

Algorithmes de Monte Carlo optimisés pour la simulation du transfert radiatif 3D en milieux nuageux

Najda Villefranque et collègues (DEPHY, EDStar)

January 21, 2021

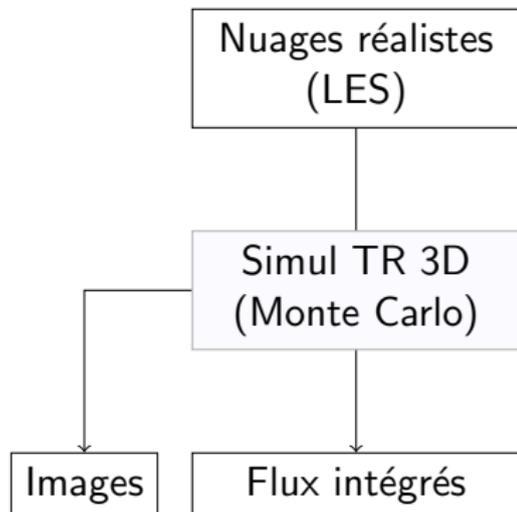
Interactions nuages–rayonnement : sources d’incertitude pour le climat

- ▶ Les nuages bas et leurs effets radiatifs, source majeure d’incertitudes des projections climatiques [Dufresne and Bony, 2008, Vial et al., 2013]
- ▶ Représentation approchée de ces processus “sous-maille” : besoin d’améliorer les paramétrisations nuages et rayonnement dans les modèles = compréhension des processus, nouvelles formes fonctionnelles, infos issus des params microphy ou nuages, réglage des paramètres libres...

Méthodologie pour améliorer une param radiative

Amélioration param radiative, à nuages moyens connus

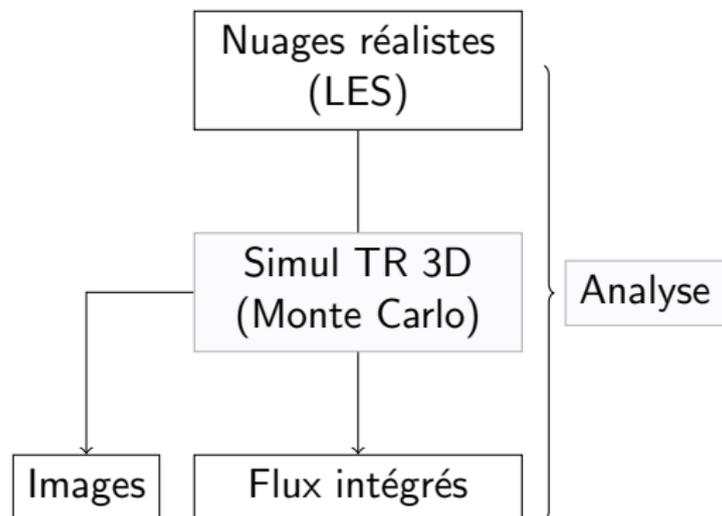
1. calculs de référence sur des scènes nuageuses réalistes



Méthodologie pour améliorer une param radiative

Amélioration param radiative, à nuages moyens connus

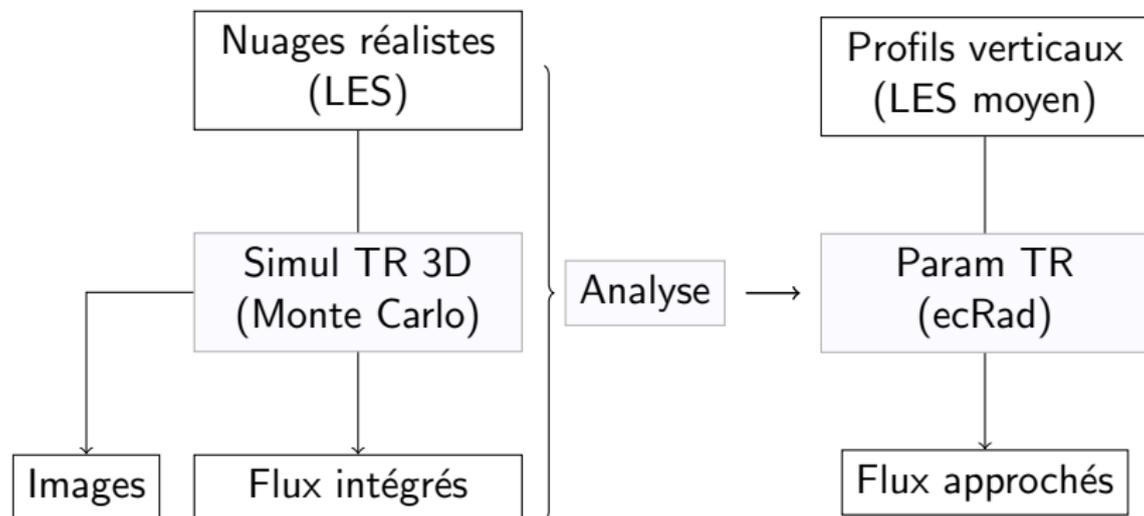
1. calculs de référence sur des scènes nuageuses réalistes
2. comprendre les interactions à une échelle "macro"



Méthodologie pour améliorer une param radiative

Amélioration param radiative, à nuages moyens connus

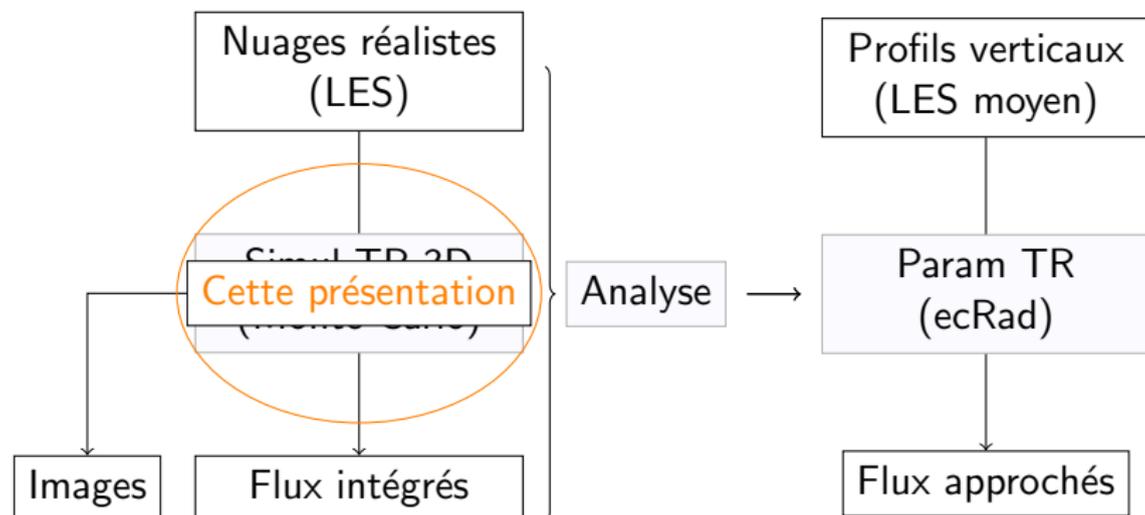
1. calculs de référence sur des scènes nuageuses réalistes
2. comprendre les interactions à une échelle "macro"
3. intégrer cette compréhension dans les modèles de climat



Méthodologie pour améliorer une param radiative

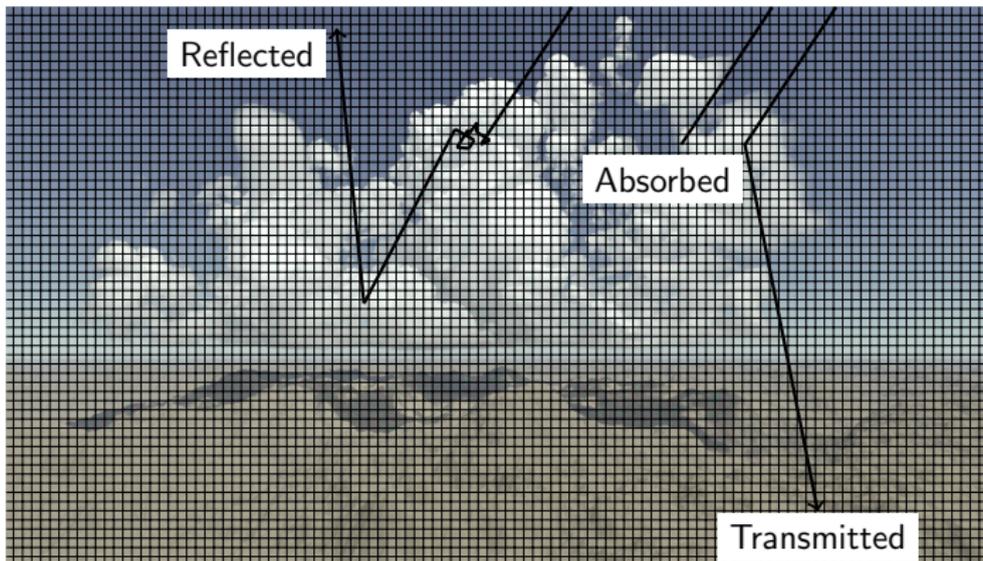
Amélioration param radiative, à nuages moyens connus

1. calculs de référence sur des scènes nuageuses réalistes
2. comprendre les interactions à une échelle "macro"
3. intégrer cette compréhension dans les modèles de climat



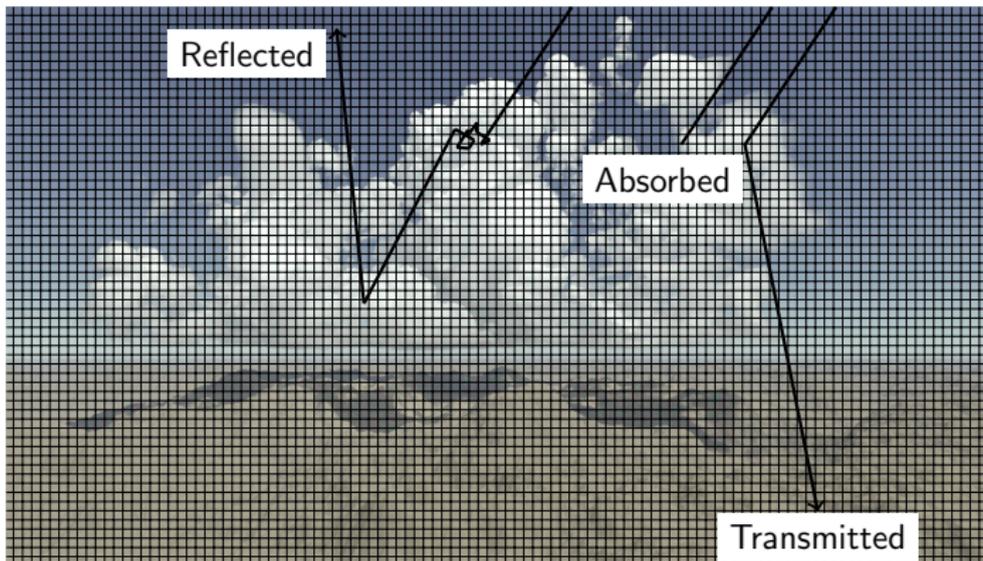
Calculs de référence sur scènes nuageuses issues de LES

Monte Carlo = suivi d'un grand nombre de chemins par simulation explicite d'évènements radiatifs (absorptions / diffusions).



Calculs de référence sur scènes nuageuses issues de LES

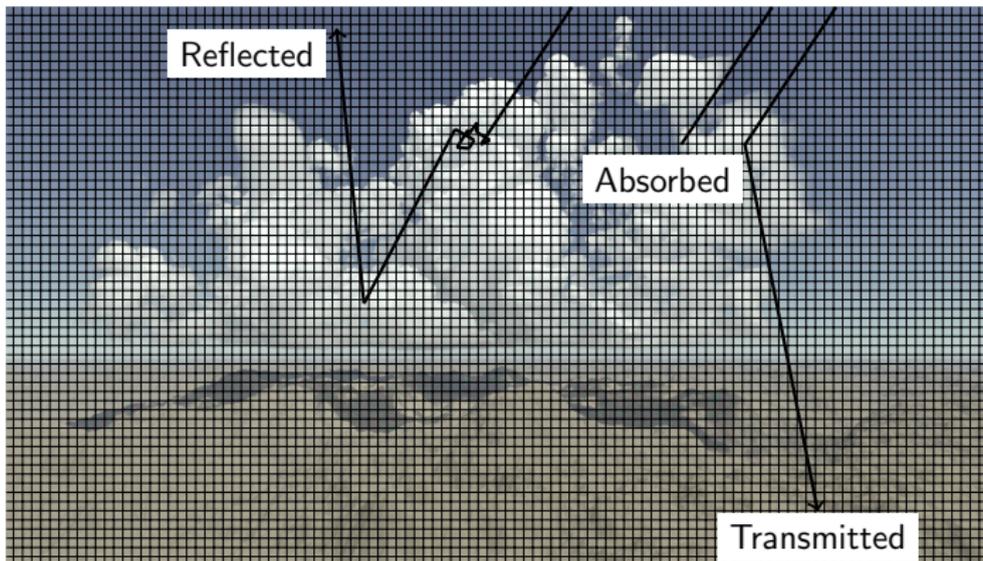
Monte Carlo = suivi d'un grand nombre de chemins par simulation explicite d'évènements radiatifs (absorptions / diffusions).



Echantillonnages aléatoires : distance avant évènement ? nature de l'évènement ? direction diffusée ?

Calculs de référence sur scènes nuageuses issues de LES

Monte Carlo = suivi d'un grand nombre de chemins par simulation explicite d'évènements radiatifs (absorptions / diffusions).



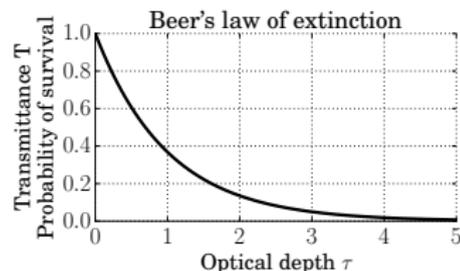
Echantillonnages aléatoires : **distance avant évènement ?** nature de l'évènement ? direction diffusée ?

Problème en milieu hétérogène

Pour trouver la distance le long du rayon (\mathbf{x}, ω) avant évènement, loi d'extinction de Beer, transmissivité = *probabilité de survie*

$$T(\ell) = \exp \left(- \int_0^\ell ds \underbrace{k(\mathbf{x} - \omega s)}_{\text{extinction [m}^{-1}\text{]}} \right)$$

épaisseur optique τ

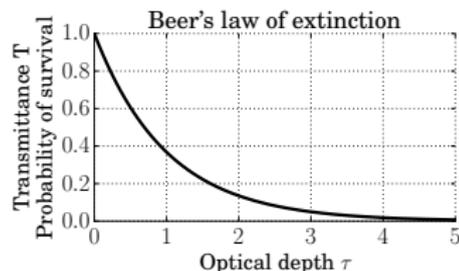


Problème en milieu hétérogène

Pour trouver la distance le long du rayon (\mathbf{x}, ω) avant évènement, loi d'extinction de Beer, transmissivité = *probabilité de survie*

$$T(\ell) = \exp \left(- \int_0^\ell ds \underbrace{k(\mathbf{x} - \omega s)}_{\text{extinction [m}^{-1}\text{]}} \right)$$

épaisseur optique τ

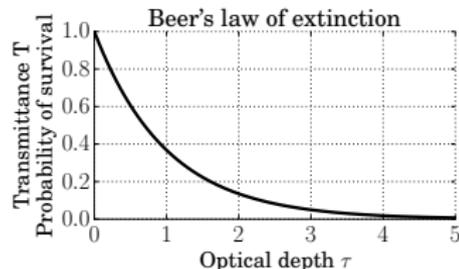


En milieu homogène, $T(\ell) = e^{-k\ell} \Rightarrow \ell = -\ln(T)/k$, $T \sim \mathcal{U}(0, 1)$

Problème en milieu hétérogène

Pour trouver la distance le long du rayon (\mathbf{x}, ω) avant évènement, loi d'extinction de Beer, transmissivité = *probabilité de survie*

$$T(\ell) = \exp \left(- \overbrace{\int_0^\ell ds}^{\text{épaisseur optique } \tau} \underbrace{k(\mathbf{x} - \omega s)}_{\text{extinction [m}^{-1}\text{]}} \right)$$



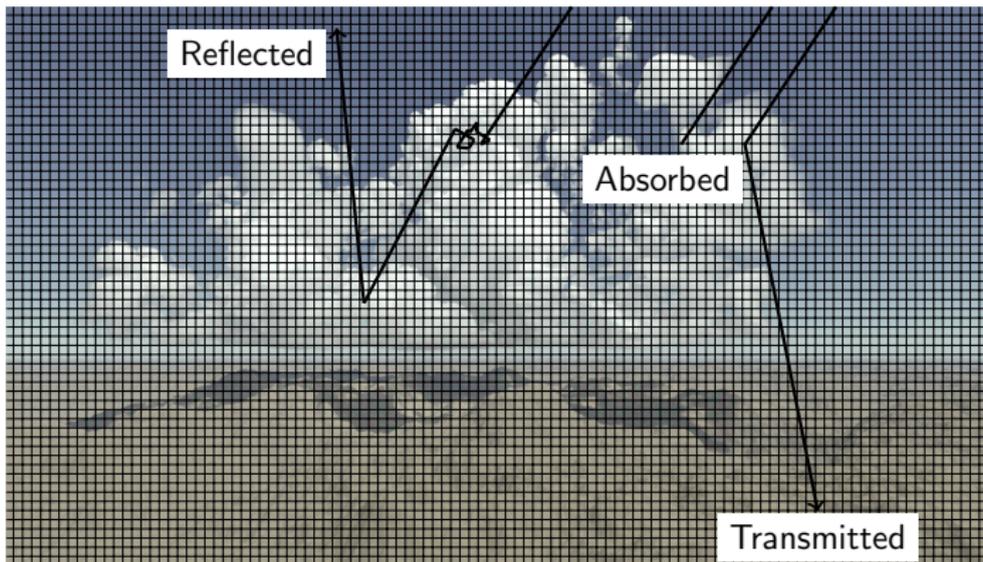
En milieu homogène, $T(\ell) = e^{-k\ell} \Rightarrow \ell = -\ln(T)/k$, $T \sim \mathcal{U}(0, 1)$

En milieu hétérogène... pas d'inversion analytique.

Classiquement, cumul de l'épaisseur optique le long des mailles traversées $\int_0^\ell ds k(\mathbf{x} - \omega s) \approx \sum_{i=0}^n s_i \times k_i$ jusqu'à $= -\ln(T)$

Calculs de référence sur scènes nuageuses issues de LES

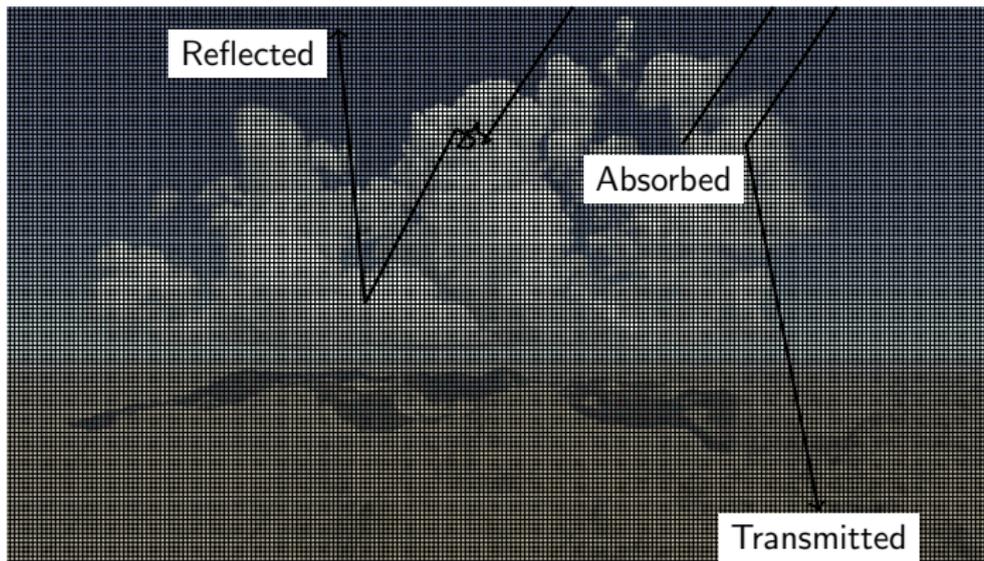
Monte Carlo = suivi d'un grand nombre de chemins par simulation explicite d'évènements radiatifs (absorptions / diffusions).



Echantillonnages aléatoires : **distance avant évènement ?**

Calculs de référence sur scènes nuageuses issues de LES

Monte Carlo = suivi d'un grand nombre de chemins par simulation explicite d'évènements radiatifs (absorptions / diffusions).



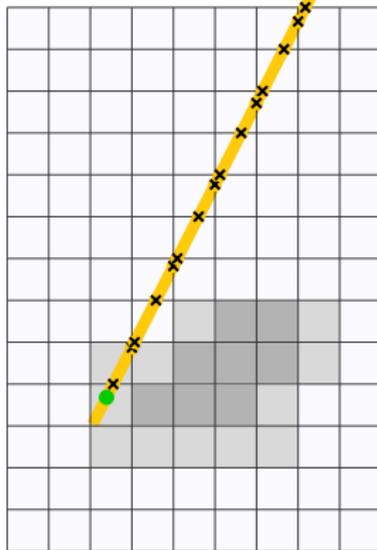
Echantillonnages aléatoires : **distance avant évènement ?**

⇒ le calcul devient impraticable quand la résolution augmente

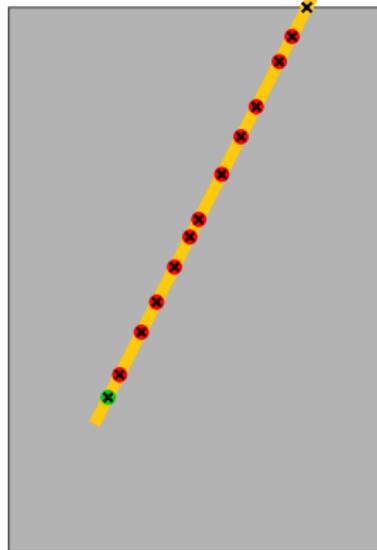
Solution en milieu hétérogène

Algorithmes à collisions nulles (*maximum cross-section*) : ajout de particules fictives pour se ramener à un milieu homogène, sans effet sur la propagation (diffusions purement vers l'avant)

a) Regular tracking



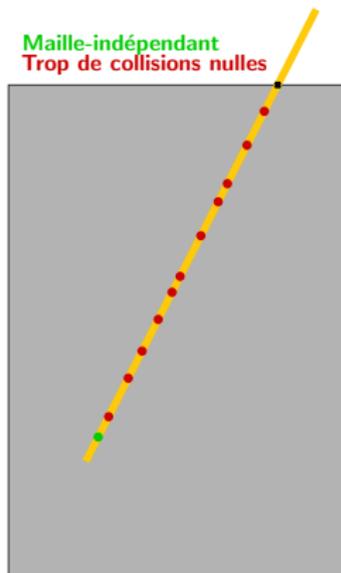
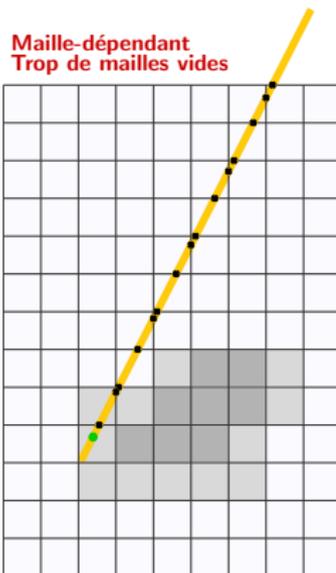
b) Null-collision



× Access data ● True collision ● Null collision

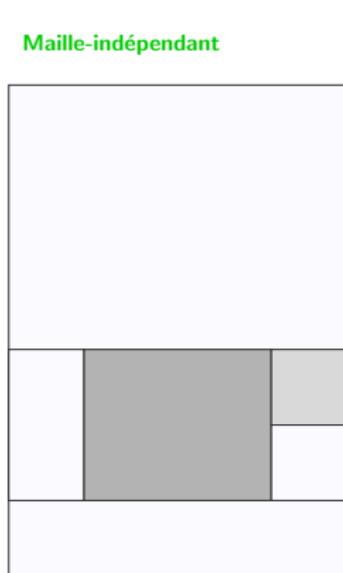
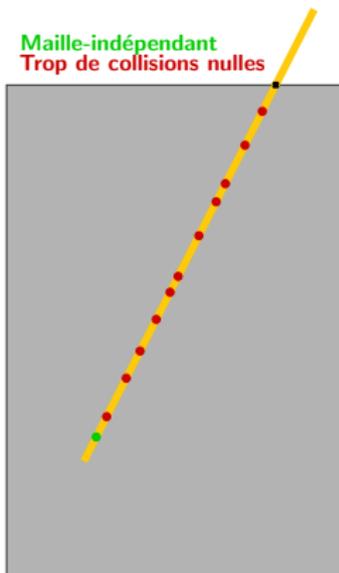
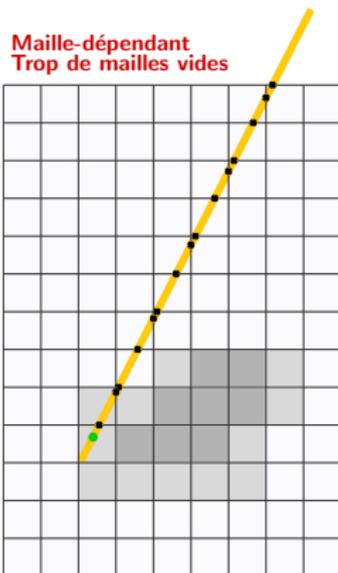
Collisions nulles et grilles accélératrices

Collisions nulles = milieu arbitraire



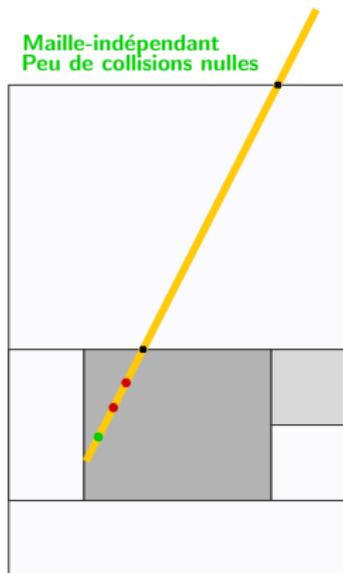
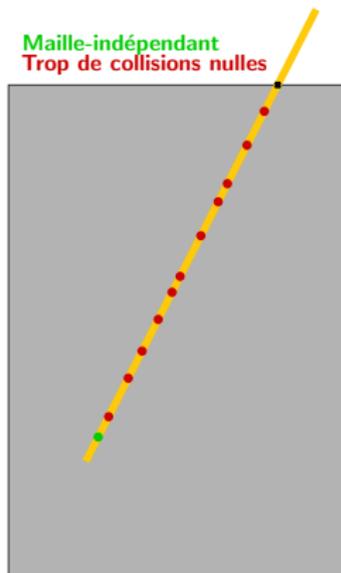
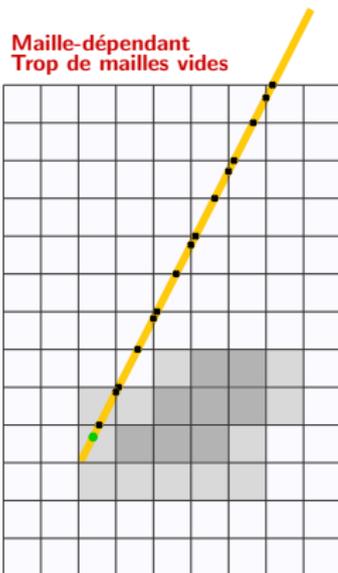
Collisions nulles et grilles accélératrices

Collisions nulles = milieu arbitraire pas forcément homogène !



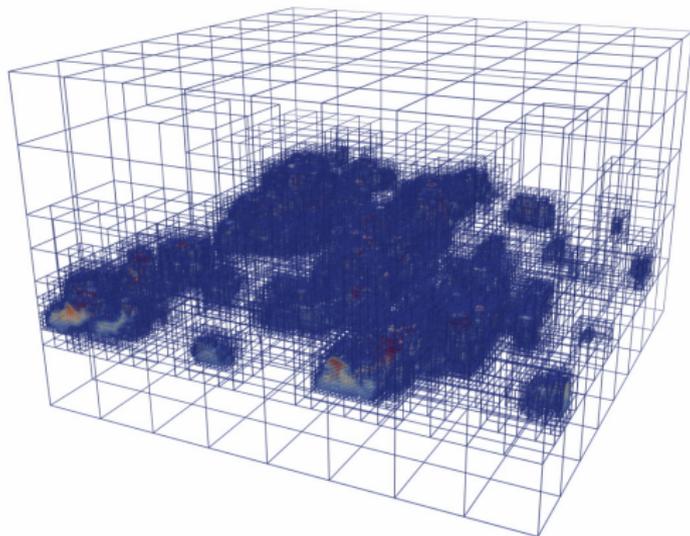
Collisions nulles et grilles accélératrices

Collisions nulles = milieu arbitraire pas forcément homogène !



Champ de majorants adapté aux hétérogénéités

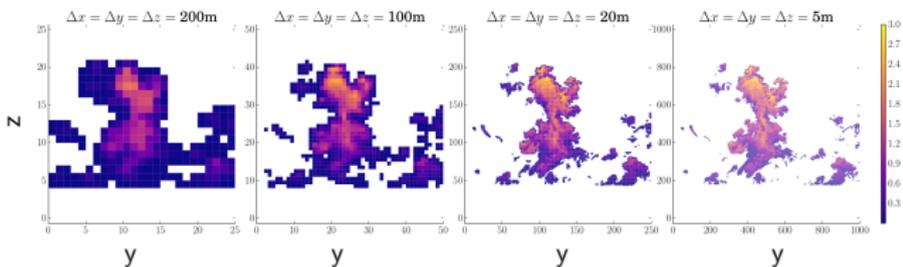
Echantillonnage distance avant évènement : cumul épaisseur optique **majorante** le long du rayon + rejet des collisions nulles



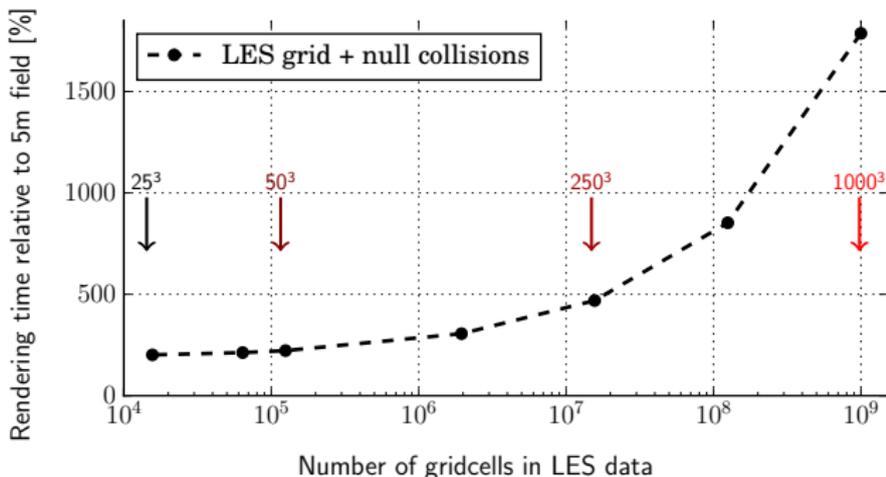
Optimisation temps de traversée = compromis entre nombre de mailles intersectées et nombre de collisions nulles rejetées

Résultat = insensibilité du calcul à la complexité

a) Vertical cross section r_c [g/kg] in cloud fields of increasing resolution

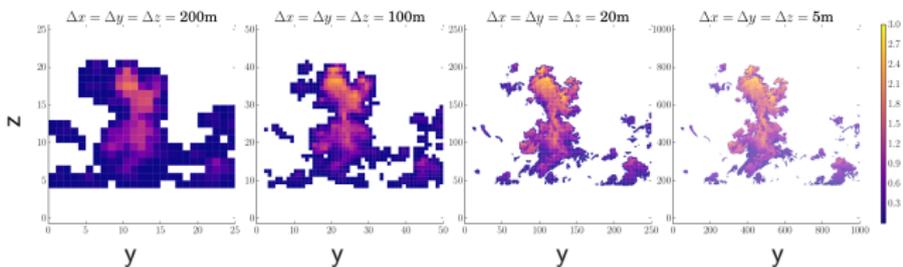


b) Relative rendering time of scenes of increasing resolution

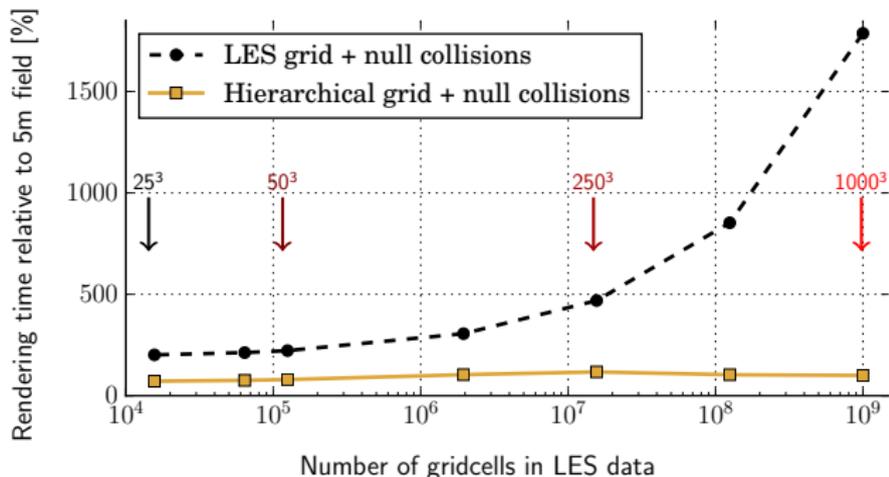


Résultat = insensibilité du calcul à la complexité

a) Vertical cross section r_c [g/kg] in cloud fields of increasing resolution



b) Relative rendering time of scenes of increasing resolution



Ensemble de bibliothèques libres et logiciel de rendu

[Villefranque et al., 2019]

- ▶ Pérennisé sous forme de bibliothèques libres¹ : le **Star-Engine** développé et maintenu par **Meso-Star** + collectif de ~ 30 chercheurs “physique statistique en milieux complexes”

¹Lancer de rayon en volumes, lancer de rayon en surfaces, échantillonnage fonctions de phase...

²2020 = 2 ANRs en cours, 1 déposée, 3 thèses...

Ensemble de bibliothèques libres et logiciel de rendu

[Villefranke et al., 2019]

- ▶ Pérennisé sous forme de bibliothèques libres¹ : le **Star-Engine** développé et maintenu par **Meso-Star** + collectif de ~ 30 chercheurs “physique statistique en milieux complexes”
- ▶ Logiciel de rendu basé sur ces bibliothèques :
High-Tune: RenDeRer (**animation**)

¹Lancer de rayon en volumes, lancer de rayon en surfaces, échantillonnage fonctions de phase...

²2020 = 2 ANRs en cours, 1 déposée, 3 thèses...

Ensemble de bibliothèques libres et logiciel de rendu

[Villefranque et al., 2019]

- ▶ Pérennisé sous forme de bibliothèques libres¹ : le **Star-Engine** développé et maintenu par **Meso-Star** + collectif de ~ 30 chercheurs “physique statistique en milieux complexes”
- ▶ Logiciel de rendu basé sur ces bibliothèques :
High-Tune: RenDeRer (**animation**)
- ▶ Calcul “de référence” mais pour l’instant : que eau liquide, fonction de phase Henyey-Greenstein, gaz = k-distrib, pas polarisé...

¹Lancer de rayon en volumes, lancer de rayon en surfaces, échantillonnage fonctions de phase...

²2020 = 2 ANRs en cours, 1 déposée, 3 thèses...

Ensemble de bibliothèques libres et logiciel de rendu

[Villefranque et al., 2019]

- ▶ Pérennisé sous forme de bibliothèques libres¹ : le **Star-Engine** développé et maintenu par **Meso-Star** + collectif de ~ 30 chercheurs “physique statistique en milieux complexes”
- ▶ Logiciel de rendu basé sur ces bibliothèques :
High-Tune: RenDeRer (**animation**)
- ▶ Calcul “de référence” mais pour l’instant : que eau liquide, fonction de phase Henyey-Greenstein, gaz = k-distrib, pas polarisé...
- ▶ Code de recherche vivant², permet de tester des idées, nouveaux algos... tout de suite en milieu complexe (chambre combustion, ville...)

¹Lancer de rayon en volumes, lancer de rayon en surfaces, échantillonnage fonctions de phase...

²2020 = 2 ANRs en cours, 1 déposée, 3 thèses... 

Apports, en cours et perspectives

Ces outils pour attaquer des questions méthodos et de physique :

- ▶ visualisation des nuages (+ bientôt, des ascendances thermiques à l'aide de traceurs), de leurs effets radiatifs, évolution temporelle, processus de couche limite...

Apports, en cours et perspectives

Ces outils pour attaquer des questions méthodologiques et de physique :

- ▶ visualisation des nuages (+ bientôt, des ascendances thermiques à l'aide de traceurs), de leurs effets radiatifs, évolution temporelle, processus de couche limite...
- ▶ apports pour la paramétrisation : analyse des chemins = accès direct aux processus (énormément d'info !) [Hogan et al., 2019], comparaisons flux intégrés Monte Carlo vs issus de params, exploration et ajustement des paramètres de géométrie nuageuse [Villefranque et al., 2020]...

Apports, en cours et perspectives

Ces outils pour attaquer des questions méthodologiques et de physique :

- ▶ visualisation des nuages (+ bientôt, des ascendances thermiques à l'aide de traceurs), de leurs effets radiatifs, évolution temporelle, processus de couche limite...
- ▶ apports pour la paramétrisation : analyse des chemins = accès direct aux processus (énormément d'info !) [Hogan et al., 2019], comparaisons flux intégrés Monte Carlo vs issus de params, exploration et ajustement des paramètres de géométrie nuageuse [Villefranche et al., 2020]...
- ▶ TR3D dans des champs nuageux 3D reconstruits à partir de profils 1D (GCMs) ou d'obs [Barker et al., 2011] : générer directement les grilles accélératrices et échantillonner statistiquement l'hétérogénéité sous-maille ?

Apports, en cours et perspectives

Ces outils pour attaquer des questions méthodologiques et de physique :

- ▶ visualisation des nuages (+ bientôt, des ascendances thermiques à l'aide de traceurs), de leurs effets radiatifs, évolution temporelle, processus de couche limite...
- ▶ apports pour la paramétrisation : analyse des chemins = accès direct aux processus (énormément d'info !) [Hogan et al., 2019], comparaisons flux intégrés Monte Carlo vs issus de params, exploration et ajustement des paramètres de géométrie nuageuse [Villefranche et al., 2020]...
- ▶ TR3D dans des champs nuageux 3D reconstruits à partir de profils 1D (GCMs) ou d'obs [Barker et al., 2011] : générer directement les grilles accélératrices et échantillonner statistiquement l'hétérogénéité sous-maille ?
- ▶ méthodes de MC avancées \Rightarrow vers un couplage MC / LES ? vers de nouvelles paramétrisations pour les GCMs ?



Barker, H. W., Jerg, M. P., Wehr, T., Kato, S., Donovan, D. P., and Hogan, R. J. (2011).

A 3D cloud-construction algorithm for the EarthCARE satellite mission.
Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 137(657):1042–1058.



Dufresne, J.-L. and Bony, S. (2008).

An assessment of the primary sources of spread of global warming estimates from coupled atmosphere–ocean models.
Journal of Climate, 21(19):5135–5144.



Hogan, R. J., Fielding, M. D., Barker, H. W., Villefranque, N., and Schäfer, S. A. K. (2019).

Entrapment: An Important Mechanism to Explain the Shortwave 3D Radiative Effect of Clouds.
Journal of the Atmospheric Sciences, 76(7):2123–2141.



Vial, J., Dufresne, J.-L., and Bony, S. (2013).

On the interpretation of inter-model spread in CMIP5 climate sensitivity estimates.
Climate Dynamics, 41(11-12):3339–3362.



Villefranque, N., Fournier, R., Couvreur, F., Blanco, S., Cornet, C., Eymet, V., Forest, V., and Tregan, J.-M. (2019).

A Path-Tracing Monte Carlo Library for 3-D Radiative Transfer in Highly Resolved Cloudy Atmospheres.
Journal of Advances in Modeling Earth Systems.



Villefranque, N., Williamson, D., Couvreur, F., Hourdin, F., Gautrais, J., Fournier, R., Hogan, R. J., Blanco, S., and Volodina, V. (2020).

Process-based climate model development harnessing machine learning: III. The Representation of Cumulus Geometry and their 3D Radiative Effects.

Earth and Space Science Open Archive, page 30.

Submitted to JAMES.