

Diagnostic optique de nanoparticules dans les plasmas; application aux poussières carbonées.

D. Lacroix ⁽¹⁾, ***P. Boulet*** ⁽¹⁾ & ***R. Vaillon*** ⁽²⁾

(1) **LEMTA** – Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée

(2) **CETHIL** – Centre d'Energétique et de Thermique de Lyon



L'esprit dans lequel le cours été construit – Les objectifs

● SOMMAIRE

Voir en haut à gauche...

● Objectifs du cours

Idée de départ : « tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur la diffusion ... »
1 H 15 ... donc non exhaustif... accent mis sur les outils... et illustrer

● Attendus et objectifs

Les questions à se poser
Les paramètres à connaître
Une méthodologie à appliquer

Phénomène de diffusion – quelques diapos d'introduction

● Mise en évidence

Illustrations etc...

Les paramètres à prendre en compte (morphologie, taille, indice, espacement)

● Les différents régimes de diffusion

Dépendante vs indépendante
Simple vs multiple

● Proposition d'une méthodologie générale

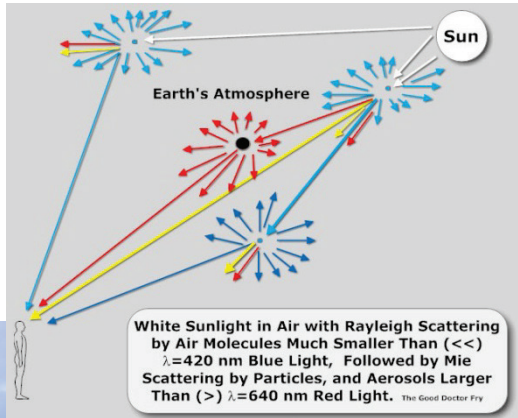
Méthode proposée
pour traiter le
problème

$$\frac{1}{c_\lambda} \frac{\partial L_\lambda(\mathbf{r}, \mathbf{n}, t)}{\partial t} + \mathbf{n} \cdot \nabla_r L_\lambda(\mathbf{r}, \mathbf{n}, t) = -(\kappa_\lambda + \sigma_\lambda) L_\lambda(\mathbf{r}, \mathbf{n}, t) + \kappa_\lambda n_\lambda^2 L_\lambda^0(\mathbf{T}(\mathbf{r}, t)) \dots$$
$$\dots + \frac{\sigma_\lambda}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi_\lambda(\mathbf{n}', \mathbf{n}) L_\lambda(\mathbf{r}, \mathbf{n}', t) d\Omega'$$

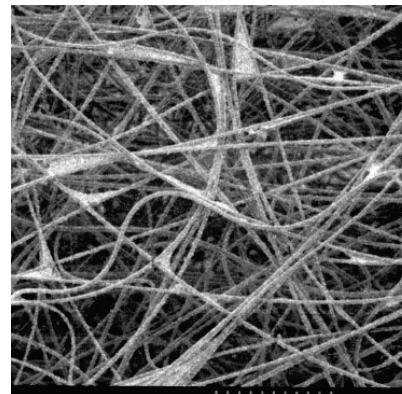
Phénomène de diffusion : illustrations dans votre « quotidien »

● Mise en évidence

La couleur du ciel



Diffusion par des gouttes d'eau



Rôle de la diffusion dans les isolants

Phénomène de diffusion : définition et conséquences


● Le phénomène

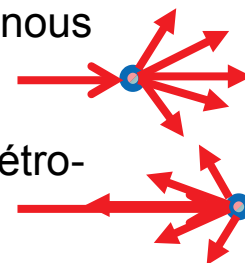


Une interaction entre une onde électromagnétique et une particule (hétérogénéité) avec pour conséquences: absorption possible d'une partie de l'énergie de l'onde et *dévi*ation du reste (= diffusion proprement dite, **scattering** en anglais).

Il faut qu'il y ait changement d'indice optique du milieu.

Pas de changement de longueur d'onde (mécanismes élastique) dans ce qui nous intéresse ici (autres phénomènes ...).

Juste un changement de direction plus ou moins marqué (diffusion avant ou rétro-diffusion).  une redistribution directionnelle du rayonnement.

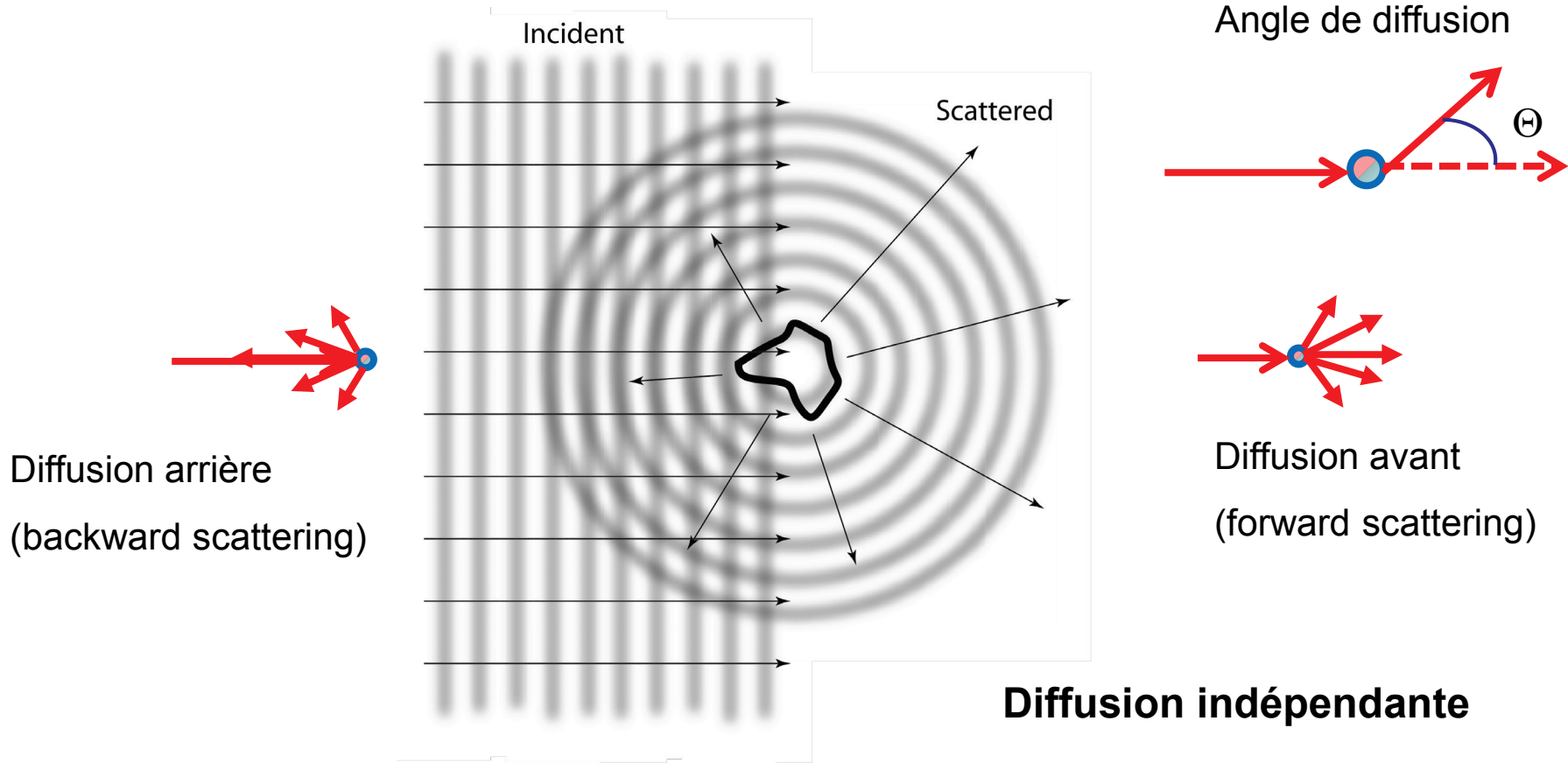


Importance du phénomène gouvernée par **4 paramètres** essentiellement.

Importance relative? Négligeable ou pas? Quels critères? Quelles méthodes?...

Phénomène de diffusion : illustration

● Le phénomène



Phénomène de diffusion : illustration

● Diffusion indépendante vs dépendante

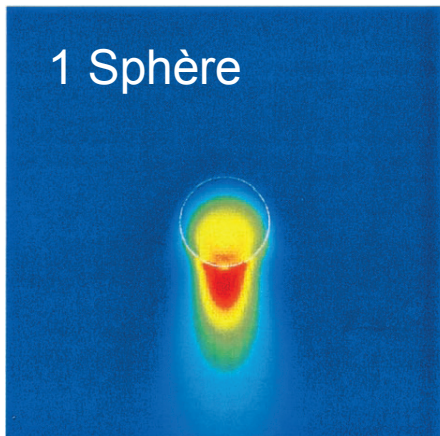
Onde plane, $\lambda=250\text{nm}$



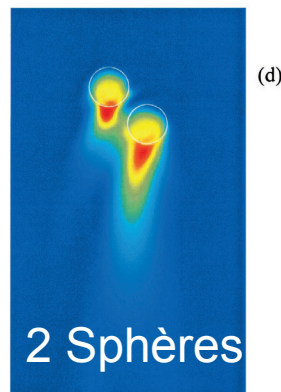
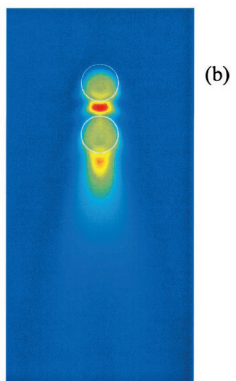
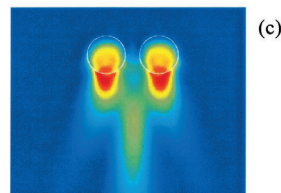
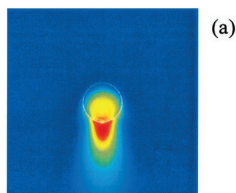
Sphère,
 $d=200\text{nm}$



1 Sphère

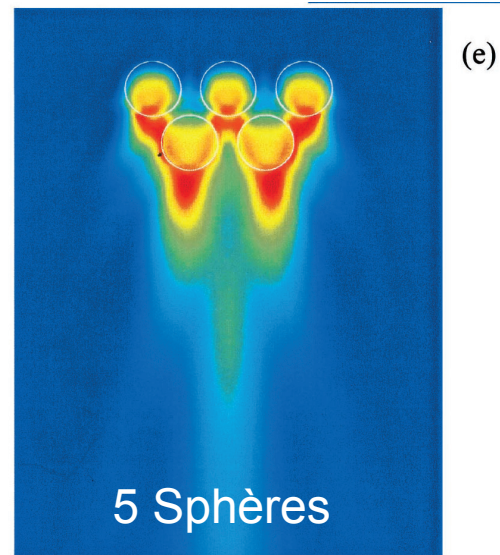


Champ électrique diffusé



2 Sphères

(L.E. McNeil et al., 2001)



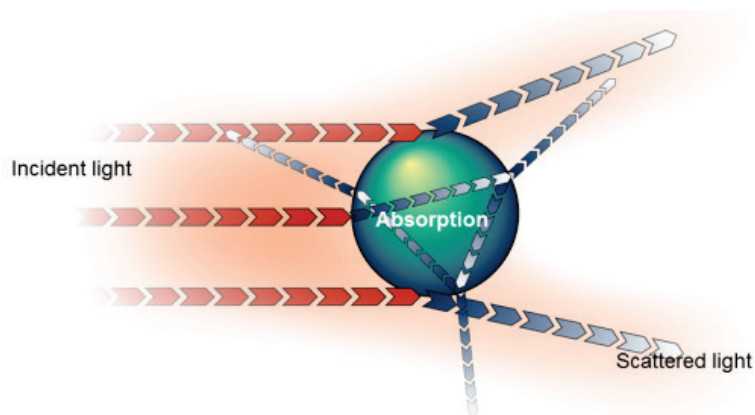
5 Sphères



Complicque le calcul des propriétés de diffusion (interférences)

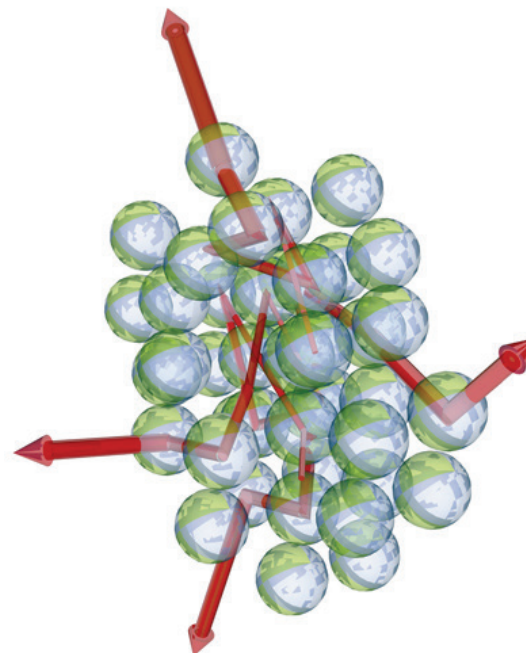
Phénomène de diffusion : illustration

● Diffusion simple vs multiple



Diffusion simple

(faible densité de particules)



Diffusion multiple

(forte densité de particules)



Complicque la mesure des distributions de particules

Phénomène de diffusion : 4 grandeurs pour évaluer la situation

● Quels paramètres sont importants?

Le paramètre de taille

$$x = \frac{2\pi a}{\lambda}$$

Rayon ou dimension caractéristique

Longueur d'onde

L'indice optique des inclusions / particules / diffuseurs

$$m = n - ik \text{ (} n \text{ indice de réfraction, } k \text{ indice d'extinction)}$$

La morphologie des diffuseurs : assimilable à une sphère, un sphéroïde, un cylindre infini, de forme quelconque?

L'espacement entre particules

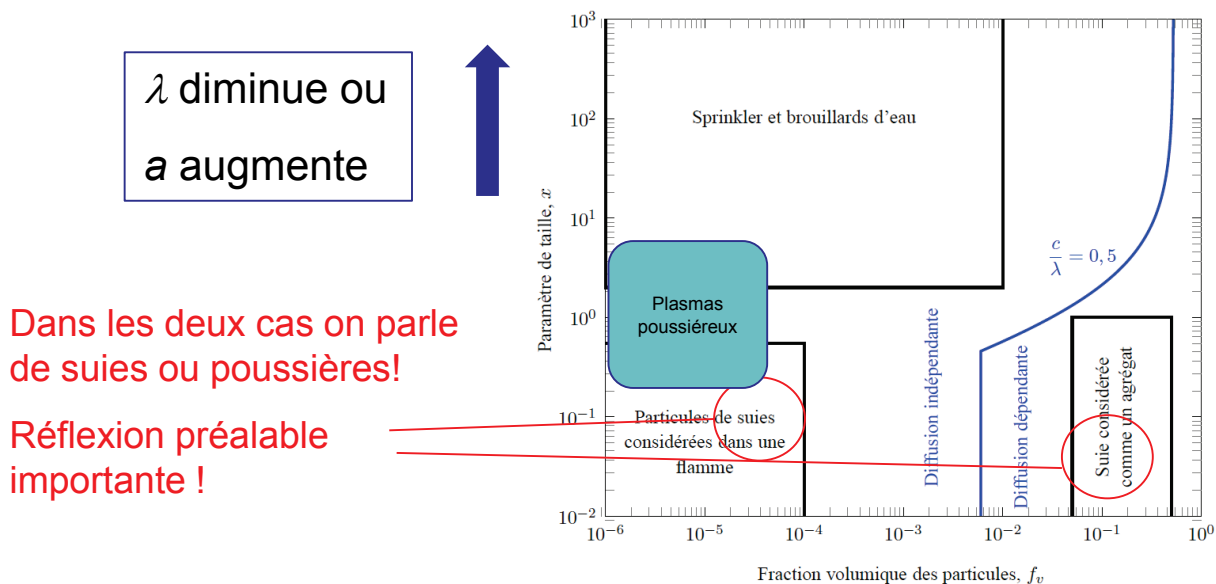
$$\frac{c}{\lambda} \text{ "espace entre particules sur longueur d'onde"}$$

↳ Fraction volumique : f_v

Phénomène de diffusion – comment se situer à partir de x et f_v

● Le diagramme de Tien et Drolen

Diffusion dépendante ou indépendante?



Simple ou multiple?... le libre parcours moyen (lpm) peut être un indicateur

$$1/\kappa? \quad 1/\sigma? \quad 1/\beta?$$

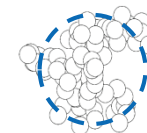
à comparer à la dimension caractéristique du milieu

Phénomène de diffusion: quelques tendances générales

● Quelles sont les grandes tendances à connaître?

- «Très petites» particules : la diffusion est peut-être négligeable **à nouveau, penser au lpm**
 - «Petites» particules : diffusion plutôt isotrope
 - «Grandes» particules: anisotropie croissante avec la taille des diffuseurs

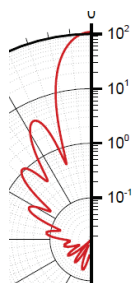
• Peu de particules... diffusion simple et indépendante. A partir d'un certain seuil, diffusion multiple. Si la densité volumique de diffuseurs augmente encore, diffusion dépendante.



• Pour une particule unique, l'efficacité de diffusion croît avec la taille.

Mais... pour une fraction volumique donnée, plus les diffuseurs sont petits plus le phénomène est important (augmentation de l'interface milieu porteur / diffuseurs)

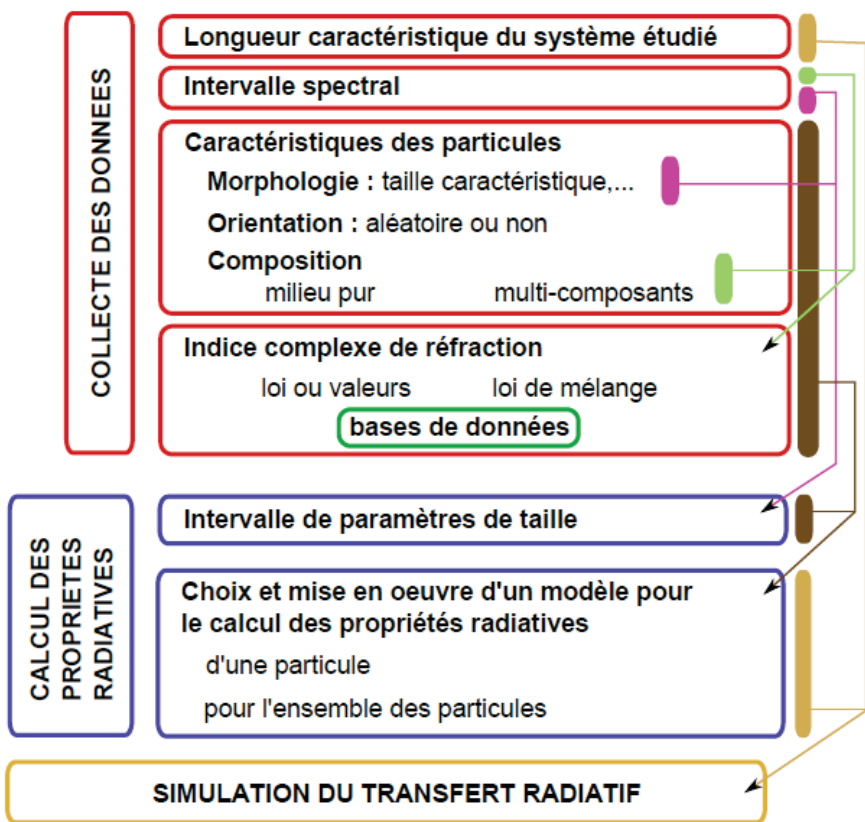
• Fortes variations directionnelles possibles (phénomènes d'interférences), atténuées par la variété des diffuseurs (la polydispersion en tailles ou en formes provoque une sorte de lissage).



Phénomène de diffusion : méthode pour approcher le problème

● Une méthodologie générale suggérée

Réflexion préalable
puis évaluation des propriétés
et simulation...
... *a priori* des étapes découplées



Phénomène de diffusion / outils

● Revue rapide des outils disponibles

Sur les indices: biblio, bases de données, mesures ... pas toujours évident ... surtout pour les diffuseurs carbonés!

(mots clés pour aider: modèles électromag., Kramers-Krönig, valeurs effectives, lois de mélanges)

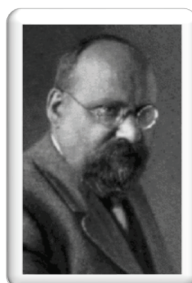
Calculer les propriétés radiatives, les méthodes « usuelles » :

- Mie et ses méthodes dérivées / formulations exactes de l'interaction onde/particules pour des formes « académiques » (sphères, cylindres)
- diffusion de Rayleigh / petites particules
- approximation de l'optique géométrique / grosses particules
- approximation RDG-FA (Rayleigh-Debye-Gans Fractal Aggregates) / agrégats
- les méthodes numériques / forme et composition quelconques
- les formes approchées / notamment pour la fonction de phase de diffusion

Un outil à connaître : SCATTPORT (<http://www.scattport.org>)

Théorie de Mie

Mie (Gustav)



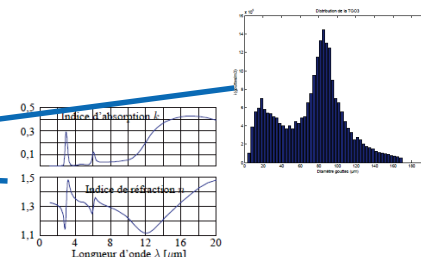
Diffuseurs sphériques (éventuellement sphéroïdes, cylindres)

Régime de diffusion indépendante

Indices optiques et distribution de taille connus

Grandeurs recherchées : κ , σ_s , β , $P(\Omega, \Omega')$, g

coefficients d'absorption / diffusion / extinction, fonction de phase et facteur d'asymétrie

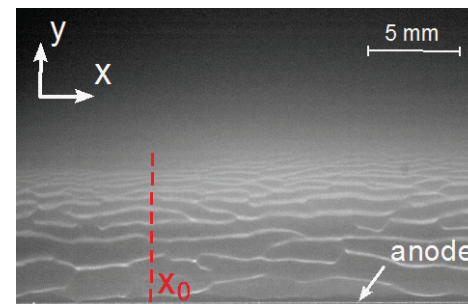


Extension de Mie et méthodes approchées

Extension à des « sphéroïdes », des cylindres, des sphères inhomogènes (coated spheres)

Application : plasmas poussiéreux

Illustration en « fil rouge »

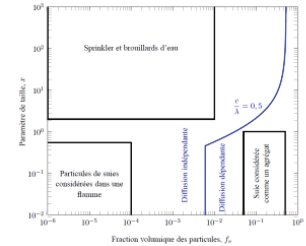


Autrement dit ... comment traiter la diffusion dans les cas « simples »

Les coefficients d'atténuation : principe...

- Vos particules sont assimilables à des sphères et en concentration raisonnable...

Vous avez les infos sur la distribution en taille, la gamme spectrale et les indices optiques...



Les propriétés recherchées sont liées aux efficacités ou aux sections efficaces, c'est-à-dire la surface d'obstruction caractéristique de la particule de rayon a

$$\kappa = N C_{\text{abs}} = N \pi a^2 Q_{\text{abs}} \quad \text{coefficient d'absorption}$$

Efficacité (-)

$$\sigma_s = N C_{\text{diff}} = N \pi a^2 Q_{\text{diff}} \quad \text{coefficient de diffusion}$$

$$\beta = N C_{\text{ext}} = N \pi a^2 Q_{\text{ext}} \quad \text{coefficient d'extinction}$$

Albedo (-)

$$\omega = \frac{\sigma_s}{\beta} = \frac{\sigma_s}{\sigma_s + \kappa}$$

Section efficace

(en m^2)

Densité volumique en diffuseurs (cas simple d'une mono-dispersion N particules / m^3)

Efficacités à partir des coefficients de Mie

● Les efficacités sont obtenues pour une particule donnée

Solution des équations de Maxwell pour une onde en incidence sur une sphère homogène

$$Q_{\text{ext}}(x) = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{N_{\text{max}}} (2n + 1) \Re[a_n + b_n]$$

Coefficients de Mie, obtenus par des séries

$$Q_{\text{diff}}(x) = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{N_{\text{max}}} (2n + 1) (|a_n|^2 + |b_n|^2)$$

Attention à ce seuil!

$$Q_{\text{abs}}(x) = Q_{\text{ext}}(x) - Q_{\text{diff}}(x)$$

A intégrer ensuite sur une distribution de taille de particules

$$\beta = \int_0^\infty C_{\text{ext}} n(a) da = \pi \int_0^\infty Q_{\text{ext}} a^2 n(a) da$$

$$N = \int_0^\infty n(a) da$$

$$P_N(\Theta) = \frac{1}{\sigma_s} \int_0^\infty P(\Theta) C_{\text{diff}} n(a) da$$

Les coefficients de Mie

● Résultat de l'approche électromagnétique : des séries infinies...

Différentes formes, pas toujours stables numériquement. Ci-dessous ce que proposent Bohren et Huffman, *Absorption and scattering of light by small particles*

$$a_n = \frac{\left(\frac{D_n(mx)}{m} + \frac{n}{x}\right) \Re[\zeta_n(x)] - \Re[\zeta_{n-1}(x)]}{\left(\frac{D_n(mx)}{m} + \frac{n}{x}\right) \zeta_n(x) - \zeta_{n-1}(x)} \quad \zeta_n(z) = \frac{2n-1}{z} \zeta_{n-1}(z) - \zeta_{n-2}(z)$$

$$b_n = \frac{\left(mD_n(mx) + \frac{n}{x}\right) \Re[\zeta_n(x)] - \Re[\zeta_{n-1}(x)]}{\left(mD_n(mx) + \frac{n}{x}\right) \zeta_n(x) - \zeta_{n-1}(x)} \quad \zeta_{-1}(z) = \cos(z) - i \sin(z)$$

$$\zeta_0(z) = \sin(z) + i \cos(z)$$

Fct de Riccati-Bessel

$$D_{n-1}(mx) = \frac{n}{mx} - \frac{1}{D_n(mx) + \frac{n}{mx}}$$

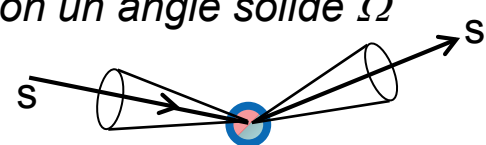
$$D_{n_{\max}} = 0 + i0 \quad N_{\max} = \max\left(x + 4x^{1/3} + 2, |mx|\right)$$

Sans grand intérêt... assez facilement programmable, ou accessible sur programmes libre accès

La fonction de phase

● $P_\lambda(\Omega', \Omega)$: Définition et forme « exacte » d'après Mie

La probabilité pour une onde arrivant dans une direction s selon un angle solide Ω d'être diffusée dans une direction s' selon un angle solide Ω' .



Conséquence : propriété de normalisation

$$\frac{1}{4\pi} \int_{\Omega=4\pi} P_\lambda(\Omega', \Omega) \cdot d\Omega' = 1 \quad \text{Pas toujours garanti après discrétisation!}$$

Facteur d'asymétrie $g = \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} P(\Theta) \cos(\Theta) d\Omega$

$g > 0$ anisotropie vers l'avant

$g = 0$ diffusion isotrope

$g = -1$ rétrodiffusion

$$P_{\text{Mie}}(\Theta) = 2 \frac{|S_1(\Theta)|^2 + |S_2(\Theta)|^2}{x^2 Q_{\text{diff}}(x)}$$

$$S_1(\Theta) = \sum_{n=1}^{N_{\text{max}}} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n(\mu) + b_n \tau_n(\mu))$$

$$\pi_n(\mu) = \frac{2n-1}{n-1} \mu \pi_{n-1}(\mu) - \frac{n}{n-1} \pi_{n-2}(\mu)$$

$$S_2(\Theta) = \sum_{n=1}^{N_{\text{max}}} \frac{2n+1}{n(n+1)} (b_n \pi_n(\mu) + a_n \tau_n(\mu))$$

$$\tau_n(\mu) = n\mu \pi_n(\mu) - (n+1) \pi_{n-1}(\mu)$$

$$\pi_0 = 0 \text{ et } \pi_1 = 1$$

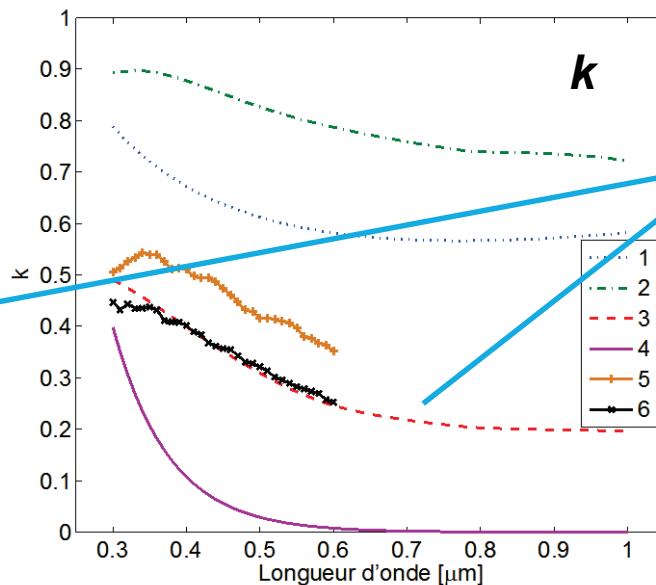
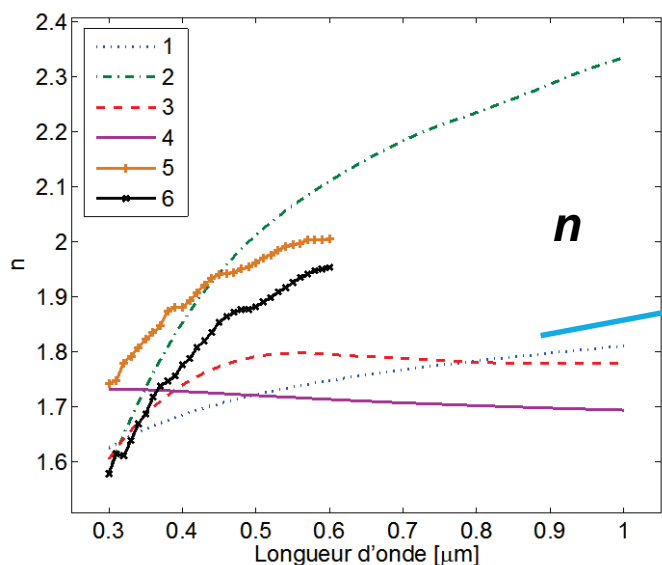
Les propriétés optiques

● **Indice optique complexe $m = n - i k$**

L'estimation des propriétés optiques des matériaux diffusant le rayonnement est capitale pour le calcul des grandeurs optiques Q_{abs} , Q_{scat} , Q_{ext} , κ , σ_s , β , $P(\Omega, \Omega')$, g

Remarque : Littérature &/ou mesures (spectroscopie ...)

! Poussières carbonées, grande variété de valeurs de n & k (selon le processus d'élaboration)

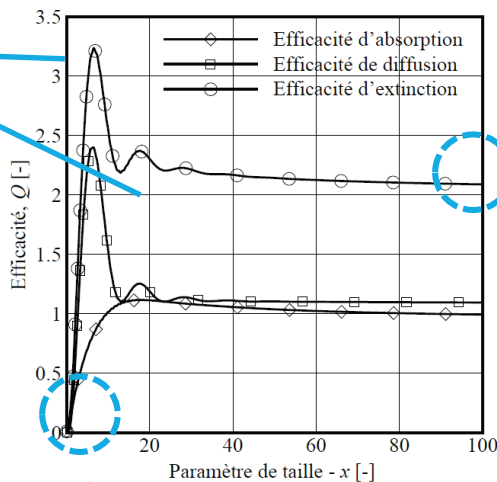


plasma d'arc entre
deux électrodes de
carbone amorphe
en atmosphère
hydrogène (ACH2)

Quelques idées sur les variations de ces grandeurs fondamentales

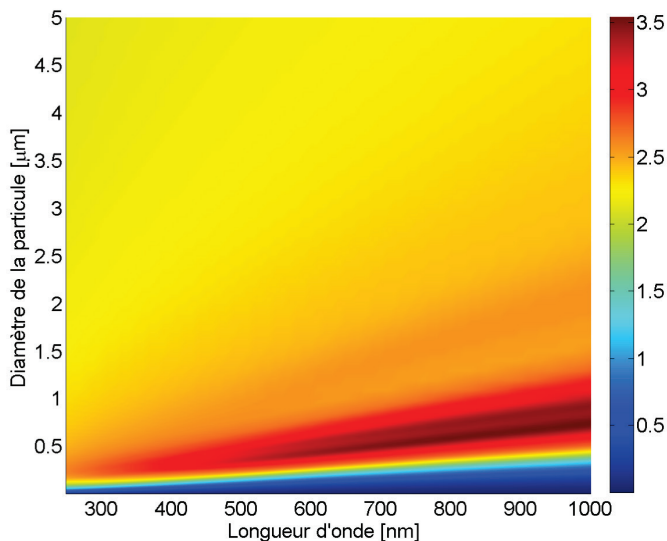
● Efficacités – Sphères, carbone ACH2

*Des oscillations
 Atténuées par
 l'absorption ou les
 polydispersions*

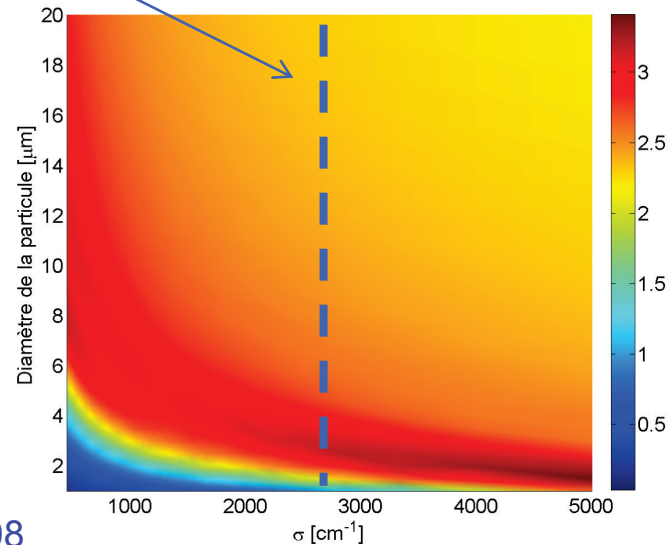


*Une limite vers 2 intéressante!
 Le paradoxe d'extinction !*

Q_{ext} , UV - Visible



IQ_{ext} , Infrarouge



*Tend vers 0 pour
 les très petites
 particules*

Y. Peng et al., JQSRT, 109, 2008

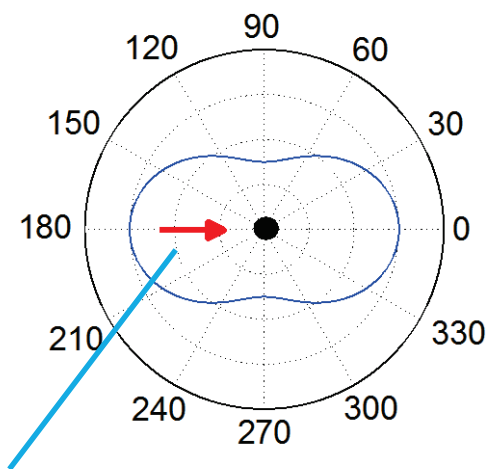
Quelques idées sur les variations de ces grandeurs fondamentales

- Fonctions de phase $P(\Theta)$ pour des poussières carbonées ACH2 sphériques ($\lambda = 300\text{nm}$)

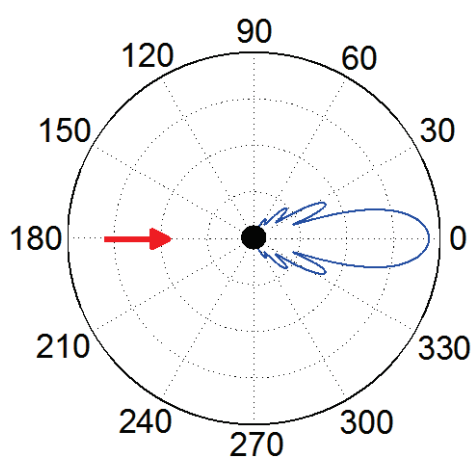
$x = 0.1$ (Rayleigh)

$x = 10$

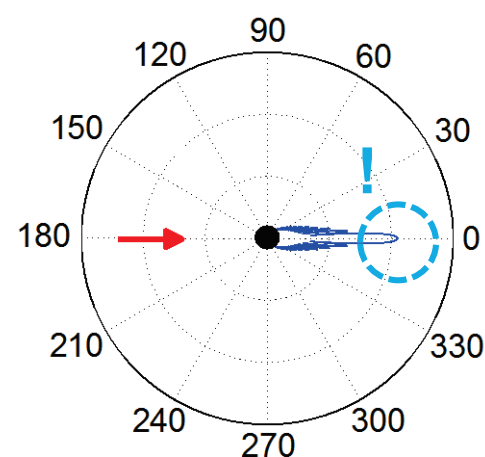
$x = 50$



Rayonnement incident



Θ angle de diffusion

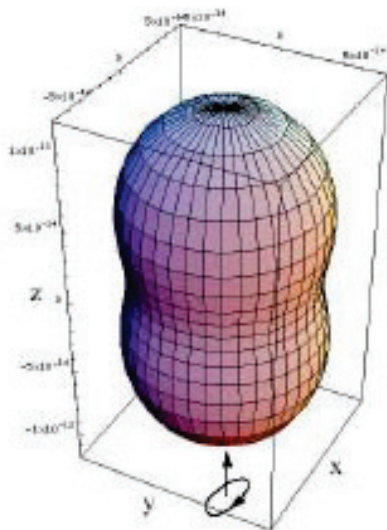


➡ Une anisotropie vers l'avant croissante avec le paramètre de taille

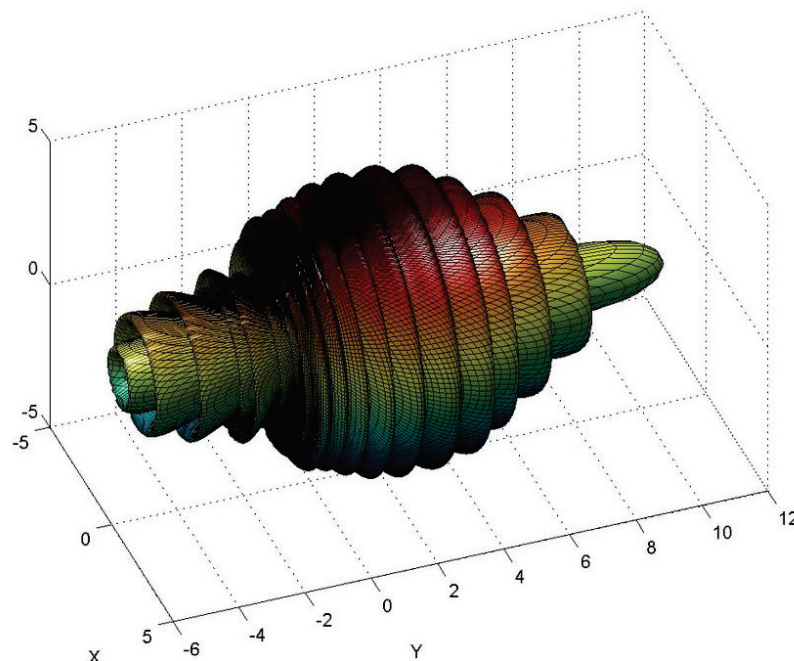
Quelques idées sur les variations de ces grandeurs fondamentales

● Fonctions de phase $P(\Theta)$, représentation 3D

Rayleigh ($d=10\text{nm}$)



Mie ($d=4\mu\text{m}$; $\lambda=633\text{nm}$)



➡ *La symétrie azimutale est due à la symétrie de la particule (ici des sphères)*

La fonction de phase

● Il existe des formes approchées

Plus simple, évite les problèmes de stockage mémoire, nécessaire en cas d'identification

Les basiques... $P(\Theta) = 1$ **isotrope** $P(\Theta) = 1 + A \cos(\Theta)$ **LAS** $P(\Theta) = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n P_n(\cos(\Theta))$ **Poly. de Legendre**

Henyey et Greenstein $P(g, \cos(\Theta)) = \frac{1 - g^2}{(1 - g^2 - 2g \cos(\Theta))^{3/2}}$ **Aptitude pour anisotropie marquée, utile en méth. inverses**

Milne-Eddington $P(\Theta) = 2f\delta(1 - \cos(\Theta)) + (1 - f) \left(1 + \sum_{n=0}^M A_n^* P_n(\cos(\Theta)) \right)$
Possibilité de simplifier la résolution de l'ETR
 (prise en compte du pic de diffusion avant)

Formes composées $P(f_1, f_2, g_1, g_2, \cos \Theta) = f_2 (f_1 P_{HG}(g_1, \cos \Theta) + (1 - f_1) P_{HG}(g_2, \cos \Theta)) + (1 - f_2)$
Possibilité de modéliser diffusion avant et rétrodiffusion

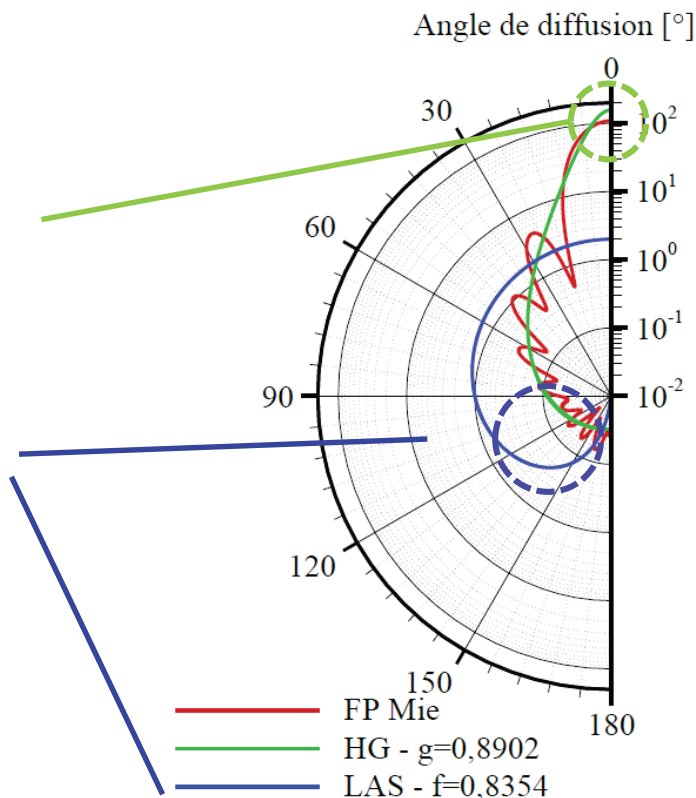
La fonction de phase

● Quelle précision pour ces formes approchées?

Comparaison Mie – Henyey et Greenstein
– LAS

*Henyey et Greenstein : attention! Facteur 2
dans le pic de diffusion!!*

*LAS ... une estimation correcte de la part
de diffusion « effective », mais on est loin
de la bonne représentation de la part
diffusée*



Solutions asymptotiques

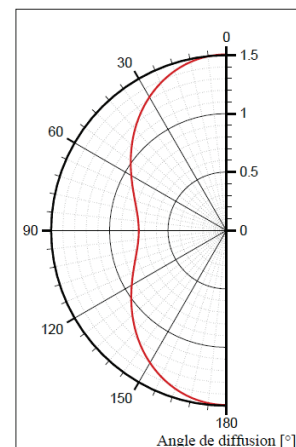
● Petites particules, régime de diffusion de Rayleigh

$$Q_{\text{diff}} = \frac{8}{3} x^4 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$$

$$Q_{\text{ext}} = -4x \Im \left[\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right] \approx Q_{\text{abs}}$$

$$P(\Theta) = \frac{3}{4} (1 + \cos^2(\Theta))$$

Dépendance en $1/\lambda^4$ pour la diffusion, en $1/\lambda$ pour l'absorption

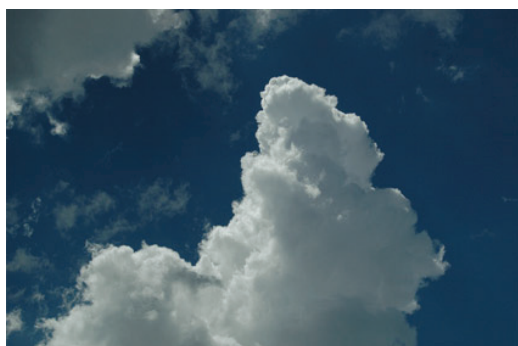


*Pas isotrope...
 (effet de polarisation de la lumière, dipôle)*

Suppose aussi particule sphérique...

Solutions asymptotiques : Diffusion Rayleigh ... Bleu du ciel

● Atmosphère (molécules), diffusion du rayonnement visible

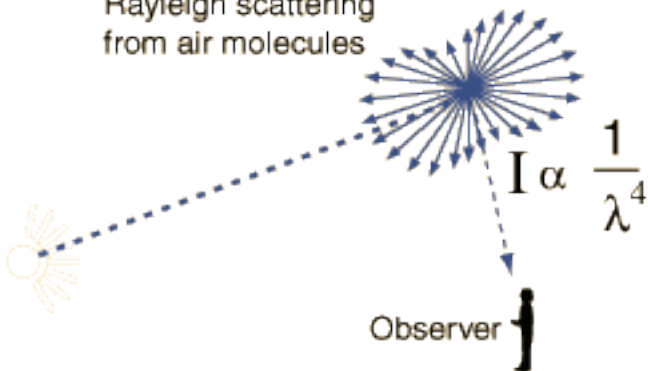


$$Q_{\text{diff}} = \frac{8}{3} x^4 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$$

$$Q_{\text{ext}} = -4x \Im \left[\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right] \approx Q_{\text{abs}}$$

Rayonnement visible : $400 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$

Rayleigh scattering
from air molecules



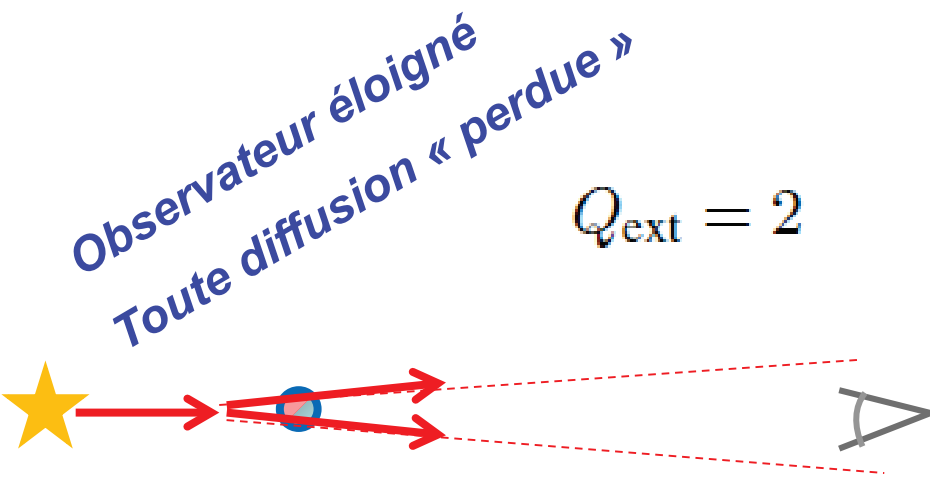
The strong wavelength dependence of Rayleigh scattering enhances the short wavelengths, giving us the blue sky.

The scattering at 400 nm is 9.4 times as great as that at 700 nm for equal incident intensity.

**Dépendance en $1/\lambda^4$
pour la diffusion, en
 $1/\lambda$ pour l'absorption**

Solutions asymptotiques

- Grosses particules, approximation de l'optique géométrique



??

Paradoxe d'extinction... mais est-on dans un cadre où on peut se considérer en champ lointain? Et la diffusion avant est « presque » de la transmission...

$Q_{\text{ext}} = 2$ (théorie) ; $Q_{\text{ext}} = 1$ (dans la pratique car la diffusion est très fortement vers l'avant - pic pointu)

➡ Loin du domaine d'application (nanoparticules)

Solutions pour particules non sphériques ou non homogènes

Même principe possible: résolution de l'interaction onde/particule

- **Cylindres infinis (avec ou non hypothèse de diffusion dépendante)**

Kerker, Lind et Greenberg, Lee

- **Sphères inhomogènes (« coated spheres », présence d'un dépôt ou inclusion)**

Aden et Kerker

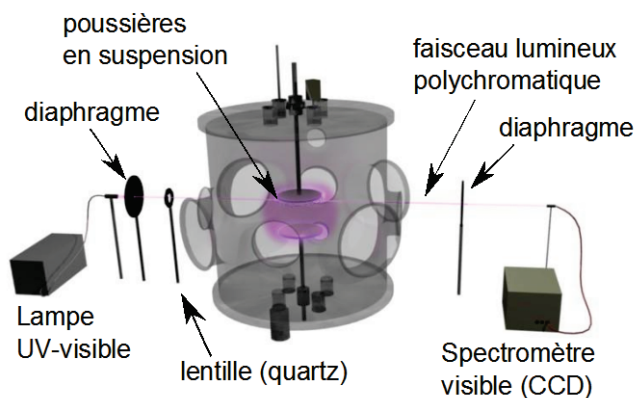
- **Ellipsoïdes, particules présentant une certaine asphéricité**

Yeh et Meï

Application aux plasmas poussiéreux

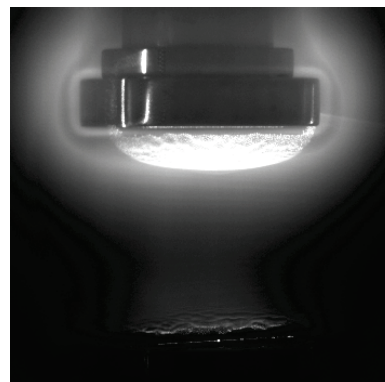
● Principe, fonctionnement, intérêts

Diffusion et absorption du rayonnement UV-visible-IR par des poussières carbonées

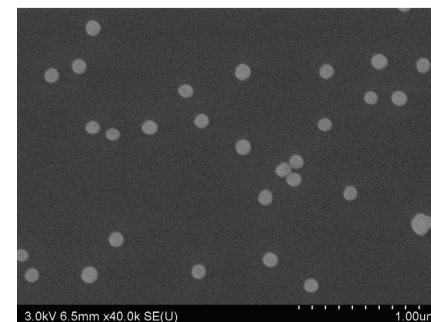
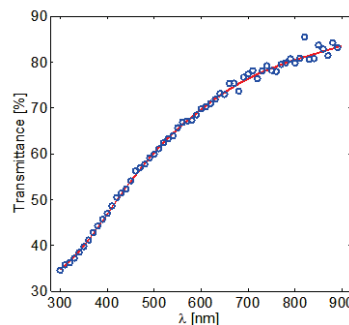


Possibilité de simuler ou mesurer la dynamique du transport des poussières (thèse S. Dap)

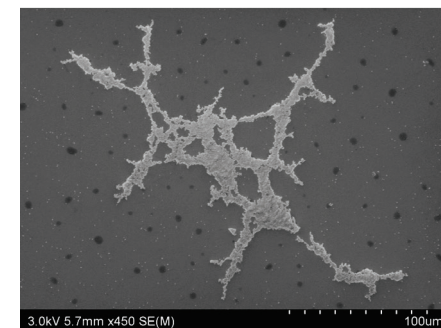
Transmittance expérimentale à la cathode



Poussières sous la cathode et au dessus de l'anode



Particules isolées et agglomérats



Application aux plasmas poussiéreux

● Les paramètres clés

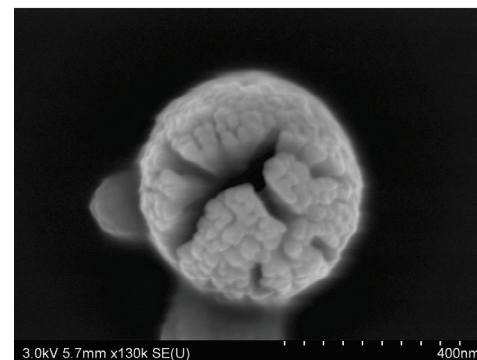
d_{Sauter} ou D_{32} de 150 nm à 400 nm

$$d_{\text{Sauter}} = \frac{\sum_i N_i d_i^3}{\sum_i N_i d_i^2}$$

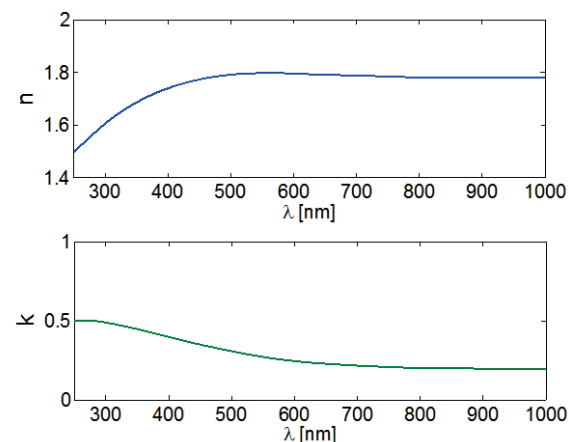
Particules sphériques (?) C + H

Gamme de longueurs d'onde 250 nm à 1 μm

Fraction volumique 10^{-6} à 10^{-5}



Thèse S. Dap



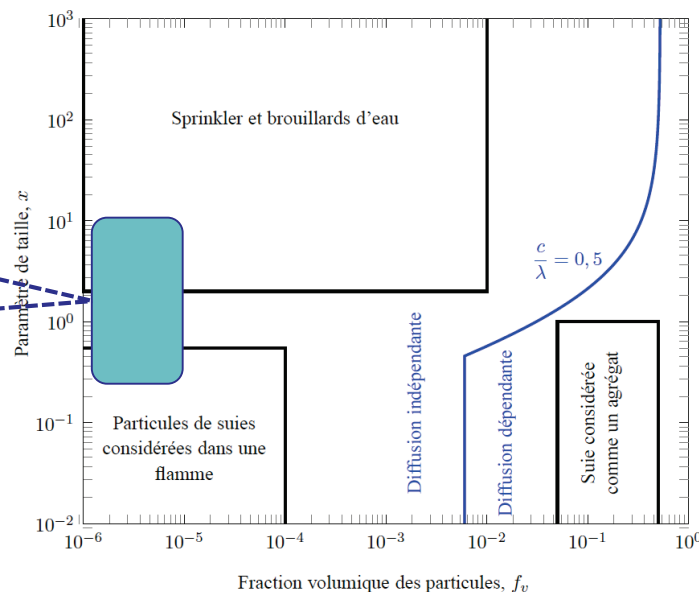
Indice optique : V.G. Zubko et al.

Application aux plasmas poussiéreux

→ Diffusion indépendante, ... Mie applicable

$$0.5 < x < 10$$

$$10^{-5} < f_v < 10^{-6}$$



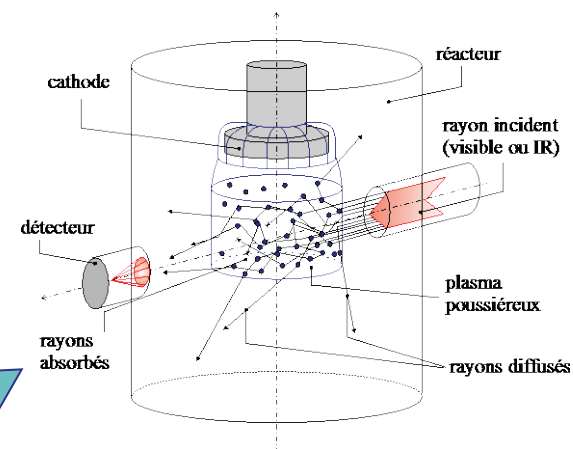
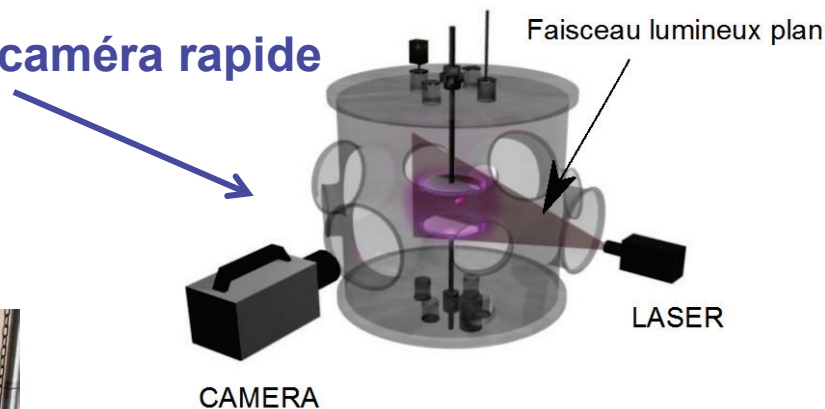
Approximation courante :

Diffusion Rayleigh/Mie pour les petites particules

Application aux plasmas poussiéreux

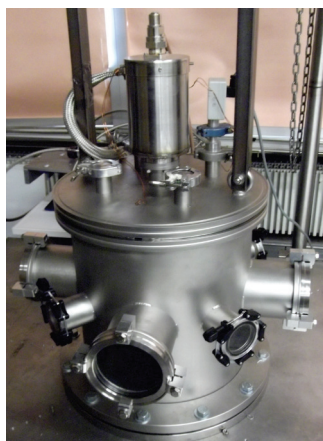
● Dispositif expérimental et modélisation

Imagerie par caméra rapide

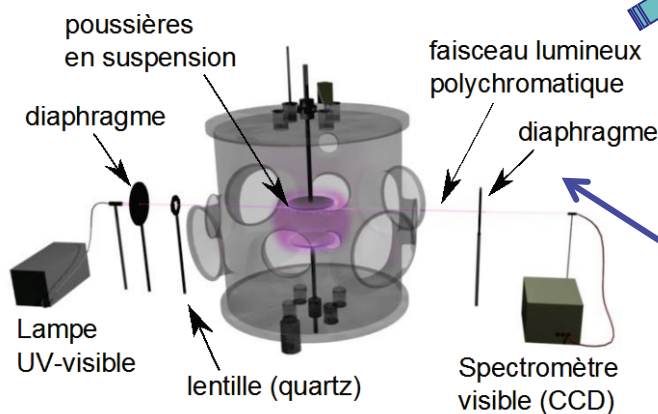


Simulation numérique par méthode de Monte Carlo

Spectroscopie par transmission (Visible ou IR)



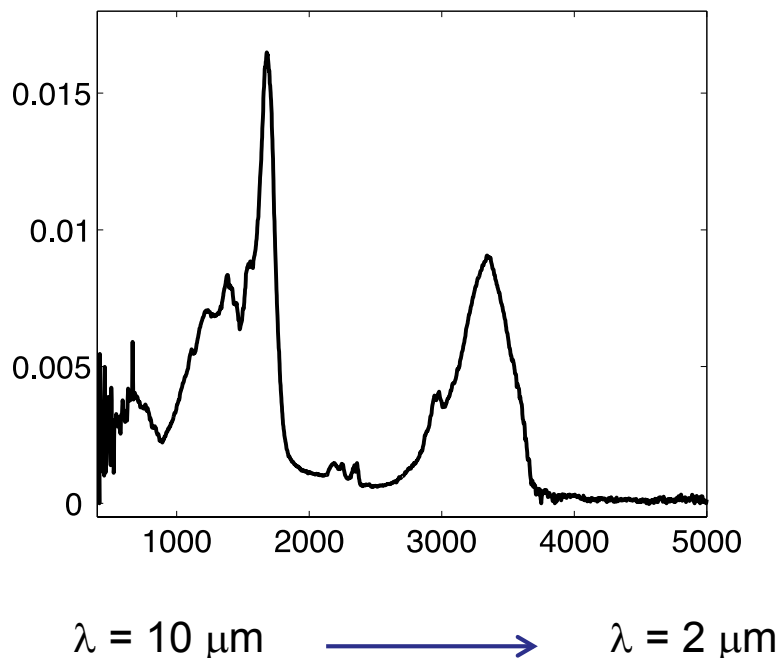
Réacteur « diode »



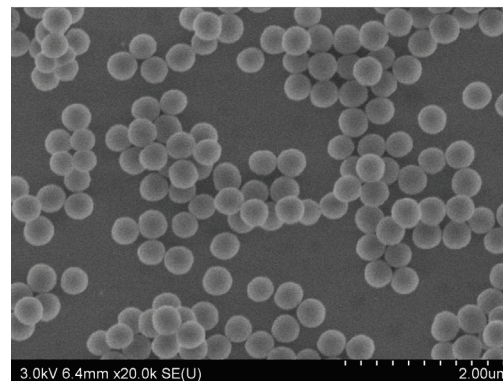
Application aux plasmas poussiéreux

● Domaine spectral étudié

Spectre IR Argon/Acétylène



$$\text{Abs} = \log_{10} (1/\text{Tr})$$



Poussières carbonées, photo MEB, taille sub-micrométrique.

Etant donné la taille des particules, l'étude dans l'IR moyen (2.5 μm à 15 μm) n'est pas pertinente (manque de sensibilité).

\longrightarrow Spectro dans le visible

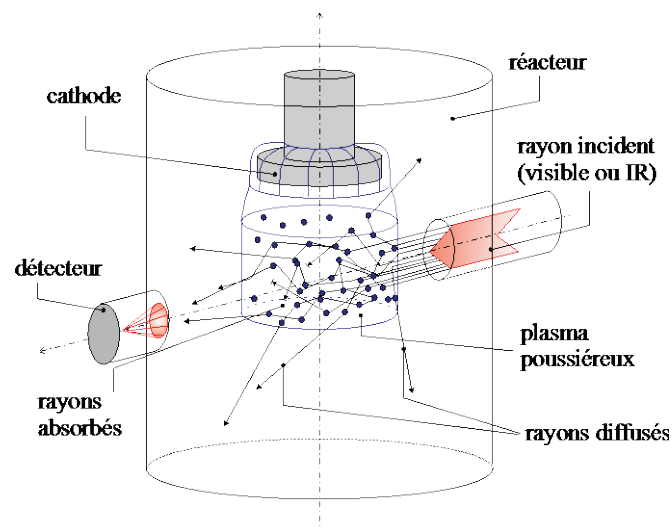
Application aux plasmas poussiéreux

● Simulation du transfert radiatif (MMC)

Approche directe :

- Indices optiques (n & k)
- Taille des particule (d) et distribution en taille $f_v(d)$
- Lancé de quanta ($I_0 = N_0 \times \delta E$) & calcul de l'intensité reçue par le détecteur ($I_T = N_r \times \delta E$) par intervalle spectral ($I_\sigma = -1/\sigma \ln(R)$)
- $Tr = I_T/I_0$

Implique la connaissance de $f_v(d)$!



S. Dap et al., NJP, 12, 2010

Méthode inverse pour remonter à $f_v(d)$ à partir de la mesure expérimentale

Application aux plasmas poussiéreux

● Méthode d'inversion par tirage aléatoire

Données :

- Indice optique
- Transmittance spectrale expérimentale

Démarche :

- Reconstruire le coefficient d'extinction β_{exp} par méthode itérative aléatoire (MMC)
- Minimisation entre β_{exp} et β_{MMC}

$$\bar{C}_{ext}(r_i, \lambda) = \frac{1}{\delta_r} \int_{r_i - \delta_r/2}^{r_i + \delta_r/2} Q_{ext}(r, \lambda) \pi r^2 dr$$

Section efficace d'extinction de particule de rayon r_i

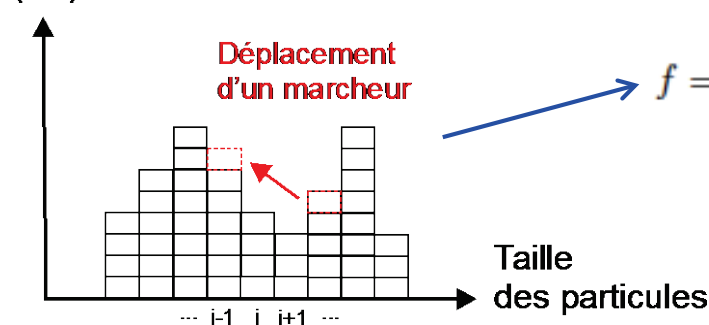
$$\beta_j = N_0 \sum_{i=1}^M (\bar{C}_{ext})_{ji} f_i$$

Coefficient d'extinction spectral à la longueur d'onde λ_j pour une distribution f_i donnée

$$\beta_j = \frac{-1}{L} \ln(T r_j)$$

Coefficient d'extinction spectral, déduit de la transmittance expérimentale à λ_j

(nw)



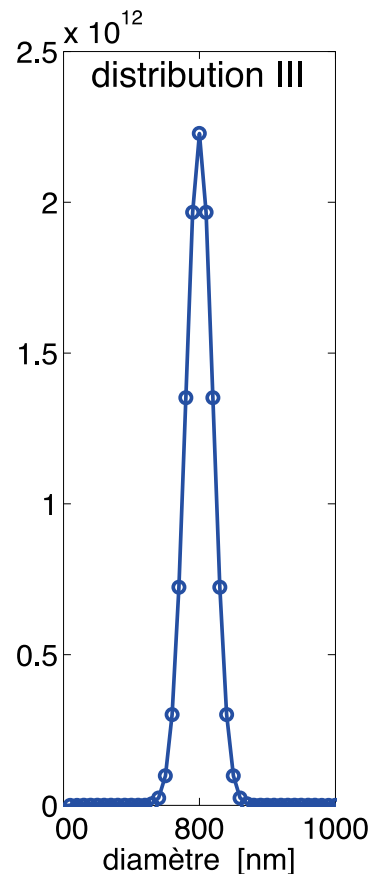
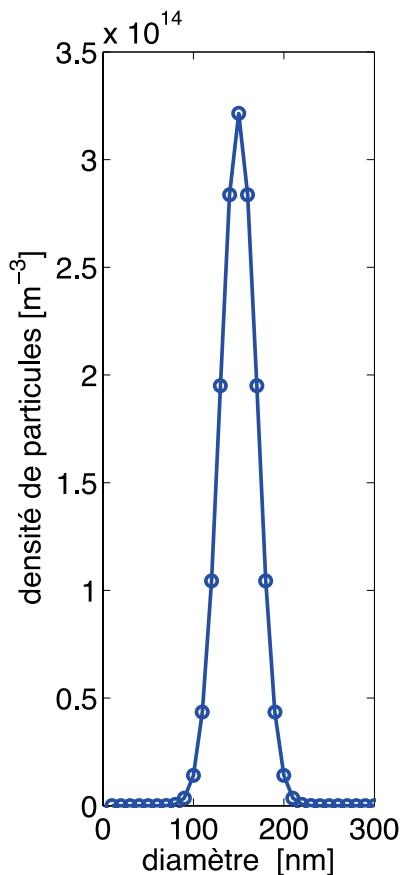
$$\beta_j^0 = \frac{1}{N_{tot}} \sum_{i=1}^M (\bar{C}_{ext})_{ji} (nw)_i$$

$$R = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \sqrt{\frac{(\beta_j - N_0 \beta_j^0)^2}{\beta_j^2}}$$

Résidu minimisant l'extinction expérimentale et l'extinction estimée à λ_j

Application aux plasmas poussiéreux

● Distributions tests et validation de la méthode

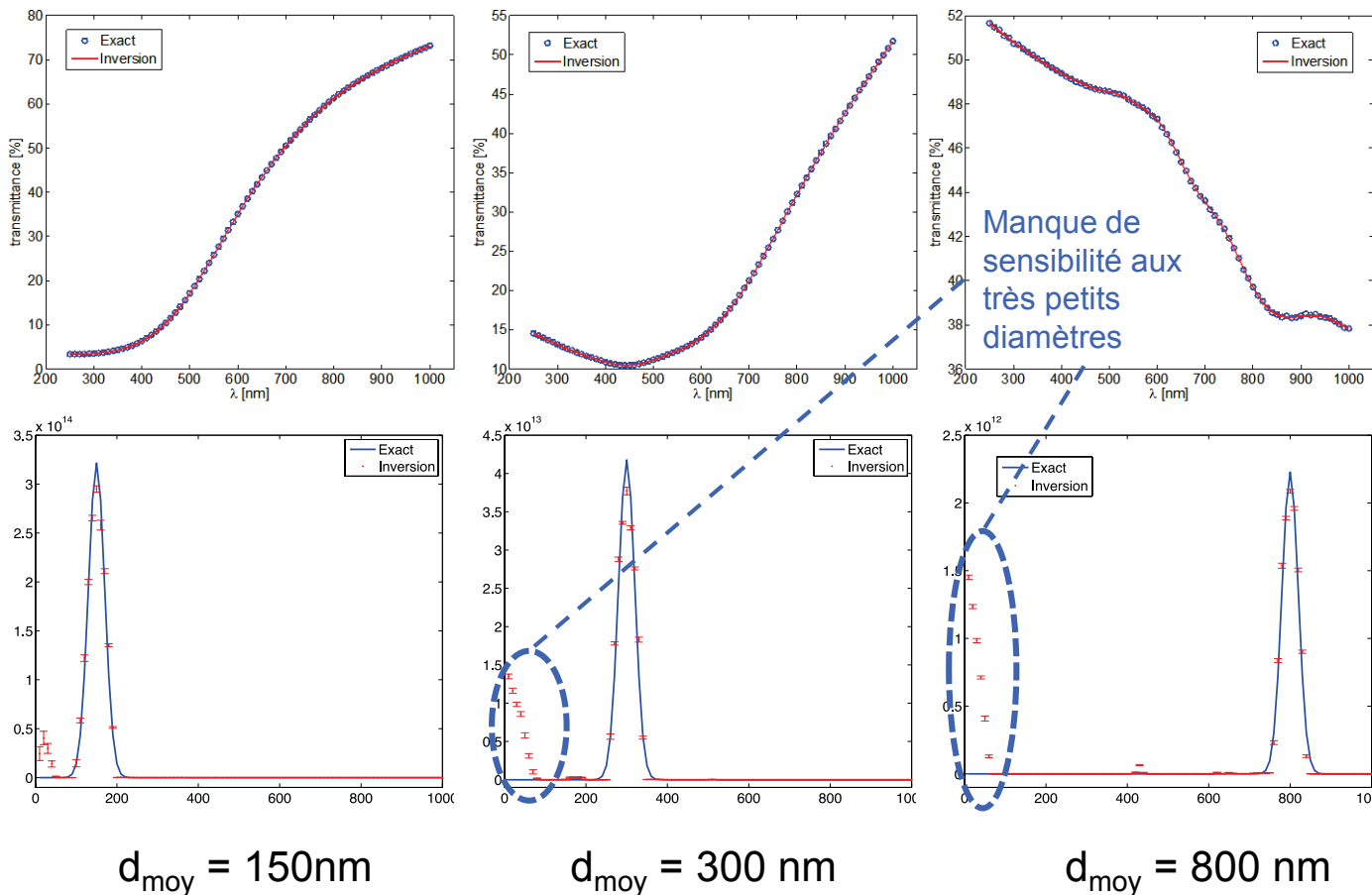


Test sur trois distributions mono-modales de petites, moyennes et grandes particules.

- Calcul MC direct (n , k , f_v donnent Tr_{MMC})
- Inversion par déplacement de marcheurs et minimisation de l'extinction β

Application aux plasmas poussiéreux

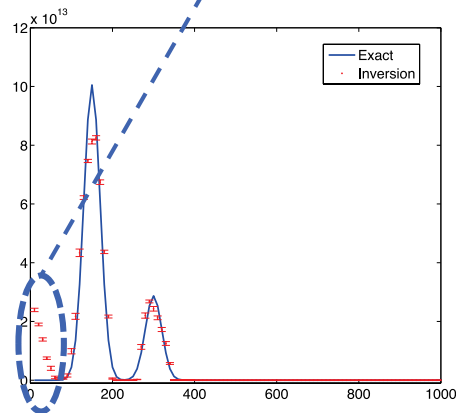
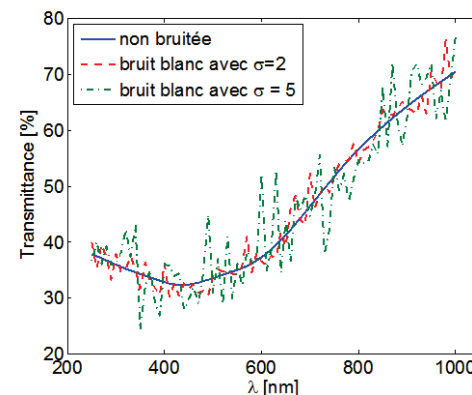
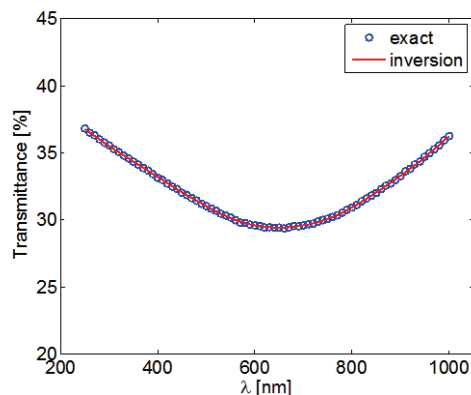
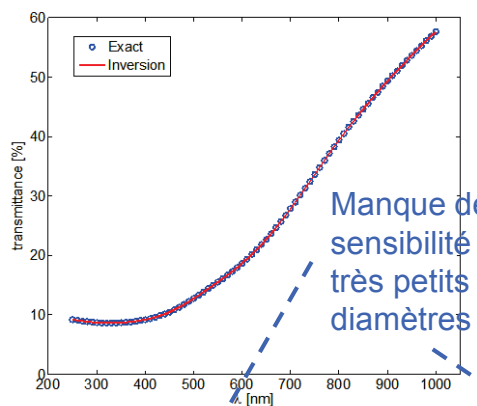
● Distributions tests et validation de la méthode ($f_v = 3,5 \cdot 10^{-6}$)



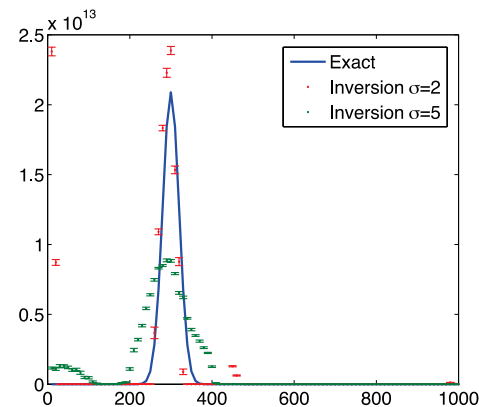
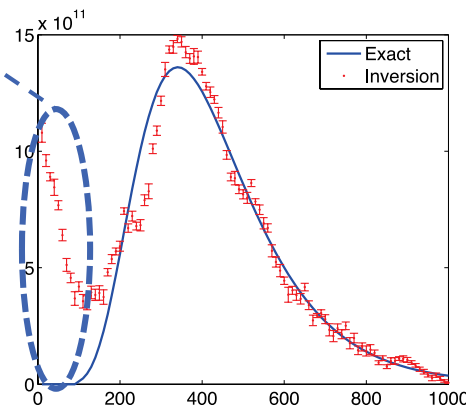
- Accord satisfaisant
- Sensibilité pour les petits diamètres fortement dépendante de la plage spectrale

Application aux plasmas poussiéreux

● Distributions complexes tests et validation



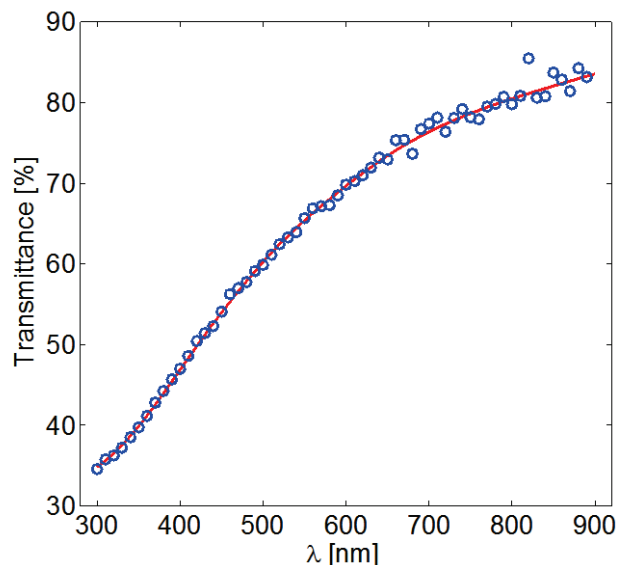
bimodale



Application aux plasmas poussiéreux

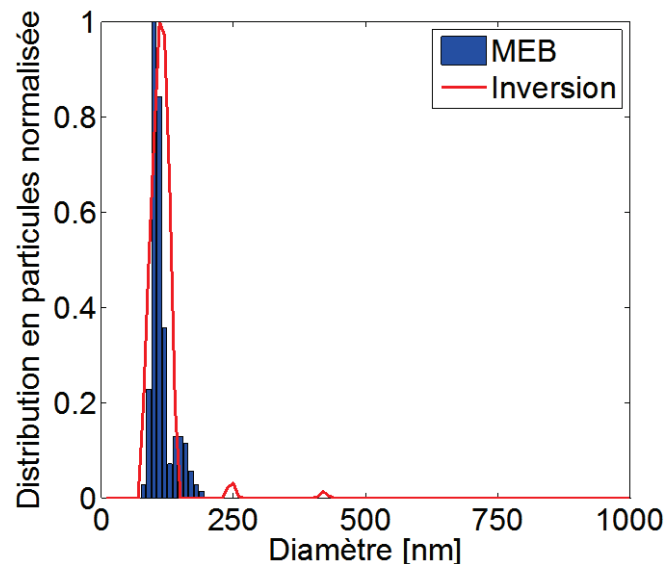
● Validation expérimentale

Spectre de transmittance expérimental



Distribution en taille
des poussières :
inversion et
comptage MEB

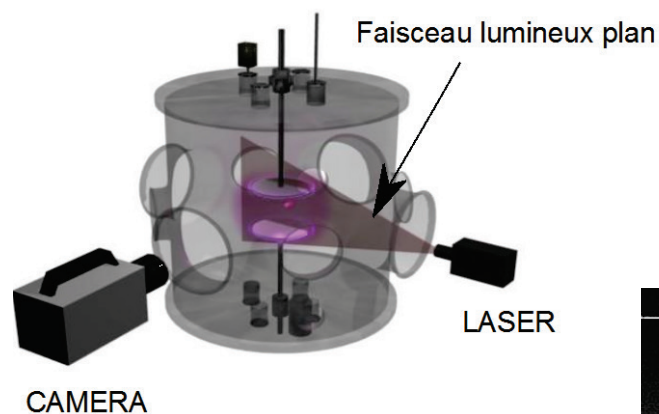
S. Dap et al., JQSRT, 128, 2013



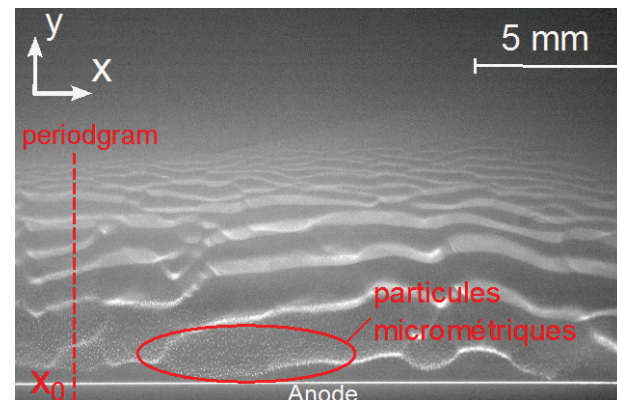
- **Bon accord**
- **Résolution dépendante des propriétés optiques**
- **Démarche valide dans le cas de la diffusion simple**

Application aux plasmas poussiéreux

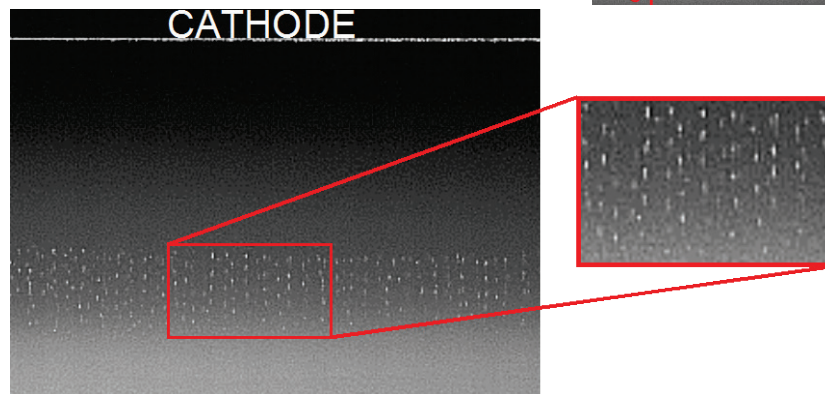
● Suivi de « grosses » poussières



Anode



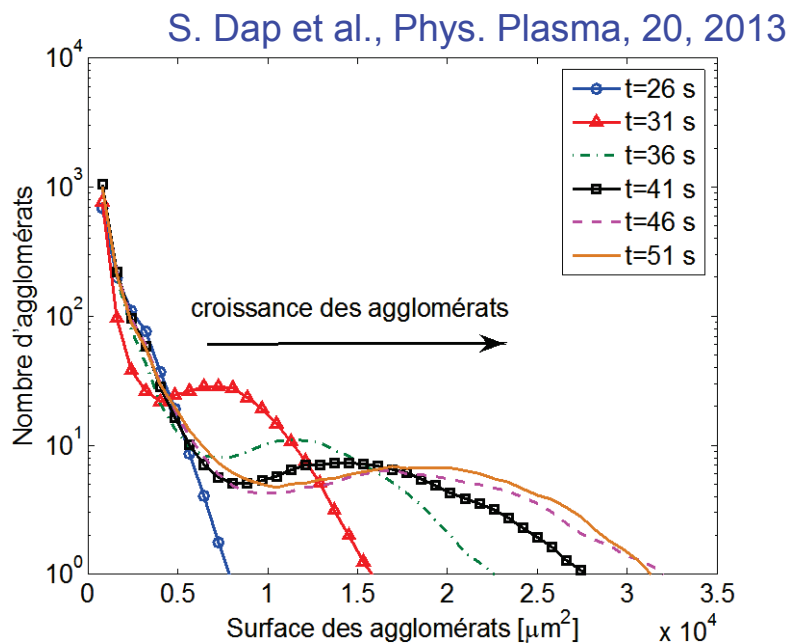
Cathode



- Poussière de taille micrométrique, agglomérats
- Dynamique de croissance et d'agglomération ?

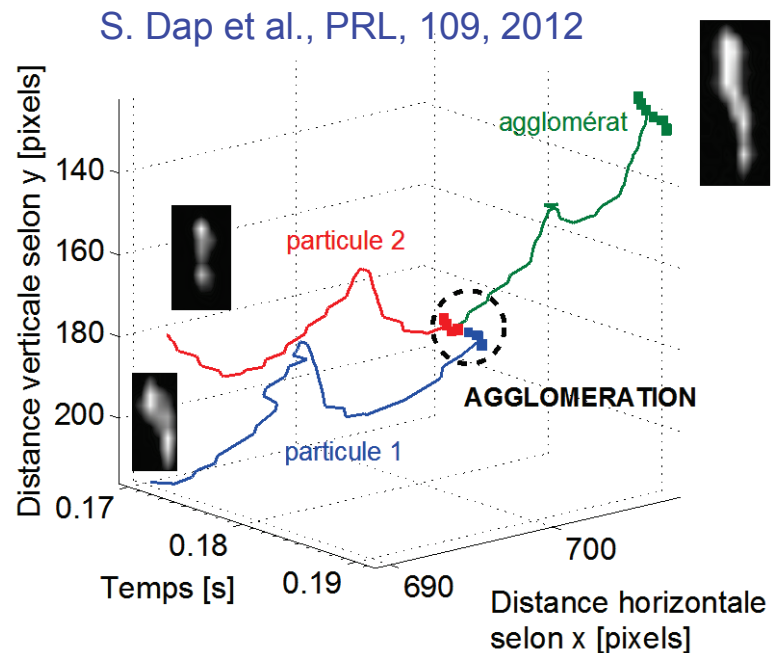
Application aux plasmas poussiéreux

● Suivi de « grosses » poussières



Suivi au cours du temps de la surface des agglomérats

- Imagerie rapide adaptée aux micro-particules

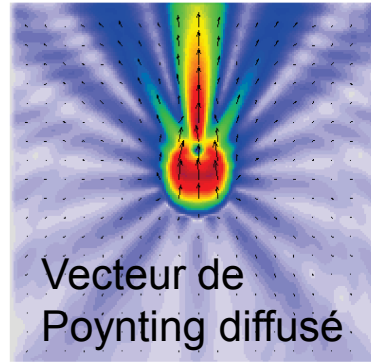
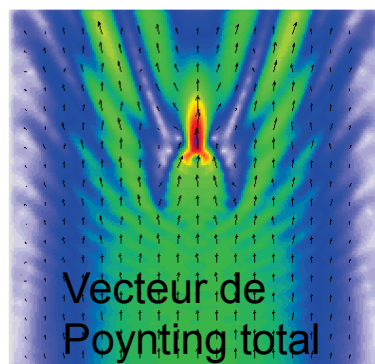
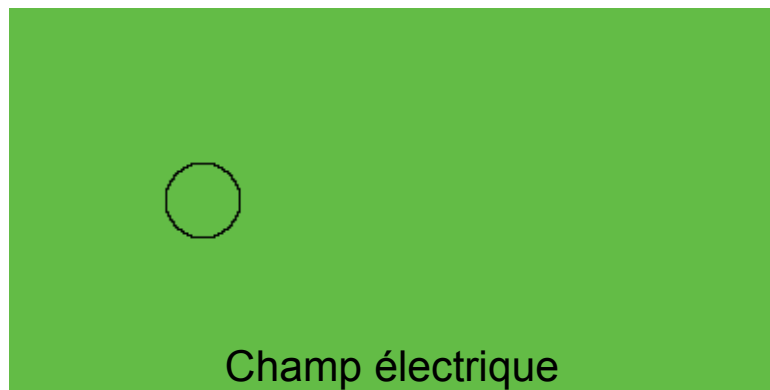
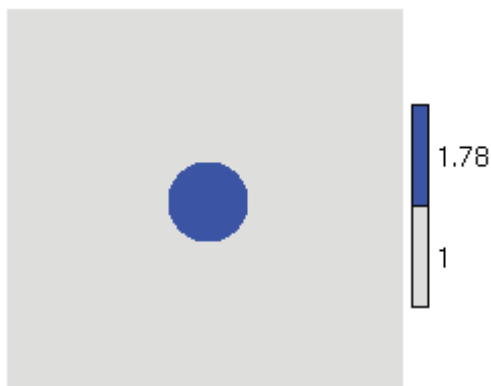


Suivi au cours du temps d'un processus d'agglomération

Diffusion du rayonnement et théorie de Mie ... Pour aller plus loin

● Mie, approche électromagnétique (Eq. De Maxwell)

Résolution FDTD (plusieurs outils libres <http://www.scattport.org/>)



- Particules complexes
- Diffusion dépendante
- Littérature abondante



Ne pas réinventer la roue !

L'exemple des particules de suie

● A quoi ressemble une particule de suie ?

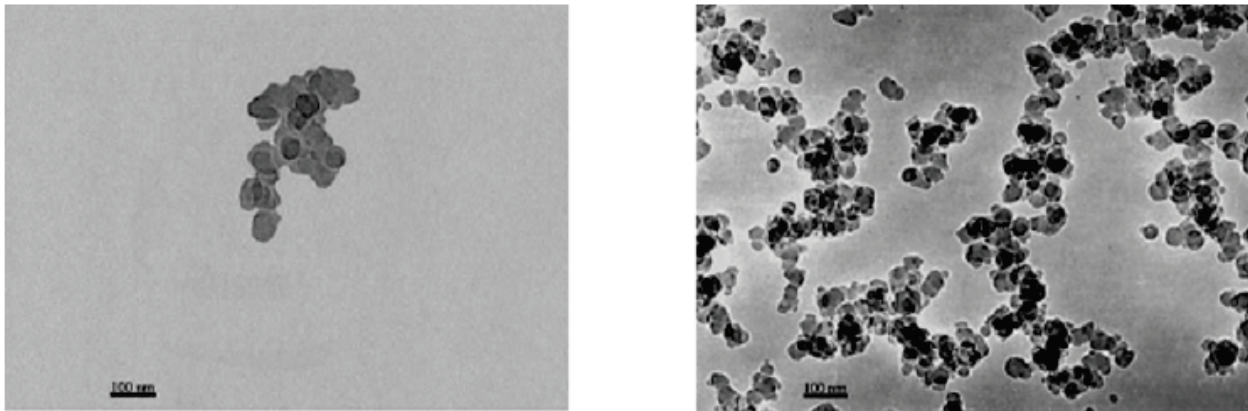
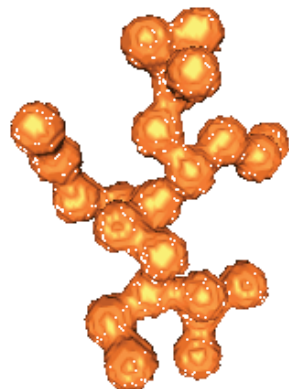
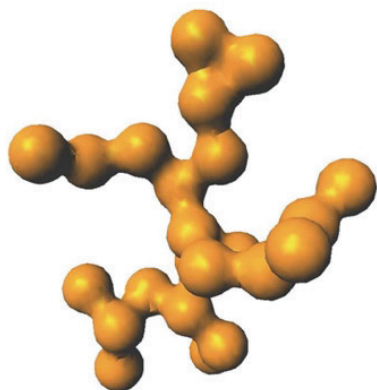


FIGURE 29 – Clichés en microscopie électronique à transmission d'agrégats de suie issus d'une flamme jet de diffusion d'éthylène ; à gauche : cliché en proche zone de formation ; à droite : cliché en zone de forte concentration en particules. D'après Xu *et al.* (2001).

Agrégats de particules (plus ou moins sphériques), chaînes plus ou moins compactes, plus ou moins longues

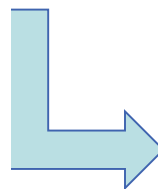
L'exemple des particules de suie

- Quel modèle géométrique pour représenter simplement une particule de suie ?



Agrégat de particules (appelées monomères)

- sphérules à un point de contact,
- sphérules se recouvrant partiellement,
e forme arbitraire... ?



Loi fractale de masse

L'exemple des particules de suie

- Quelle composition, quelle structure atomique ?

Atomes : C > H > O > ...

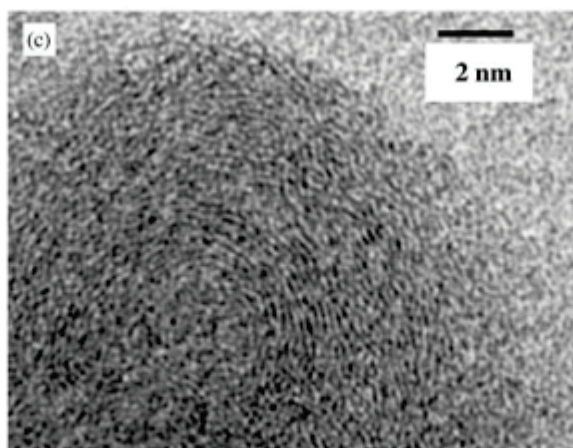


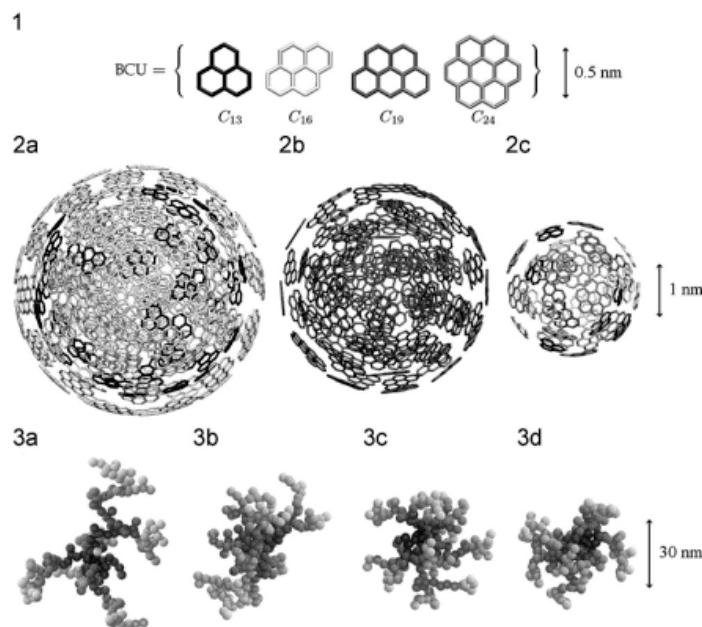
FIGURE 31 – Structure d'éléments graphitiques nano-cristallins en pelure d'oignon d'une particule primaire de suie de moteur Diesel. D'après Wentzel *et al.* (2003).

Structures : nano-cristalline (en pelure d'oignon) / amorphe

L'exemple des particules de suie

● Quel indice complexe de réfraction ?

Modélisation (structure atomique, simulations DDA)



Confirmation des sensibilités de la permittivité à :

- la composition,
- la structure atomique,
- au modèle de polarisabilité des atomes (carbone)

FIGURE 34 – Construction atomique d'agrégats modèles de suie en vue de réaliser des simulations DDA. 1 : Unités Chimiques de Base. 2 : distribution en pelure d'oignon pour former des sphérules. 3 : agrégats fractals à 200 sphérules générés pour diverses valeurs de la dimension fractale. D'après Langlet *et al.* (2009).

L'exemple des particules de suie

- Quel indice complexe de réfraction ?
 Dépend des conditions de combustion !!

Indice complexe de réfraction
 loi ou valeurs loi de mélange
bases de données

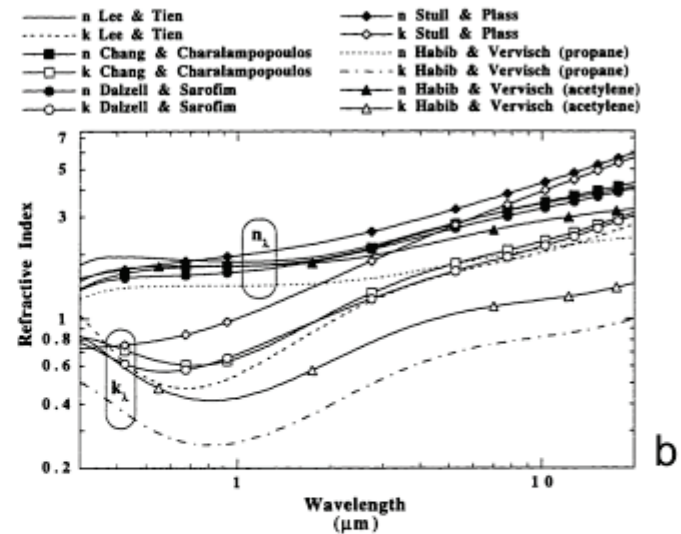
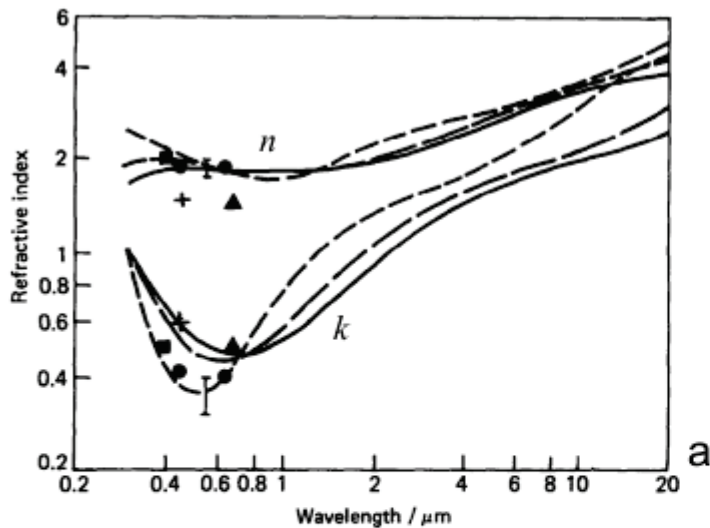


FIGURE 32 – Indice complexe de réfraction des suies. a : d'après Mullins et Williams (1987); les symboles correspondent à des valeurs spécifiques issues de travaux antérieurs et les courbes aux tracés d'un modèle dispersion à plusieurs températures (pointillés courts : 300 K, pointillés longs : 1000 K et traits pleins : 1600 K). b : d'après Rigby (1996); les différentes courbes correspondent à l'application d'un modèle de dispersion avec des paramètres issus d'études antérieures.

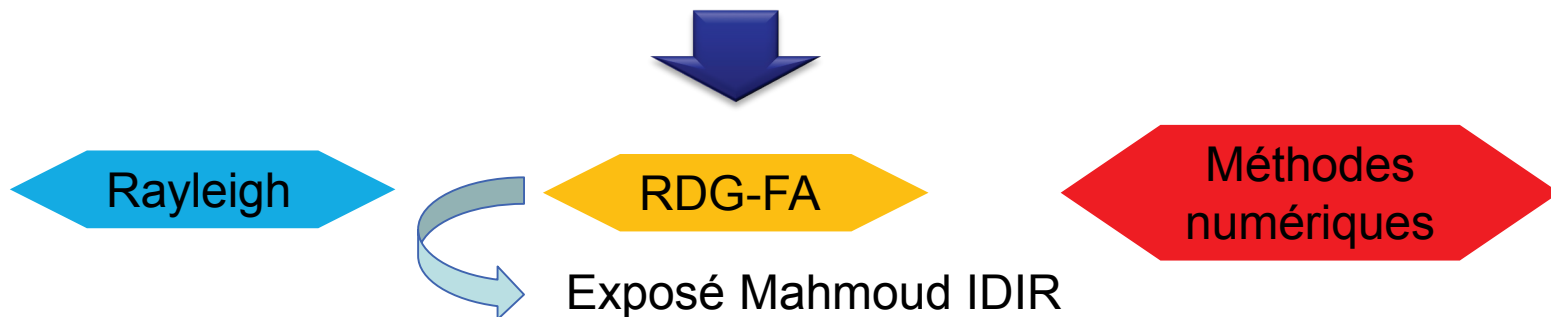
Drude - Lorentz

L'exemple des particules de suie

● Quel modèle de propriétés radiatives ?

Dans quel but ?

- valider un modèle approché (simulations, expériences),
- en vue de réaliser un calcul des transferts radiatifs, éventuellement couplé à des simulations aérothermochimiques,
- identifier, par comparaison à des résultats expérimentaux, des caractéristiques des particules de suie.



L'exemple des particules de suie

Méthodes
numériques

● Quel modèle de propriétés radiatives ?

Plusieurs classes de méthodes numériques

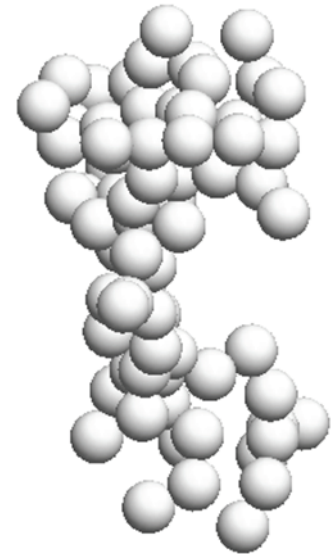
- éléments de frontière (Boundary Element Method, BEM),

- développements multipolaires,

T-matrix, Generalized Multi-sphere Mie (GMM), Generalized Mie Theory (GMT),...

- intégrale de volume (Volume Integral Method, VIM)

Discrete Dipole Approximation (DDA), Method of Moments (MoM),...



Pour aller plus loin...

- De nombreux livres et articles scientifiques
- Boîte à outils

www.scattport.org

search...

Contact Disclaimer ScattPort Page Information

SCATTPORT

You are here: Home 17 | 06 | 2014

Main Menu

- Home
- Light Scattering News
- Short Articles
- Conferences
- Vacant Positions
- Wriedt Group
- Scattport concept

Programs

- Light Scattering Software

Related / External

- Journals
- Books
- External Links
- TIB
- ViFaPhys
- ViFaTec

Acknowledgement

We acknowledge support of

LIP2014

Laser-light and Interactions with Particles, August 25-29th, 2014, Marseille, France

› Link (22 July 2013)

LIP 2014

25-29th August 2014
Marseille, France

JULIA

Julia is a high-level, high-performance dynamic programming language for technical computing, with syntax that is familiar to users of other technical computing environments like Matlab.

› Link (21 Feb 2014)

WORKSHOP SCATTERING BY AGGREGATES

Workshop "Scattering by aggregates (on surfaces)"

RAWDOG

RawDog is a MATLAB program by Gergely Kajtar. It calculates diffraction efficiencies of lamellar gratings, photonic crystals (1D and 2D) based on based on the Rigorous Coupled Wave Analysis (RCWA).

Special

- Gustav Mie
- Classic Papers
- ELS-Conference Series
- Codes page in 1994
- Mie Theory 1908-2008

Latest Additions

- Electromagnetic scattering from complex medium
- Dipole Code
- Too many searches
- MieOhMy
- FLAGE
- Overture
- Julia
- RawDog
- ACA Solver
- BETL

Popular

- RCWA