



Université
de Lille



Diffusion et Particules

Hervé Herbin¹ et Najda Villefranque²

1. Laboratoire d'Optique Atmosphérique
2. Centre National de Recherches Météorologiques

Atelier TRATTORIA
26-28 mai 2025



Pourquoi prendre en compte la diffusion:

- Les particules (nuages/aérosols) sont le sujet d'étude
- Information couplée (e.g. gaz+aérosol)
- Correction atmosphérique (surface, gaz) :
 - diminution des erreurs/biais
 - augmenter le nombre de mesures exploitablese.g. Microcarb (>75% avec AOD>0.3)

Dépendances:

- Régime de diffusion
- Distribution en taille
- Composition chimique/minéralogique
- Forme/Morphologie

RTE en atmosphère diffusante:

Echelle Microscopique

- Distribution en tailles
- Forme des particules
- Composition chimique
- Propriétés optiques

Echelle Macroscopique

- Statistiques de chemins
- Effets radiatifs 3D des nuages
- Calcul et analyse de sensibilités par Monte Carlo

- Variation de la radiance L selon la direction S :

$$dL_\lambda(s) = -k_{ext,\lambda} L_\lambda(s) ds + k_{ext,\lambda} J_\lambda(s) ds$$

- Fonction source J :

$$J_\lambda(s) = J_\lambda^S(s) + J_\lambda^E(s) = \frac{\omega_{o,\lambda}}{4\pi} \int_{4\pi} p_\lambda(s, s') L_\lambda(s') d\Omega' + [1 - \omega_{o,\lambda}] B_\lambda(T)$$

avec $\omega_{o,\lambda}$ l'albédo de diffusion simple, p_λ la fonction de phase, B_λ la fonction de Planck et s' la direction de diffusion.

- Le coefficient d'extinction k_{ext} :

$$k_{ext} = \sum_{i=1}^{u_g} u_i \sum_j k_j^{abs.}(v, T, p) + \sum_{m=1}^p p_m \sum_n k_n^{ext.}(v, T, p)$$

Absorption moléculaire

+ diffusion moléculaire
Rayleigh (UV-Vis.)

Extinction particulaire

avec $k_{ext}(\lambda) = \int \pi r^2 Q_{ext}(r, \lambda, m) n(r) dr$

avec r le rayon géométrique moyen, $n(r)$ la distribution en taille
 Q_{ext} le facteur d'efficacité d'extinction.



Régimes de diffusion



Régimes de diffusion

Le régime de diffusion caractérise **la fonction de phase** et la section efficace différentielle de diffusion σ et donc pas conséquent **les facteurs d'efficacités**: $Q_x = 4\sigma_x/\pi D^2$,



L'efficacité d'extinction angulaire Q est liée à la **longueur d'ondes** et la **taille** des particules : introduction du paramètre de taille

$$x = 2\pi r/\lambda$$

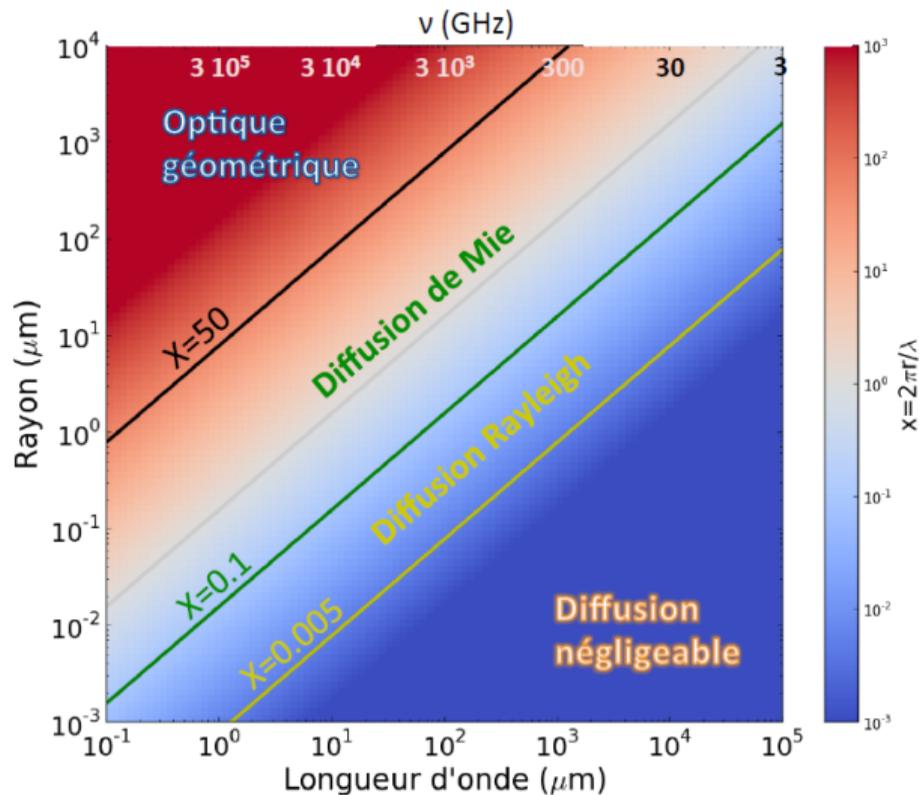
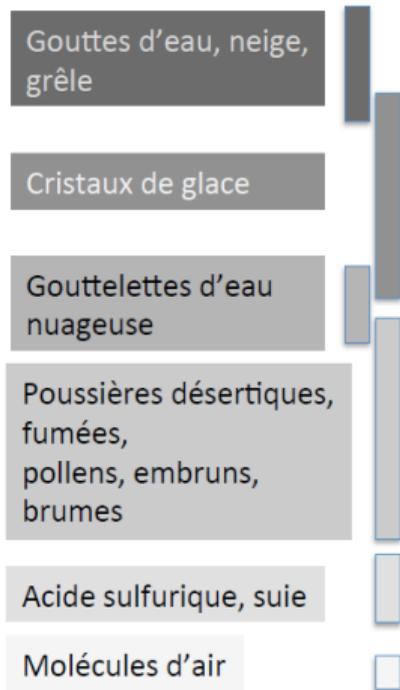
r le rayon moyen et λ est la longueur d'ondes (en μm).

Rayleigh : $x \ll 1$;

Mie : $x \approx 1$;

Optique Géométrique : $x \gg 1$

Régimes de diffusion





Université
de Lille



Distribution en tailles

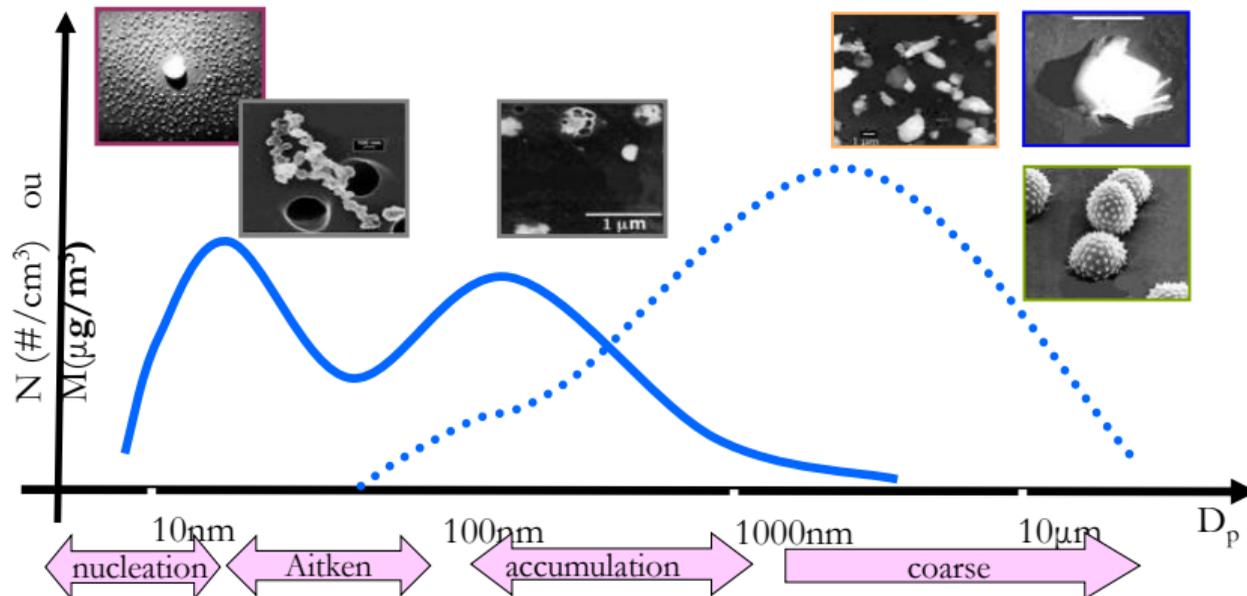


Distribution en tailles: Aérosols

$$n(r) = \frac{n_0}{\sqrt{2\pi \ln(\sigma)} r} \exp\left[-\frac{(\ln r - \ln r_m)^2}{2 \ln^2 \sigma}\right],$$

where r_m the mean radius of the distribution, $\ln \sigma$ the standard deviation that quantifies the width of the distribution and n_0 the number of particles per unit volume.

- Particules Ultra-fines (modes Nucléation et Aitken) : conversion gaz-particules (1 – 100 nm)
- Particules Fines (mode accumulation) : formation par coagulation (100 nm-1 μ m)
- Mode grossier : émission depuis la surface par processus mécanique (vent)



Nuages d'eau: distribution gamma modifiée:

$$n(r) = ar^\alpha \exp \left[-\frac{\alpha}{\gamma} \left(\frac{r}{r_c} \right)^\gamma \right],$$

where $n(r)$ is the number of droplets per unit volume with radius r . The parameter a represents the total number of drops per volume. The shape of the distribution is given by the empirical parameters α , γ and r_c and controls the fraction of small or large particles.

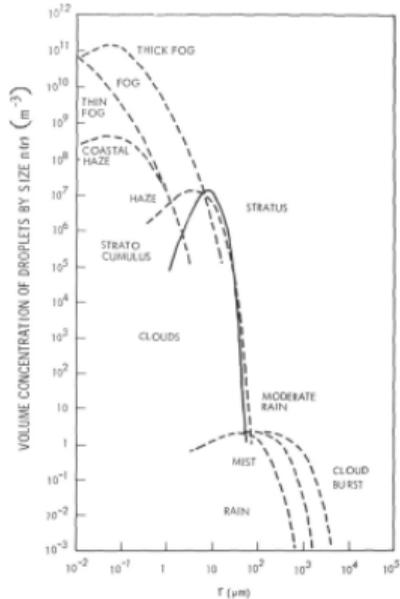


Figure 1.4. Size distribution functions $n(r)$ for water droplet clouds (adapted from [HUN 71])

Cloud type	a	α	γ	r_c (μm)
Stratocumulus Sc1	0.2823	5	1.19	5.33
Stratocumulus Sc2	0.19779	2	2.46	10.19
Stratus St1	0.97923	5	1.05	4.70
Stratus St2	0.38180	3	1.3	6.75
Nimbostratus Nb1	0.080606	5	1.24	6.41
Nimbostratus Nb2	1.0969	1	2.41	9.67
Cumulus	0.5481	4	1.0	6.0
Precipitating cloud	$4.97 \cdot 10^{-8}$	2	0.5	70.0

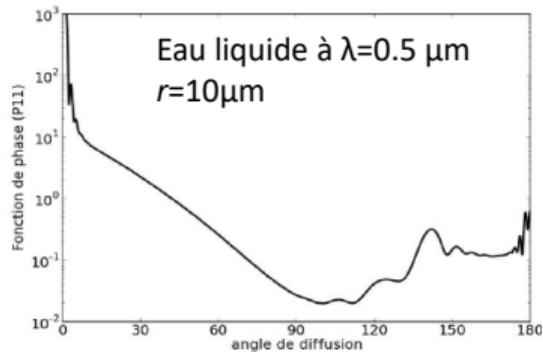
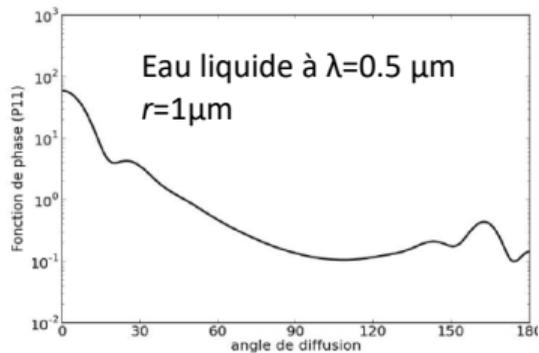
Table 1.4. Parameters of the modified gamma distribution defined by [DEI 69] for different types of clouds

Nuages de glace: distribution exponentielle:

$$n(r) = C_1 \exp(-C_2 \cdot r)$$

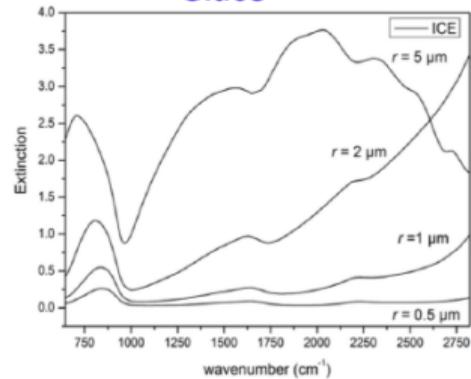
where $n(r)$ is the number of crystals per unit volume with radius r . C_1 and C_2 are function of bulk densities, shape and thermodynamical parameters.

Fonction de phase

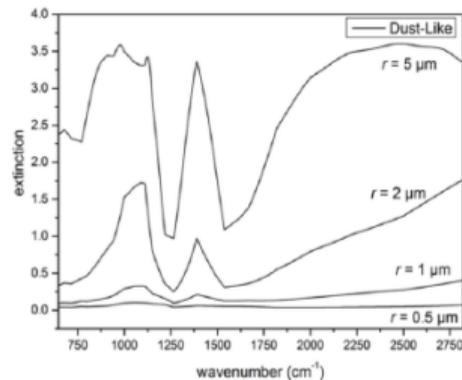


Extinction

Glace

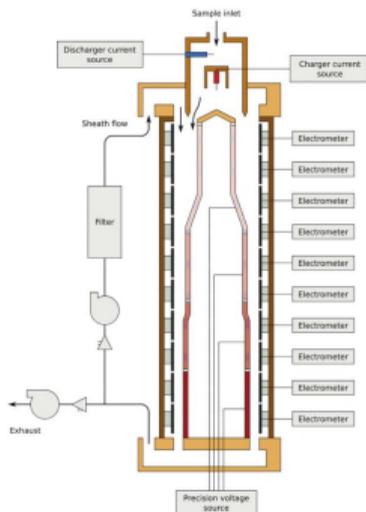


Dust



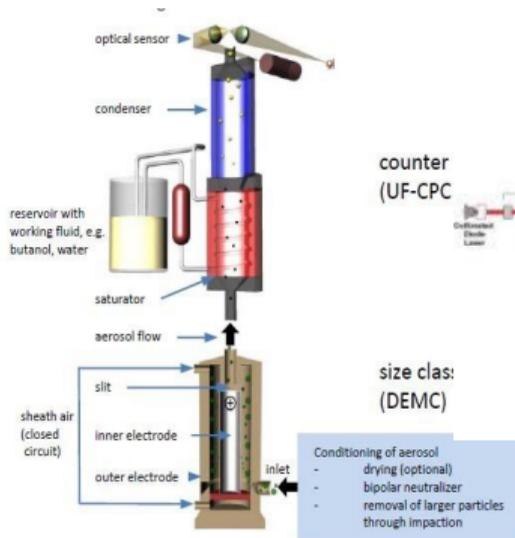
En laboratoire ou in-situ

Air Ion Spectrometer (AIS)



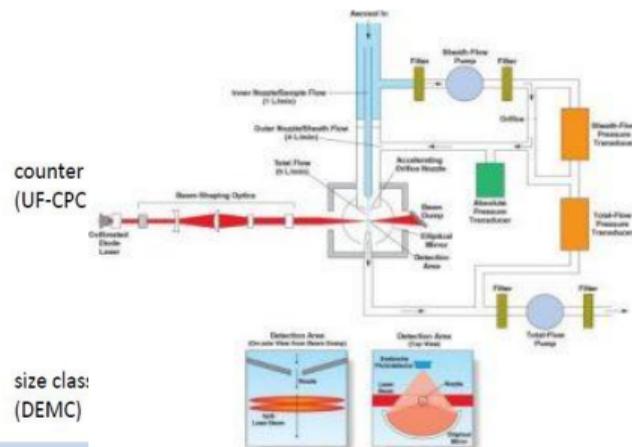
$D_m = 0.8-40 \text{ nm}$

Scanning Mobility (SMPS)



$D_m : 20 \text{ nm}-600 \text{ nm}$

APS



$D_a : 500 \text{ nm}-10\mu\text{m}$

Difficulté: Relations de passage (D_m , D_a , D_g) qui dépendent de plusieurs paramètres dont la forme

Les mini-capteurs: Outils intéressants de la science participative.

Distribution de mini capteurs (P, T, GPS and particle Size distribution) à la population au travers d'associations.



- ✓ Estimation of individual exposure to air pollution under different environmental conditions.
- ✓ Prediction of air quality in urban areas using mobile sensors and artificial intelligence.

Difficulté: Exercice d'intercomparaison-validation

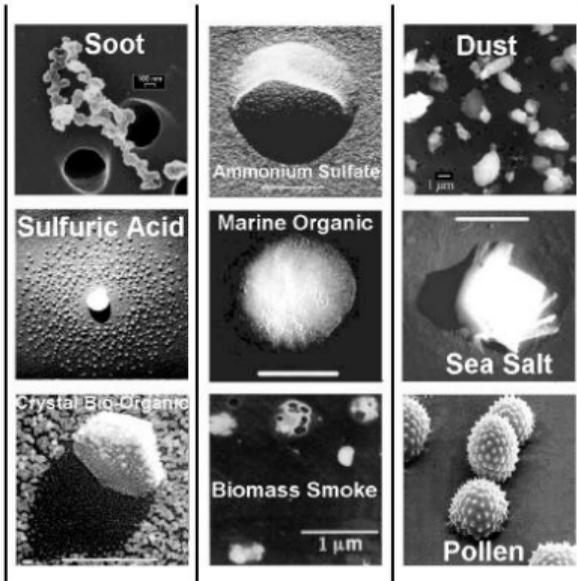


Forme des particules

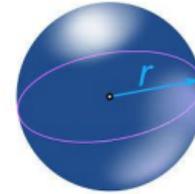


Forme des particules

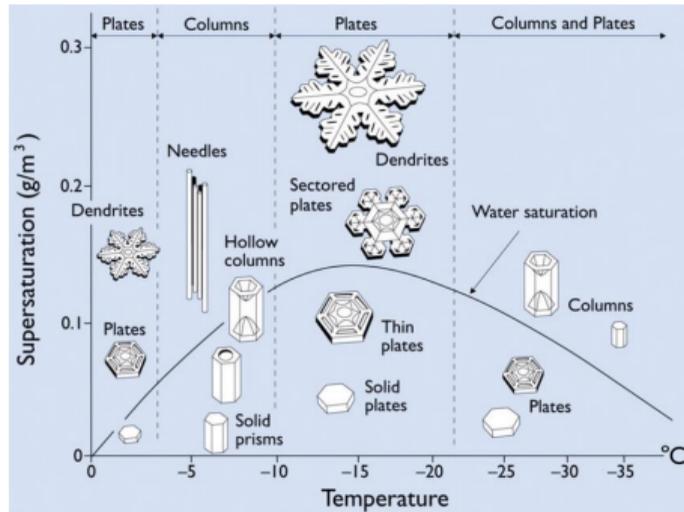
Aérosols



Gouttelettes liquides

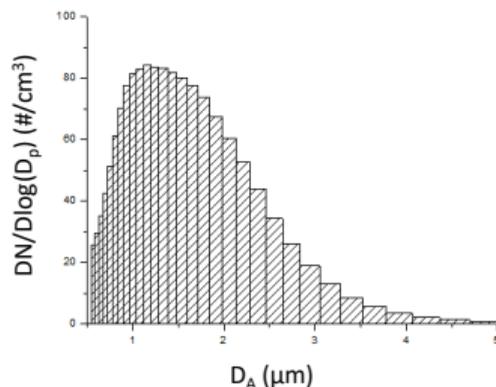


Cristaux de glace



Forme des particules: Effet sur la distribution en taille

Exemple de l'APS:



Geometrical diameter D_G

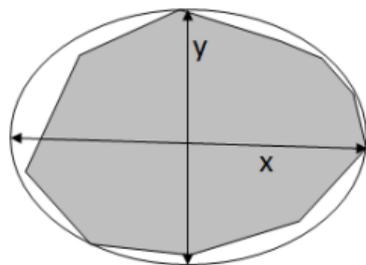
$$D_G = D_A \sqrt{\frac{\chi \rho_0}{\rho}}$$

D_A : aerodynamic diameter (μm)

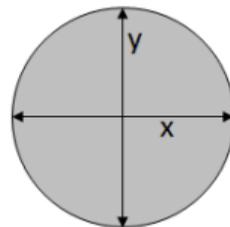
χ : shape factor

ρ : density in $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

ρ_0 : water density ($1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)



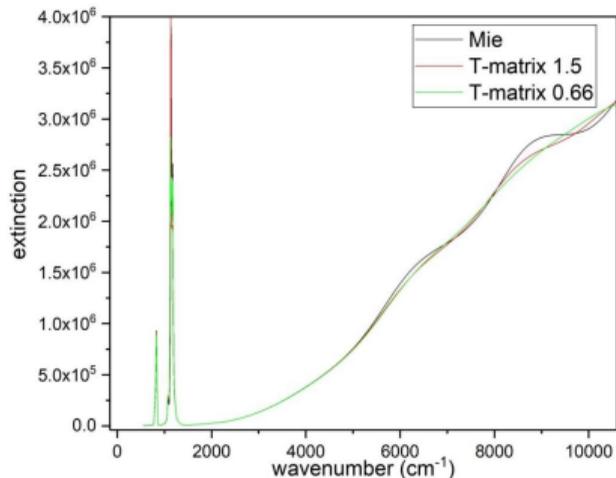
Particule non sphérique $\chi = \frac{x}{y} > 1$



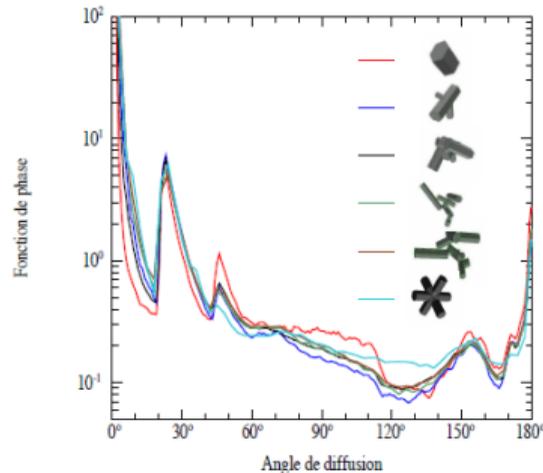
Particule sphérique $\chi = \frac{x}{y} = 1$

Forme des particules : Effet sur le calcul de la diffusion et la fonction de phase

- Pour les particules ayant une faible dissymétrie ($\chi \approx 1$): Mie donne de bons résultats
- Pour les cylindres et les sphéroïdes: solutions analytiques des relations de Maxwell
- Pour les ellipsoïdes: Approches numériques satisfaisantes, e.g. T-Matrix
- Pour les formes plus complexes: Méthode des éléments finis



Comparaison de la variation spectrale de l'extinction pour des particules de formes différentes à même volume équivalent.

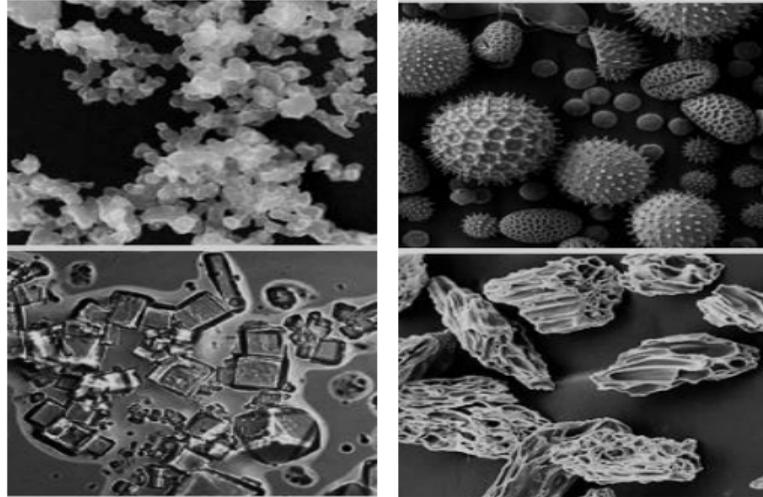
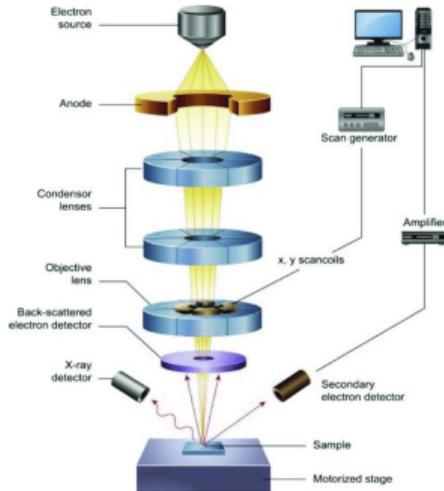


Méthodes:

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

Difficulté: Comment connaître la forme et comment traiter les milieux non-homogènes?

Scanning Electronic Microscopy



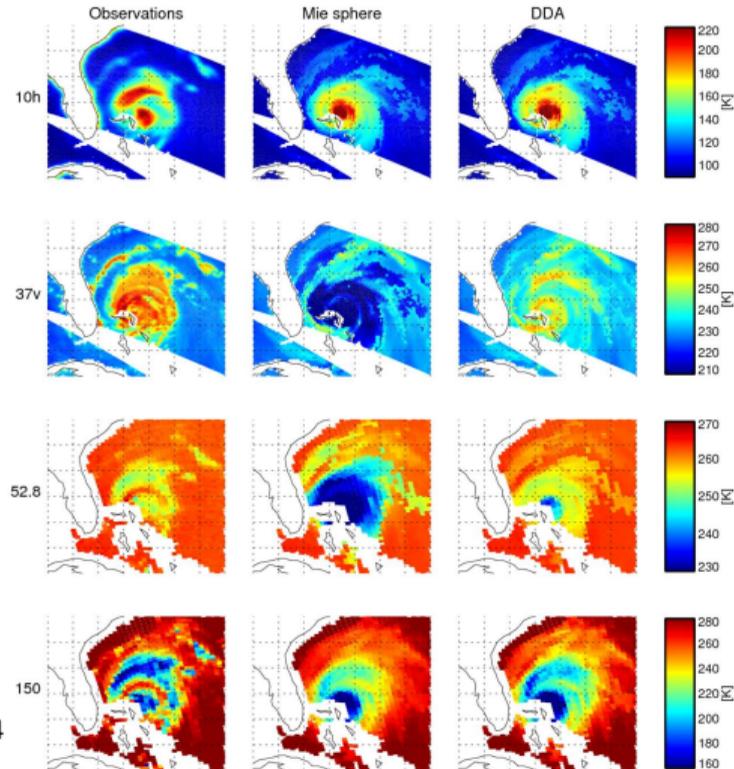
Distributions en tailles et en formes (fastidieux!!!)

Difficulté: Quelle statistique pour une bonne représentativité?

Exemple d'application

La spécification de formes réalistes pour les cristaux est un élément clé pour différentes applications comme la génération de produit de Niveau 2 (ex: taux de pluie/neige) et **l'assimilation de données nuageuses**

Les élargissements successifs donnés par les missions TRMM puis GPM ont conduit la communauté « micro-ondes » à s'intéresser d'abord à l'inversion des précipitations liquides puis solides => nécessitant des codes de transfert radiatifs plus précis pour la diffusion



Ouragan Irène
25 Août 2011
Geer and Baordo, 2014



Université
de Lille

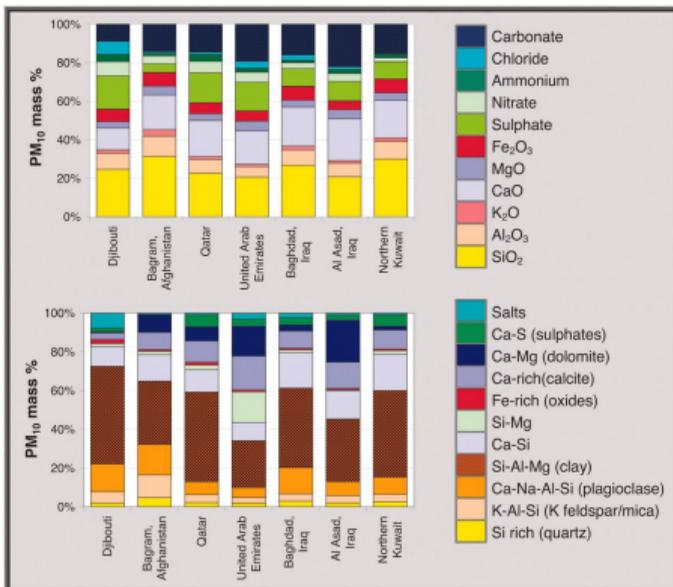


Composition chimique

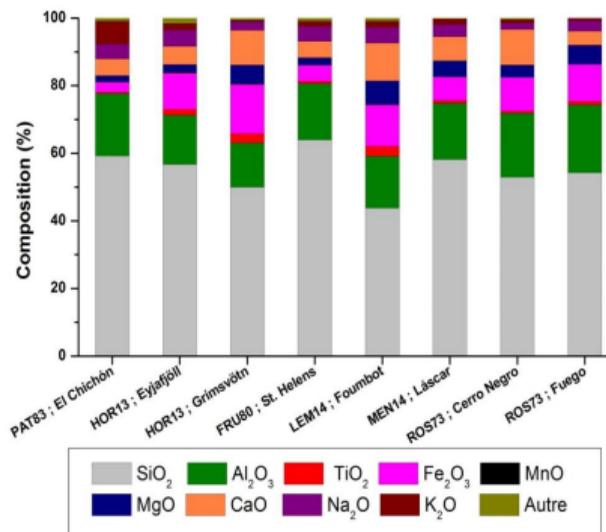


Variabilité de la composition chimique/minéralogique

Déserts :

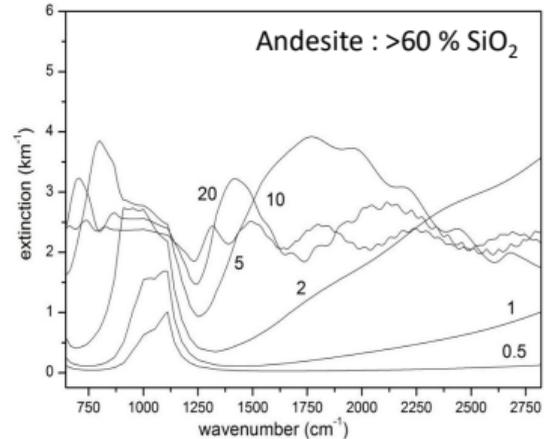
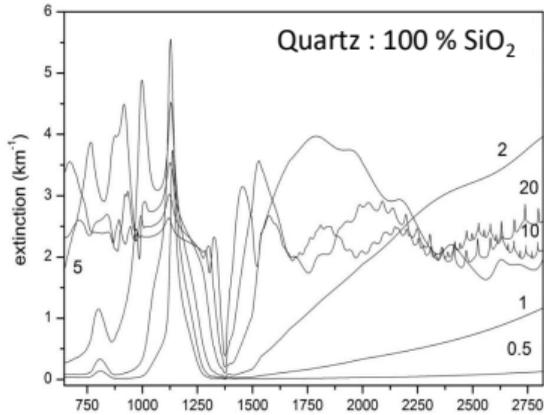


Volcans :

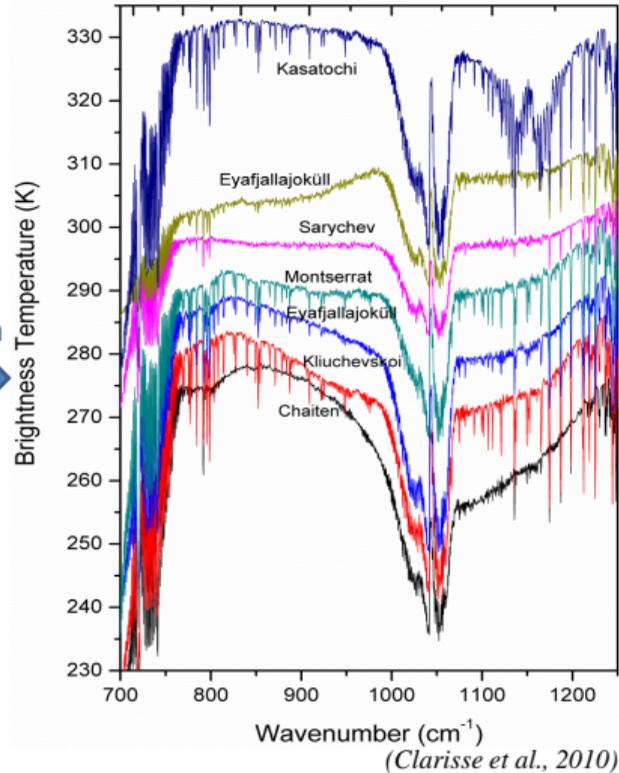


Difficulté: Dépend de la source d'émission mais également du transport (vieillesissement)

Composition chimique: impact sur les propriétés optiques



Absorption
Diffusion

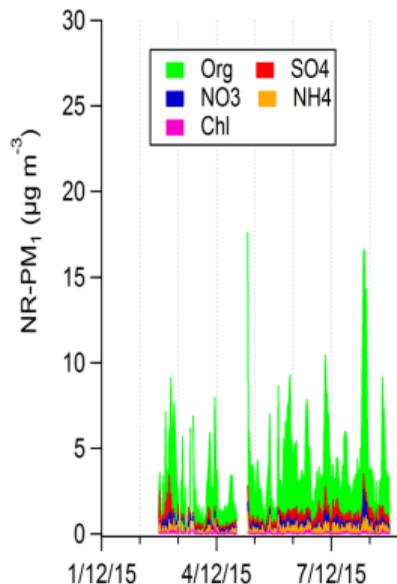


Difficulté: influence également du taux de cristallinité.

Composition chimique: la mesure

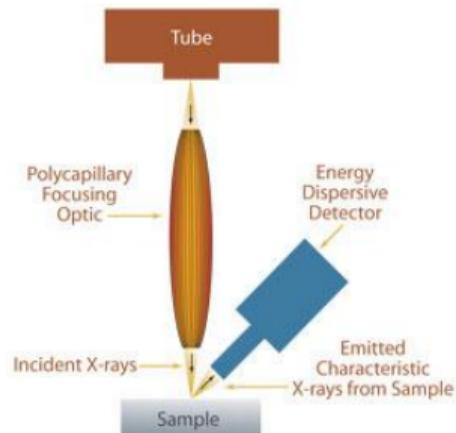
Exemples : XRF, XRD, spectrométrie de masse, chromatographie ionique...

Ion Chromatography (IC) /
Mass spectrometer (ACSM)



Concentrations pour (Organiques, Sulfates,
Nitrates, Chlorures, Ammonium)

X-ray fluorescence (XRF) /
X-ray diffraction (XRD)



Composition élémentaire,
minéralogie

Difficulté: techniques utilisables uniquement en in-situ ou en laboratoire.



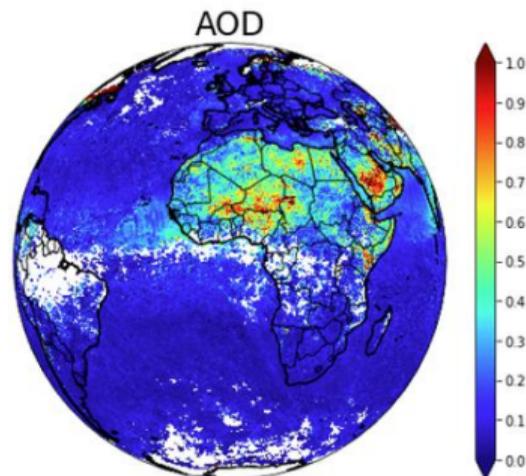
LL
Université
de Lille



Propriétés Optiques



$$\text{AOD} = \tau_{\lambda}(s_1, s_2) = \int_{s_1}^{s_2} k_{\text{ext}}(\lambda, s) ds.$$

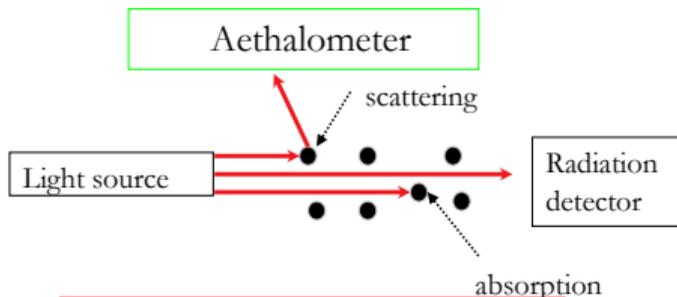


En télédétection, le paramètre le plus utilisé, car c'est une grandeur purement optique: pas de distinction entre la concentration, la taille, la forme des particules et leurs propriétés d'absorption/diffusion.

$$\tau_{\lambda} = -\ln(I_{\lambda}/I_{0\lambda}),$$

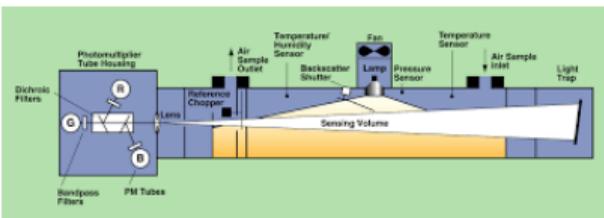
Difficulté: Une meilleure caractérisation des particules nécessite d'autres paramètres qui ne sont obtenus que par le biais de LUTs ou de paramétrisations.

Propriétés optiques: la mesure



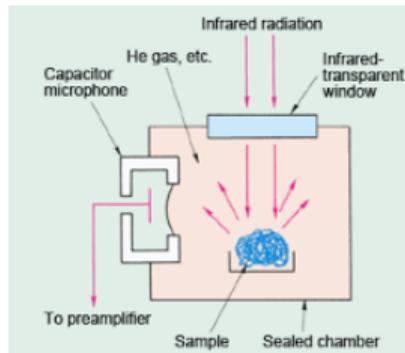
Absorption coefficient (1 – 7 wavelength from UV to NIR)

Nephelometer



Scattering coefficient (3 wavelength) in visible

Photo-Acoustic Sensor (PAS)



Absorption coefficient (1 – 7 wavelength from visible to NIR)

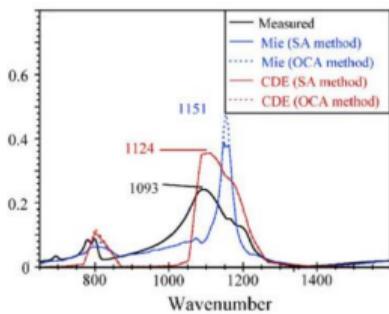
Difficulté: Ne permet pas de couvrir une étendue spectrale suffisante et extrapolations impossibles (surtout pour l'absorption)

Propriétés optiques: la mesure (suite)

Le paramètre idéal: grandeur intrinsèque qui permet le lien entre composition chimique, propriétés μ -physiques et propriétés optiques.

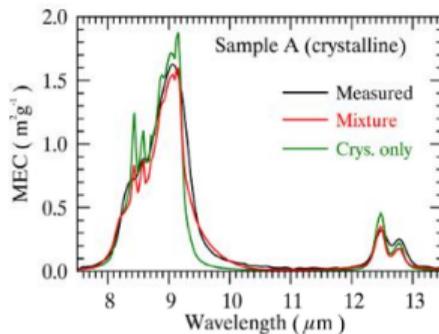
Mogili et al, 2007

Study the sphericity effect



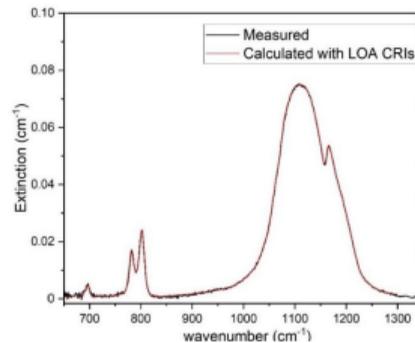
Reed et al, 2017

Study the crystallinity effect



Herbin et al., 2023

New refractive indices retrieval



We have:

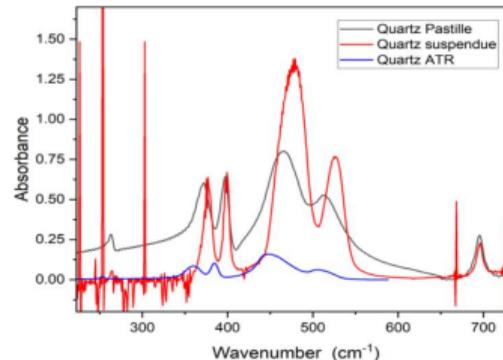
Bulk



Pellet

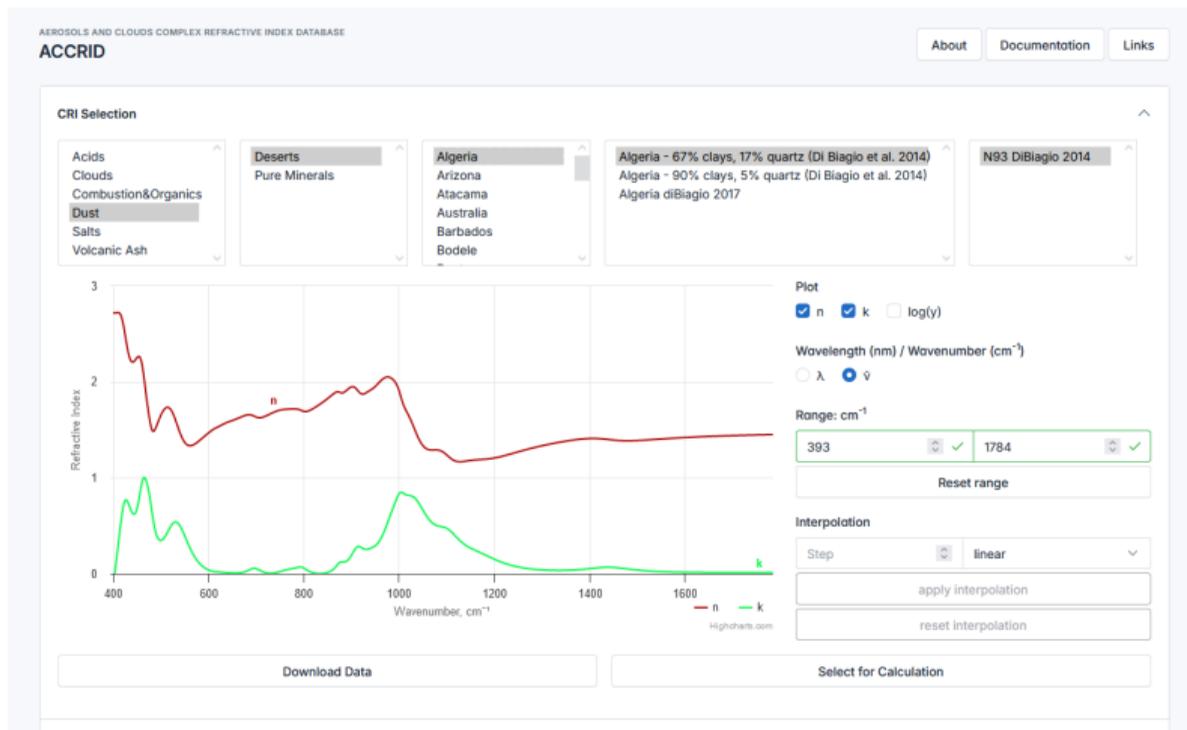


We need:



Propriétés optiques: Database

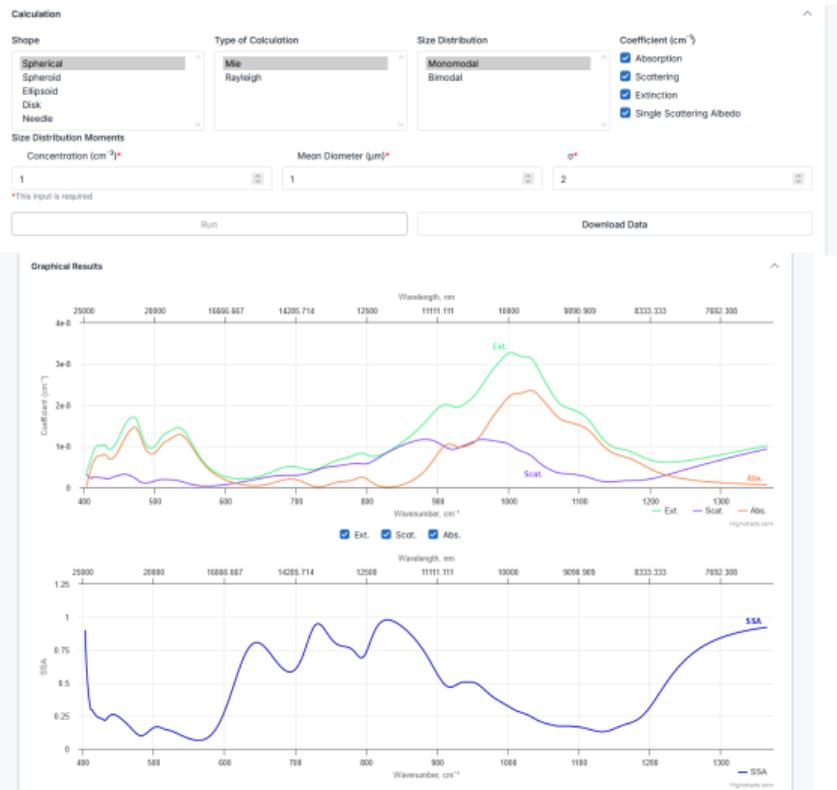
ACCRID is the acronym for Aerosols and Clouds Complex Refractive Index Database. ACCRID is first a compilation of CRI that a variety of radiative transfer algorithms use to simulate the absorption and scattering of light in the atmosphere.



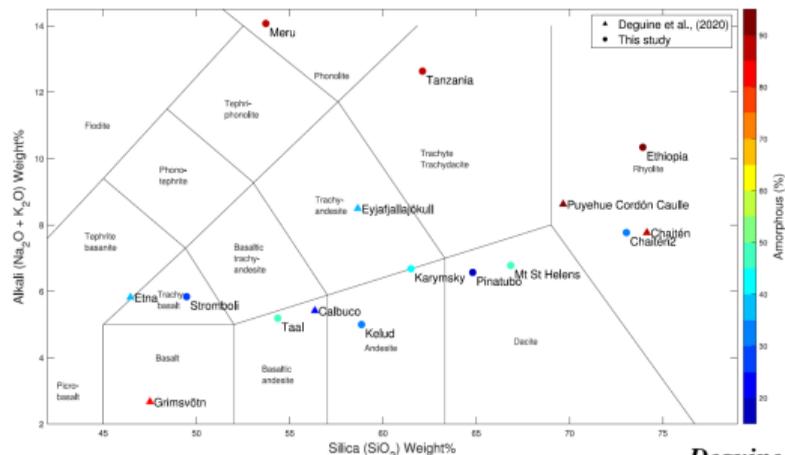
Beta version available at: <https://accrid.loa.univ-lille.fr/>

Propriétés optiques: Database

ACCRID is also a user-friendly interface for calculating some essential optical parameters such as: absorption, scattering, extinction coefficients or even Single Scattering Albedo (SSA) and this, for many shapes or size distributions.

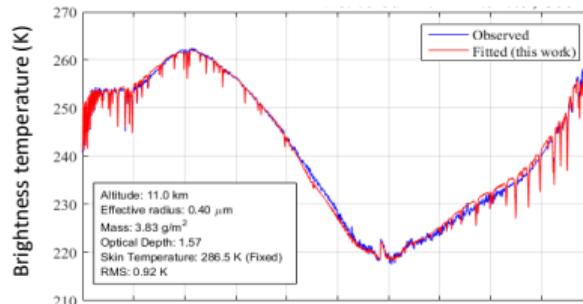
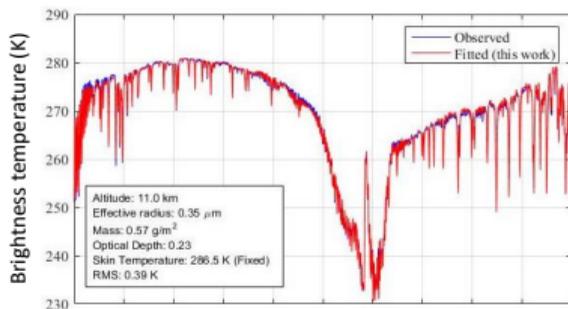


Propriétés optiques: application à la télédétection



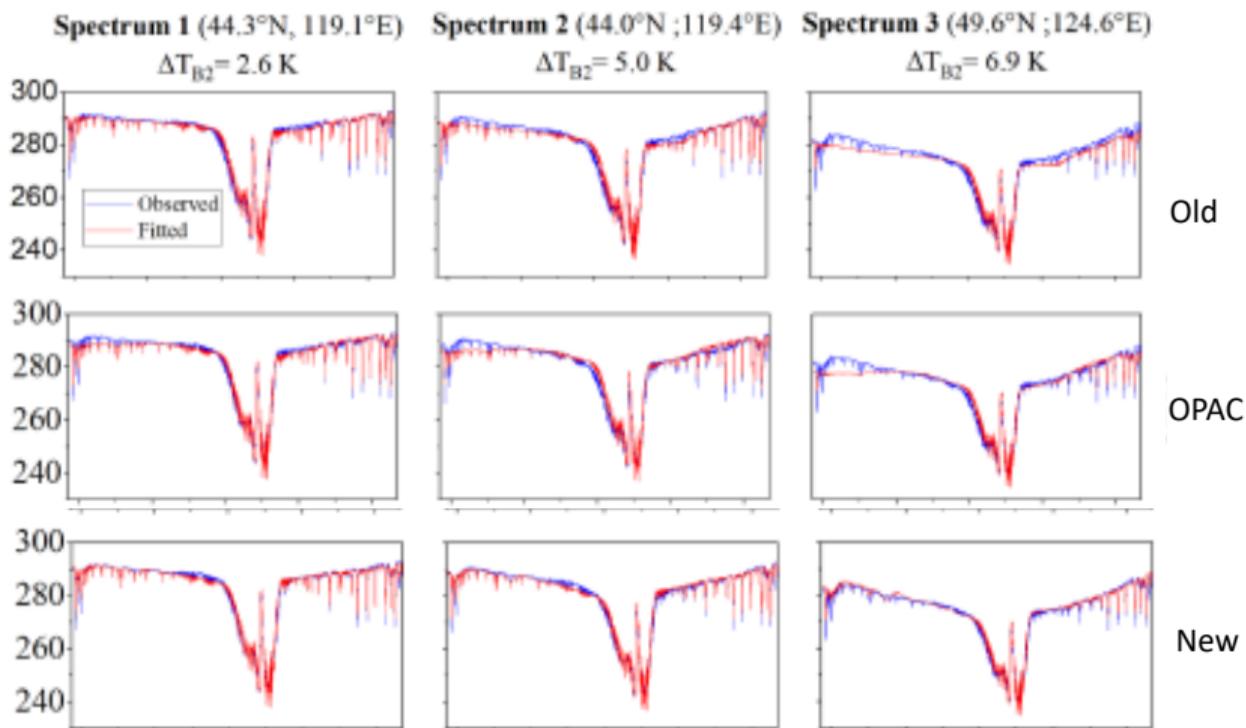
Deguine et al., 2023

Case study: Puyehue Cordón Caulle (06/2011)



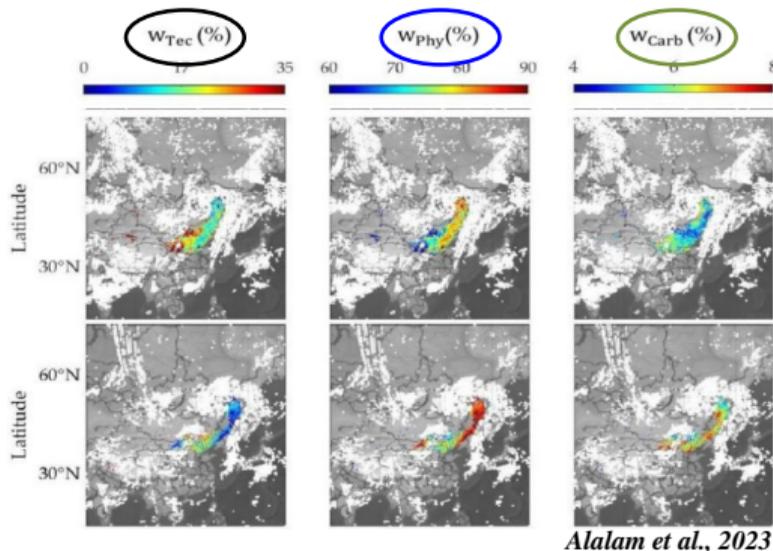
Deguine et al., 2020

Case Study: East Asian desert storm (05/2017)



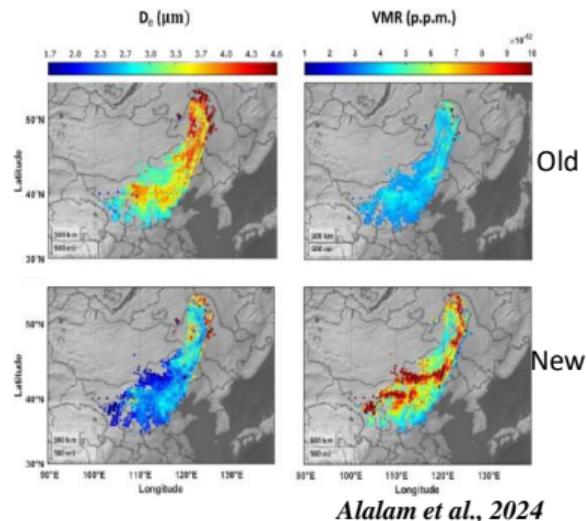
Composition

Spatio-temporal evolution of mineralogical mass weight maps of **tectosilicates**, **phyllosilicates**, and **carbonates** :



Difficulté: généralisation et quid des théories de mélange

μ -Physique



Difficulté: la validation

Diffusion dans les nuages et aérosols : effets macroscopiques

Comment interpréter les observations pour restituer des propriétés macro de scènes nuageuses (et aérosols) ?

Quel modèle de géométrie nuageuse ? Quel modèle de transfert ?

Nuages vrais → propagation vraie → mesure ← modèle de nuage et de transfert radiatif ← paramètres nuageux

Diffusion dans les nuages et aérosols : effets macroscopiques

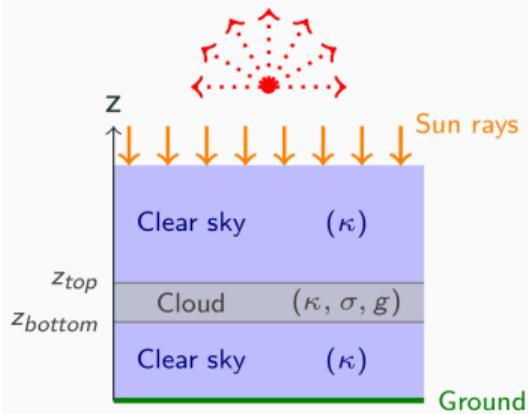
Comment interpréter les observations pour restituer des propriétés macro de scènes nuageuses (et aérosols) ?
Quel modèle de géométrie nuageuse ? Quel modèle de transfert ?

Nuages vrais \rightarrow propagation vraie \rightarrow mesure \leftarrow modèle de nuage et de transfert radiatif \leftarrow paramètres nuageux

Modèles simples pour limiter les temps de calculs et le nombre de paramètres à restituer :

- Slab plan parallèle homogène, altitude du sommet z_{top} , épaisseur H , coefficient d'extinction $k \sim q_l/r_e$
- Transfert radiatif 1D aux limites diffusion simple quand $\tau \ll 1$ ou diffusion macro quand $\tau \gg 1$

Crédit M. Galtier



Géométrie considérée

Diffusion dans les nuages et aérosols : effets macroscopiques

Comment interpréter les observations pour restituer des propriétés macro de scènes nuageuses (et aérosols) ?
Quel modèle de géométrie nuageuse ? Quel modèle de transfert ?

Nuages vrais → propagation vraie → mesure ← modèle de nuage et de transfert radiatif ← paramètres nuageux

Modèles simples pour limiter les temps de calculs et le nombre de paramètres à restituer :

- Slab plan parallèle homogène, altitude du sommet z_{top} , épaisseur H , coefficient d'extinction $k \sim q_l/r_e$
- Transfert radiatif 1D aux limites diffusion simple quand $\tau \ll 1$ ou diffusion macro quand $\tau \gg 1$

Ces modèles, quand trop éloignés de la réalité, induisent des biais sur les paramètres restitués :

- Diffusion multiple \Rightarrow biais sur les coefficients d'extinction restitués à partir de mesures lidars
 - Hétérogénéité des nuages sous-pixel \Rightarrow biais "plan parallèle homogène", domine dans les pixels $\gg 1\text{km}$
 - Hétérogénéité horizontale des nuages inter-pixel \Rightarrow biais "pixels indépendants", domine dans les pixels $\ll 1\text{km}$
- ▷ On s'y intéresse depuis des années, e.g. analyse et quantification à l'aide de méthodes Monte Carlo

Diffusion dans les nuages et aérosols : effets macroscopiques

Comment interpréter les observations pour restituer des propriétés macro de scènes nuageuses (et aérosols) ?
Quel modèle de géométrie nuageuse ? Quel modèle de transfert ?

Nuages vrais → propagation vraie → mesure ← modèle de nuage et de transfert radiatif ← paramètres nuageux

Modèles simples pour limiter les temps de calculs et le nombre de paramètres à restituer :

- Slab plan parallèle homogène, altitude du sommet z_{top} , épaisseur H , coefficient d'extinction $k \sim q_l/r_e$
- Transfert radiatif 1D aux limites diffusion simple quand $\tau \ll 1$ ou diffusion macro quand $\tau \gg 1$

Ces modèles, quand trop éloignés de la réalité, induisent des biais sur les paramètres restitués :

- Diffusion multiple \Rightarrow biais sur les coefficients d'extinction restitués à partir de mesures lidars
 - Hétérogénéité des nuages sous-pixel \Rightarrow biais "plan parallèle homogène", domine dans les pixels $\gg 1\text{km}$
 - Hétérogénéité horizontale des nuages inter-pixel \Rightarrow biais "pixels indépendants", domine dans les pixels $\ll 1\text{km}$
- ▷ On s'y intéresse depuis des années, e.g. analyse et quantification à l'aide de méthodes Monte Carlo

On progresse, les instruments et capacités de calcul évoluent \Rightarrow nouvelles questions et nouvelles opportunités

Diffusion dans les nuages et aérosols : effets macroscopiques

Comment interpréter les observations pour restituer des propriétés macro de scènes nuageuses (et aérosols) ?
Quel modèle de géométrie nuageuse ? Quel modèle de transfert ?

Nuages vrais → propagation vraie → mesure ← modèle de nuage et de transfert radiatif ← paramètres nuageux

Modèles simples pour limiter les temps de calculs et le nombre de paramètres à restituer :

- Slab plan parallèle homogène, altitude du sommet z_{top} , épaisseur H , coefficient d'extinction $k \sim q_l/r_e$
- Transfert radiatif 1D aux limites diffusion simple quand $\tau \ll 1$ ou diffusion macro quand $\tau \gg 1$

Ces modèles, quand trop éloignés de la réalité, induisent des biais sur les paramètres restitués :

- Diffusion multiple \Rightarrow biais sur les coefficients d'extinction restitués à partir de mesures lidars
 - Hétérogénéité des nuages sous-pixel \Rightarrow biais "plan parallèle homogène", domine dans les pixels $\gg 1\text{km}$
 - Hétérogénéité horizontale des nuages inter-pixel \Rightarrow biais "pixels indépendants", domine dans les pixels $\ll 1\text{km}$
- ▷ On s'y intéresse depuis des années, e.g. analyse et quantification à l'aide de méthodes Monte Carlo

On progresse, les instruments et capacités de calcul évoluent \Rightarrow nouvelles questions et nouvelles opportunités

Quelques exemples de travaux récents, non-exhaustif :

- (1) Théorie de la diffusion et statistiques de chemins pour la télédétection active
- (2) Effets 3D, impacts sur les propriétés nuageuses restituées à partir des imageurs
- (3) Calcul et analyse de sensibilité des luminances aux propriétés nuageuses par Monte Carlo

(1) Théorie de la diffusion et statistiques de chemins pour la télédétection active

Télédétection active basée sur l'interprétation des temps de retour

- lien distributions longueurs de chemins \leftrightarrow propriétés nuages ? [1]
- correction signal diffusion simple \leftrightarrow signal diffusion multiple ? [2]

- En fonction de l'éclairage, de l'épaisseur optique, de l'albedo de diffusion simple, de la fonction de phase...?
- Et dans des scènes 3D complexes (bords de nuages, aérosols...) ?

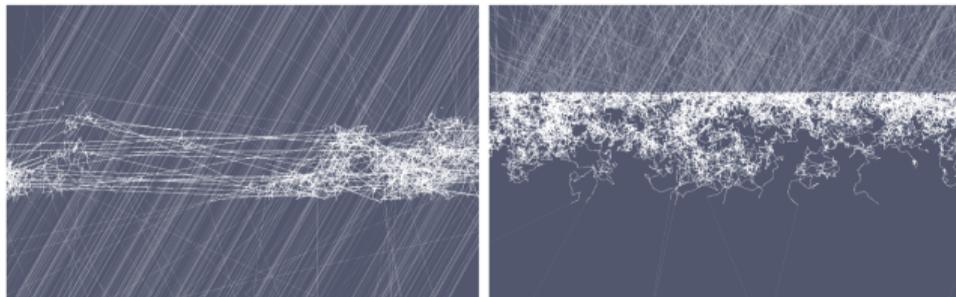


FIGURE 6 – Illustration de chemins échantillonnés pendant une simulation Monte Carlo de transfert radiatif solaire (à gauche) dans un champ de cumulus et (à droite) dans une couche nuageuse homogène horizontalement infinie (géométrie slab) où chaque couche contient le contenu en eau liquide maximum de la couche équivalente dans le champ de cumulus. Les segments plus épais correspondent à des morceaux de chemins ayant vécu au moins 10 diffusions.

Extrait de [1]

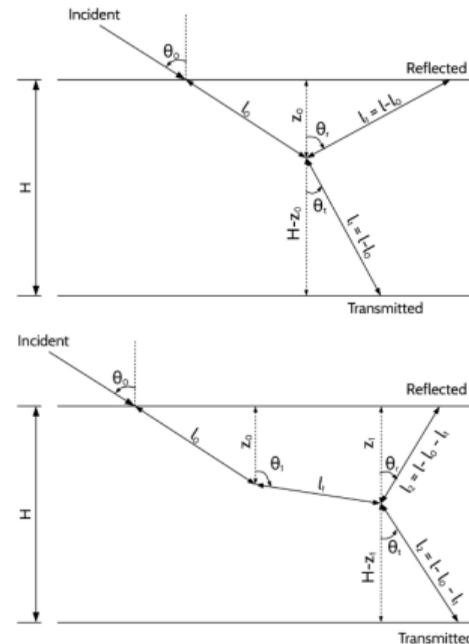


Fig. 1. Geometry of the slab, with the main quantities used in the calculations, for single (top) and double (bottom) scattering.

\leftrightarrow slab fin : 2e moment de la distribution
 $\sim H^2/\tau = k$

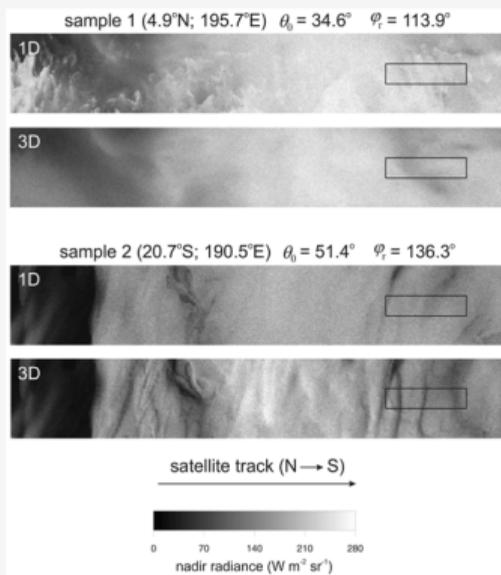
[1] *Photon path distributions in optically thin slabs*, Libois and Davis, 2022

[2] *Empirical model of multiple-scattering effect on single-wavelength lidar data of aerosols and clouds*, Shcherbakov et al., 2022

(2) Effets 3D, impacts sur les radiances et flux *Broadband radiative quantities for the EarthCARE mission, Cole et al. 2023*

Images sat de synthèse 1D et 3D sur des nuages simulés

Flux SW 3D-1D sur des nuages simulés (fermeture)



smoothing

roughening

Figure 7 Nadir broadband SW radiances for two sample regions in the Hawaii frame; both regions measure 128 km along-track by 20.25 km across-track. Small rectangles indicate a 5x21 km assessment domain, the size used for radiative closure assessments. Central values of latitude and longitude are listed along with θ_0 and ϕ_s (measured clockwise from the satellite's tracking direction). The labels 3D and 1D indicate RT model dimensionality using horizontal grid spacings of 0.25 km and 10⁶ km.

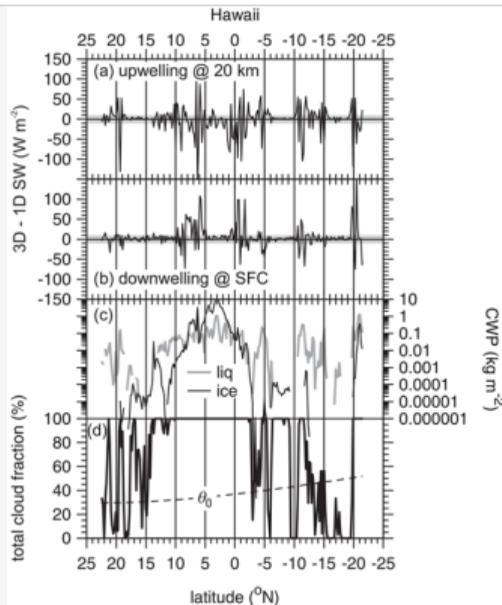


Figure 8 (a) Difference between upwelling SW fluxes at an altitude of 20 km as predicted by 3D and 1D RT models for 5x21 km assessment domains of the Hawaii frame. The shaded area indicates EarthCARE's goal of $\pm 10 \text{ W m}^{-2}$. (b) As in panel (a), except this is for SW surface irradiance. (c) Mean liquid and ice cloud water paths for the Hawaii frame's 5x21 km domains. (d) Corresponding total cloud fraction and solar zenith angle for the same assessment domains.

- Sous hypothèse 1D (pixels indépendants), luminance réfléchi dans le pixel i dépend de τ_i
- En 3D, la diffusion par les nuages hauts lisse le signal, on ne distingue plus le détail des nuages bas (smoothing)
- En 3D, les aspérités géométriques créent des hétérogénéités de luminance qu'on ne voit pas en 1D (roughening)
- Effets 3D non négligeables sur les flux SW hémisphériques intégrés sur $5 \times 21 \text{ km}$

(2) Effets 3D, impacts sur les épaisseurs optiques restituées

Luminances mesurées par une caméra all-sky

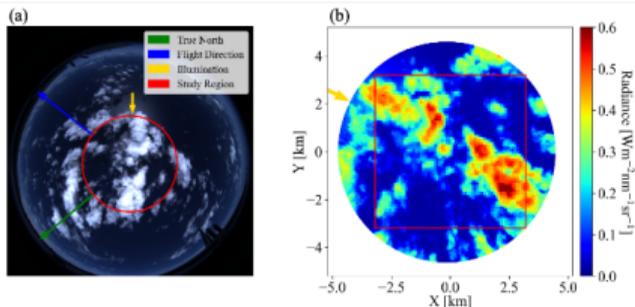


Figure 10. (a) RGB imagery of nadir-viewing all-sky camera deployed during CAMP²Ex for a cloud scene centered at 15.2744° N, 123.392° E over the Philippine Sea at 02:10:06 UTC on 5 October 2019. The arrows indicate true north (green), flight direction (blue), and illumination (where the sunlight comes from, yellow). (b) Red-channel radiance measured by the camera for the circular area indicated by the red circle in (a). The region in the red square shows a gridded radiance with a pixel size of 64×64 and spatial resolution of 100 m.

Épaisseurs optiques restituées, sous hypothèse 1D ou 3D

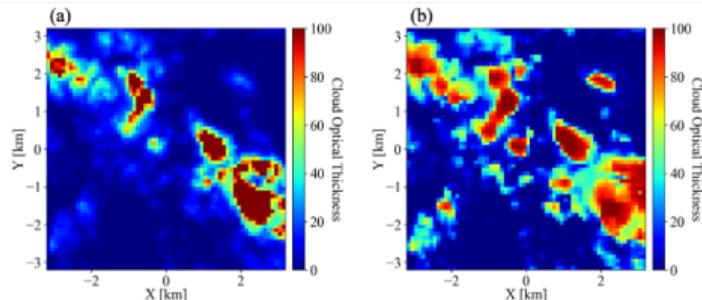


Figure 11. Cloud optical thickness for the gridded radiance in Fig. 10b (a) estimated by IPA method and (b) predicted by CNN.

The Education and Research 3D RT Toolbox, Chen et al., 2023

- **Répercussion des hypothèses 1D sur les épaisseurs optiques restituées**
- Quantification des erreurs associées, e.g. *Cornet et al. 2018, Matar et al. 2023...*
- Réseau de neurone pour inverser la luminance sous hypothèse 3D : de *Cornet et al., 2004* à *Nataraja et al., 2022*
- Simulations de référence (nuages LES et rayonnement Monte Carlo) + accessibles \Rightarrow + de données pour l'apprentissage
- La suite ? Restituer des profils verticaux (e.g. thèse G. Merlin), des enveloppes nuages 3D (mission C3IEL, C. Cornet)...

- Sous hypothèse 1D (pixels indépendants), luminance réfléchiée dans le pixel i dépend de τ_i
- En 3D, la diffusion par les nuages hauts lisse le signal, on ne distingue plus le détail des nuages bas (smoothing)
- En 3D, les aspérités géométriques créent des hétérogénéités de luminance qu'on ne voit pas en 1D (roughening)
- Effets 3D non négligeables sur les flux SW hémisphériques intégrés sur 5×21 km

(3) Calcul et analyse de sensibilité des luminances aux propriétés nuageuses par Monte Carlo

Calcul de jacobiens = sensibilités locales, petites perturbations, e.g., $s_I(x; k(y)) = \frac{\partial I(x)}{\partial k(y)}$

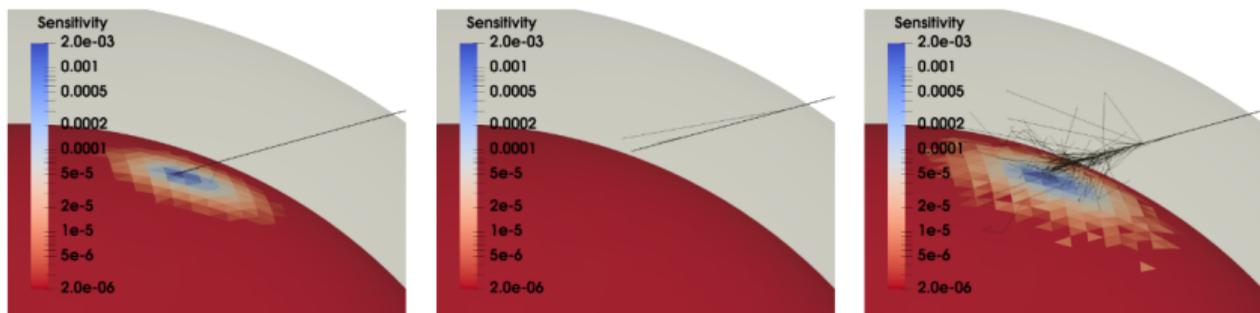
- Thèses dans le groupe EDStar

Nada Chem's Mourtaday (2024) *Espaces de chemins couplés pour le calcul de sensibilités par la méthode de MC*

Zili He (2022) *La méthode Monte-Carlo vectorisée pour les modèles de sensibilité en transfert radiatif*

Paule Lapeyre (2021) *Un modèle de transfert radiatif pour la sensibilité géométrique*

- Projet ANR RAD-NET piloté par Sandrine Vinatier (LIRA, Obs. Paris), *He et al., 2025 (in rev.)*



(a) $\lambda = 5022.4 \text{ nm}$

(b) $\lambda = 3512.84 \text{ nm}$

(c) $\lambda = 933.08 \text{ nm}$

Figure 13: The reverse sampled optical paths. Following our method, the optical paths are sampled from the observation point. The propagation directions are changed when scattering/reflection occurs, and the paths end when absorption occurs. 10,000,000 paths are sampled to estimate sensitivities, but only 100 paths are shown in each sub-figure for illustration.

- Differentiable rendering en synthèse d'image (Mitsuba, Eradiate ?)

Unbiased Inverse Volume Rendering with Differential Trackers, Nimier-David et al., 2022

(3) Calcul et analyse de sensibilité des luminances aux propriétés nuageuses par Monte Carlo

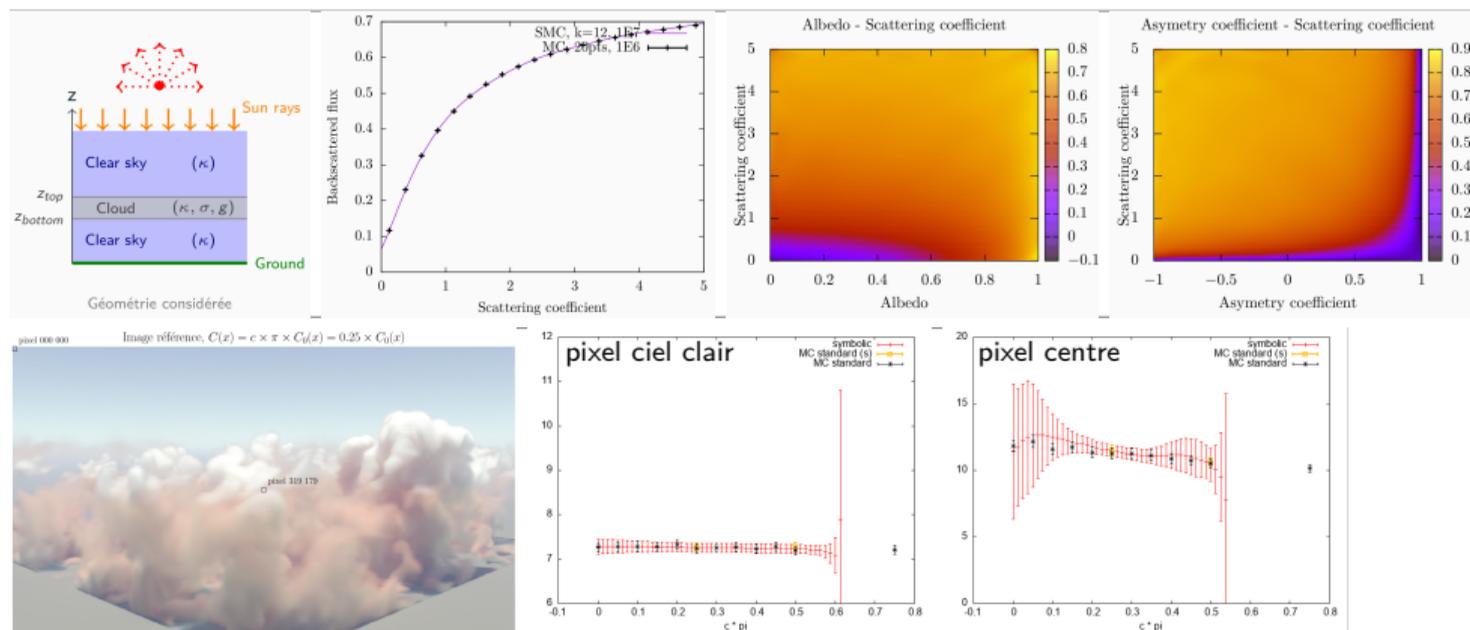
Calcul de fonctionnelles = sensibilités globales, e.g., $I(x, k) = f(k)$

- Thèses dans le groupe EDStar

Yassine Maanane (2020) *Identification expérimentale de propriétés radiatives à partir de méthodes MC Symbolique*

Thèse de Léa Penazzi (2020) *Construction d'une fonction de transfert par la méthode Monte Carlo Symbolique*

- Projet PNTS SMCLOUD piloté par Mathieu Galtier (CETHIL, INSA Lyon) *in prep.*



Questions, perspectives

- **Des propriétés physico-chimiques des particules à leurs propriétés optiques :**

Vers une base de données spectroscopique pour les aérosols

Comment appréhender la complexité du réel : des espèces pures aux mélanges, vieillissement, transport... ?

Cohérence spectrale des propriétés acquises par différents instruments ?

- **Des mesures radiatives aux propriétés macro-physiques des nuages/aérosols :**

la télédétection passives des nuages dans un futur plus ou moins proche...

- **Nouvelles missions spatiales pour l'observation des nuages : EPS-SG (3MI, Met-Image, IASI-NG...) en 2025, INCUS en 2026-2027, C³IEL en 2028, C²OMODO/AOS en 2030,...**

- **Développement de nouveaux algorithmes d'inversion des observations :**

- Vers la restitution de profils verticaux en utilisant les informations multispectrales, polarisé et multiangulaires des capteurs (ex. 3MI)
- Haute résolution spatiale et observations simultanées = prise en compte de la structure des nuages....vers la restitution "3D" des propriétés nuageuses ?
- Intervalle de temps entre 2 observations => dynamique des processus nuageux (C³IEL, C²OMODO, INCUS)

http://teledetection.ipgp.fr/mpt/documents/seminaire_Cornet.pdf

Vers une exploitation opérationnelle des obs basée sur des codes radiatifs 3D de référence ?

Diffusion multiple, polarisation, line by line...