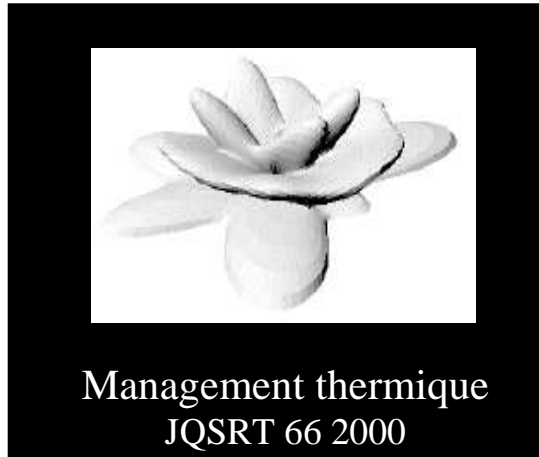
- Flux de chaleur :  $\Pi_{\infty} \int \int G(x, x') \langle j(\mathbf{x}), j^*(\mathbf{x}') \rangle dx dx'$

- Introduction d'une torsion par brisure de symétrie

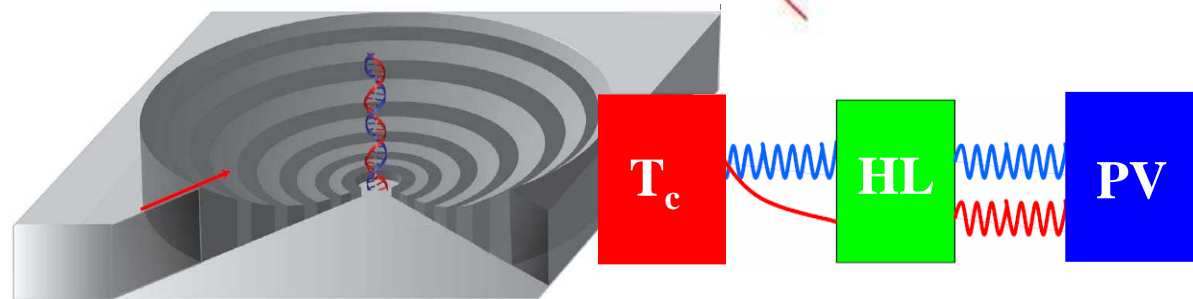
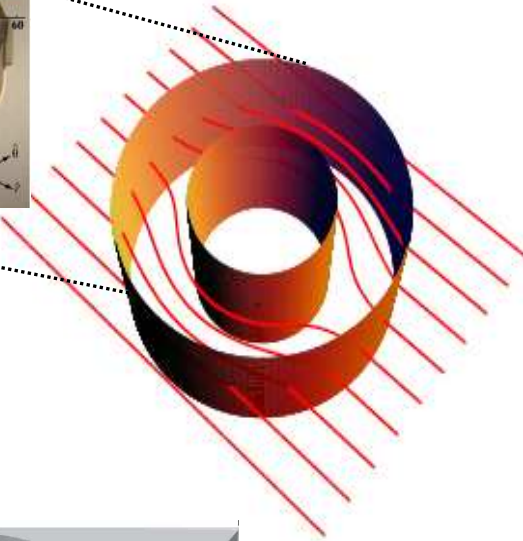
- Augmenter la cohérence spatiale en champ lointain



# ...et des applications potentielles



Leonhard, Pendry, Schurig et al.  
Science 2006  
« cape d'invisibilité »



Hyperlentille  
(Narimanov et al. Opt. Express 2006) :  
Imagerie en champ lointain  
d'objets sub-longueur d'onde

Conversion TPV  
de champ proche

**Micro et nanostructures planes à  
émission thermique cohérente en  
champ lointain**

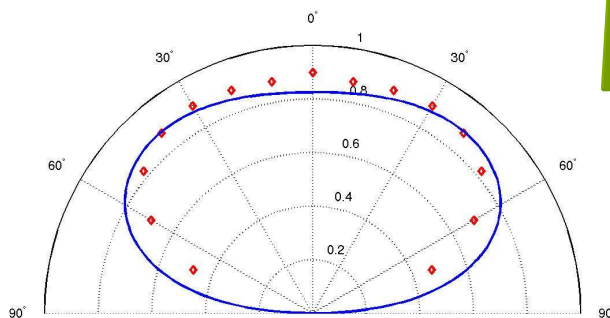
# Contrôle directionnel de l'émission thermique

## Lien entre directivité et cohérence spatiale

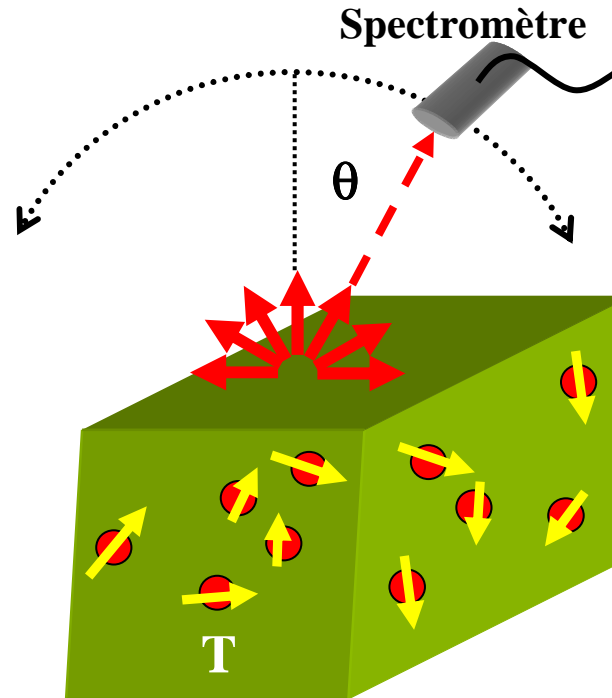
*Jusqu'en 2002*



*Lampe à incandescence*



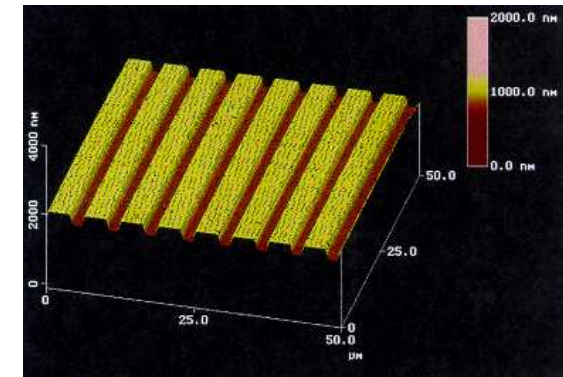
*Emission quasi-isotrope  
(Lambertienne)*



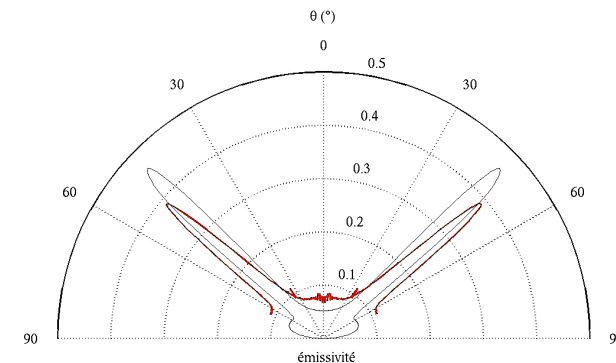
**Agitation thermique**



**Les porteurs de charge rayonnent**



*Réseau de surface  
Greffet et al. Nature 416 (2002)*

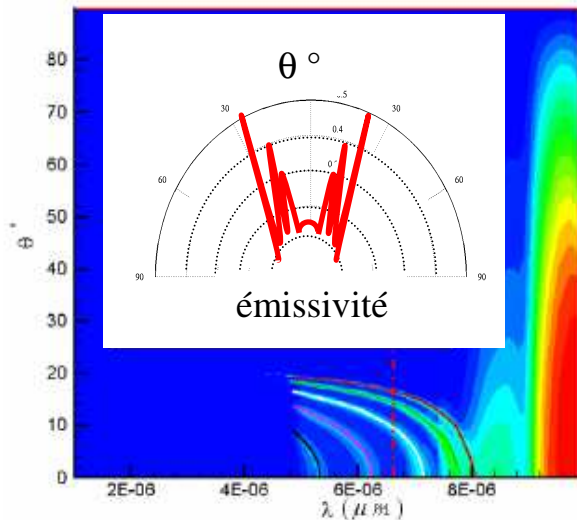
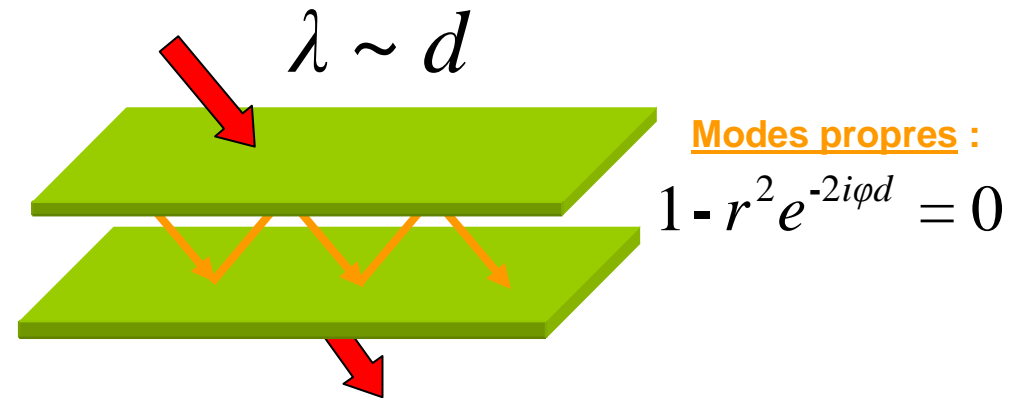
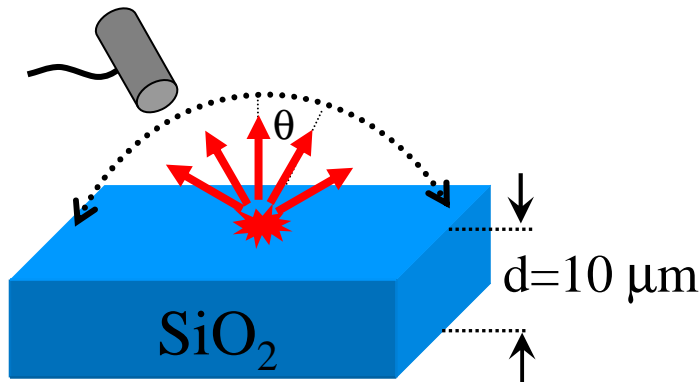


*Comportement en antenne  
en polarisation p seulement*

**Peut-on concevoir une véritable antenne thermique?**

# Contrôle directionnel de l'émission thermique

Film mince  $\leftrightarrow$  Cavité de type Fabry Péro



Emissivité :  $\varepsilon_{\lambda}(\theta)_{\infty} \frac{g_{\lambda}(\theta)}{|1 - r^2 e^{-2i\phi d}|}$

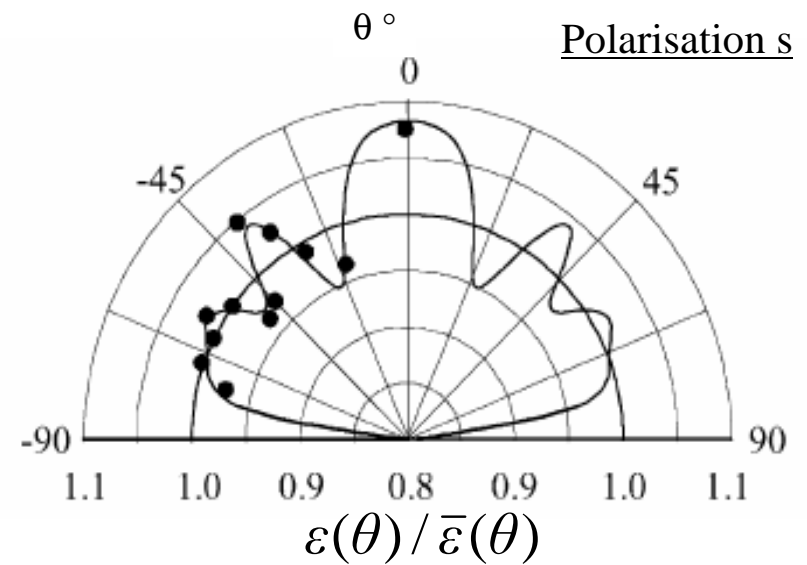
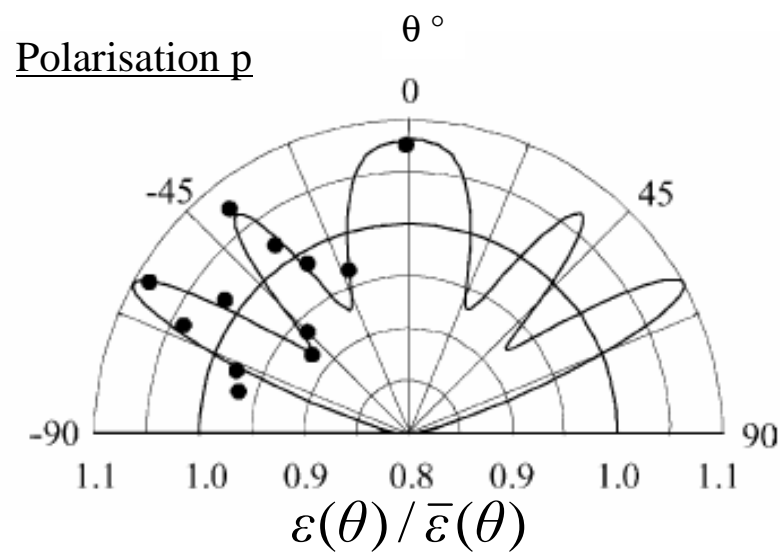
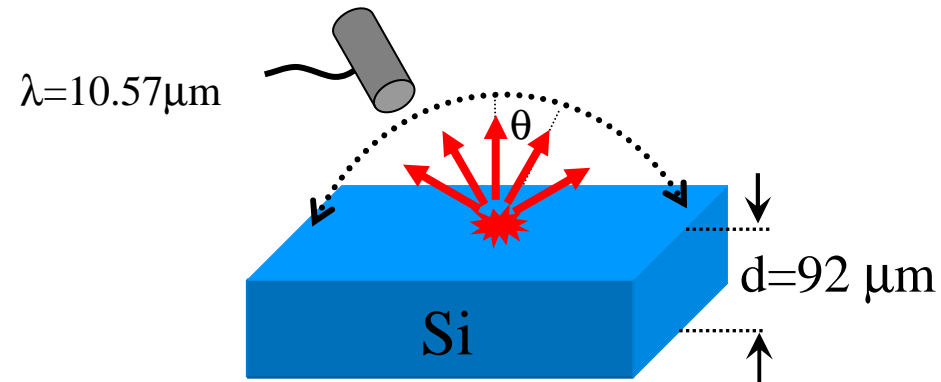
*Multiréflexions  $\rightarrow$  Interférences*

Lobes d'émission :  $\sin^2 \theta_{1m} \approx \Re \left\{ \frac{1}{\varepsilon_1} \left[ \varepsilon_2 - \left( \frac{\pi m}{dk_0} \right)^2 \right] \right\}$

*JOSA A 21 (2004) théorie*

**Multicouche = structure d'interférences plus complexe**

# Contrôle directionnel de l'émission thermique



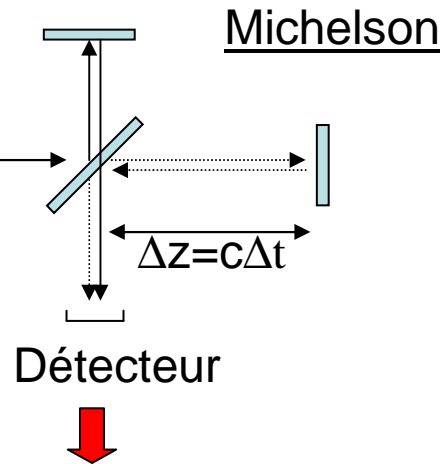
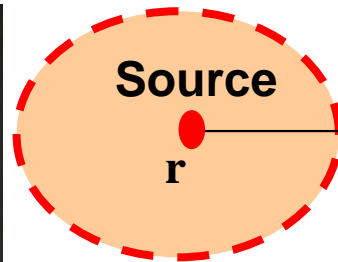
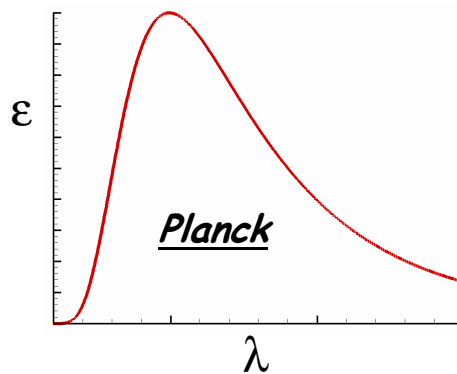
*KOLLUKH et al. Opt. Com. (2003) expérience*

# Contrôle spectral de l'émission thermique

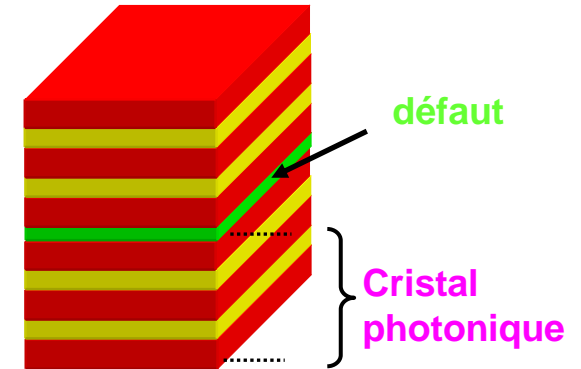
## Lien entre largeur du spectre et cohérence temporelle



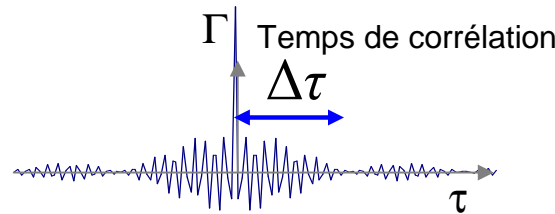
Lampe à incandescence  
(spectre à large bande)



$$\Gamma(\tau=t_1-t_2) \equiv \langle E(r, t_1) \times E^*(r, t_2) \rangle$$

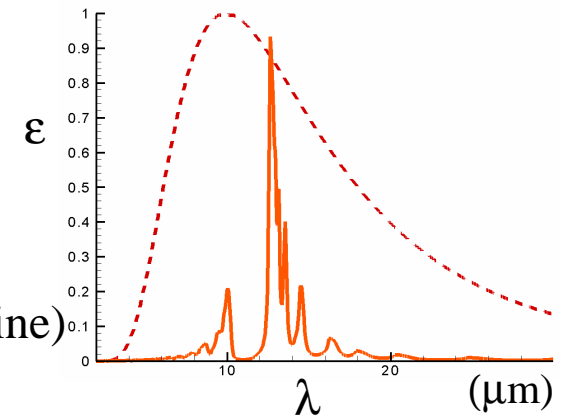


PBA et Ni, JAP 97 (2005)



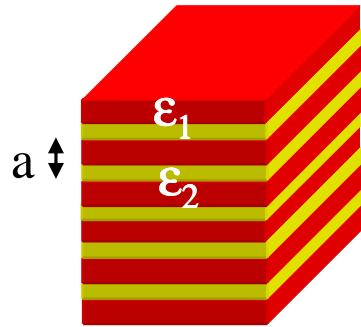
↓ (Wiener-Khintchine)

$$\Delta\tau\Delta\nu = 1$$



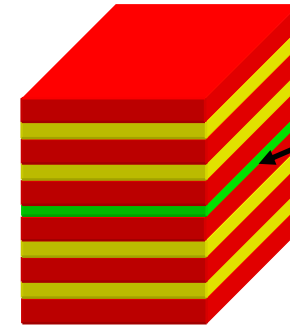
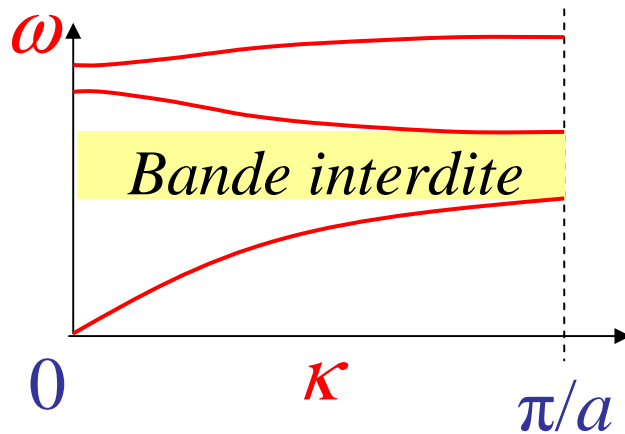
**Augmenter la cohérence = Filtrage**

# Contrôle spectral de l'émission thermique



*Yablouovitch PRL (1987)*  
*John PRL (1987)*

Cristal photonique=filtre sélectif

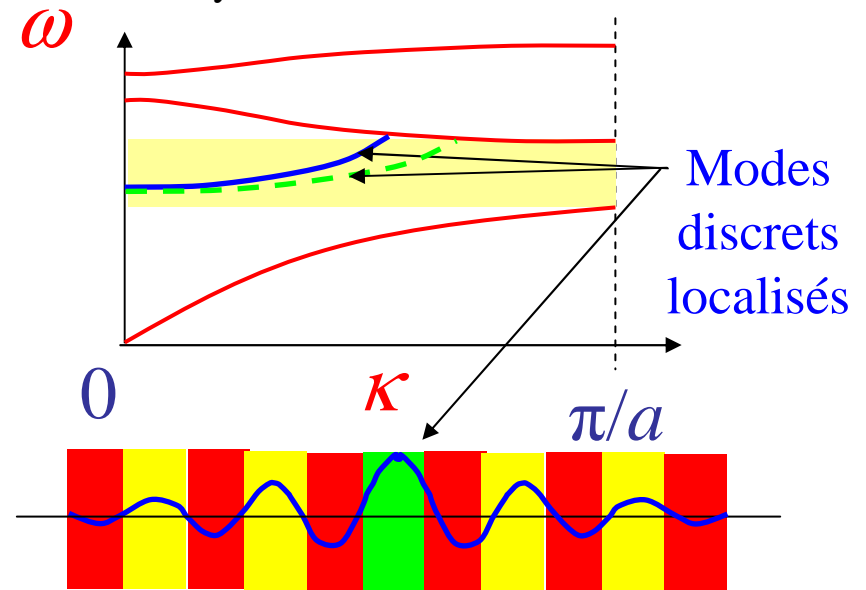


défaut  $\epsilon_3$

*McCall et al.*  
*PRL (1991)*

Cristal photonique semi-infini + défaut

→ symétrie de translation brisée



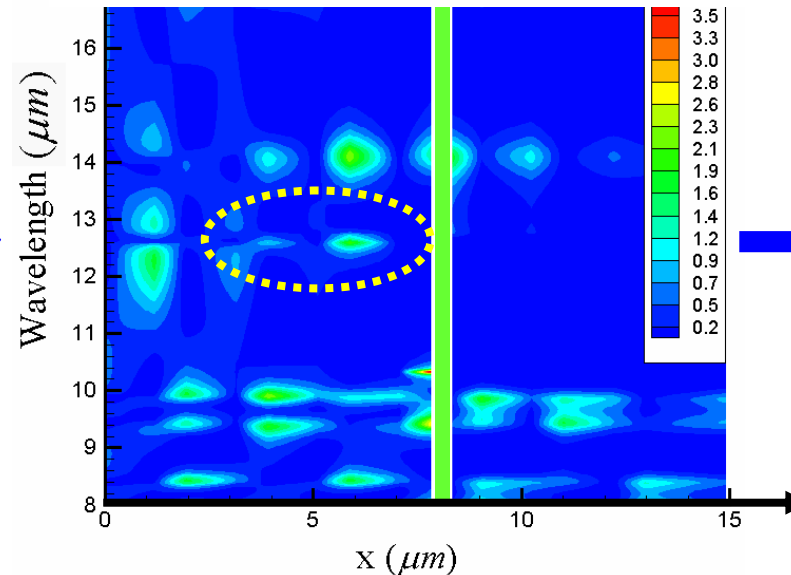
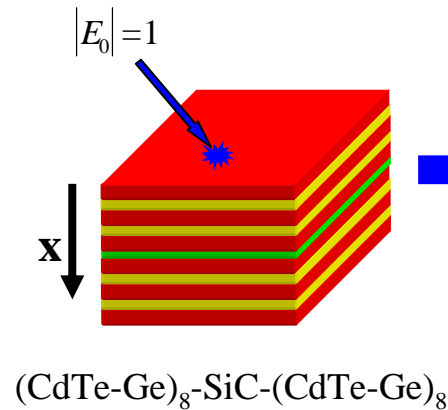
**Le mode guidé ne contribue pas à l'émission**

# Contrôle spectral de l'émission thermique

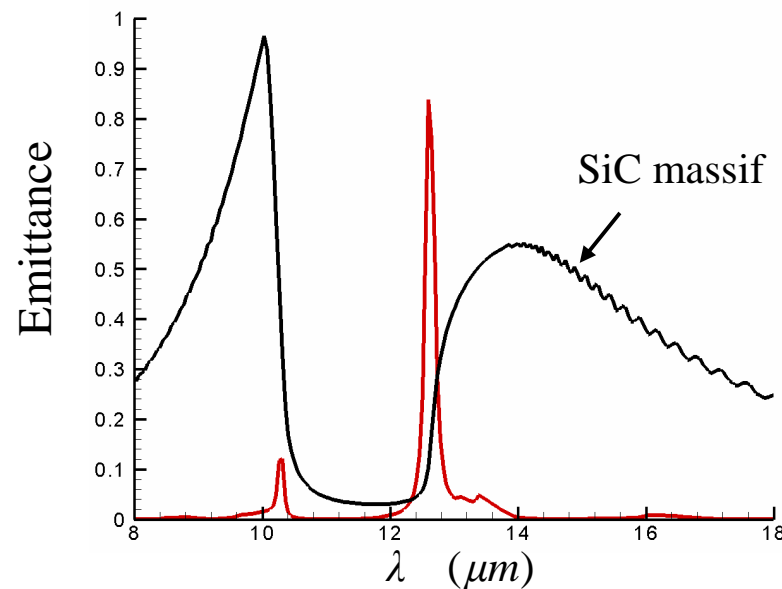
Excitation

*PBA et Ni, JAP 97 (2005)*

du mode de défaut vs. onde de surface



**Délocalisation  
du mode de défaut**



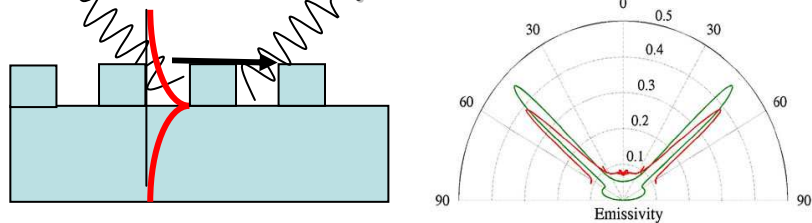
**Amplification de l'émission  
thermique par couplage  
résonant  
avec le mode du défaut  
sous le régime  
d'homogénéisation  
du cristal**



# Les sources thermiques cohérentes jusqu'en 2007

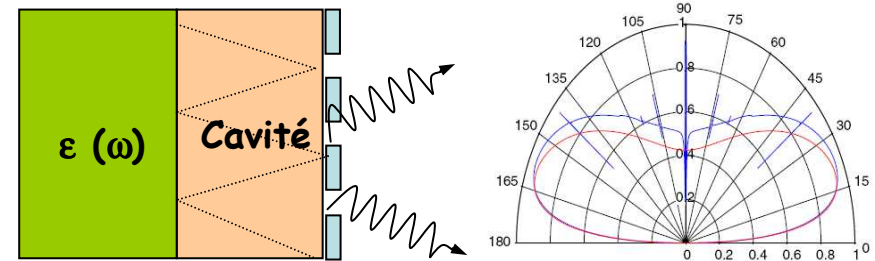
## Les réseaux de surface :

### diffraction des polaritons de surface



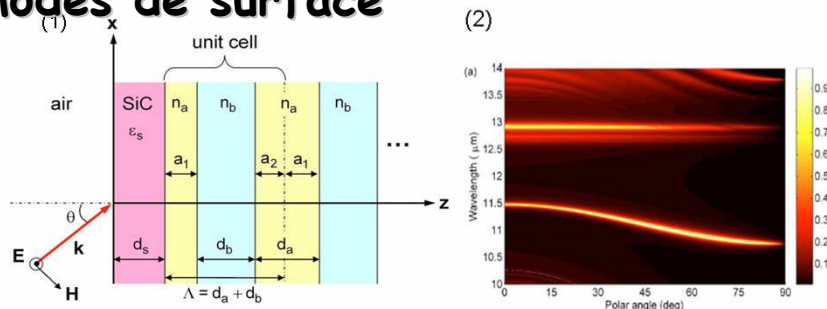
*Greffet et al. Nature 416 (2002)*

## Les structures hybrides



*Joulain & Loizeau, JQRST (2007)*

## Les multicouches : couplage avec des modes de surface



*Lee & Zhang, JHT, APL (2007)*

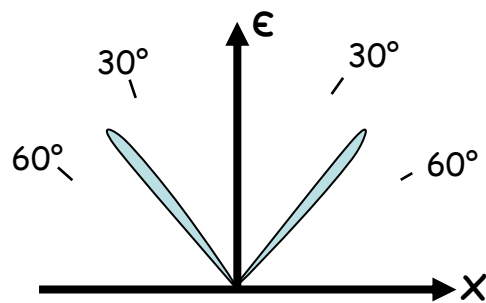
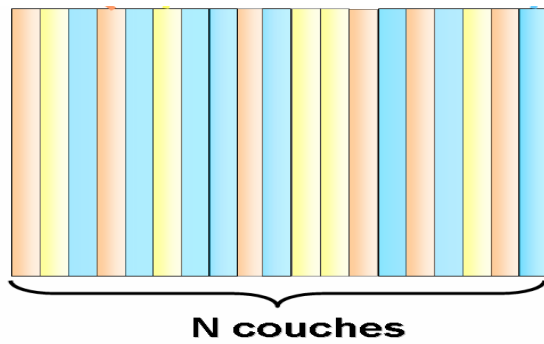
***conception heuristique***  
**→ essai-erreur**

***Augmenter le degré de cohérence des sources implique une conception bottom-up plus rationnelle***

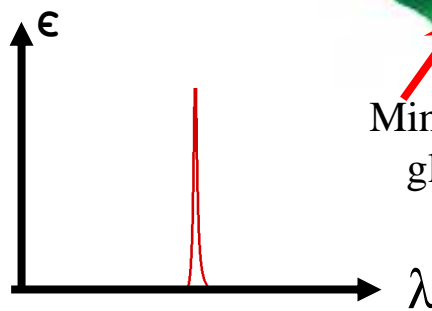
# Design ab-initio de sources thermiques cohérentes

Identification de sources

nanostructurées ?



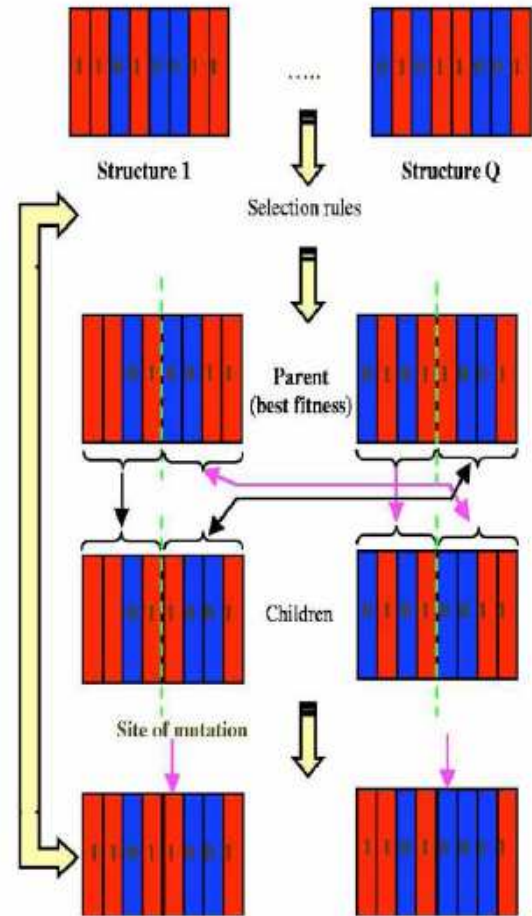
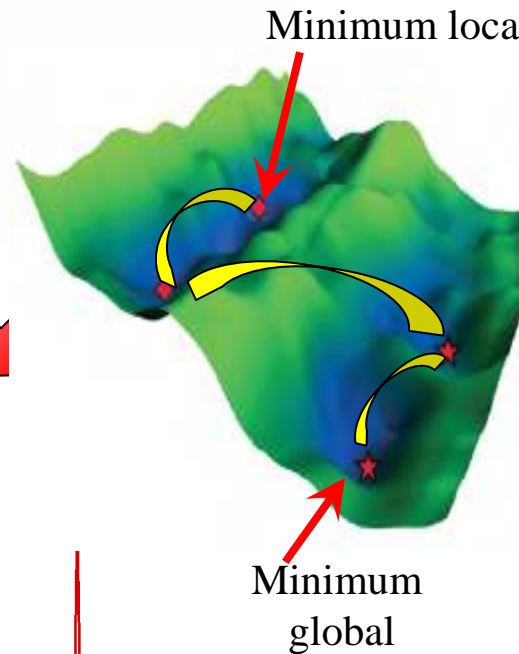
Cohérence spatiale



Cohérence temporelle

$$\sum_p \left\{ \left\| \epsilon_p - \epsilon_{cible} \right\| + \left\| r_p - r_{cible} \right\| \right\} \rightarrow \min$$

**Pb. fortement non-linéaire**



Algorithme génétique

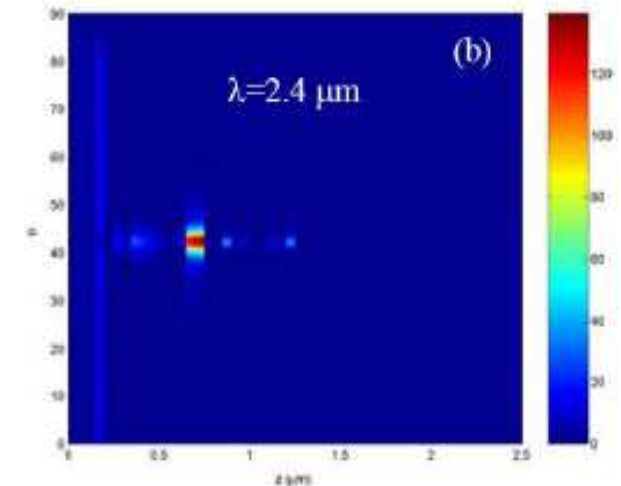
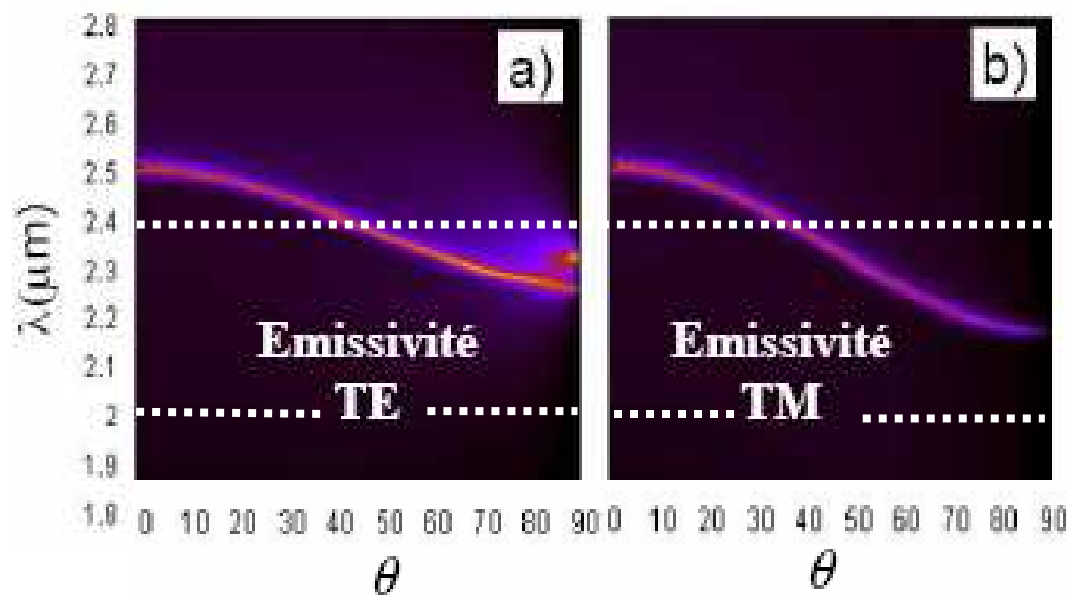
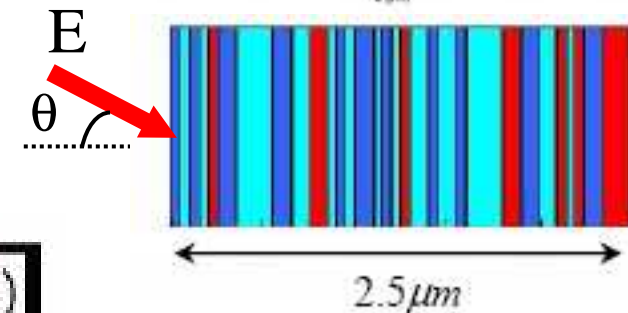
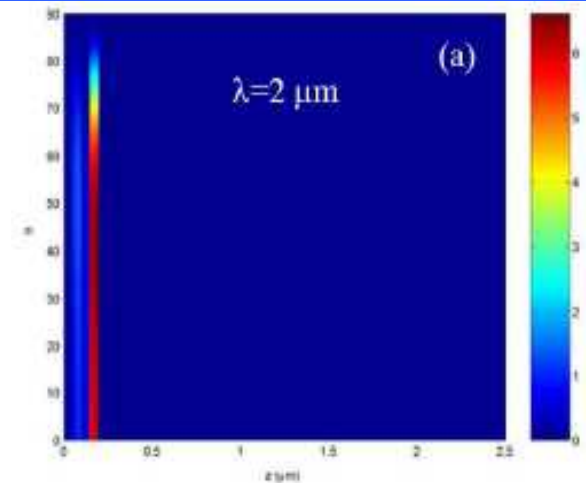
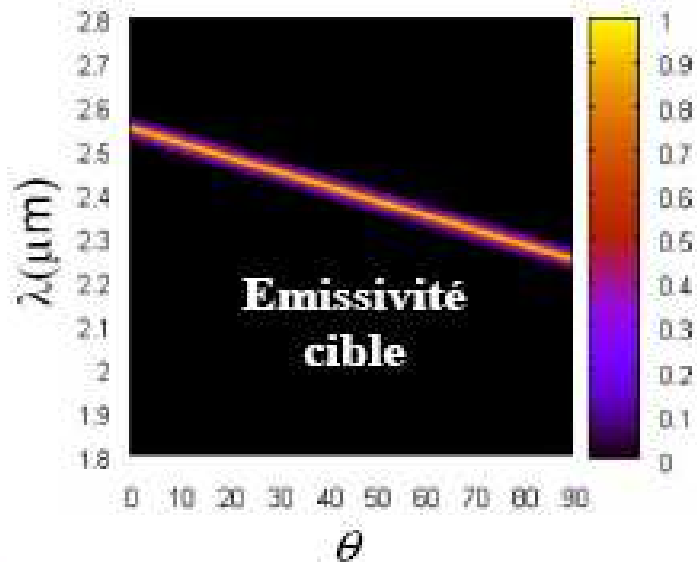
# Source thermique partiellement cohérente dans le proche IR

JAP 102, 114305 (2007)

$$\tilde{\epsilon}_{Si} = 11.15,$$

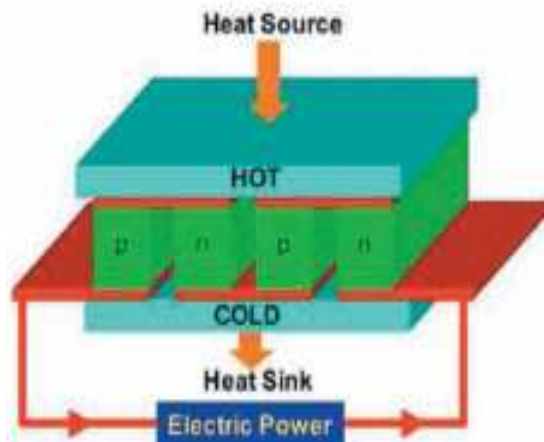
$$\tilde{\epsilon}_{SiO_2} = 2.1025,$$

$$\tilde{\epsilon}_{Ag} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - i\omega_c)},$$



# Quelques perspectives

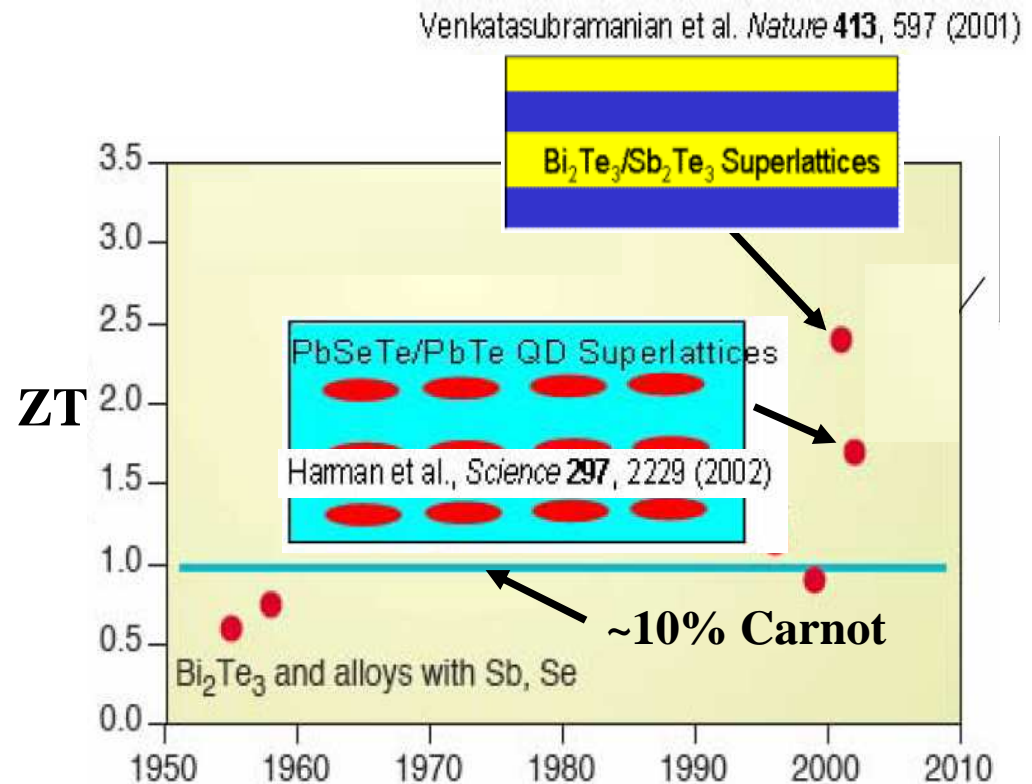
- Design ab initio de métamatériaux (collaboration Vinko ESA)
  - Management thermique et conversion PV et TPV
- Thermoélectricité (collaboration Dusquesnes, INSP)



Seebeck effect

**Efficacité :**

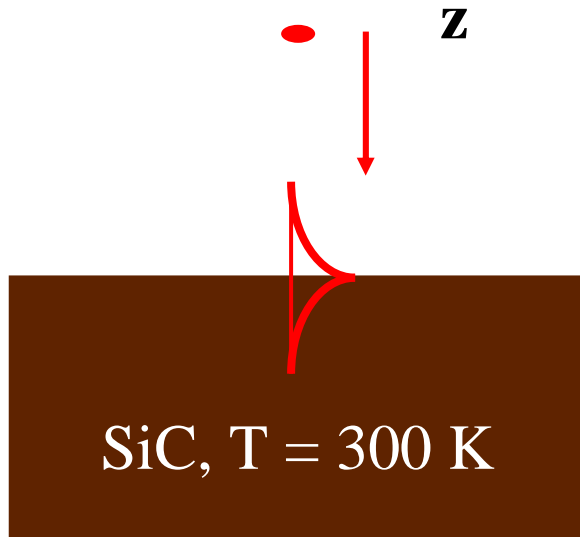
$$ZT = \frac{S^2 \sigma T}{\kappa} \rightarrow \max$$



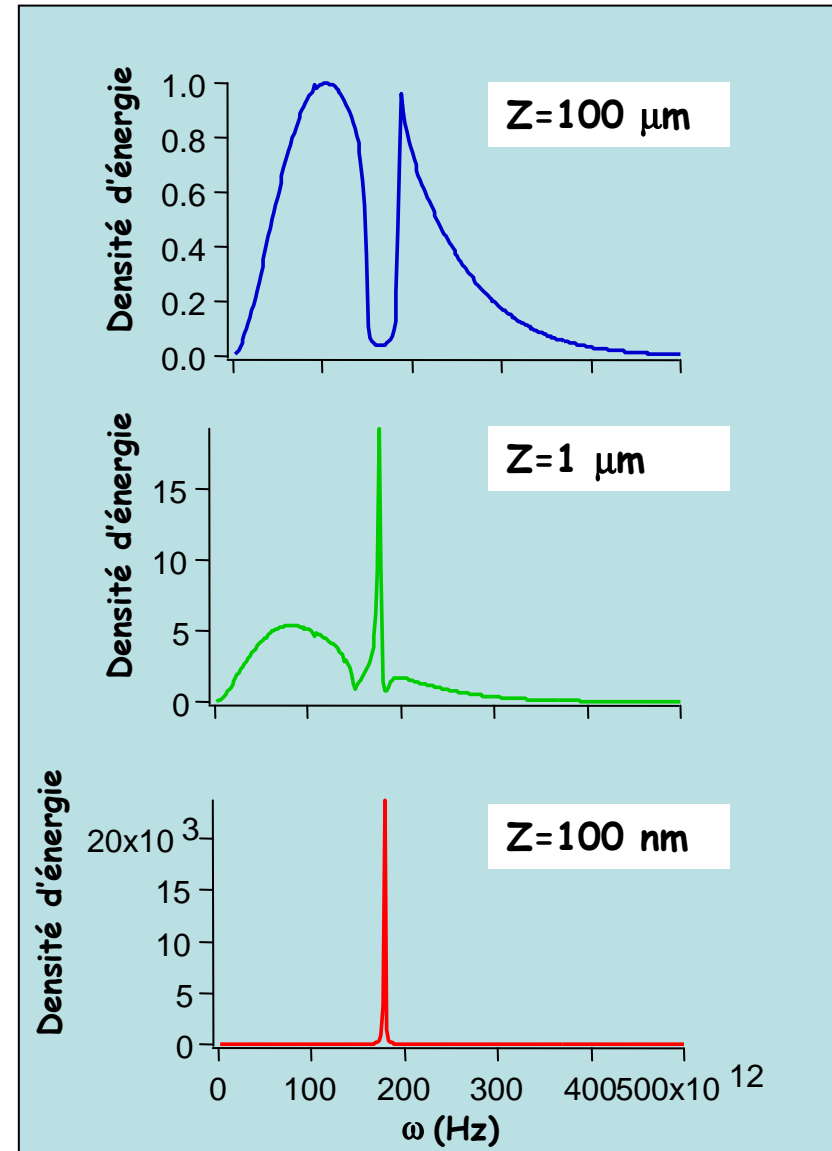
**Transferts de chaleur  
en champ proche par hybridation  
de plasmons de surface**

# Densité d'énergie à la surface d'un matériau massif

Shchegrov et al., PRL, **85**, 1548 (2000)



Comportement en champ proche  
des films minces?

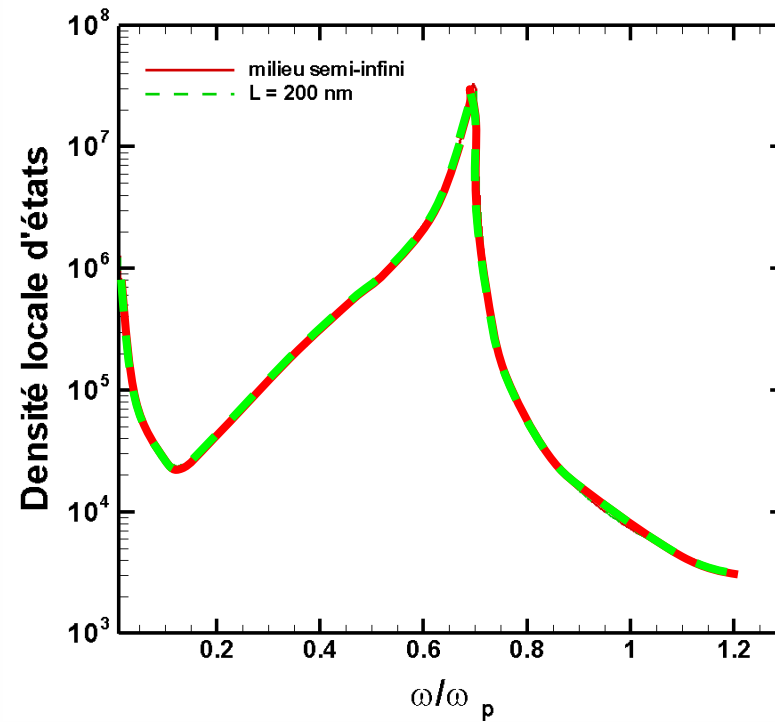
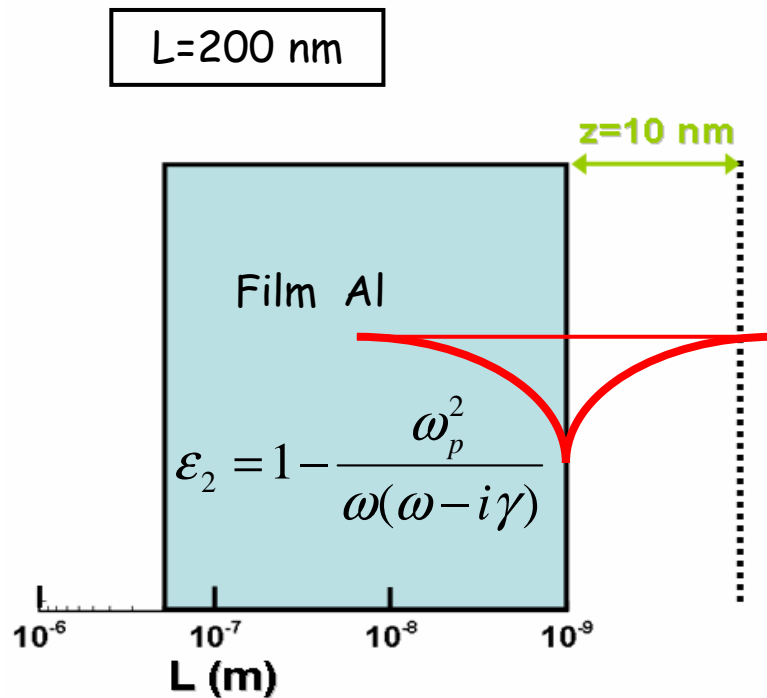


# Densité d'état à la surface d'un film

$$U(z, \omega) = \rho(z, \omega) \hbar \omega \frac{1}{\exp(\hbar \omega / k_B T) - 1}$$

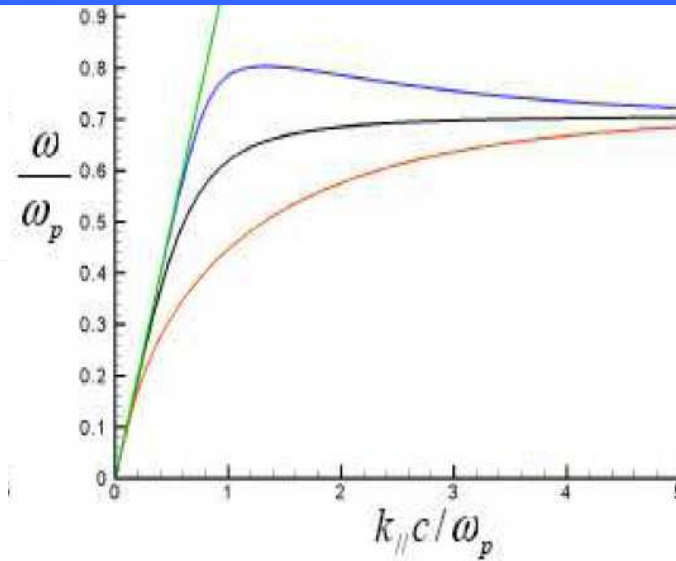
Densité d'énergie    Densité d'état

Distribution de Bose-Einstein

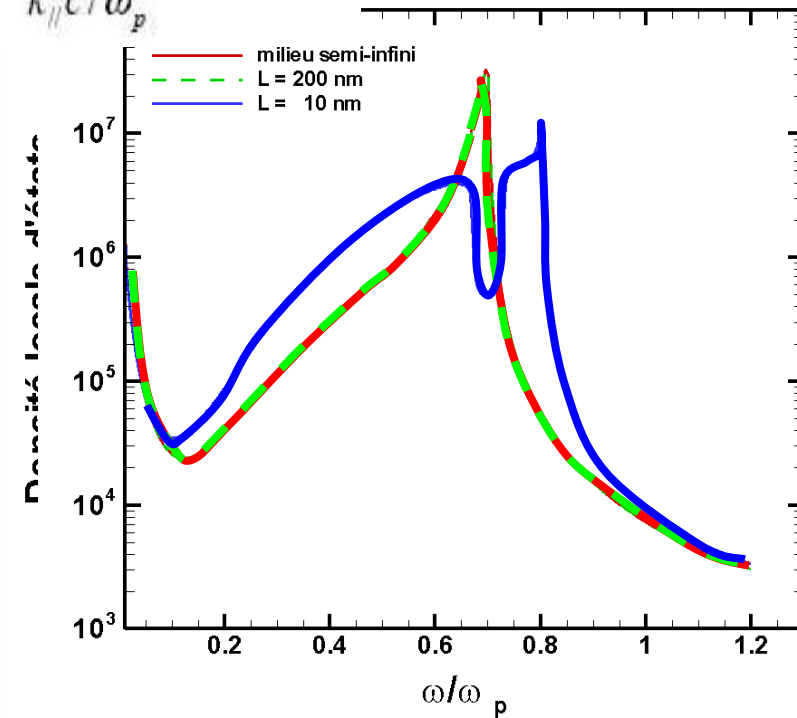
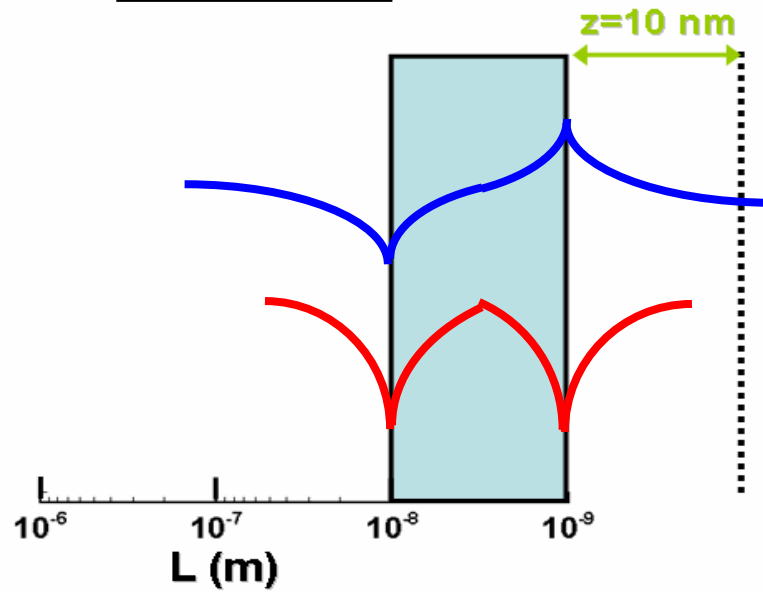


Joulain et al., PRB (2003)

# Densité d'état à la surface d'un film



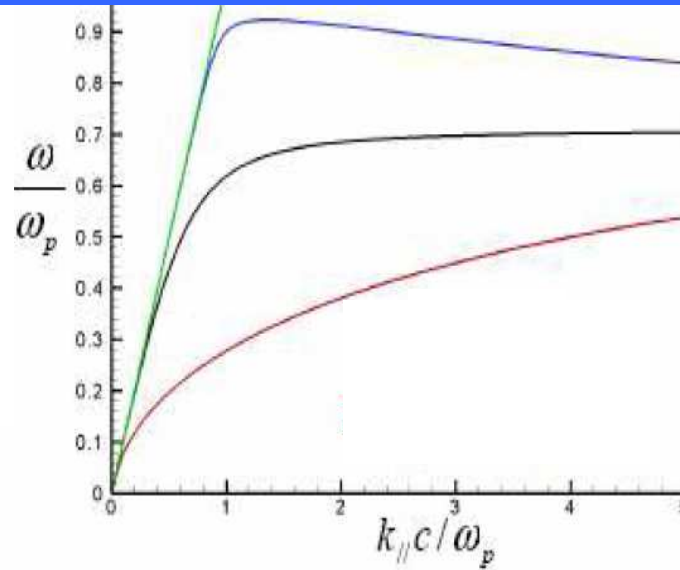
$L=10 \text{ nm}$



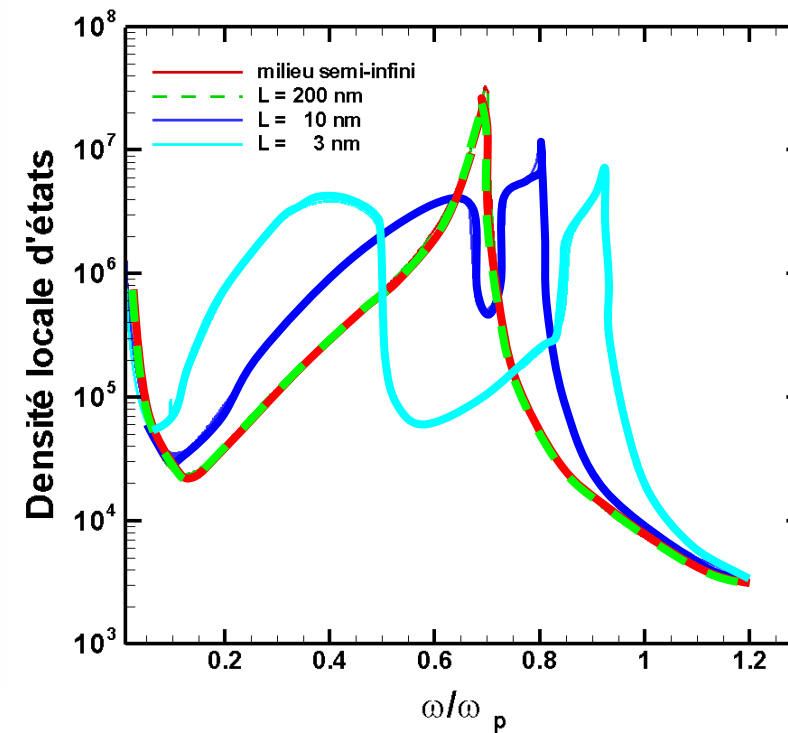
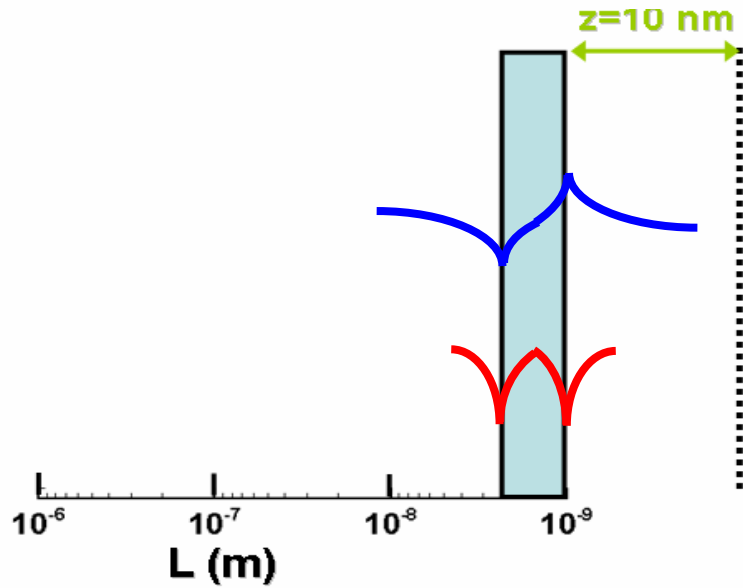
arXiv (2008)



# Densité d'état à la surface d'un film

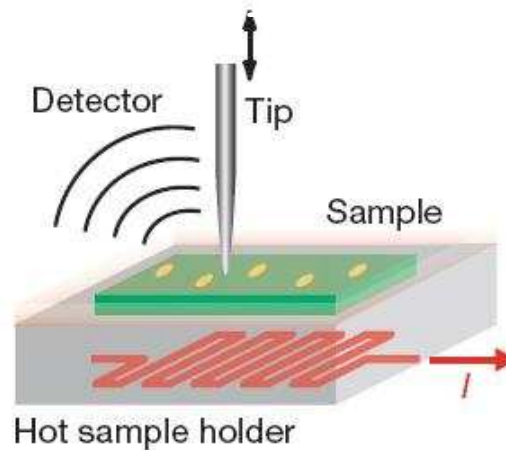


$L = 3$  nm



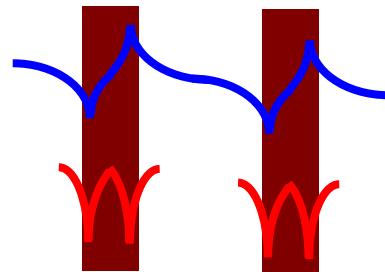
# Quelques perspectives

- Mesure de la LDOS par IRSTM (De Wilde et Joulain)



De Wilde et al. Nature 2006

- Transferts de chaleur par hybridation de plasmons entre 2 films



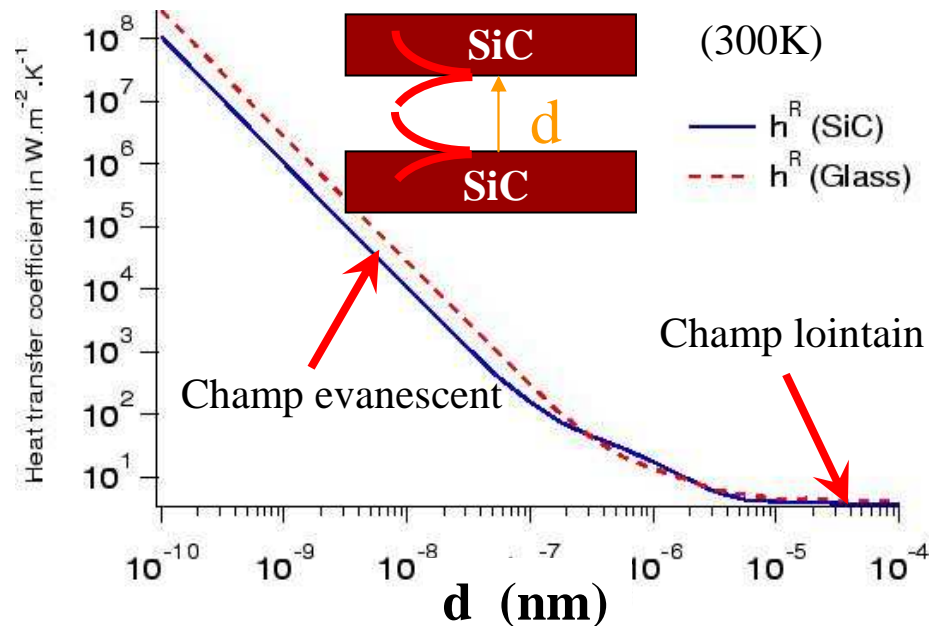
- 2 canaux fréquentiels distincts pour le transfert

# Transferts de chaleurs vs. les ondes de surface

$$d \ll \lambda_{Wien}$$



Couplage des ondes de surface

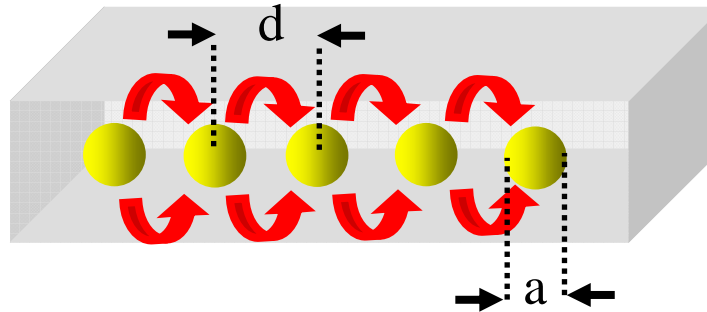


Mulet et al. *Microsc. Thermophys. Eng.* **6** (2002)

Domingues et al. *PRL* (2005)

**Que se passe t-il dans un réseau de nano-objets en interactions?**

# Transferts de chaleurs dans un réseau de NPs



Utiliser le couplage entre les plasmons de surface pour transporter de la chaleur dans une matrice

$$d > 1.5 a$$



Nanoparticules=dipôles

$$d < 1.5 a$$

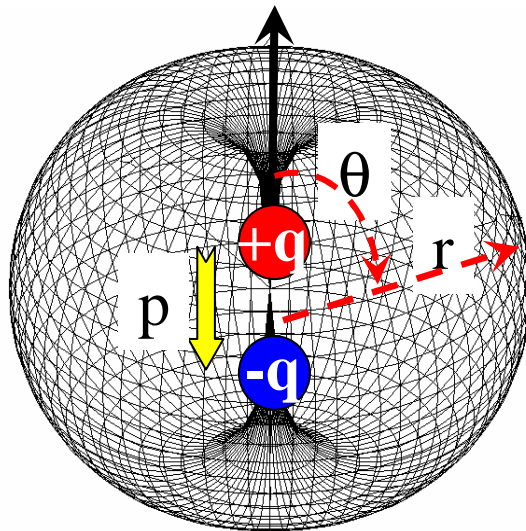


Nanoparticules=multipôles

# Chaine de dipôles

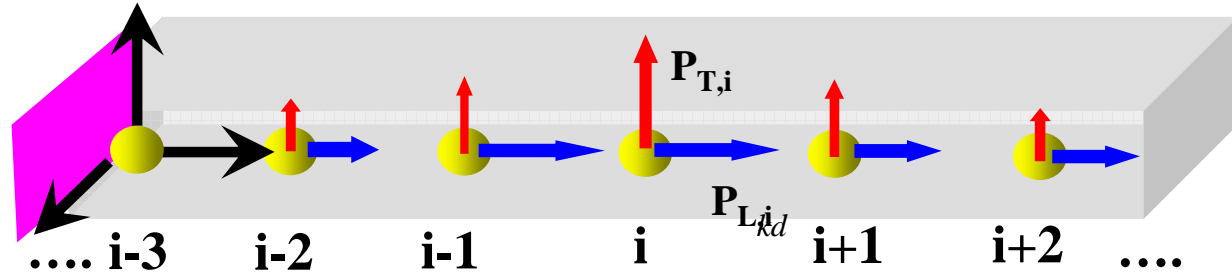
APL 89 (2006)

A chaque NP on associe un dipôle en interaction avec ces voisins



Nanoparticule=Dipôle

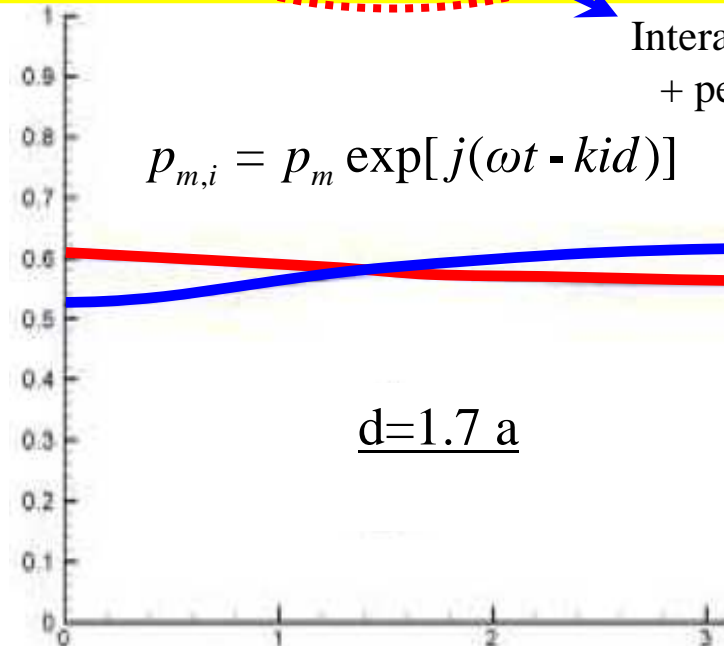
$$E(r, \theta) \propto A(p, \theta) \frac{\exp(ikr)}{r} + B(p, \theta) \left[ \frac{1}{r^3} + \frac{ik}{r^2} \right] \exp(ikr)$$



$$\ddot{p}_{m,i} = -\omega_0^2 p_{m,i} - \Gamma_I \dot{p}_{m,i} + \frac{\Gamma_R}{\omega_0^2} \ddot{p}_{m,i} - \gamma_m \omega_1^2 (p_{m,i-1} + p_{m,i+1})$$

Interactions électrons-phonons  
+ perte vers champ lointain

$$p_{m,i} = p_m \exp[j(\omega t - kid)]$$



nanoparticules de Cu  
10 nm

d=1.7 a

# Chaine de multipôles

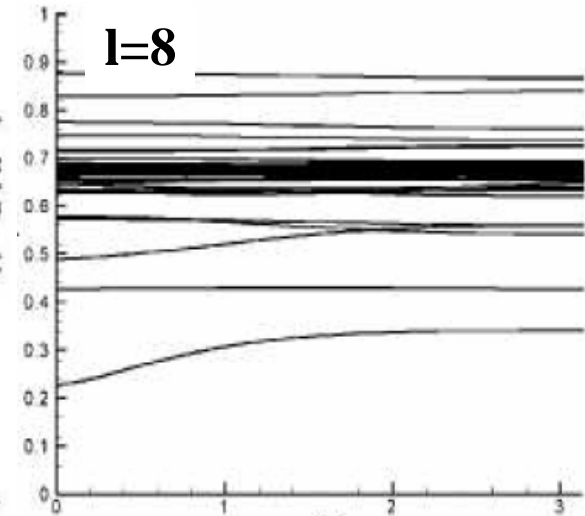
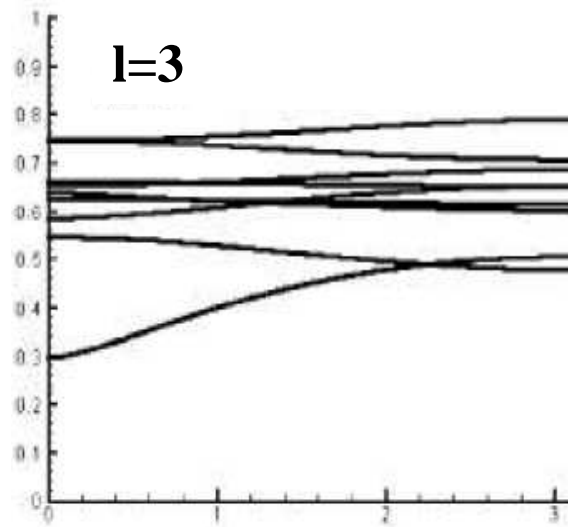
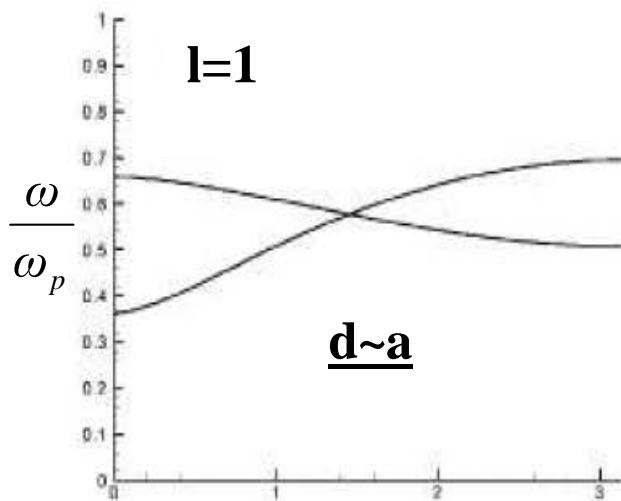
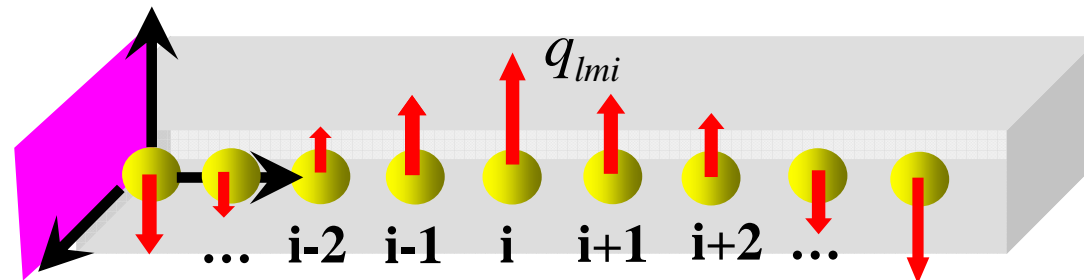
PRB 77 (2008)

Lorsque  $d < 2a$  les multipôles interagissent

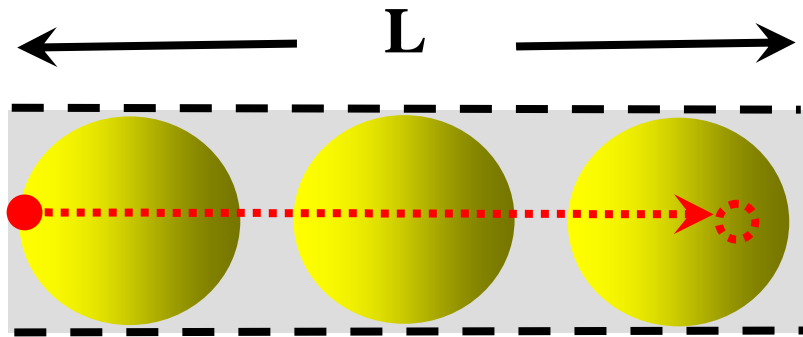
$$E(r, \theta) \propto A(p, \theta) \frac{\exp(ikr)}{r} + B(p, \theta) \left[ \frac{1}{r^3} - \frac{ik}{r^2} \right] \exp(ikr) + \frac{1}{2} \sum_{i,j} Q_{ij} \frac{[U(\theta, \varphi) + V(\theta, \varphi)]}{r^4} + \dots$$

Dipôle ( $l=1$ )

Quadrupôles ( $l=2$ )

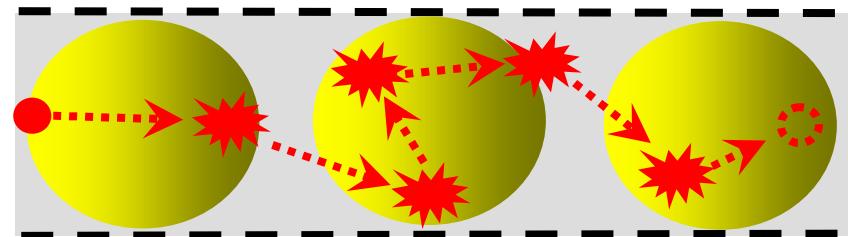


# Les régimes de transport



Transport balistique

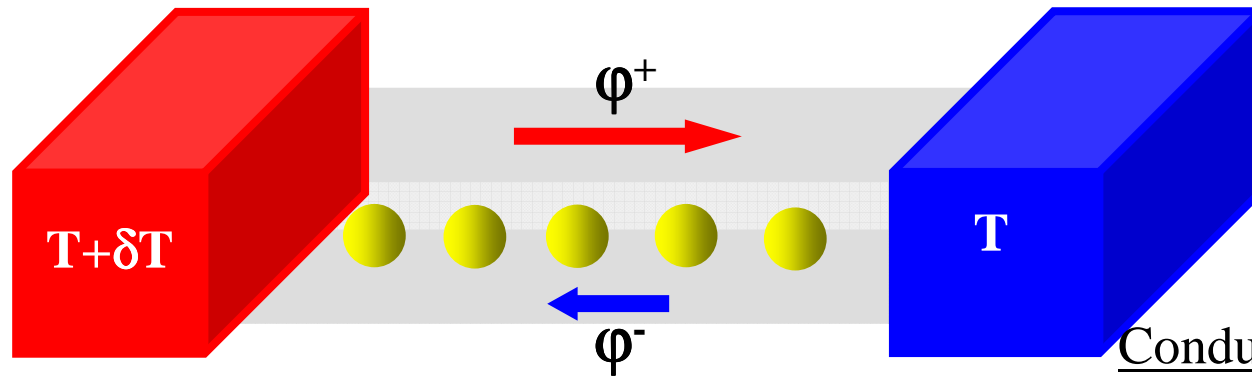
$$L \ll l_{pm}$$



Transport diffusif

$$L \gg l_{pm}$$

# Transport balistique



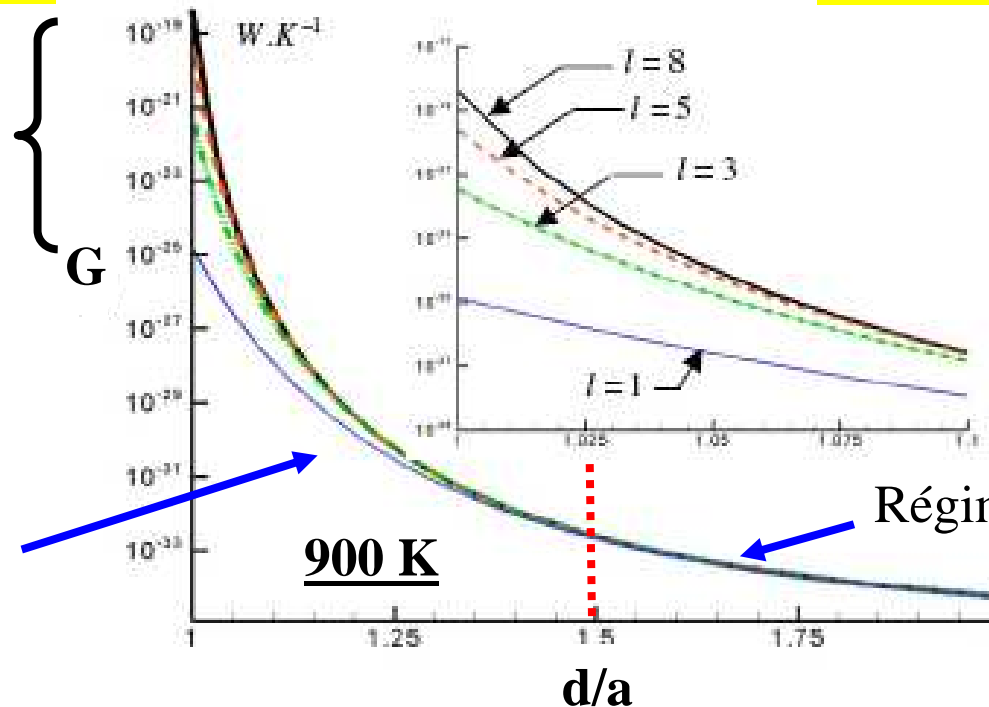
Landauer :

Conductance :

$$\varphi^{\pm} = \frac{1}{2\pi} \sum_{lm} \int_0^{\infty} |v_{glm}(k)| \hbar \omega_{lm}(k) f_B[\omega_{lm}(k)] dk$$

$$G = \lim_{\delta T \rightarrow 0} \frac{\varphi^+(T + \delta T) - \varphi^-(T)}{\delta T}$$

6 ordres de grandeur



**10 NPs Cu**  
**10 nm**

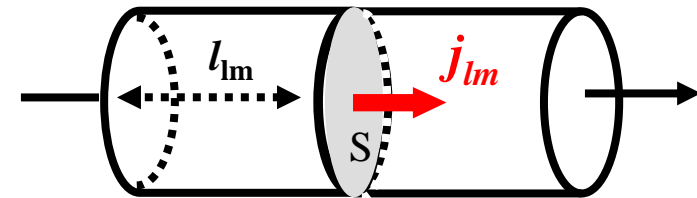
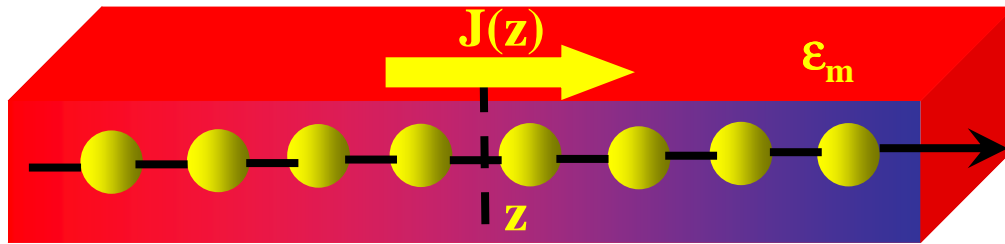
Régime multipolaire  
(limitée à  $l < 8$ )

Régime dipolaire

**900 K**



# Transport diffusif (Fourier)

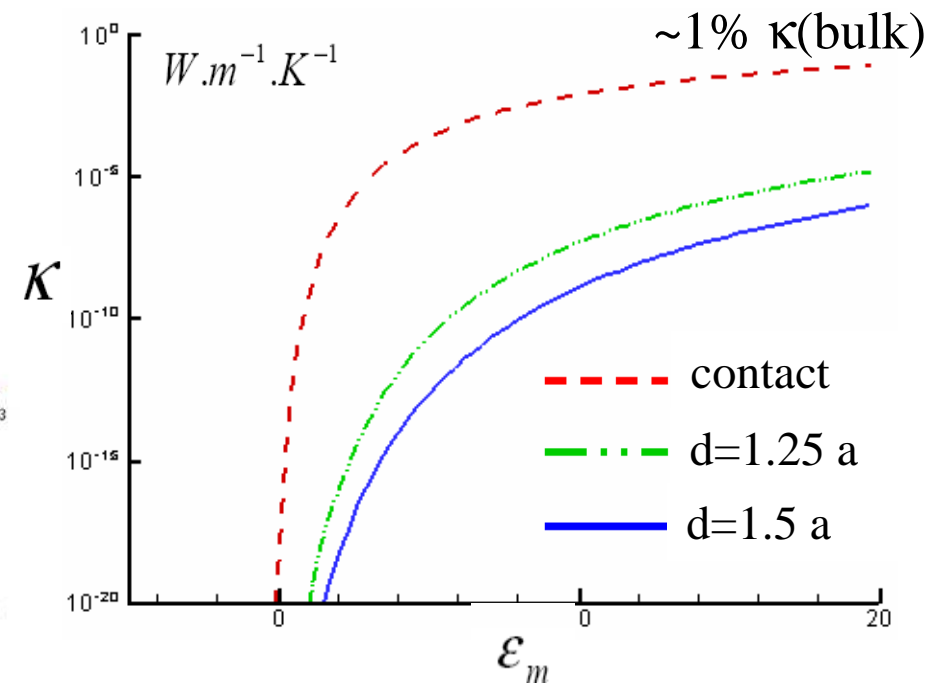
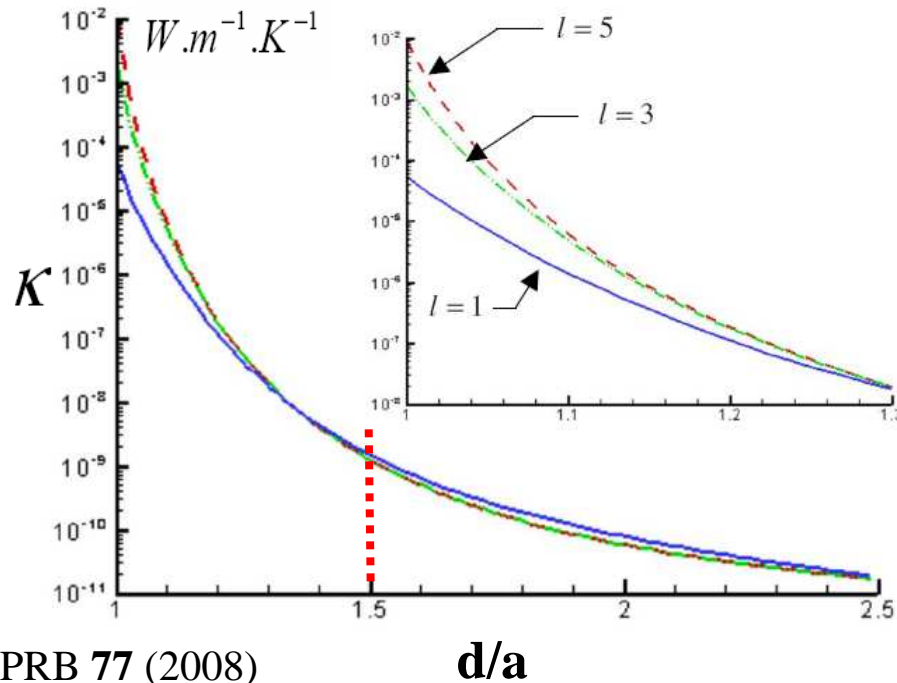


1000 Nanoparticules de Cu de 10 nm

$$j_{lm} = [n(z - l_{lm})E(z - l_{lm}) - n(z + l_{lm})E(z + l_{lm})] \frac{v_{glm}}{S} = -2l_{lm} \frac{v_{glm}}{S} \frac{\partial nE}{\partial z}$$

$$\kappa = \frac{2}{\pi S} \frac{\hbar^2}{k_B T^2} \sum_{lm} \int_0^{\pi/d} v_{glm}^2(k) \tau_{lm}(k) \omega_{lm}^2(k) \frac{e^{\beta \hbar \omega_{lm}}}{(e^{\beta \hbar \omega_{lm}} - 1)^2} dk$$

$$nE = \rho(k) \frac{dk}{L} \hbar \omega_{lm}(k) f_B[\omega_{lm}(k), T]$$



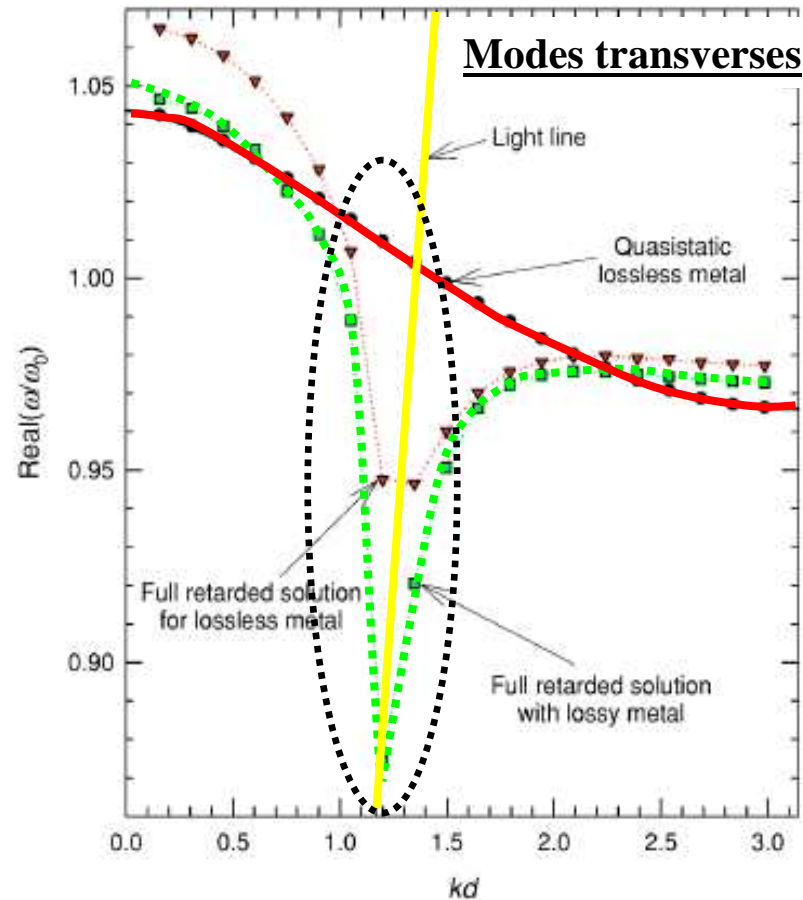
PRB 77 (2008)

d/a

ε<sub>m</sub>

# Quelques perspectives

- Influence des effets de retard sur le transport de chaleur



**Conséquences  
sur le transport de  
chaleur?**

*Chaine dipolaire  
Weber et Ford 70 PRB 2004*

**Merci !**