

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

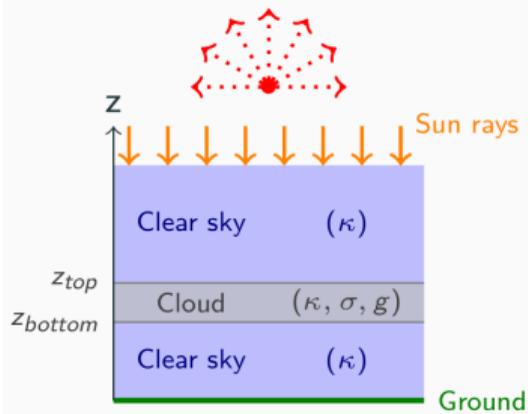
Comment interpréter les observations pour restituer des propriétés macro de scènes nuageuses (et aérosols) ?
Quel modèle de géométrie nuageuse ? Quel modèle de transfert ?

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 \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 $\tau \gg 1$

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 $\ll 1\text{km}$
- \triangleright 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...) ?

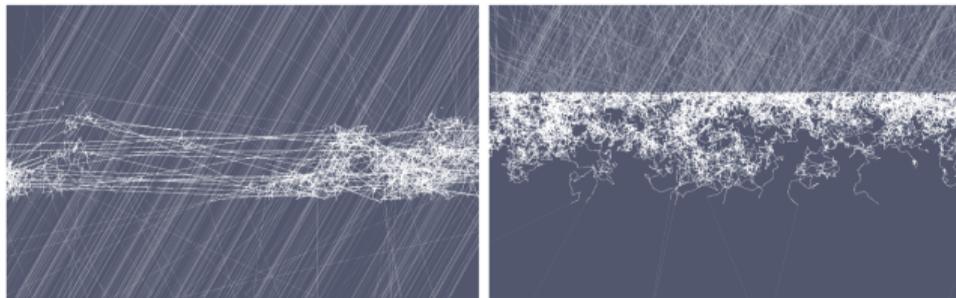


FIGURE 6 – Illustration de chemins échantillonnés pendant une simulation Monte Carlo de transfert radiatif solaire (à gauche) dans un champ de cumulus et (à droite) dans une couche nuageuse homogène horizontalement infinie (géométrie slab) où chaque couche contient le contenu en eau liquide maximum de 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]

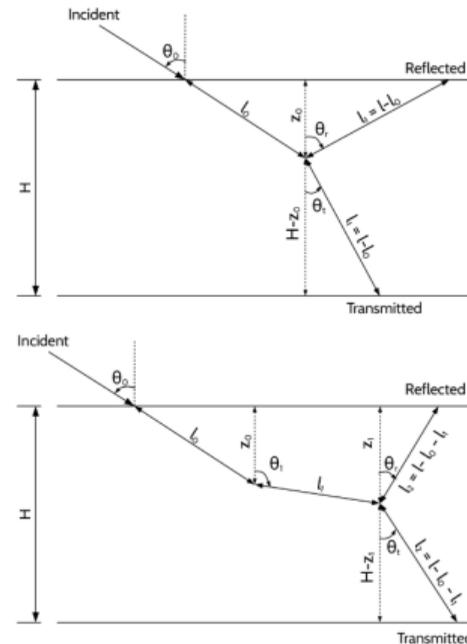


Fig. 1. Geometry of the slab, with the main quantities used in the calculations, for single (top) and double (bottom) scattering.

\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

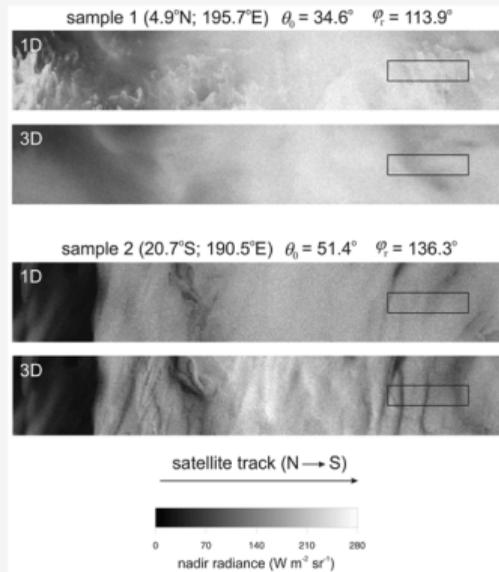
[2] *Empirical model of multiple-scattering effect on single-wavelength lidar data of aerosols and clouds*, Shcherbakov et al., 2022

(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 5×21 km assessment domain, the size used for radiative closure assessments. Central values of latitude and longitude are listed along with θ_0 and ϕ_i (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.

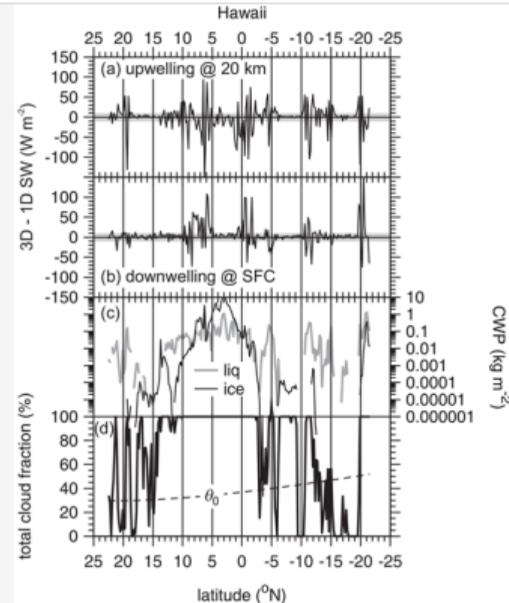


Figure 8 (a) Difference between upwelling SW fluxes at an altitude of 20 km as predicted by 3D and 1D RT models for 5×21 km assessment domains of the Hawaii frame. The shaded area indicates EarthCARE's goal of $\pm 10 \text{ W m}^{-2}$. (b) As in panel (a), except this is for SW surface irradiance. (c) Mean liquid and ice cloud water paths for the Hawaii frame's 5×21 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

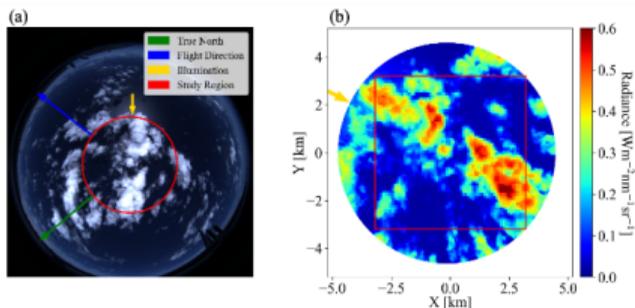


Figure 10. (a) RGB imagery of nadir-viewing all-sky camera deployed during CAMP²Ex for a cloud scene centered at 15.2744° N, 123.392° E over the Philippine Sea at 02:10:06 UTC on 5 October 2019. The arrows indicate true north (green), flight direction (blue), and illumination (where the sunlight comes 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

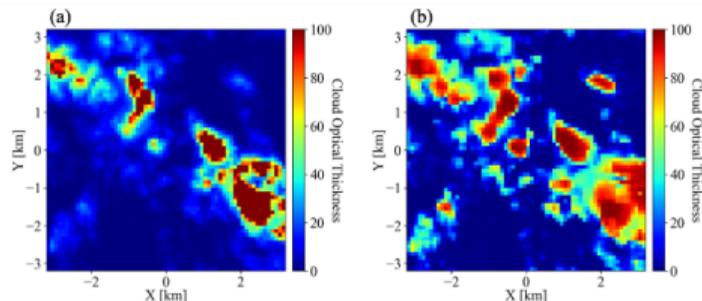


Figure 11. Cloud optical thickness for the gridded radiance in Fig. 10b (a) estimated by IPA method and (b) predicted by CNN.

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

- **Répercussion des hypothèses 1D sur les épaisseurs optiques restituées**
- 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 (thèse G. Merlin), des enveloppes nuages 3D (mission C3IEL, C. Cornet)...

- Sous hypothèse 1D (pixels indépendants), luminance réfléchie 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.)*

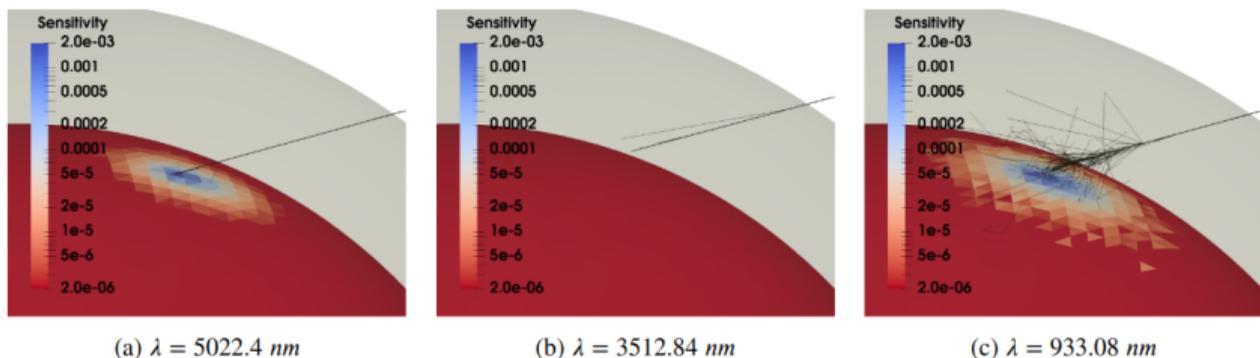


Figure 13: The reverse sampled optical paths. Following our method, the optical paths are sampled from the observation point. The propagation directions are changed when scattering/reflection occurs, and the paths end when absorption occurs. 10,000,000 paths are sampled to estimate sensitivities, but 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.*

