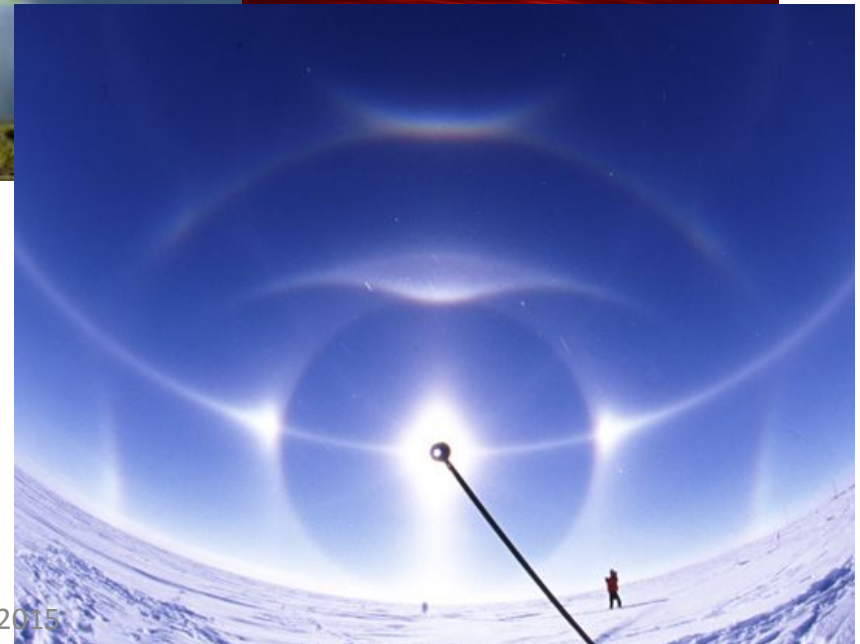
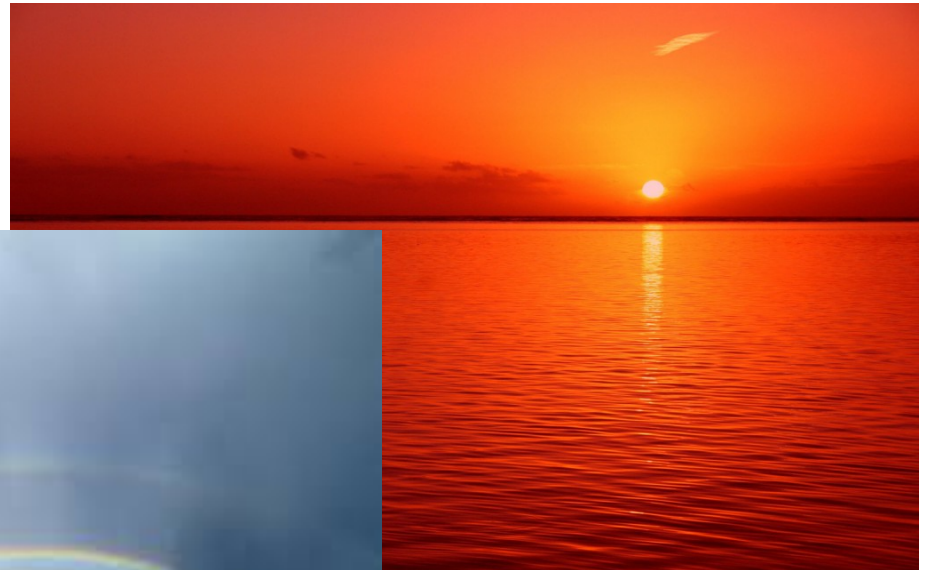




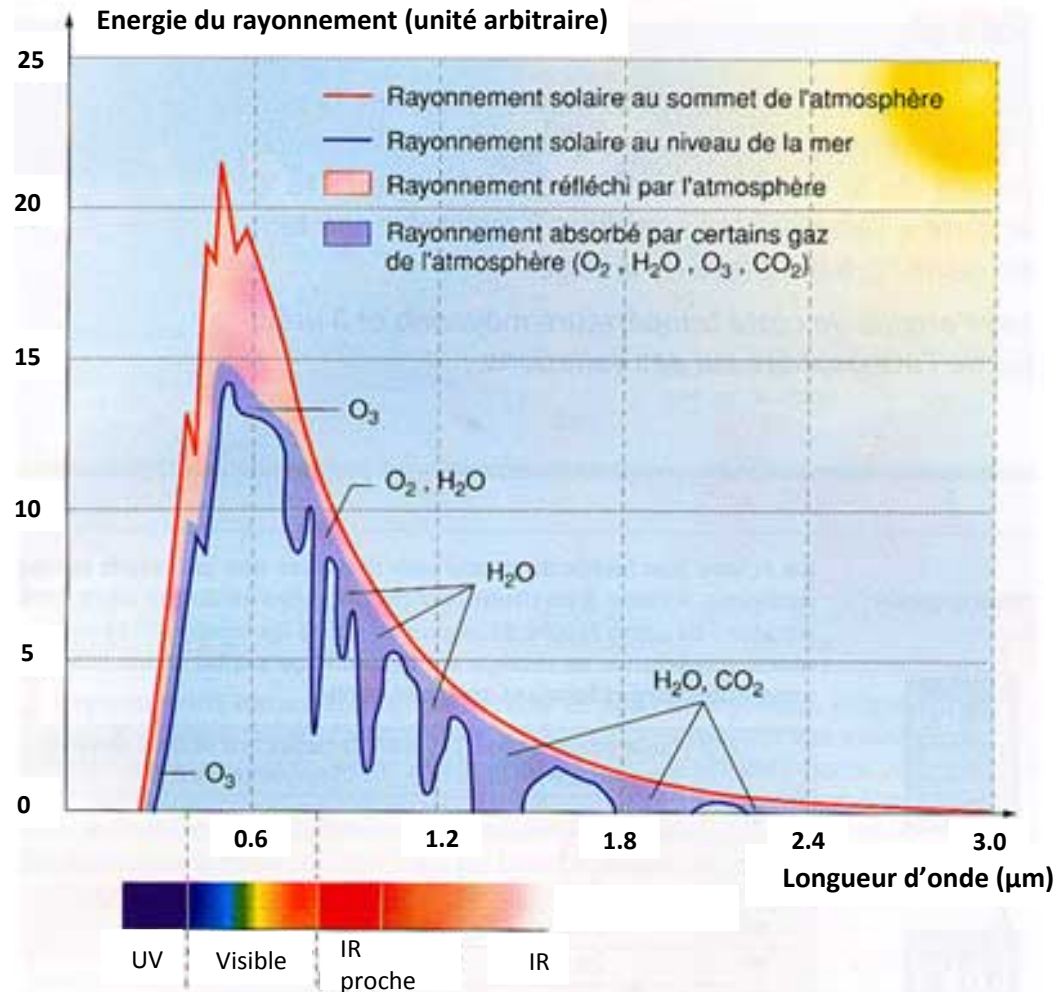
# La diffusion par les particules atmosphériques du visible aux microondes

Laurent Labonnote et Eric Defer

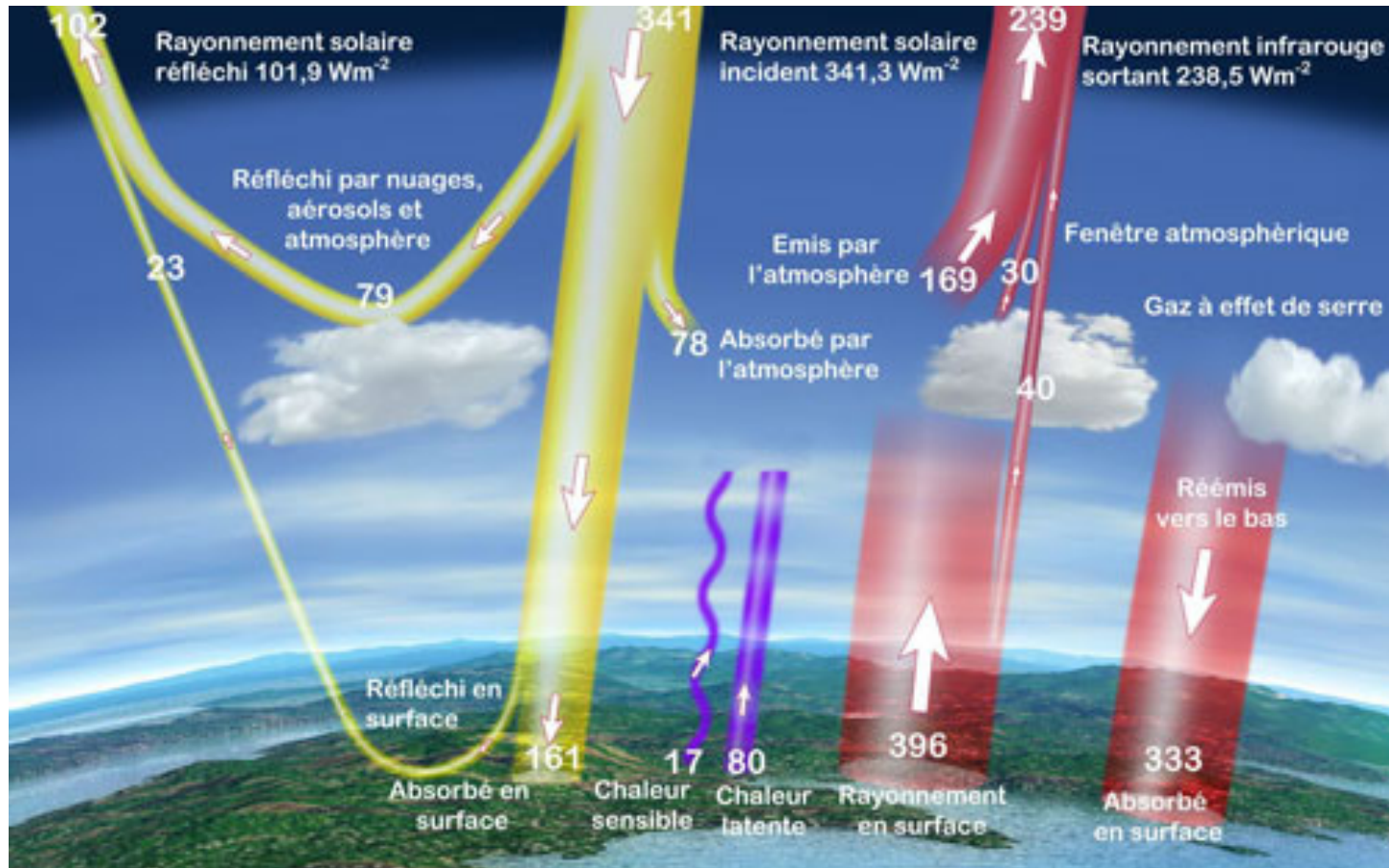
# La diffusion au jour le jour



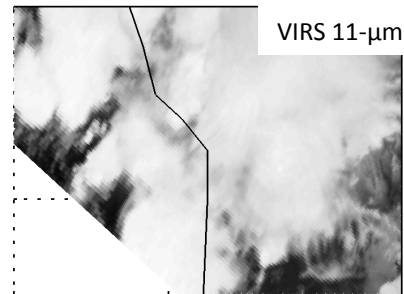
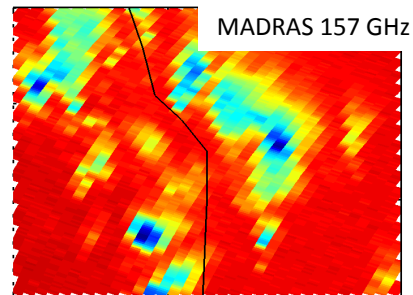
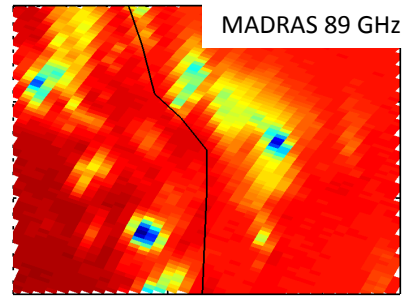
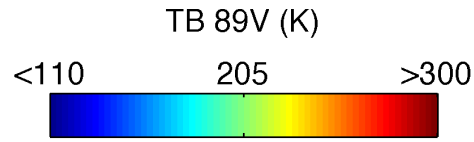
# Importance de la diffusion atmosphérique



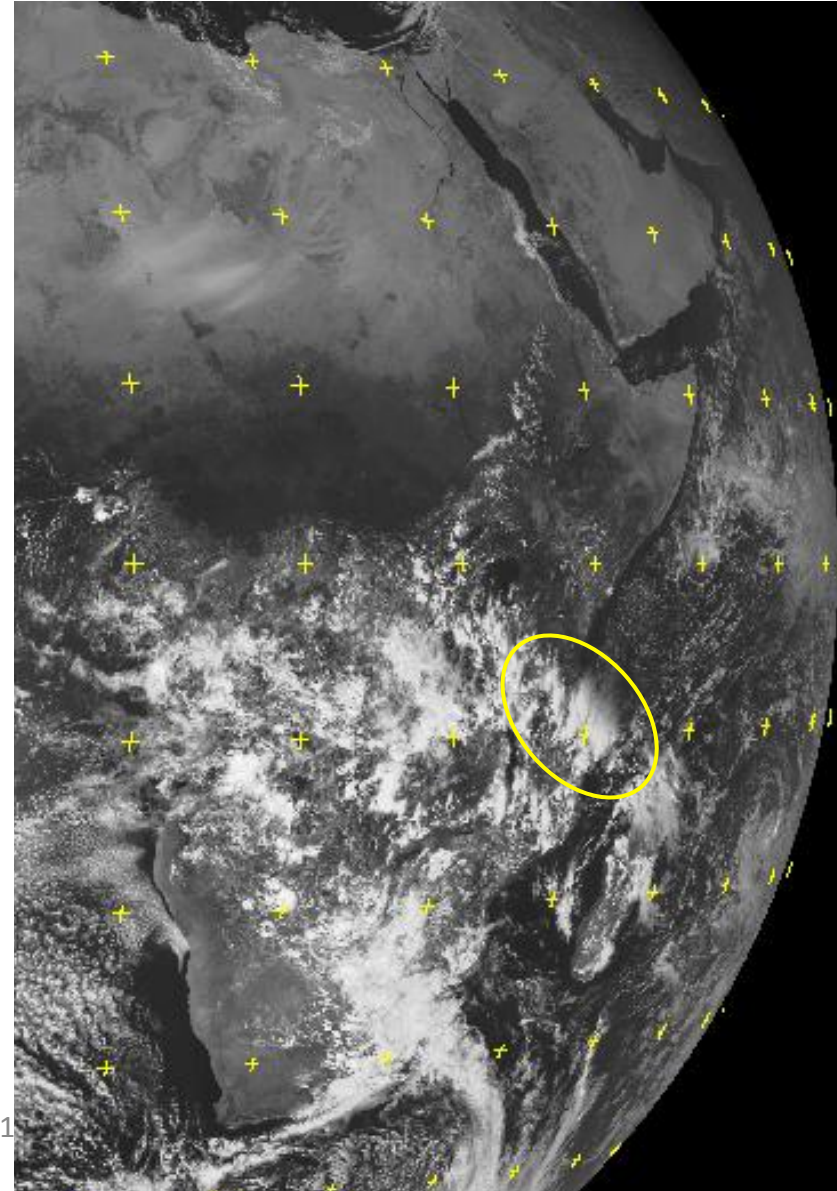
# Importance de la diffusion atmosphérique



# La diffusion telle qu'observée...



Observations de systèmes convectifs dans le canal du Mozambique par Megha-Tropiques MADRAS, TRMM VIRS et MSG SEVIRI.  
09 Decembre 2011, 12 TU

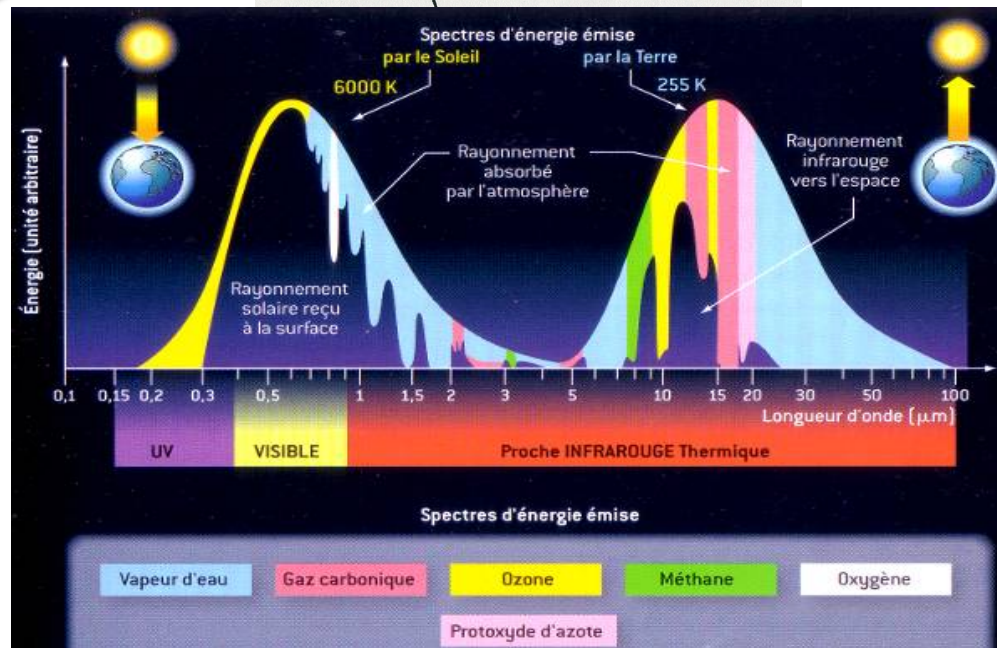


# Equation générale du transfert radiatif

$$\frac{\partial I_\lambda(z, \theta, \varphi)}{\partial z} = -\sigma_\lambda^{ext} \cdot I_\lambda(z, \theta, \varphi) + \frac{\sigma_\lambda^{diff}}{4\pi} \int_{\Omega=4\pi} P_\lambda(z; \theta', \varphi', \theta, \varphi) \cdot I_\lambda(z, \theta', \varphi') \cdot \sin\theta' d\theta' d\varphi' + \sigma_\lambda^{abs} \cdot B_\lambda(T(z))$$

Terme de diffusion

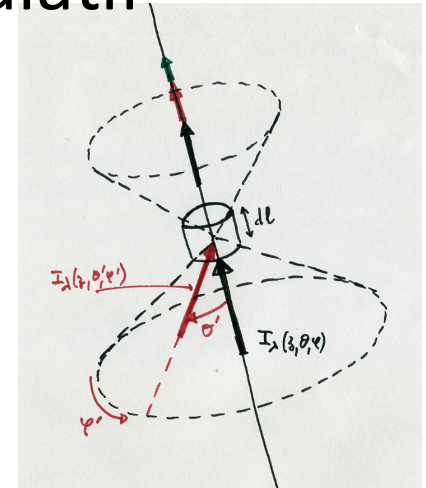
Terme d'émission



# Equation générale du transfert radiatif

## La diffusion

$$\frac{\sigma_{\lambda}^{diff}}{4\pi} \iint_{\Omega=4\pi} P_{\lambda}(z, \theta', \varphi', \theta, \varphi) \cdot I_{\lambda}(z, \theta', \varphi') \cdot \sin\theta' d\theta' d\varphi'$$



Coefficient de diffusion

$$\sigma_{diff} = \int_0^{\infty} \pi r^2 Q_{diff} n(n) da \quad (m^{-1})$$

avec  $\int_0^{\infty} n(n) da = N_0$

Fonction de phase ou matrice de phase

Probabilité de diffusion dans une direction donnée:

$$\iint P_{\lambda}(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi = 4\pi$$

**Dépendent de:**

- L'indice
- La forme
- La taille ou distribution en taille
- La longueur d'onde

# Paramètre de Mie et méthodes de résolution de la diffusion

Paramètre de Mie:  
 $x = 2\pi r/\lambda$

Gouttes d'eau, neige,  
 grêle

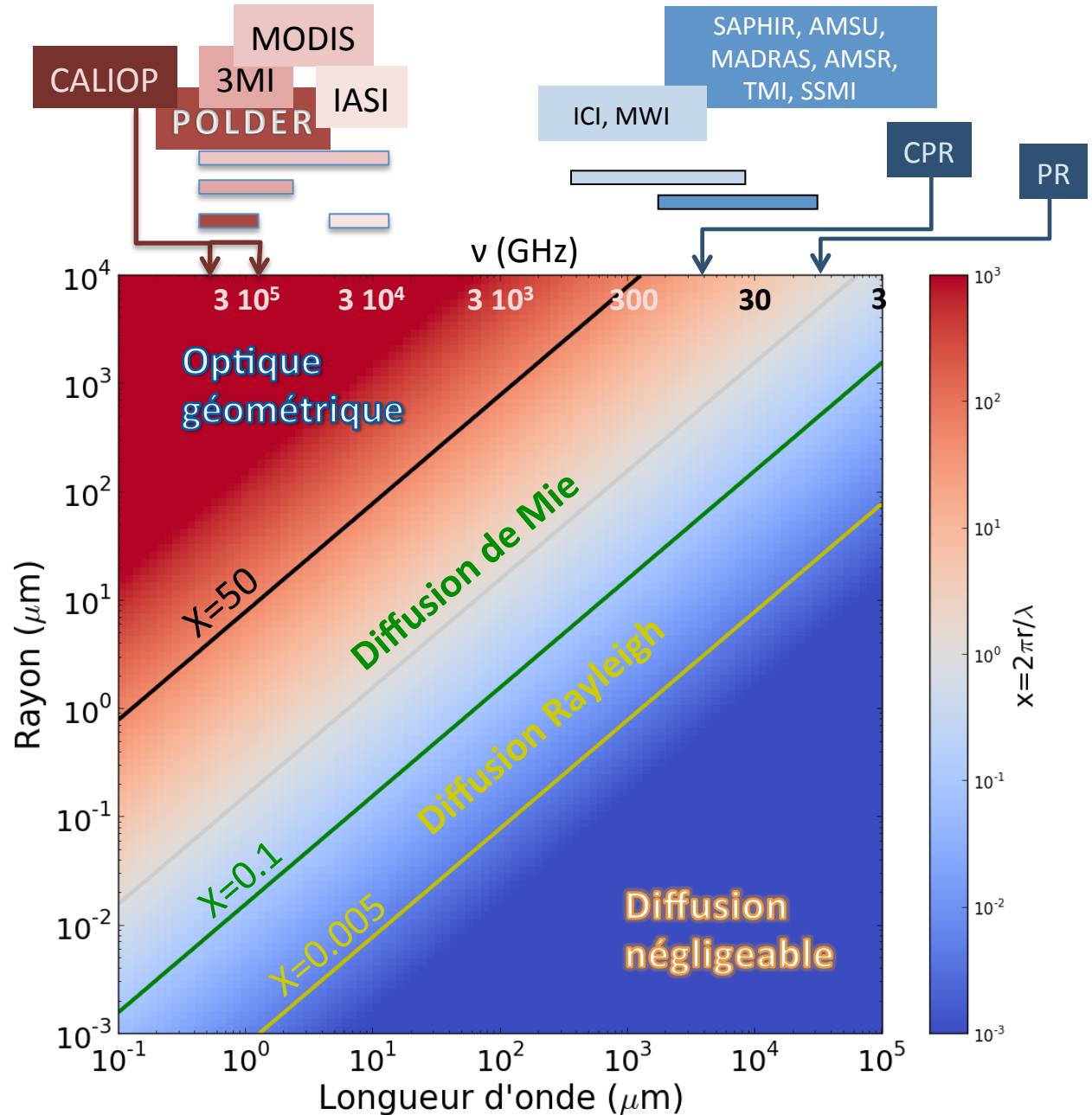
Cristaux de glace

Gouttelettes d'eau  
 nuageuse

Poussières désertiques,  
 fumées,  
 pollens, embruns,  
 brumes

Acide sulfurique, suie

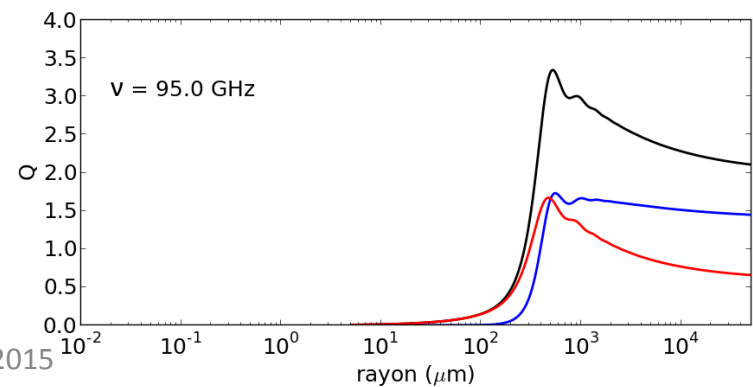
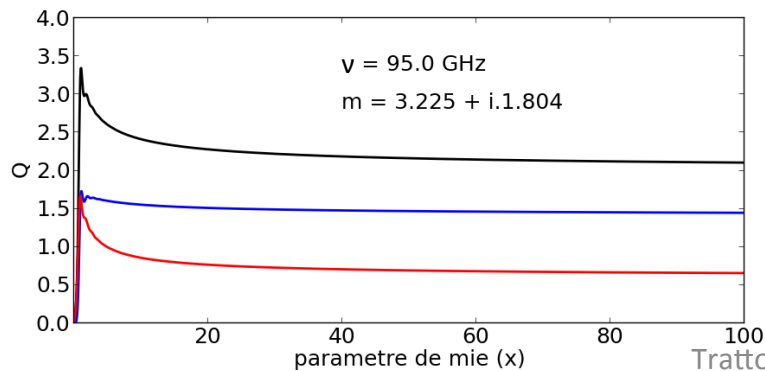
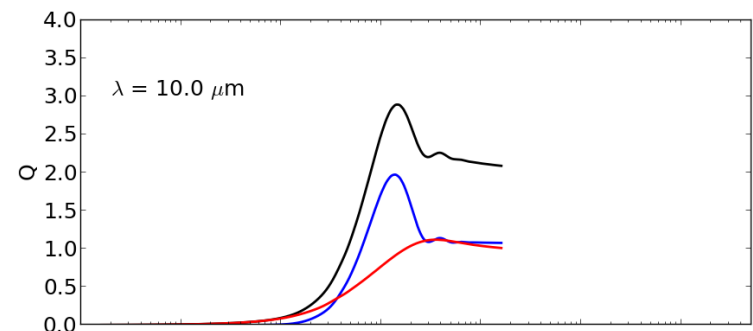
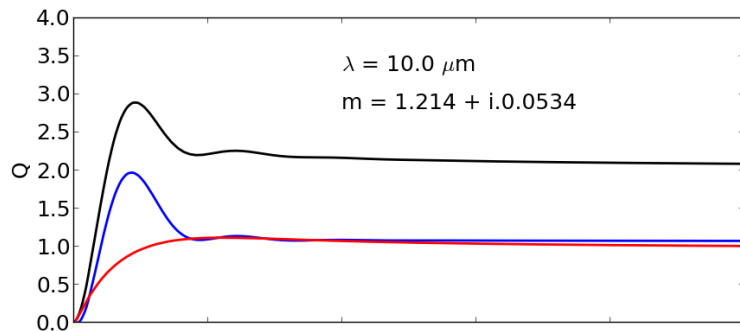
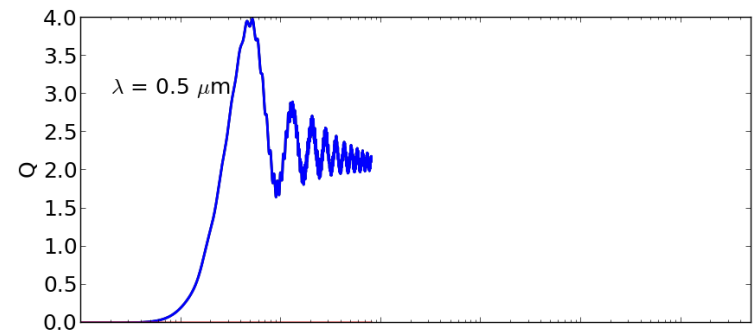
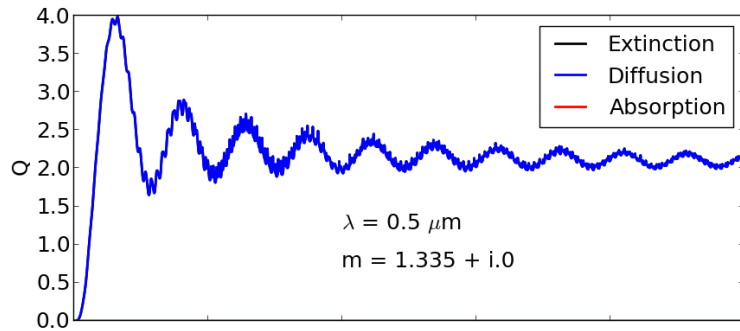
Molécules d'air





# Efficacité d'extinction, de diffusion et d'absorption

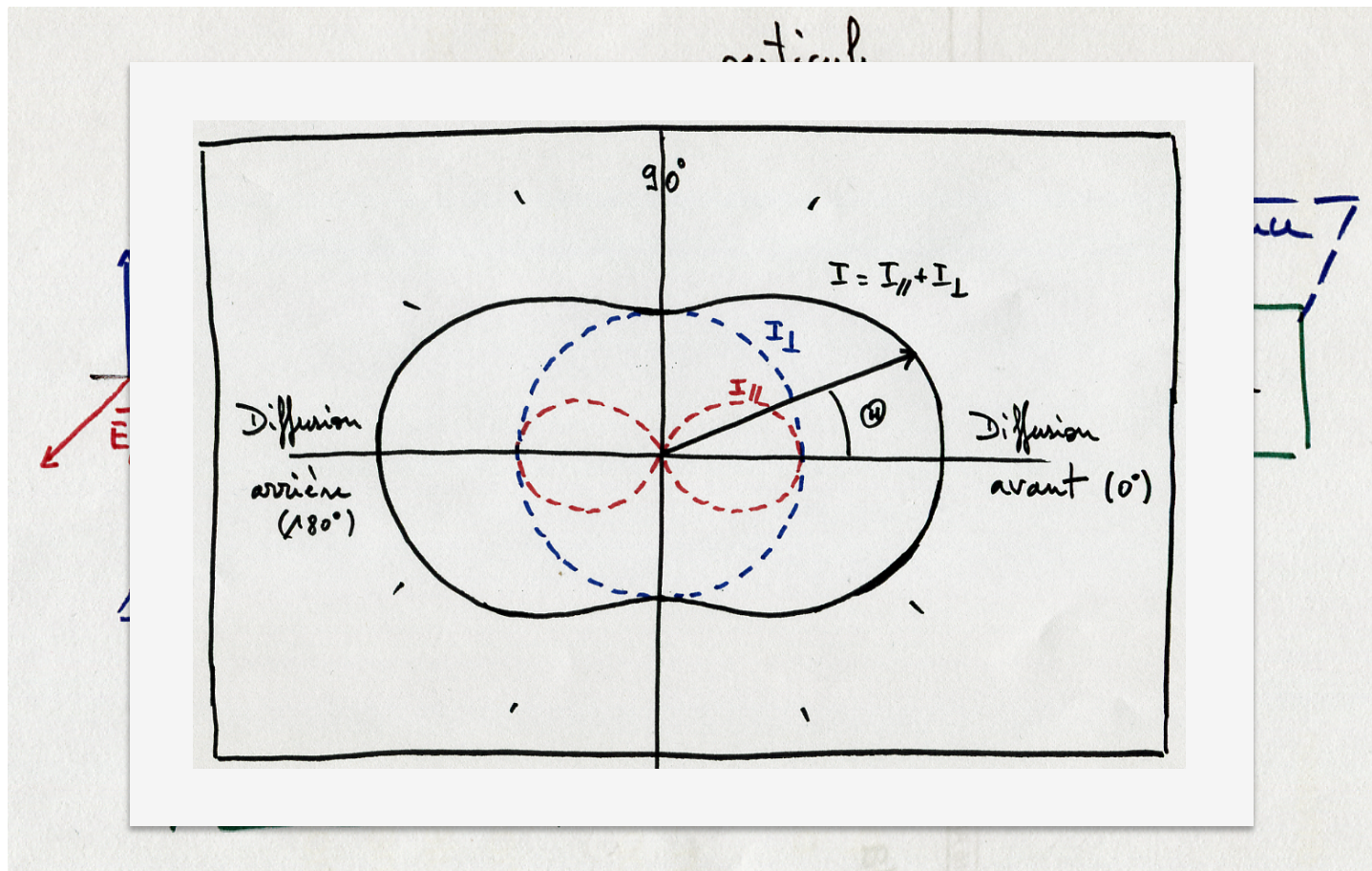
Particule unique (pas de distribution en taille) d'eau liquide



# Méthodes de résolution de la diffusion

- **Diffusion rayleigh : ( $x < 0.1$ )**

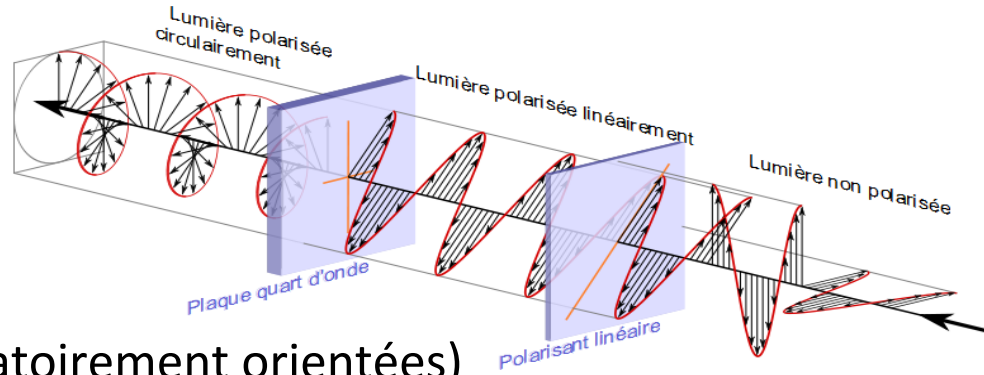
méthode approchée (diffusion indépendante de la forme) basée sur le rayonnement du dipôle



# La polarisation de la lumière

Le formalisme de Stokes (Sir Georges Stokes 1819-1903):

$$\vec{S} = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{\parallel} E_{\parallel}^* + E_{\perp} E_{\perp}^* \\ E_{\parallel} E_{\parallel}^* - E_{\perp} E_{\perp}^* \\ E_{\parallel} E_{\perp}^* + E_{\perp} E_{\parallel}^* \\ i(E_{\parallel} E_{\perp}^* - E_{\perp} E_{\parallel}^*) \end{pmatrix}$$



La matrice de diffusion (particules aléatoirement orientées)

$$\mathbb{P} = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & 0 & 0 \\ P_{21} & P_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{33} & P_{34} \\ 0 & 0 & P_{43} & P_{44} \end{pmatrix}$$

Van de Hulst  
(1957)

Particules aléatoirement orientées  
 $\Rightarrow P_{12} = P_{21}$  et  $P_{34} = -P_{43}$

Particules sphériques  
 $\Rightarrow P_{11} = P_{22}$  et  $P_{33} = P_{44}$

Equation du transfert radiatif vectoriel

$$\frac{\partial \vec{S}_{\lambda}(z, \theta, \varphi)}{\partial z} = -\tau_{\lambda}^{\text{ext}} \cdot \vec{S}_{\lambda}(z, \theta, \varphi) + \frac{\tau_{\lambda}^{\text{diff}}}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \mathbb{P}_{\lambda}(z, \theta', \varphi'; \theta, \varphi) \cdot \vec{S}_{\lambda}(z, \theta', \varphi') \sin \theta' d\theta' d\varphi' + \tau_{\lambda}^{\text{abs}} \cdot \vec{S}_{B\lambda}(T(z))$$

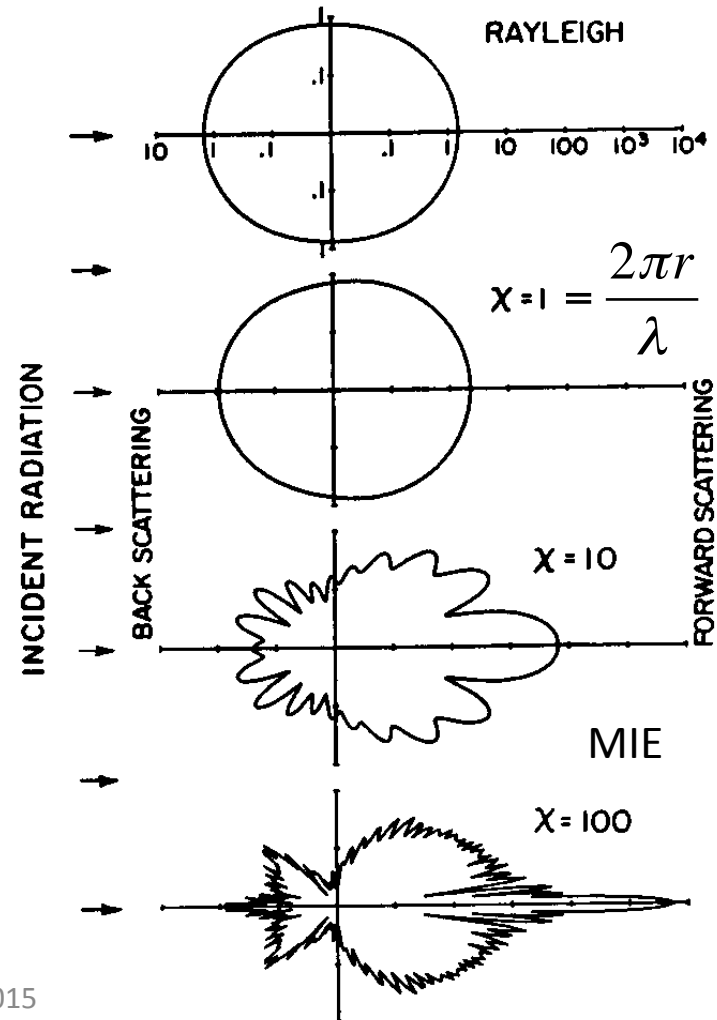
# Méthodes de résolution de la diffusion

- **Diffusion de Mie : (  $0.1 < x < 50$  )**

Méthode exacte qui résout les équations de Maxwell **pour des particules sphériques**.

Schématiquement, on développe les ondes électromagnétiques dans et à l'extérieur de la particule en harmoniques sphériques, et les conditions de passage à la surface permettent de déterminer l'onde diffusée.

- **Temps de calcul augmente fortement avec le paramètre de mie ( $x$ ) et devient prohibitif pour  $x > 100$  (dépend également de la variance effective)**
- **Calcul uniquement pour particules sphériques**



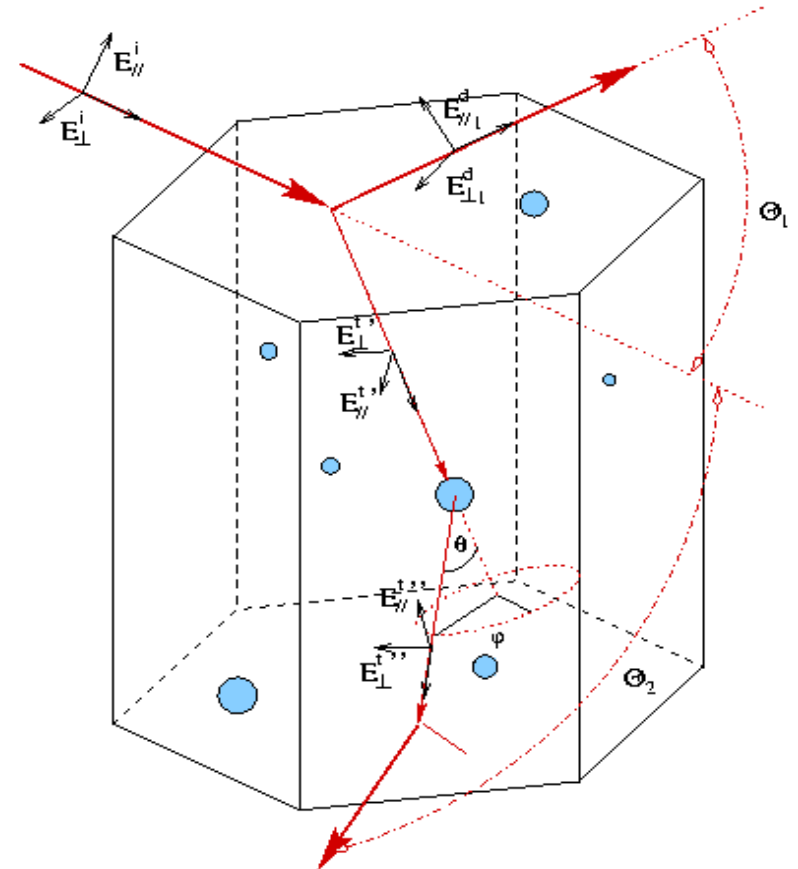
# Méthodes de résolution de la diffusion

- Diffusion géométrique (ou optique géométrique) : ( $x > 50$ )

méthode approchée basée sur les lois de l'optique géométriques (Fresnel, Snells-Descartes). On suit un photon jusqu'à ce qu'il ressorte de la particule ou qu'il soit absorbé.

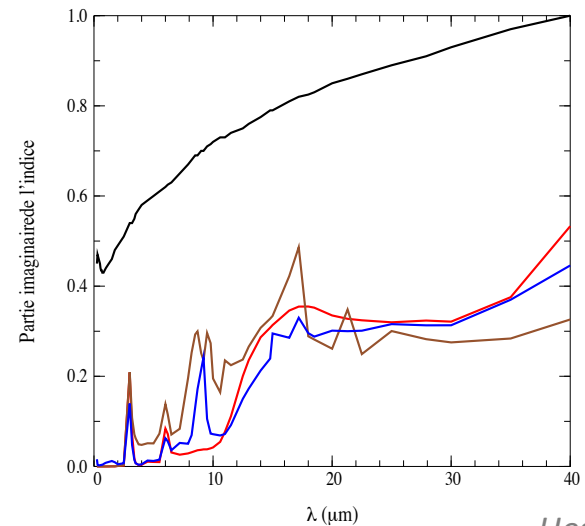
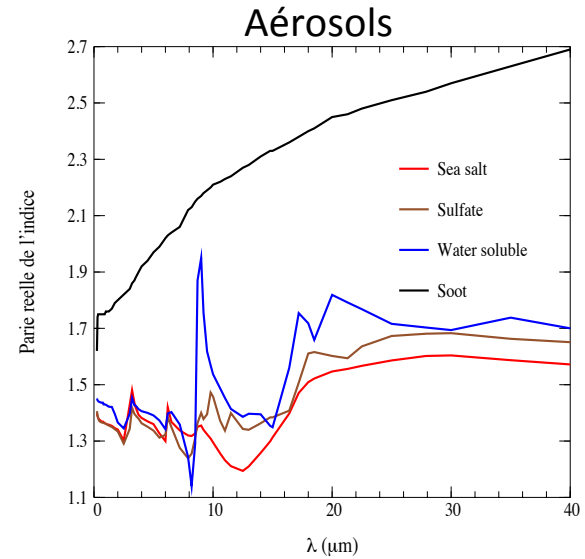
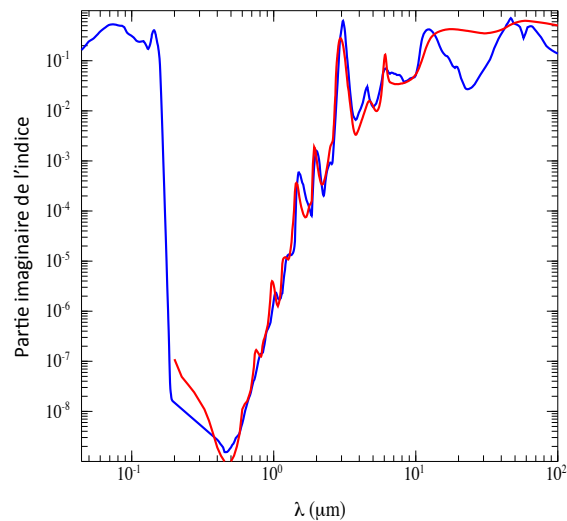
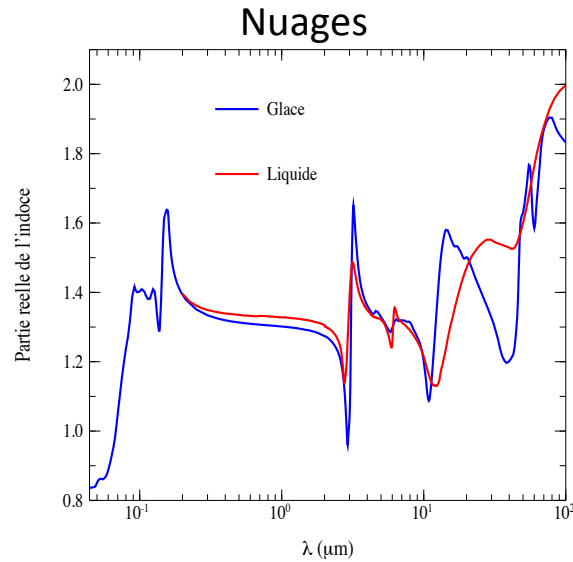
**Les interférences entre les champs diffusés et proche de la particule ne sont pas prises en compte ( $Q_{\text{ext}} = 2$  quelque soit la taille).**

**Calcul quelque soit la forme**



# Paramètres importants dans la diffusion

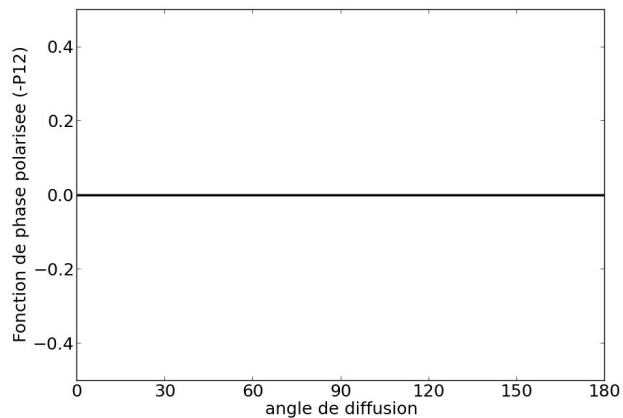
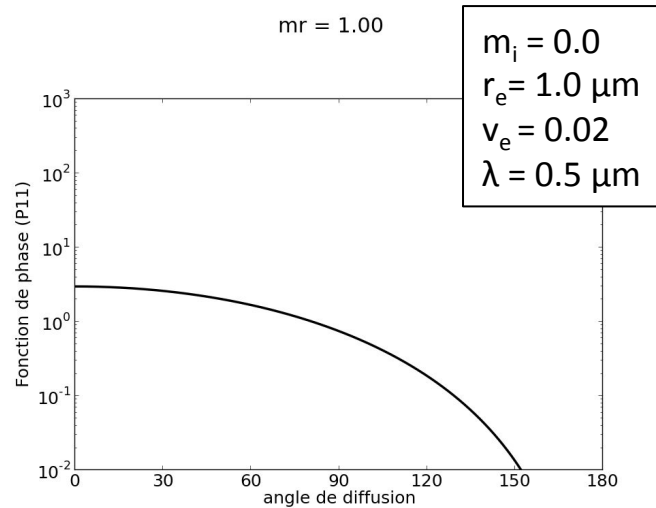
- Indice de réfraction (base de données OPAC)



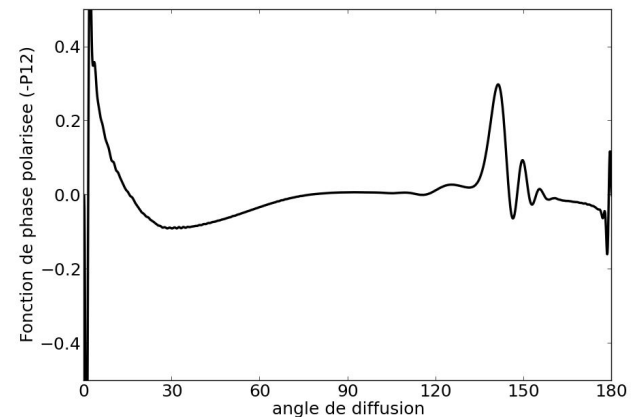
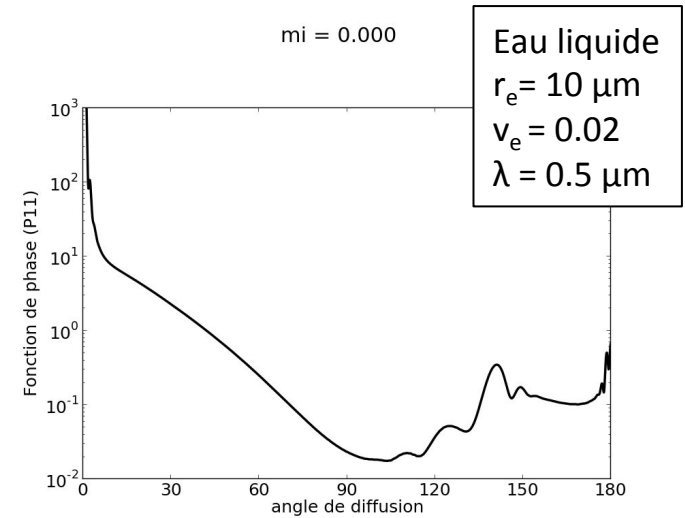
# Paramètres importants dans la diffusion

- Indice de réfraction ( $m = m_r + i.m_i$ )

Partie réelle ( $m_r$ )

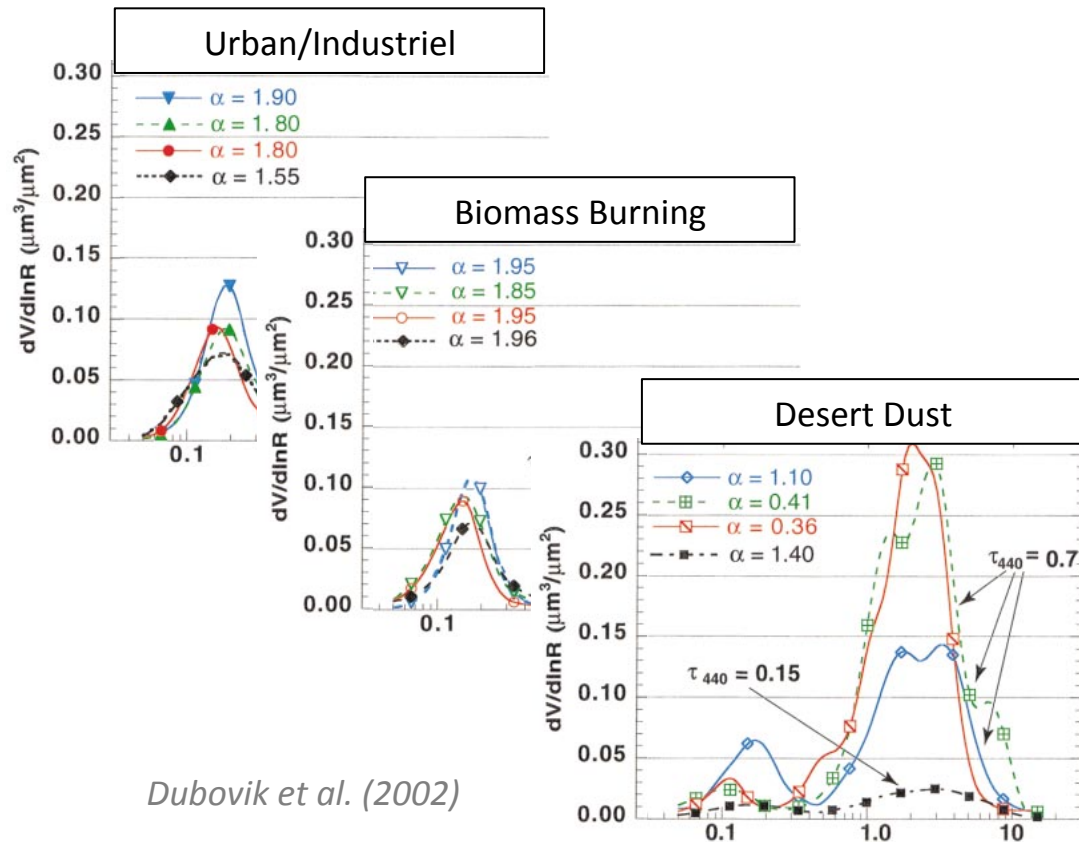


Partie imaginaire ( $m_i$ )

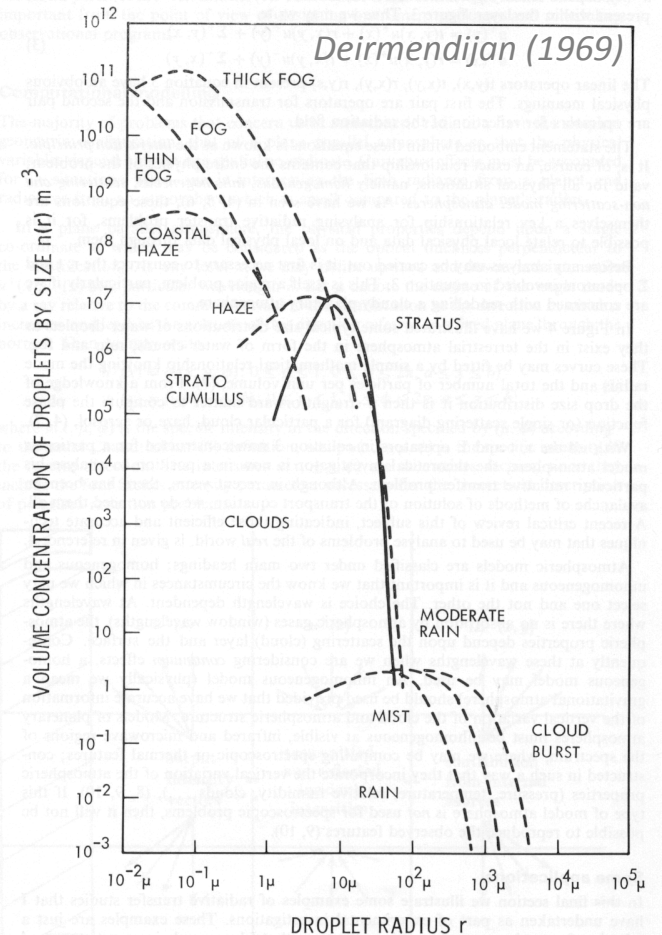


# Paramètres importants dans la diffusion

- Taille (Distribution en taille)



Dubovik et al. (2002)



Paramètres importants: rayon effectif ( $r_e$ ) et variance effective ( $v_e$ )

$$r_e = \frac{\int_0^{\infty} r \cdot \pi r^2 m(r) dr}{\int_0^{\infty} \pi r^2 m(r) dr}$$

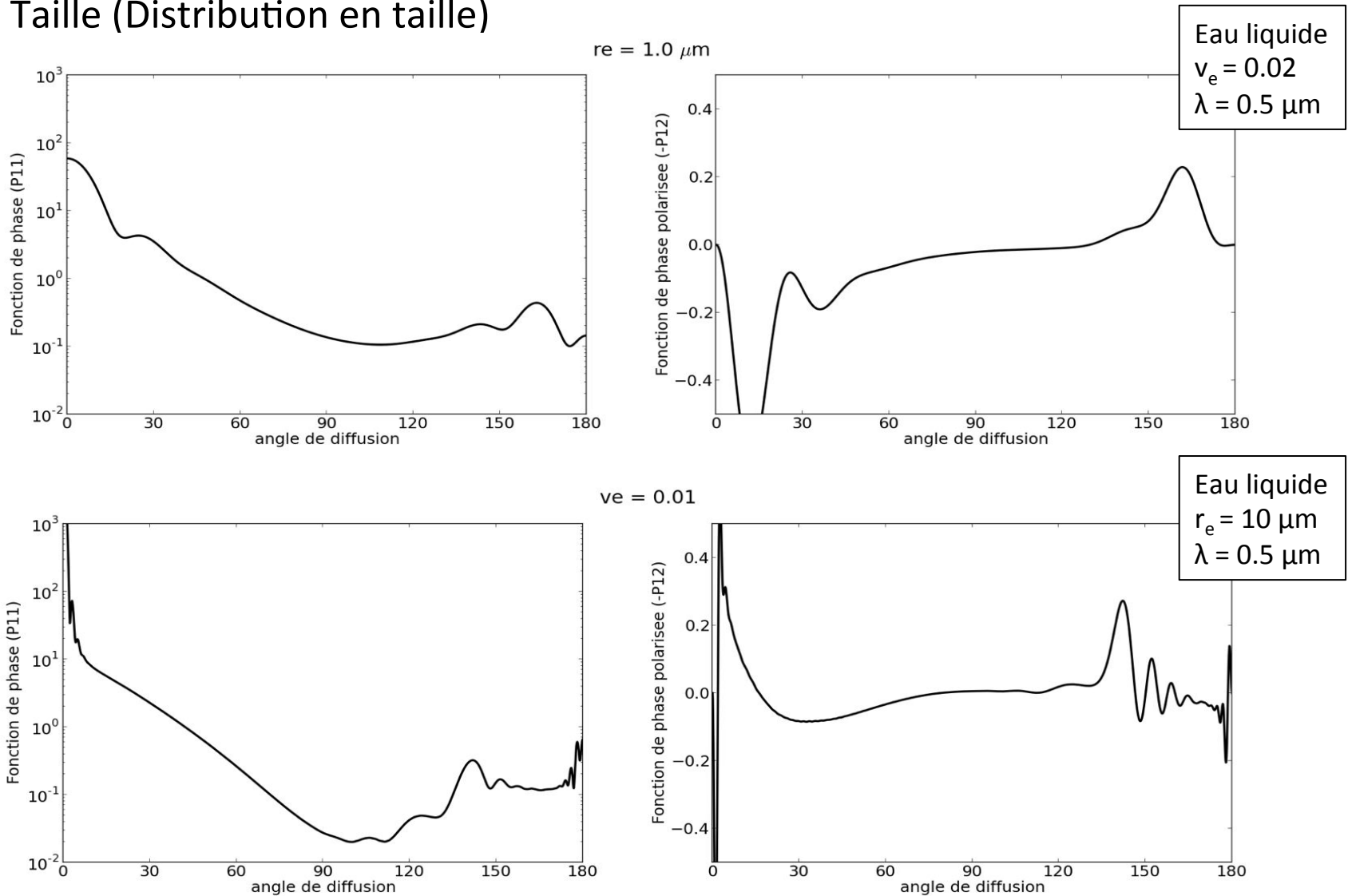
Trattoria, Lille 2015

$$v_e = \frac{\int_0^{\infty} (r - r_e)^2 \pi r^2 m(r) dr}{r_e^2 \cdot \int_0^{\infty} \pi r^2 m(r) dr}$$



# Paramètres importants dans la diffusion

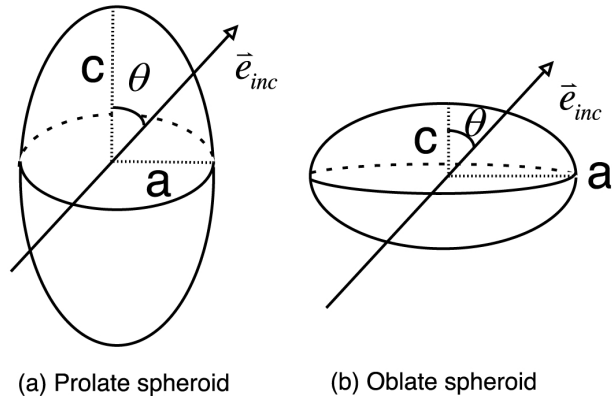
- Taille (Distribution en taille)



# Paramètres importants dans la diffusion

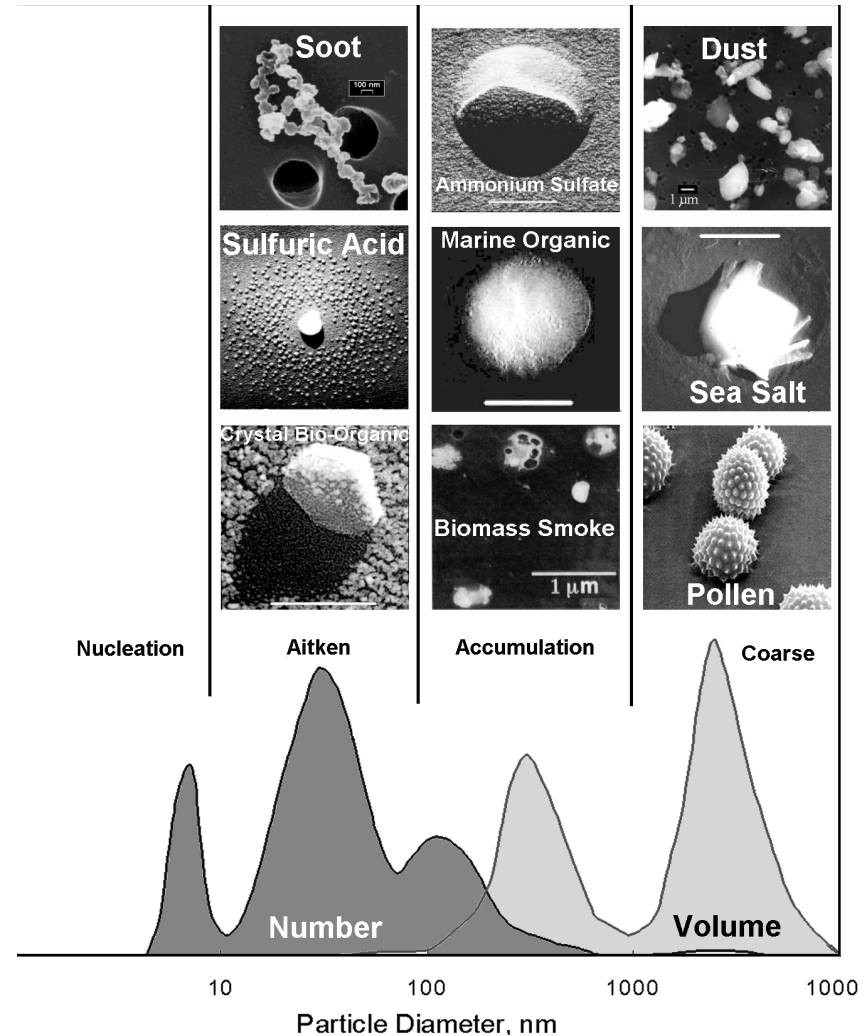
- Forme (Aérosols)

Forme simple pour modéliser la non-sphéricité



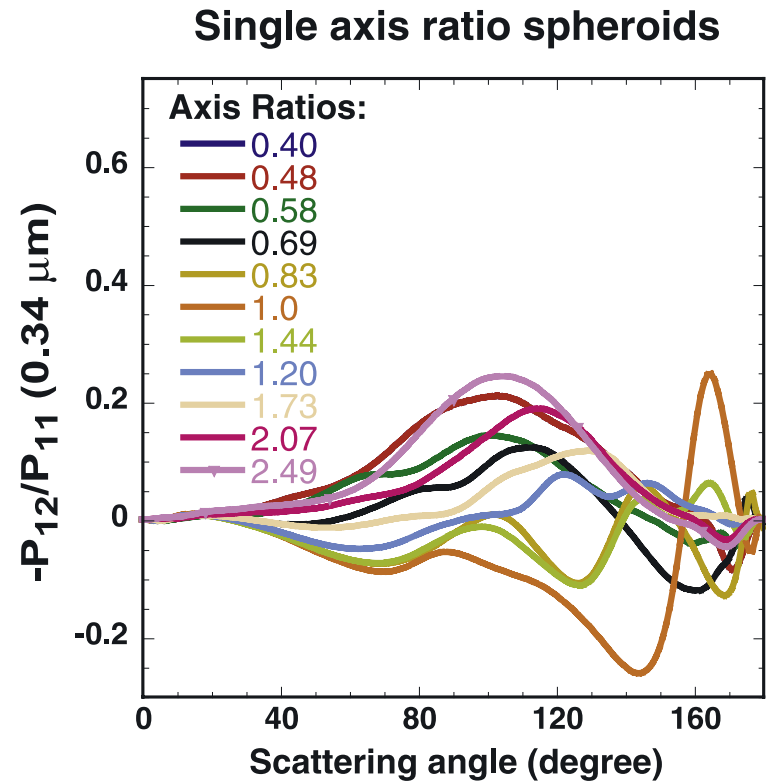
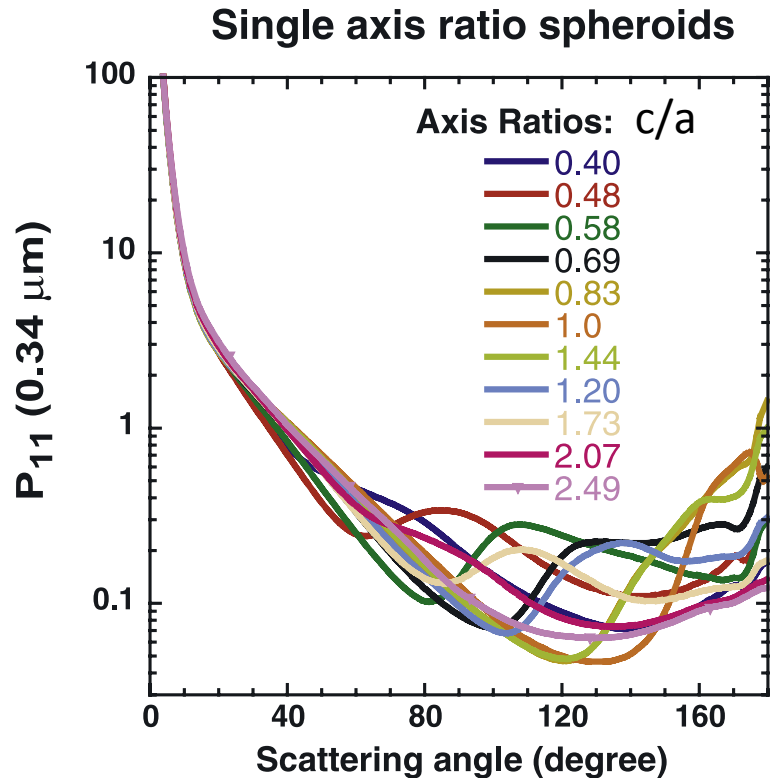
Méthode de la T-matrice:

Schématiquement, les champs incident et diffusé sont développés sur une base de fonctions sphériques qui satisfassent l'équation vectorielle de Helmholtz. Ces champs sont ensuite reliés par une matrice (matrice de transfert) qui contient toutes l'information sur les processus d'extinction.



# Paramètres importants dans la diffusion

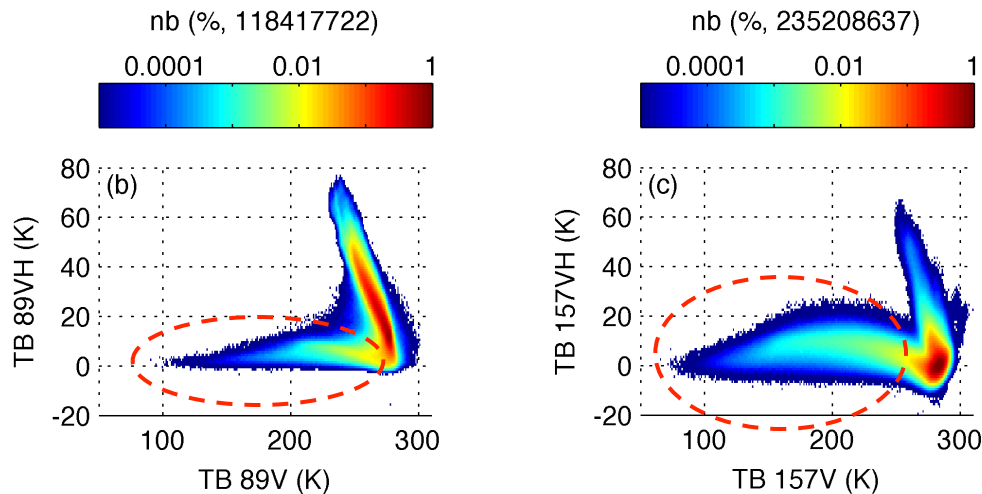
- Forme (Aérosols)



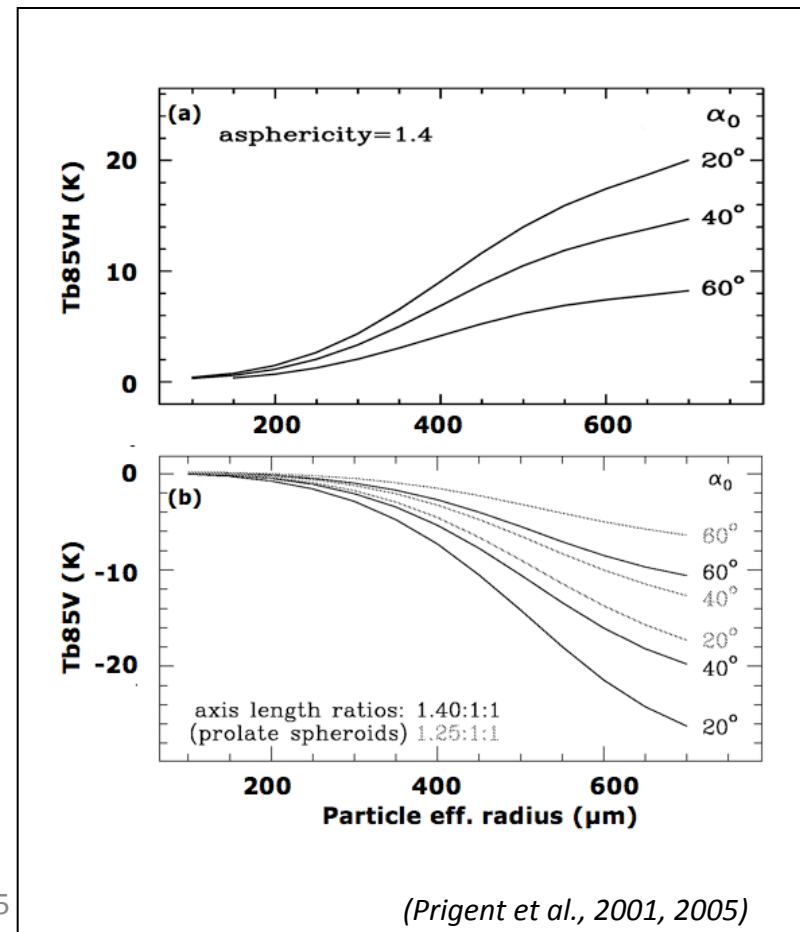
*Dubovik et al. (2006)*

# Polarisation et orientation

- Importance de la polarisation dans les calculs de la diffusion et du transfert radiatif (microphysique, surface) pour un meilleur réalisme
- Orientation des hydrométéores peut expliquer une polarisation plus ou moins importante



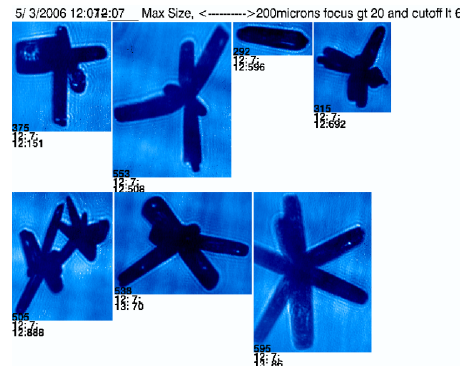
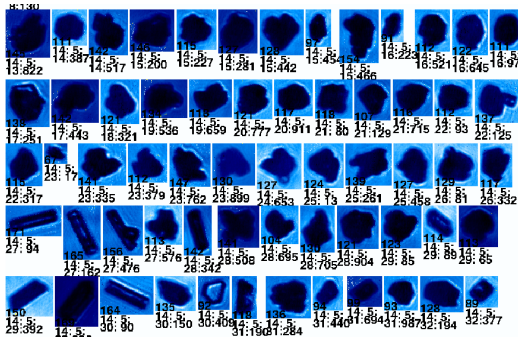
Distribution des températures de brillance et de leur différence de polarisation à 36, 89 et 157 GHz de l'instrument MADRAS au dessus des océans (Defer et al., 2014).



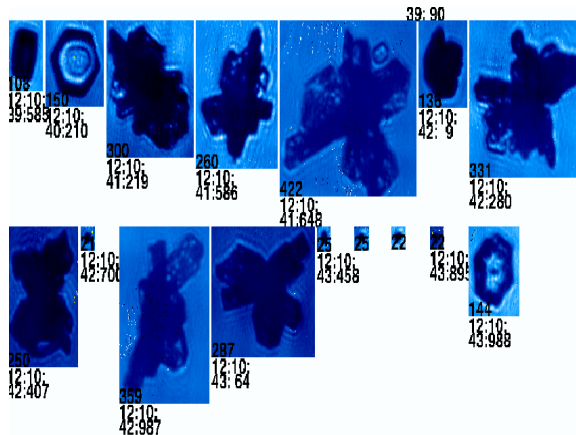
(Prigent et al., 2001, 2005)

# Paramètres importants dans la diffusion

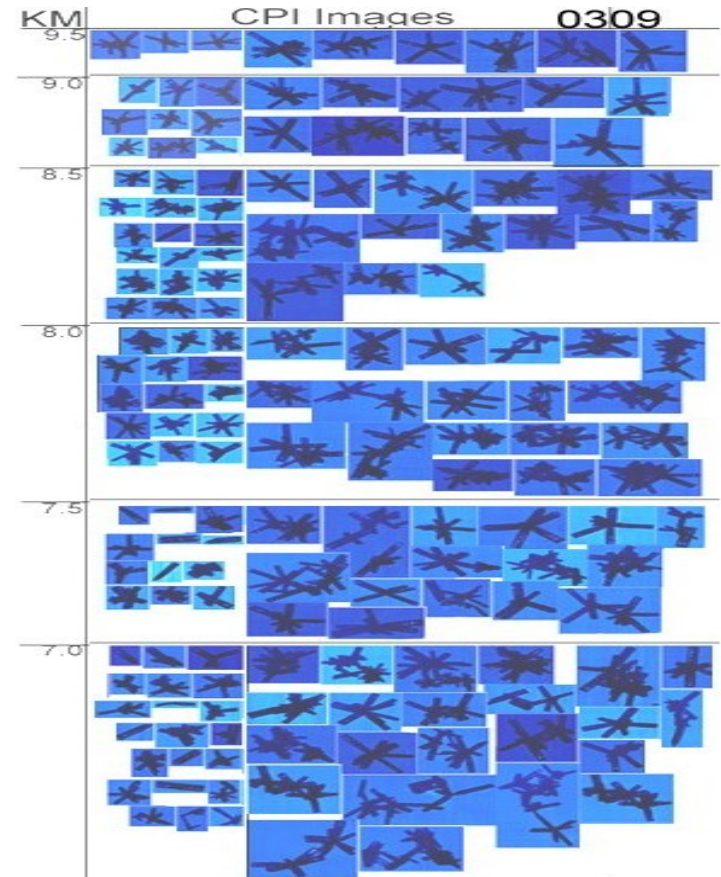
- Forme (Cristaux)



Exemple Cristaux de glace de latitude moyenne



Exemple Cristaux de glace tropicaux

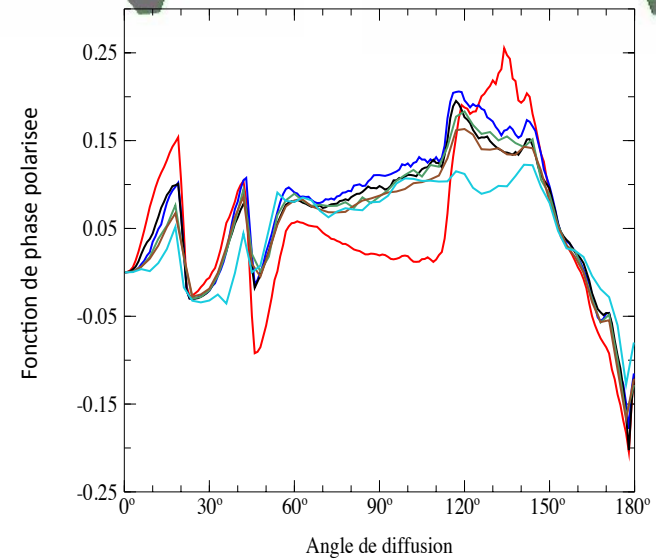
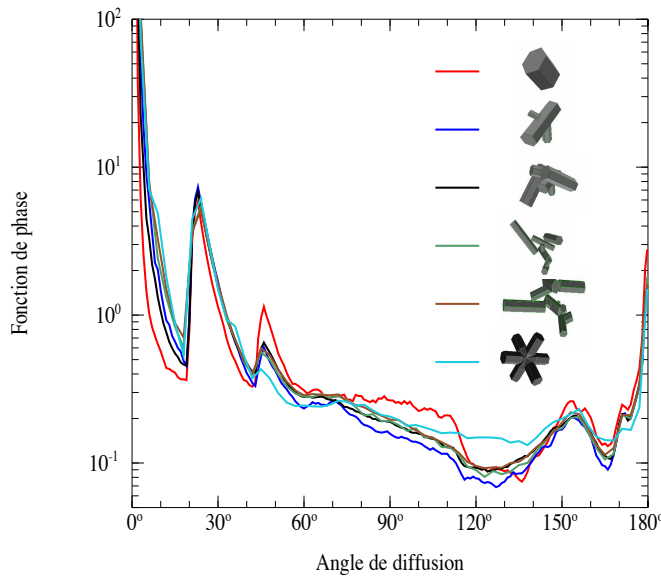
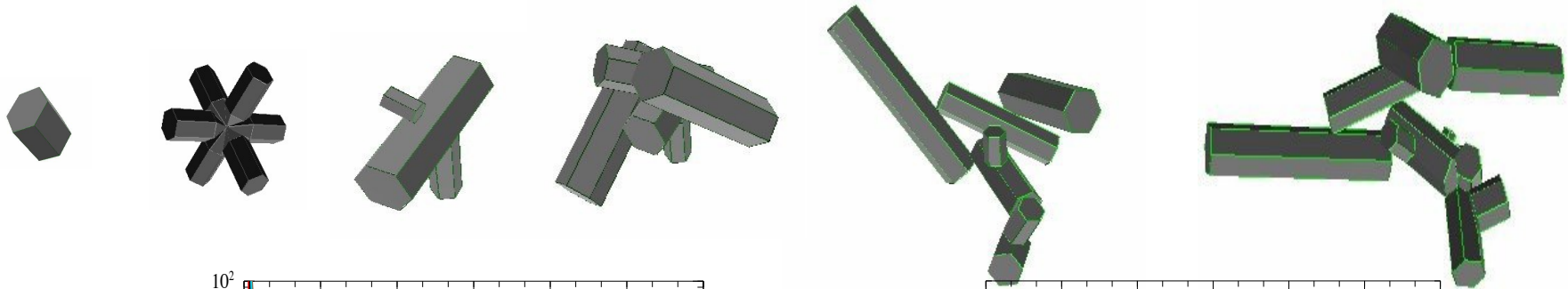


# Paramètres importants dans la diffusion

- **Forme (Cristaux)**

Cristal  $\rightarrow$  forme hexagonale

Formes se complexifiant avec la taille des cristaux



## Méthodes:

- DDA pour les petits cristaux (*Purcell and Pennypacker, 1973*)
- IGOM pour les plus gros (*Yang and Liou, 1997*)

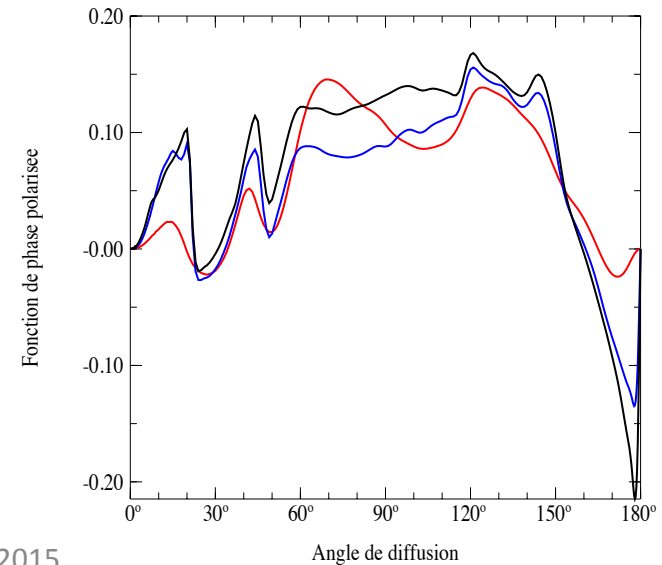
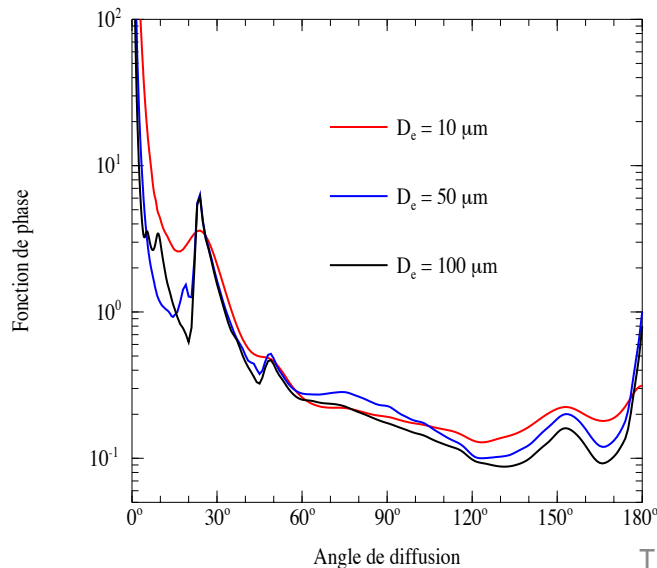
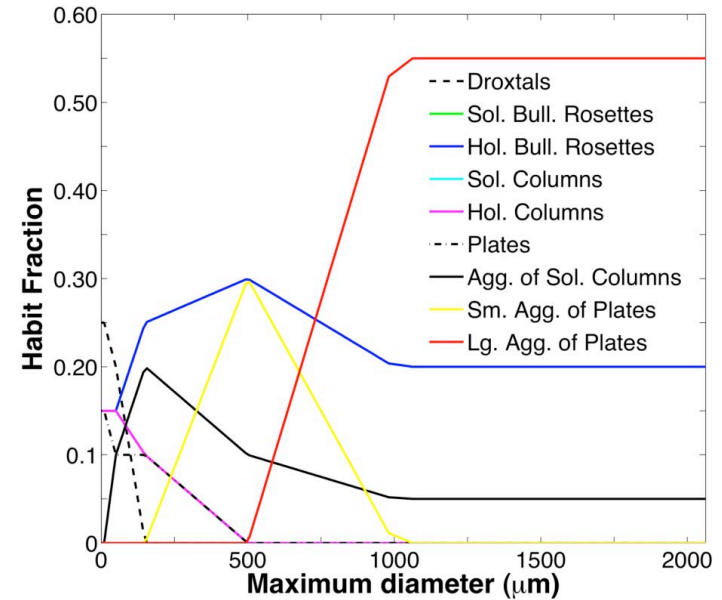
# Paramètres importants dans la diffusion

- **Forme (Cristaux)**

Introduction d'une distribution en taille couplée à une distribution en forme

*Baum et al. (2014)*

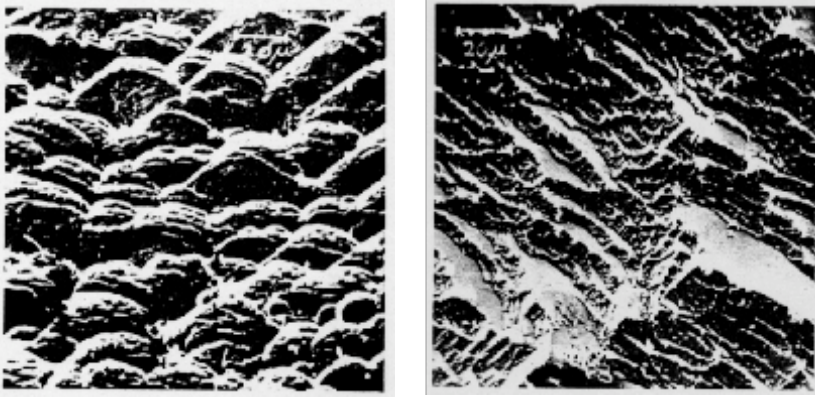
*Baran and Labonnote (2007)*



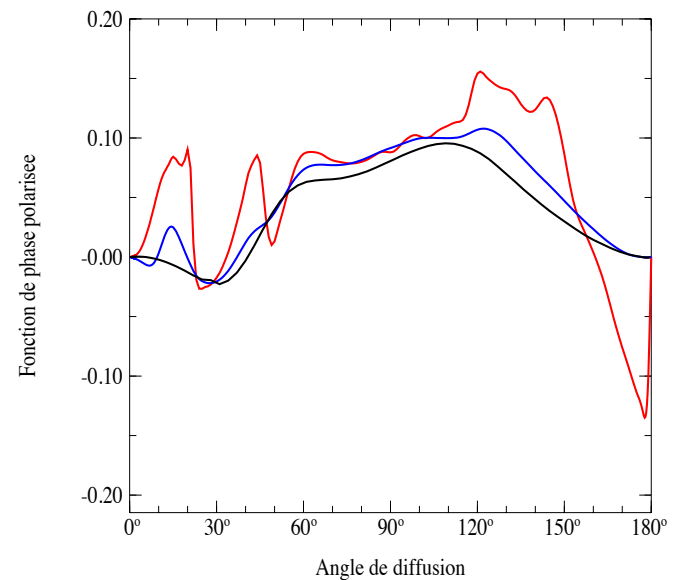
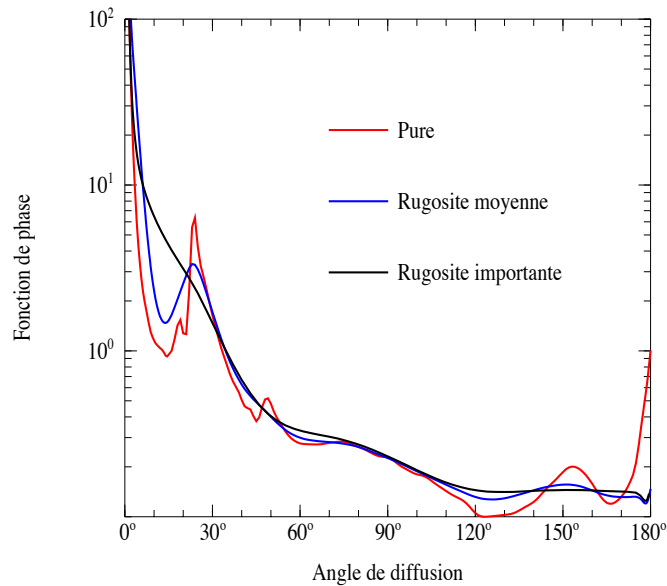
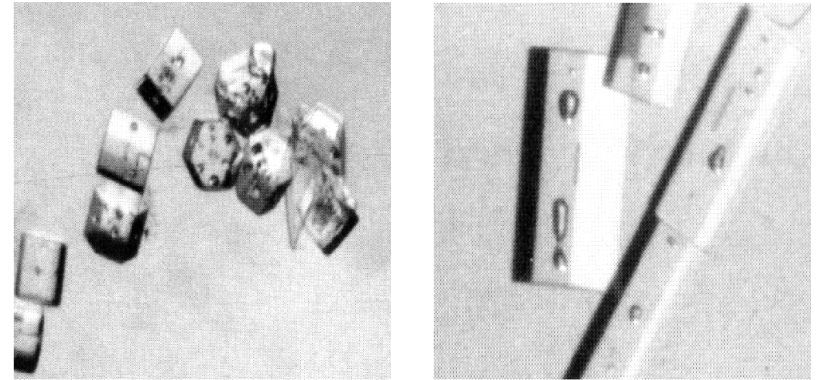
# Paramètres importants dans la diffusion

- Hétérogénéités (Cristaux)

Rugosité de surface



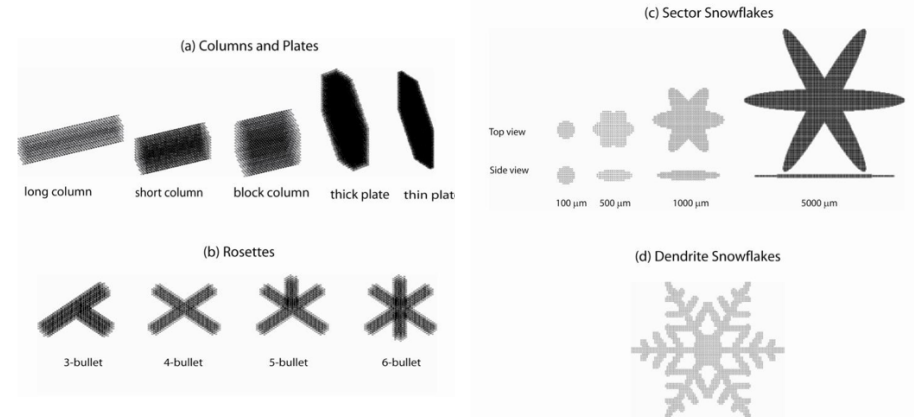
Inclusions



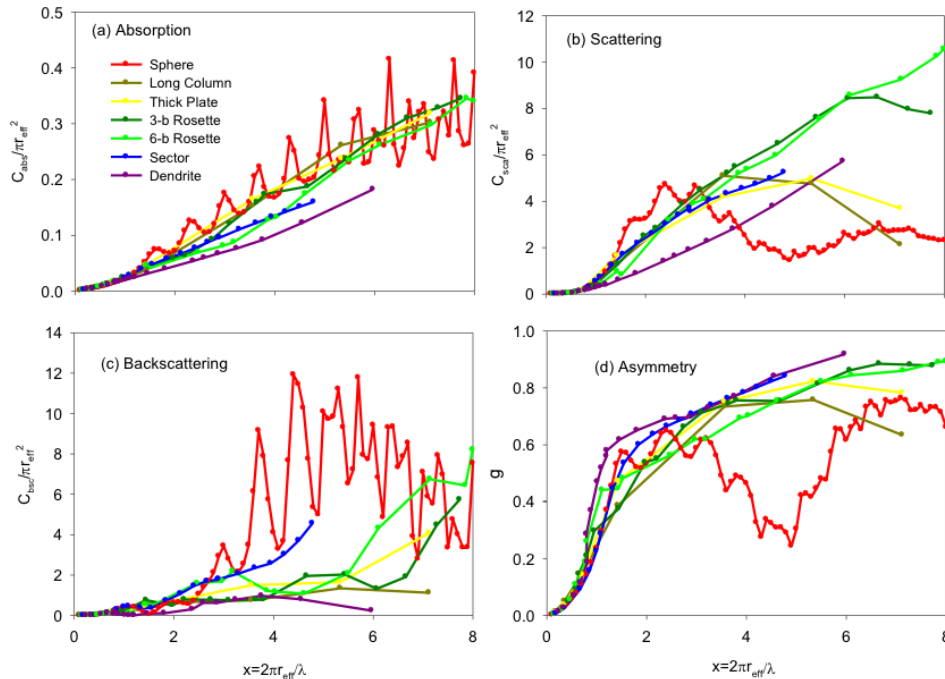


# Paramètres importants dans la diffusion

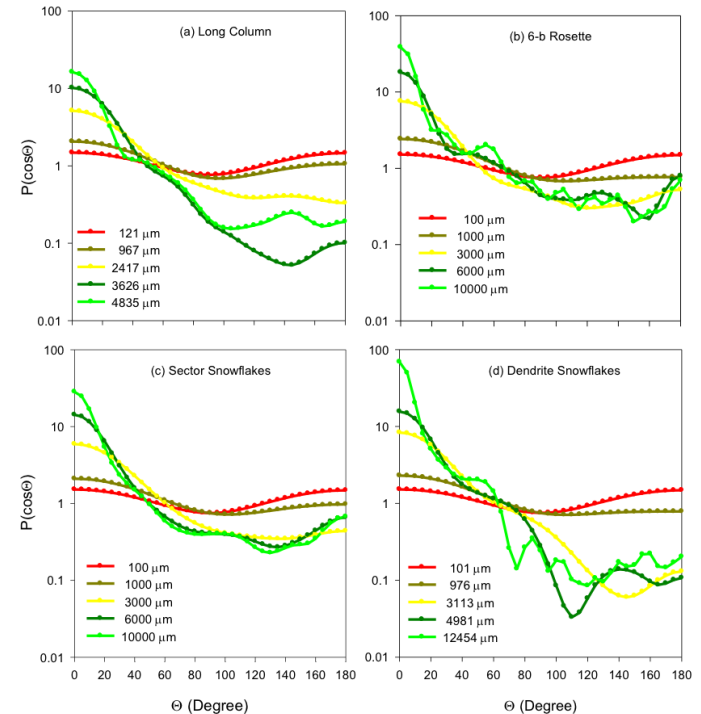
Exemple : Base de données  
 Guosheng Liu (2006) via DDA (15  
 à 340 GHz, 0° à -40°C, 50-12500  
 μm, 11 espèces)



@ 340 GHz, -10°C



Fonction de phase @ 150 GHz, -10°C

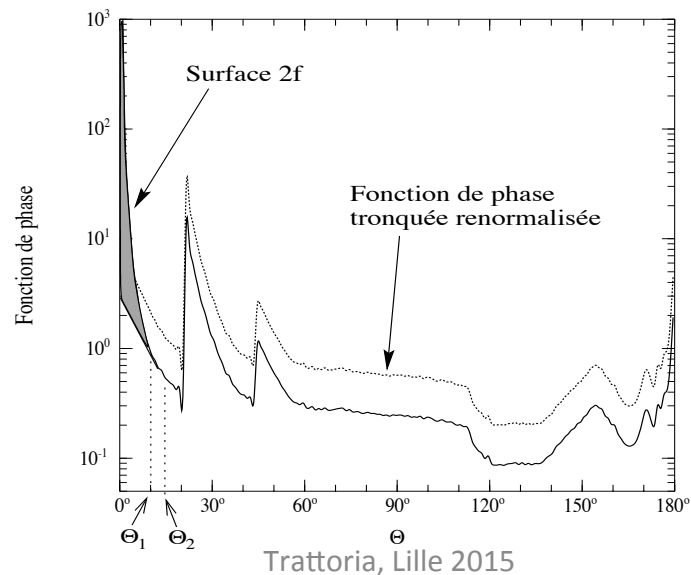


# La diffusion multiple

Calcul du terme de diffusion

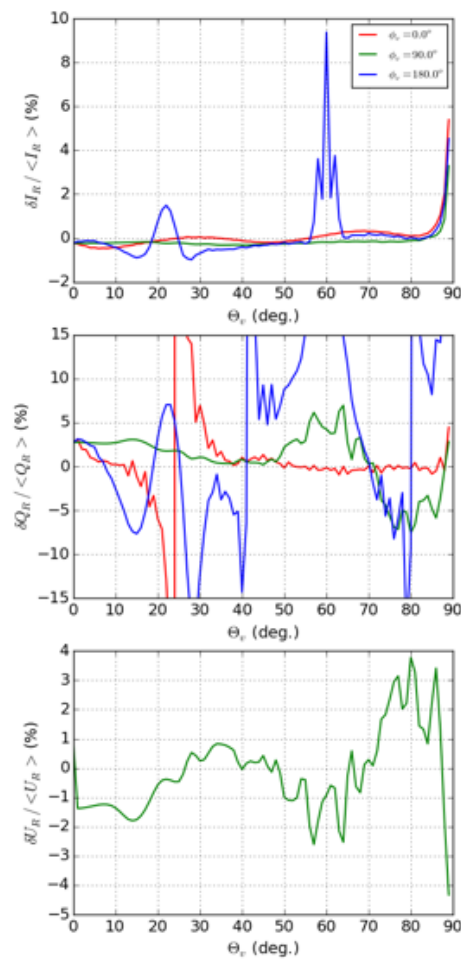
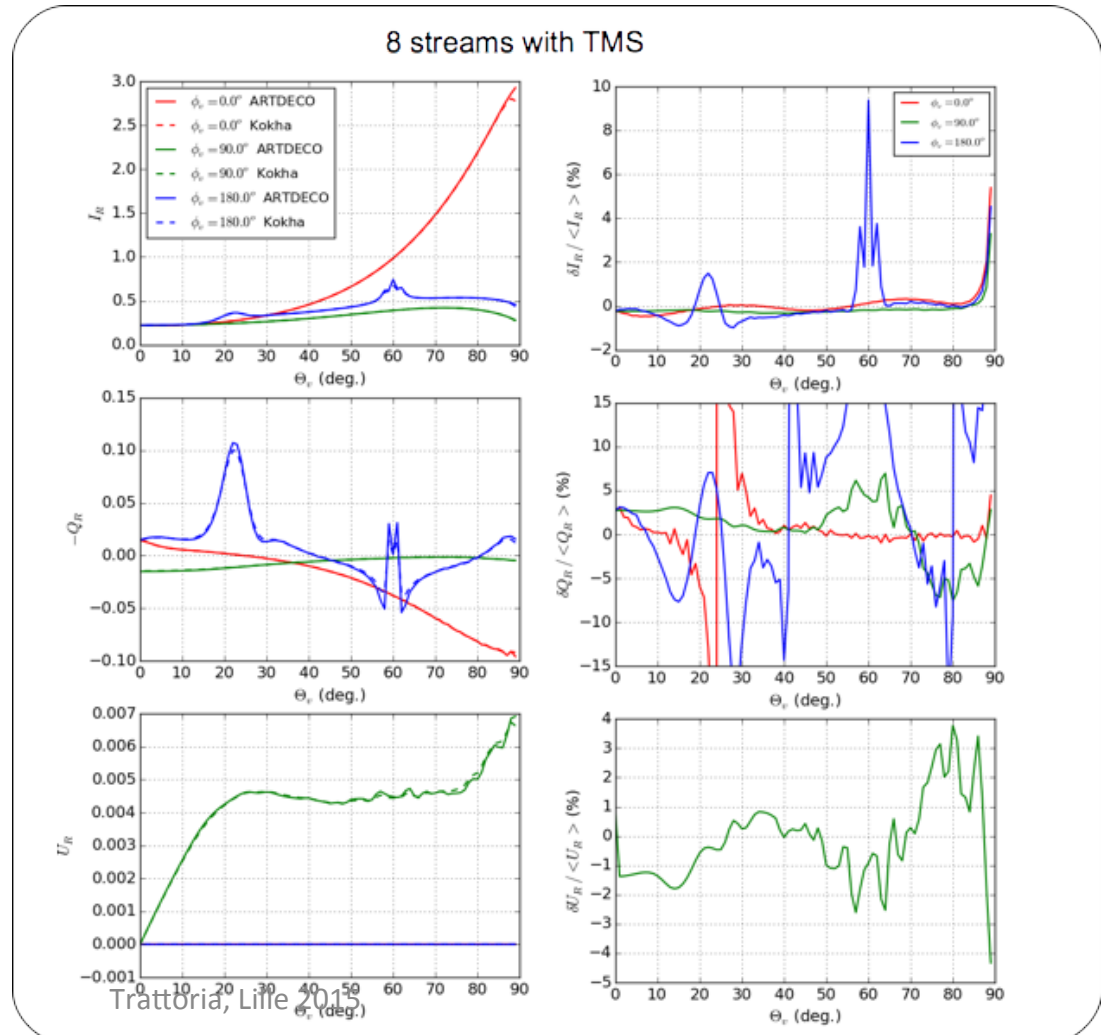
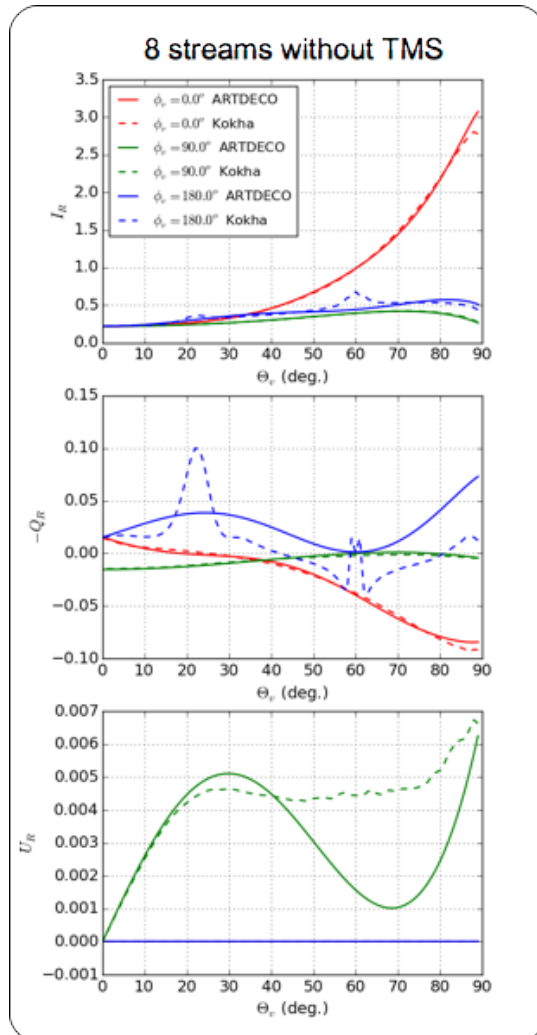
$$\frac{\sigma_{\lambda}^2}{4\pi} \iint_{\Omega=4\pi} P_{\lambda}(z; \theta', \varphi', \theta, \varphi) \cdot I_{\lambda}(z, \theta', \varphi') \cdot \sin \theta' d\theta' d\varphi'$$

- Décomposition de la matrice de phase en fonctions sphériques généralisées
- Nombre de terme de la décomposition augmente avec la taille  
→ **temps de calcul prohibitif**
- Méthodes de troncature pour réduire le nombre de terme du développement (Potter, Delta-M et Delta-fit)



# La diffusion multiple

- Utilisation de la correction d'intensité (*Nakajima et Tanaka, 1988*) pour augmenter la précision et réduire un peu plus les temps de calcul

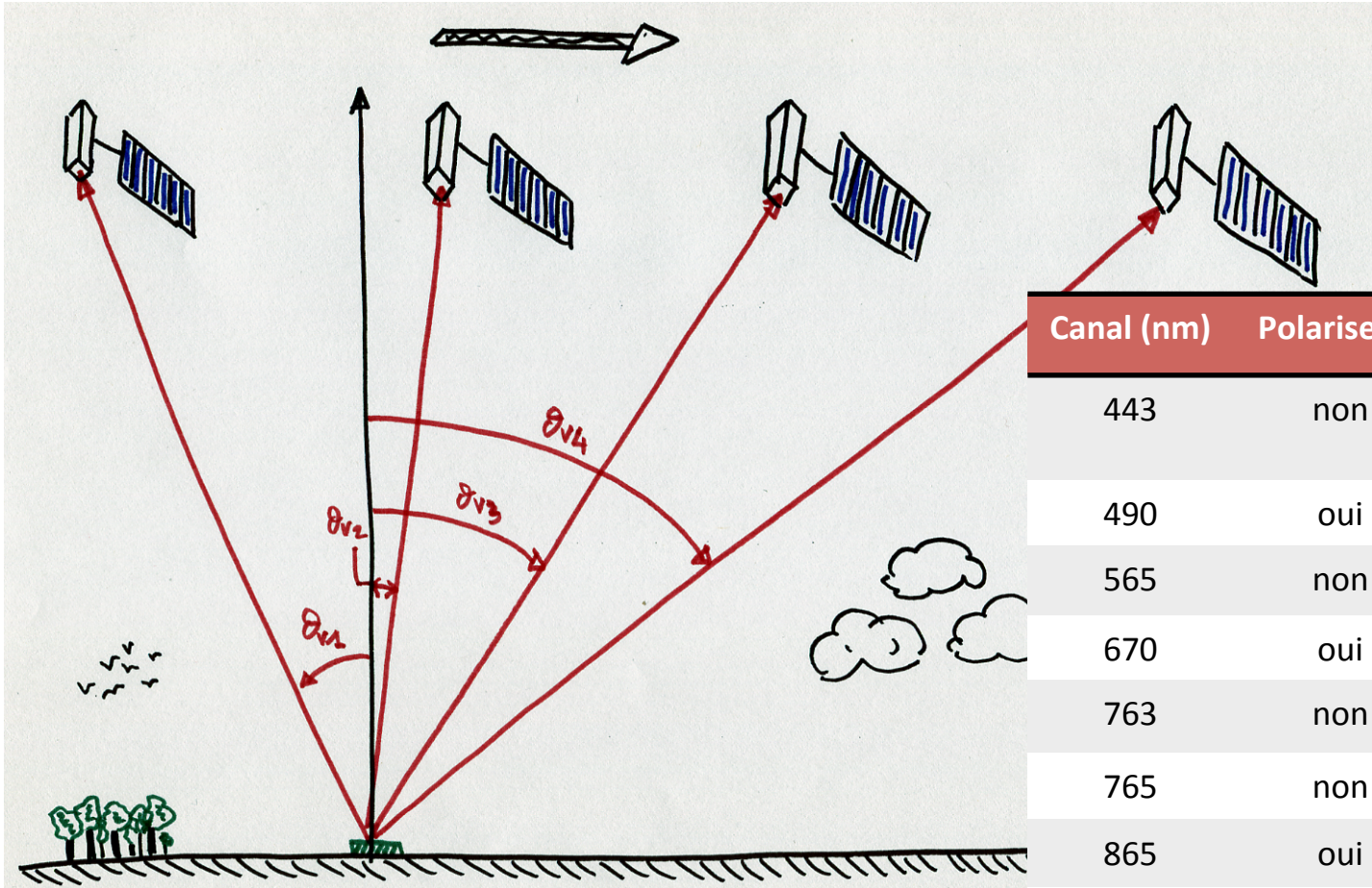


# Simuler l'atmosphère...

- Définition des conditions de surface (émissivité)
- Connaissance de l'absorption du background à la longueur d'onde/fréquence étudiée
- Description des propriétés optiques de chaque aérosol/hydrométéore en fonction de son type, de sa composition, de sa forme
- Connaissance de la distribution en taille des aérosols/hydrométéores
- Connaissance de la distribution spatiale des aérosols/hydrométéores
- Utilisation d'un code de transfert approprié selon l'application envisagée
- Prise en compte des paramètres d'observation (e.g. angle d'observation, fréquence/longueur d'onde + largeur de bande, polarisation, antenne) pour vérification et validation

# Exemple d'utilisation de la diffusion dans la télédétection – Application à l'instrument POLDER

Description de l'instrument



Canal (nm)	Polariseurs	Objectifs
443	non	Nuages et bilan radiatif
490	oui	Aérosols/nuages
565	non	Aérosols/nuages
670	oui	Aérosols/nuages
763	non	Nuages et altimétrie
765	non	Nuages et altimétrie
865	oui	Aérosols/nuages
910	non	Vapeur d'eau
1020	non	végétation

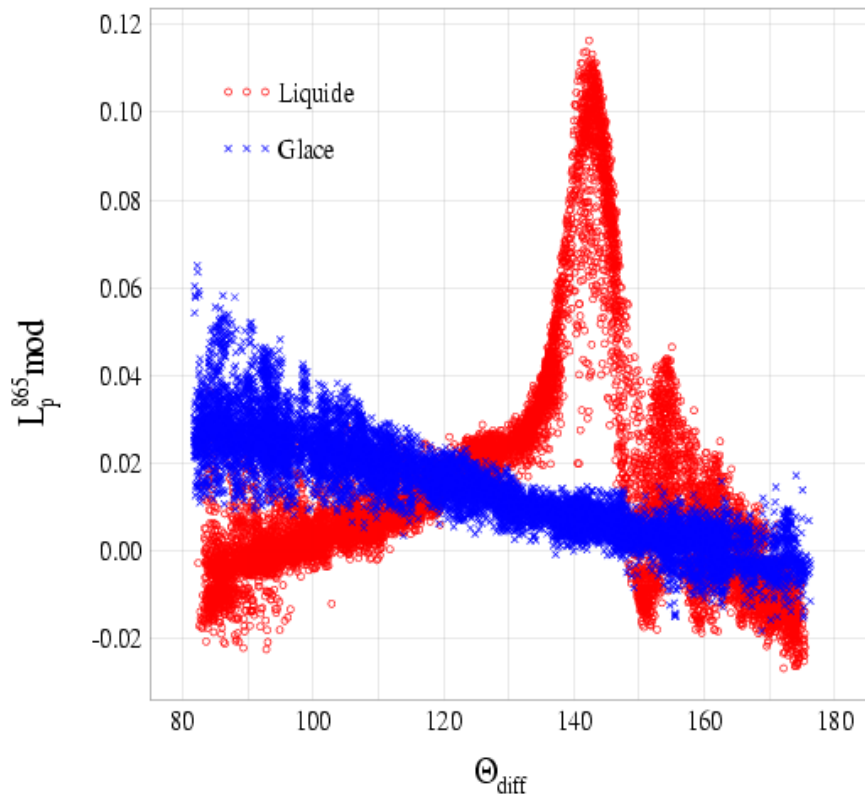
# Exemple d'utilisation de la diffusion dans la télédétection – Application à l'instrument POLDER

## **NUAGES**

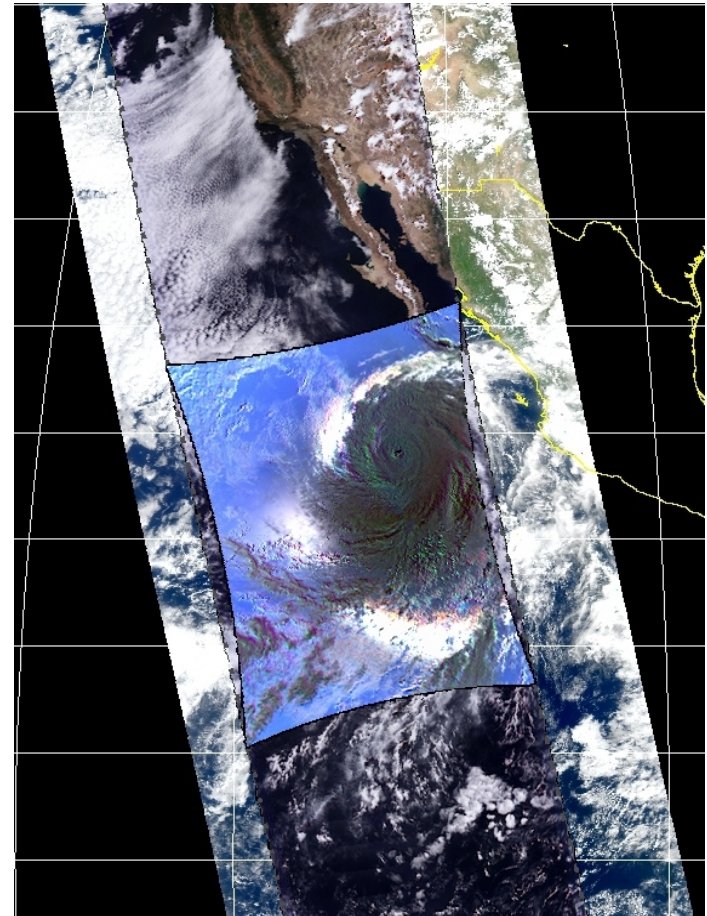
- Phase thermodynamique
- Opacité (Epaisseur optique)
- Microphysique des nuages liquides
- Pression de sommet des nuages
- Extension géométrique

# Exemple d'utilisation de la diffusion dans la télédétection – Application à l'instrument POLDER

- Phase des nuages



*Goloub et al. (2000); Riedi et al. (2001)*



# Exemple d'utilisation de la diffusion dans la télédétection – Application à l'instrument POLDER

## **NUAGES**

- Phase thermodynamique
- Opacité (Épaisseur optique)
- Microphysique des nuages liquides
- Pression de sommet des nuages
- Extension géométrique

## **AEROSOLS**

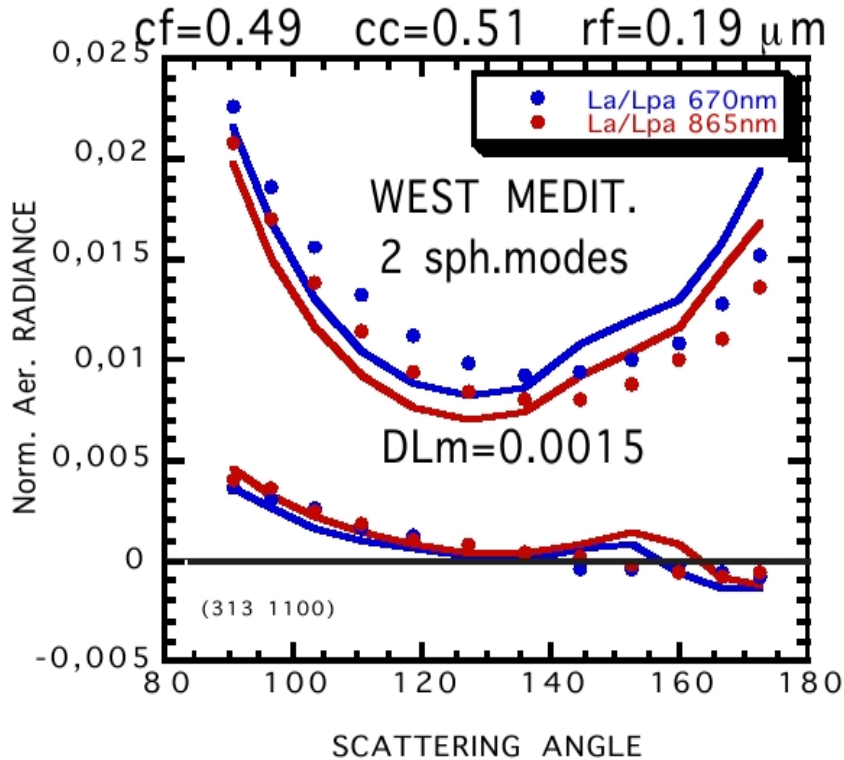
- Opacité (épaisseur optique)
- Fraction de particules non-sphériques
- Indice de réfraction (partie réelle) au-dessus des océans
- Altitude
- Propriétés des aérosols au-dessus des nuages



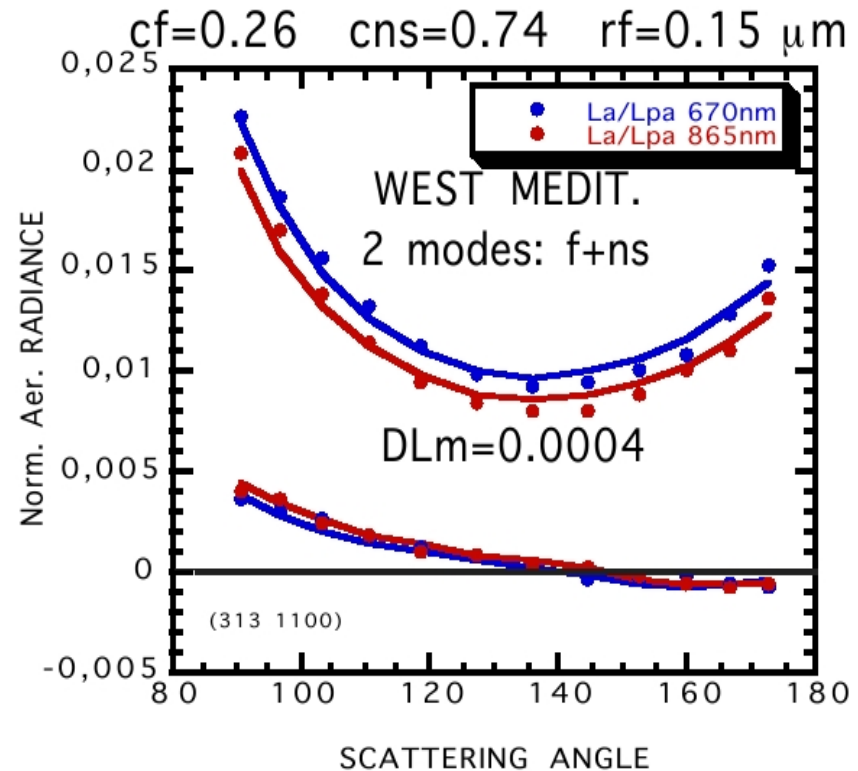
# Exemple d'utilisation de la diffusion dans la télédétection – Application à l'instrument POLDER

- Fraction de particules non-sphériques

$\delta=0.13$   $\alpha=0.56$

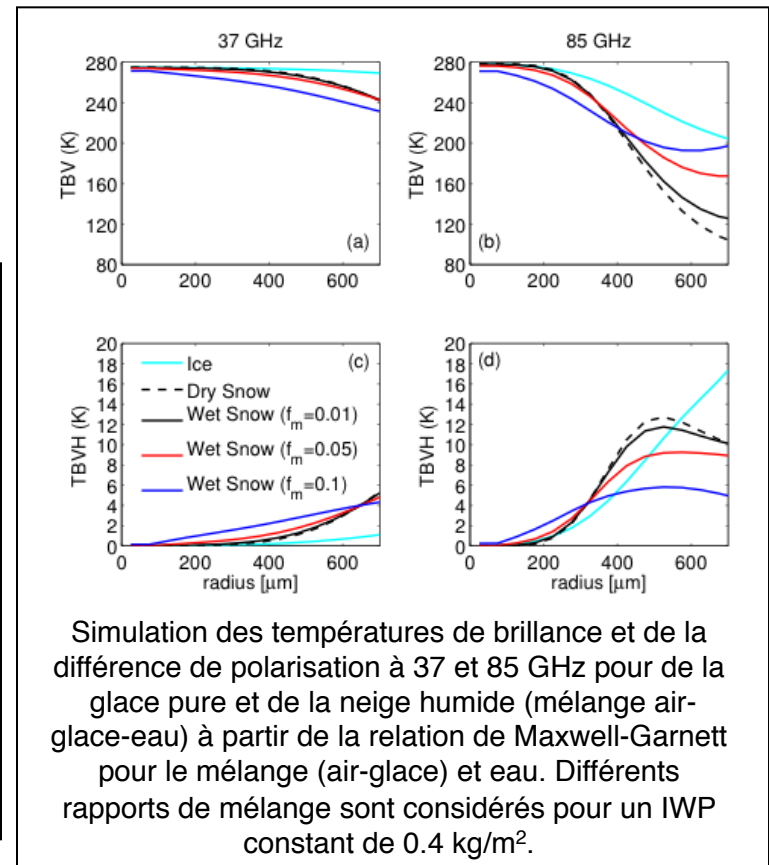
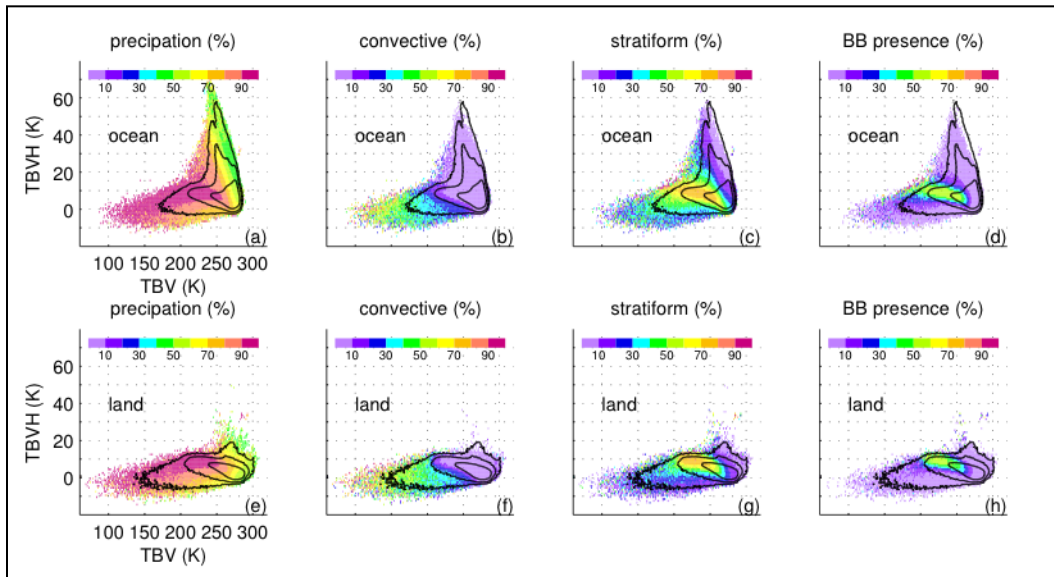
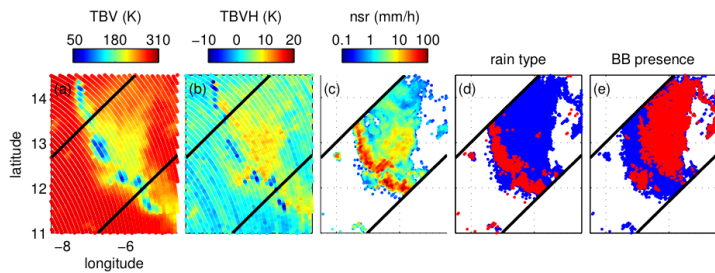


$\delta=0.15$   $\alpha=0.49$



# Exemple d' utilisation de la diffusion dans la télédétection – Convection et précipitation

- Interprétation des observations micro-ondes à l' aide des autres observations de TRMM et de calculs radiatifs pour la caractérisation des régions convectives et stratiformes (*e.g. Galligani et al., JGR, 2013*)



Simulation des températures de brillance et de la différence de polarisation à 37 et 85 GHz pour de la glace pure et de la neige humide (mélange air-glace-eau) à partir de la relation de Maxwell-Garnett pour le mélange (air-glace) et eau. Différents rapports de mélange sont considérés pour un IWP constant de  $0.4 \text{ kg/m}^2$ .

# Les différents codes et leurs limitations

## Compromis rapidité/précision

		type	polarisation	Limitations	Visible et IR	
Visible / IR	Adding-doubling		Rec./ Op.	oui	Plan parallèle	oui
	RTTOV		Op.	non	Plan parallèle Param. diffusion	oui
	OS		Rec./ Op.	oui	Plan parallèle	oui
	OD	DISORT	Rec./ Op.	non	Plan parallèle	oui
		VLIDORT		oui	Pseudo - sphérique	oui
	Monte- Carlo	MCrad1D	Rec.	oui	Plan parallèle	visible
		SMART-G			Atmos. Sphérique	
		3DMCPOL			Atmosphère 3D	oui
Microondes	RTTOV-SCAT		Op.	non	Plan parallèle	
	CRTM		Op.			
	ARTS		Rec.			