

Distributions de flux solaires en surface sous des champs de cumulus

Najda Villefranque, Zili He, Fleur Couvreur, Quentin Libois

20 mars 2025 — Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère — Journées DEPHY



Simulated cloud field (ARM-Cumulus at 8 m resolution) rendered using a Monte Carlo path-tracing model (htrdr, Villefranque et al. 2019)

Contexte de l'étude

- Travaux de post-doctorat de Zili He (2022), dans le cadre du projet Fine4Cast
Améliorer la prévision à très court terme de la production d'énergies renouvelables, ici solaires
- Ingrédients : prévoir l'état de l'atmosphère **et** le rayonnement solaire incident en surface
- Ici on s'intéresse à la seconde partie : supposons que la prévision de l'état atmosphérique est correcte, **les modèles de transfert radiatif atmosphériques permettent-ils de prévoir correctement la distribution des flux solaires en présence de nuages ?**

Contexte de l'étude

- Travaux de post-doctorat de Zili He (2022), dans le cadre du projet Fine4Cast
Améliorer la prévision à très court terme de la production d'énergies renouvelables, ici solaires
- Ingrédients : prévoir l'état de l'atmosphère **et** le rayonnement solaire incident en surface
- Ici on s'intéresse à la seconde partie : supposons que la prévision de l'état atmosphérique est correcte, **les modèles de transfert radiatif atmosphériques permettent-ils de prévoir correctement la distribution des flux solaires en présence de nuages ?**

Spoiler alert : non $\Rightarrow$ biblio en slide annexe

Contexte de l'étude

- Travaux de post-doctorat de Zili He (2022), dans le cadre du projet Fine4Cast
Améliorer la prévision à très court terme de la production d'énergies renouvelables, ici solaires
- Ingrédients : prévoir l'état de l'atmosphère **et** le rayonnement solaire incident en surface
- Ici on s'intéresse à la seconde partie : supposons que la prévision de l'état atmosphérique est correcte, **les modèles de transfert radiatif atmosphériques permettent-ils de prévoir correctement la distribution des flux solaires en présence de nuages ?**
- Préliminaire : **comprendre la variabilité spatiale des flux solaires en surface en présence de cumulus**
 1. À quoi ressemblent les flux solaires en surface sous un champ de cumulus ?
 2. Les simulations sont-elles réalistes quand on les compare aux observations ?
 3. Comment les flux de surface dépendent-ils des propriétés macrophysiques des nuages ?

Contexte de l'étude

- Travaux de post-doctorat de Zili He (2022), dans le cadre du projet Fine4Cast
Améliorer la prévision à très court terme de la production d'énergies renouvelables, ici solaires
- Ingrédients : prévoir l'état de l'atmosphère **et** le rayonnement solaire incident en surface
- Ici on s'intéresse à la seconde partie : supposons que la prévision de l'état atmosphérique est correcte, **les modèles de transfert radiatif atmosphériques permettent-ils de prévoir correctement la distribution des flux solaires en présence de nuages ?**
- Préliminaire : **comprendre la variabilité spatiale des flux solaires en surface en présence de cumulus**
 1. À quoi ressemblent les flux solaires en surface sous un champ de cumulus ?
 2. Les simulations sont-elles réalistes quand on les compare aux observations ?
 3. Comment les flux de surface dépendent-ils des propriétés macrophysiques des nuages ?
- Une partie de ces travaux est publiée dans *Combining observations and simulations to investigate the small-scale variability of surface solar irradiance under continental cumulus clouds*, He et al. 2024 (ACP)
<https://doi.org/10.5194/acp-24-11391-2024>

Nos outils pour répondre à ces questions : observations (1/2)

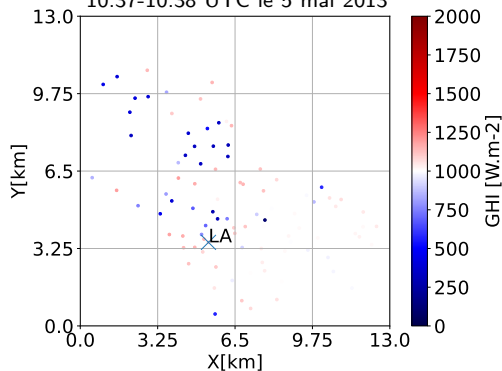
On dispose d'un réseau dense de mesures par pyranomètres issus de la campagne HOPE déployé en 2013 à Julich en Allemagne (documentée dans Madhavan et al. 2016, 2017)

du 3 avril au 30 mai ; acquisitions à 10 Hz, moyennées à la minute ;
99 pyranomètres sur $10 \times 10 \text{ km}^2$ (distances: 140m-14km, en moyenne $\sim 860 \text{ m}$)

Total sky imager
10:37 UTC le 5 mai 2013



Flux solaire mesuré par les 99 pyranomètres
10:37-10:38 UTC le 5 mai 2013



Nos outils pour répondre à ces questions : observations (2/2)

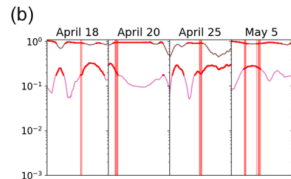
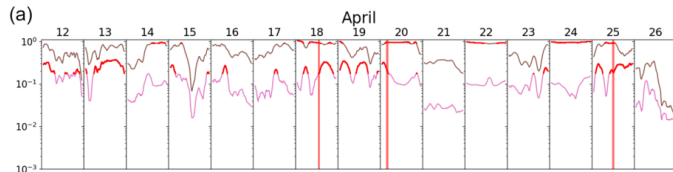
On dispose d'un réseau dense de mesures par pyranomètres issus de la campagne HOPE déployé en 2013 à Julich en Allemagne (documentée dans Madhavan et al. 2016, 2017)

du 3 avril au 30 mai ; acquisitions à 10 Hz, moyennées à la minute ;
99 pyranomètres sur $10 \times 10 \text{ km}^2$ (distances: 140m-14km, en moyenne $\sim 860 \text{ m}$)

Définition de critères pour sélectionner des “heures de cumulus” : $\text{Clear-Sky Index} = \text{flux} / \text{flux_ciel-clair}$

- (1) **CSI moyen** dans les **top 30%** : nuages peu couvrants ou optiquement fins
- (2) **variabilité spatiale** dans les **top 30%** : favorise les nuages bas par rapport aux cirrus
- (3) variabilité temporelle de la moyenne spatiale faible (situation stationnaire)
- (4) variabilité spatiale de la moyenne horaire faible (situation uniforme)

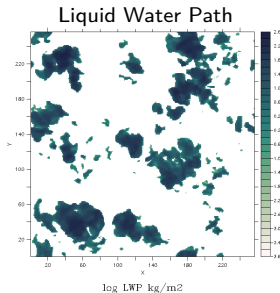
Séries temporelles du **Clear-Sky Index moyen** et de sa **variabilité spatiale** ; **traits verticaux rouges** = cumulus



Nos outils pour répondre à ces questions : simulations

On dispose de simulations haute résolution (Més0-NH, Lafore et al. 1998, Lac et al. 2018)

▷ LES du cas ARM-Cumulus (Brown et al. 2002) : 25 mètres de résolution sur domaine de $6.4 \times 6.4 \text{ km}^2$, refroidissement radiatif et flux de surface prescrits, microphysique ICE3, turbulence 3D



Nos outils pour répondre à ces questions : simulations

On dispose de simulations haute résolution (MésO-NH, Lafore et al. 1998, Lac et al. 2018)

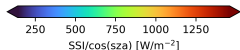
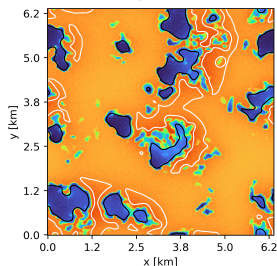
▷ LES du cas ARM-Cumulus (Brown et al. 2002) : 25 mètres de résolution sur domaine de $6.4 \times 6.4 \text{ km}^2$, refroidissement radiatif et flux de surface prescrits, microphysique ICE3, turbulence 3D

et d'un code de transfert radiatif 3D basé sur des méthodes de Monte Carlo (htrdr, Villefranque et al., 2019)

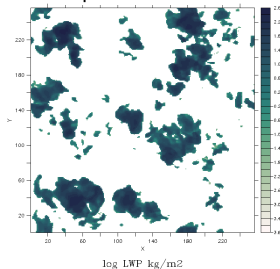
▷ flux solaires en surface calculés en diagnostic offline toutes les minutes, angle solaire zénithal $\sim 35^\circ$

Transfert radiatif 3D (ref) et 1D (colonnes indépendantes, équivalent paramétrisation)

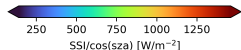
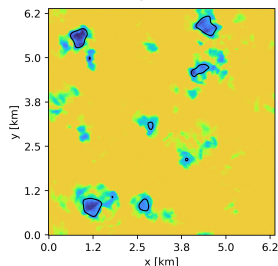
Flux simulé par htrdr, 3D



Liquid Water Path



Flux simulé par htrdr, 1D



Nos outils pour répondre à ces questions : simulations

On dispose de simulations haute résolution (MésO-NH, Lafore et al. 1998, Lac et al. 2018)

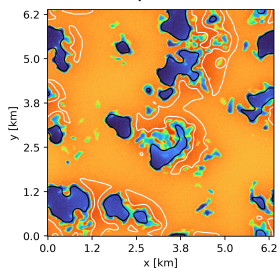
▷ LES du cas ARM-Cumulus (Brown et al. 2002) : 25 mètres de résolution sur domaine de $6.4 \times 6.4 \text{ km}^2$, refroidissement radiatif et flux de surface prescrits, microphysique ICE3, turbulence 3D

et d'un code de transfert radiatif 3D basé sur des méthodes de Monte Carlo (htrdr, Villefranque et al., 2019)

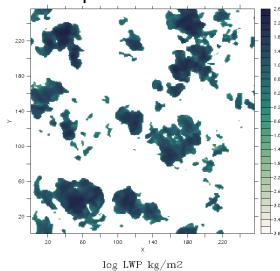
▷ flux solaires en surface calculés en diagnostic offline toutes les minutes, angle solaire zénithal $\sim 35^\circ$

Transfert radiatif 3D (ref) et 1D (colonnes indépendantes, équivalent paramétrisation)

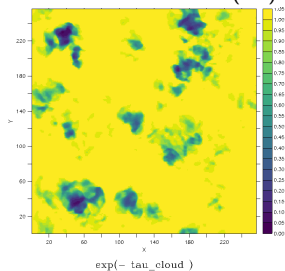
Flux simulé par htrdr, 3D



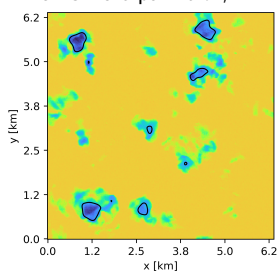
Liquid Water Path



Transmission idéalisée (1D)

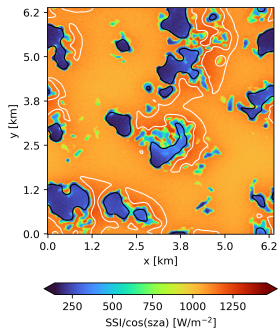


Flux simulé par htrdr, 1D

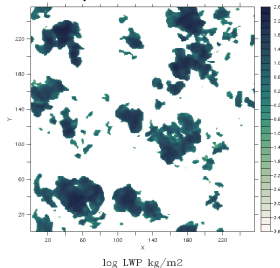


1. À quoi ressemblent les flux solaires en surface sous un champ de cumulus ?

Flux simulé par htrdr, 3D

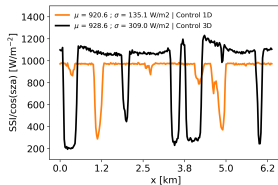


Liquid Water Path



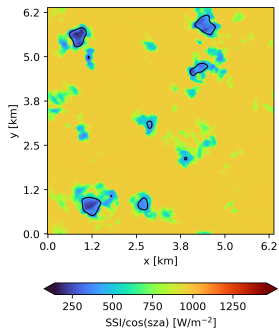
$$\mu = 928.6 \text{ W.m}^{-2}$$
$$\sigma = 309 \text{ W.m}^{-2}$$

Le long de $y = 5 \text{ km}$

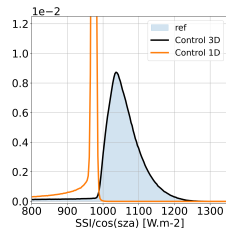
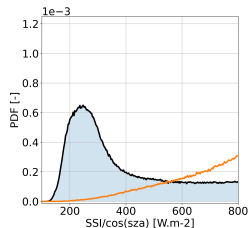
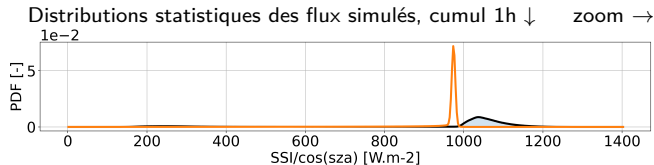


$$\mu = 920.6 \text{ W.m}^{-2}$$
$$\sigma = 135.1 \text{ W.m}^{-2}$$

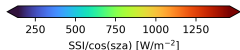
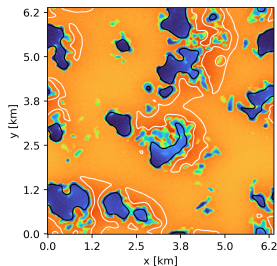
Flux simulé par htrdr, 1D



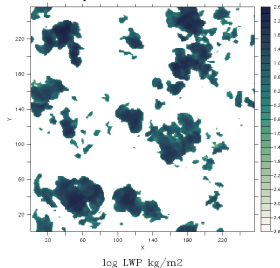
1. À quoi ressemblent les flux solaires en surface sous un champ de cumulus ?



Flux simulé par htrdr, 3D

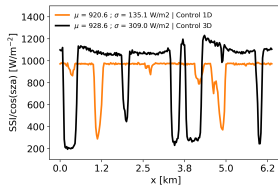


Liquid Water Path



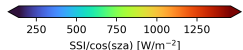
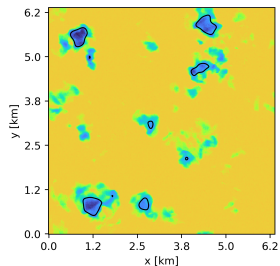
$$\mu = 928.6 \text{ W.m}^{-2}$$
$$\sigma = 309 \text{ W.m}^{-2}$$

Le long de y = 5 km

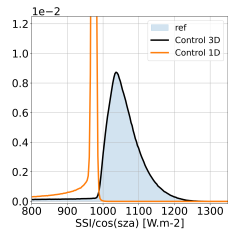
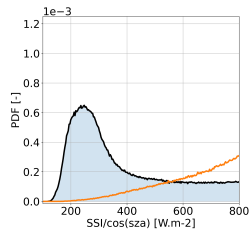
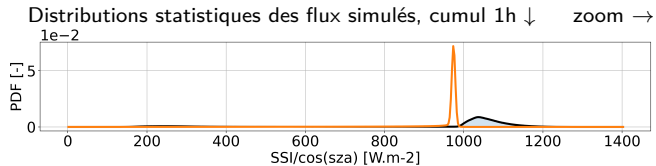


$$\mu = 920.6 \text{ W.m}^{-2}$$
$$\sigma = 135.1 \text{ W.m}^{-2}$$

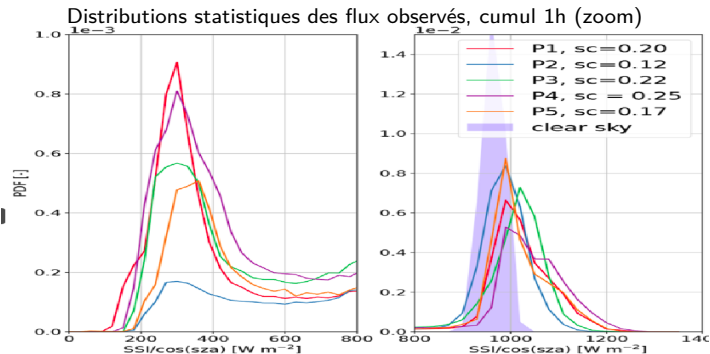
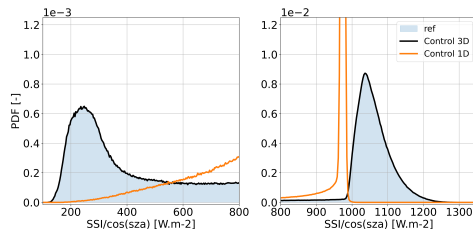
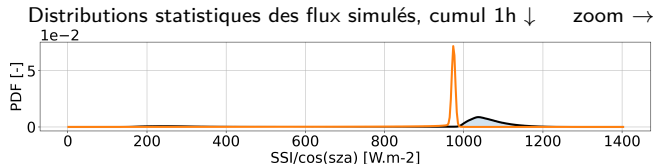
Flux simulé par htrdr, 1D



2. Les simulations sont-elles réalistes quand on les compare aux observations ?



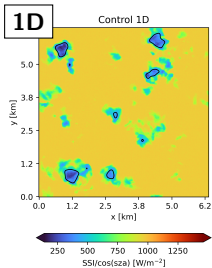
2. Les simulations sont-elles réalistes quand on les compare aux observations ?



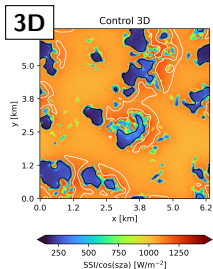
Pour 5 “heures cumulus” dans les obs
(flux fort, variabilité forte)

- Obs $\sim$ rayonnement 3D
- Diff. obs-simu $\sim$ variabilité inter cas ?
- Propriétés des nuages ?

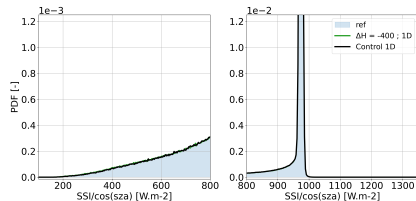
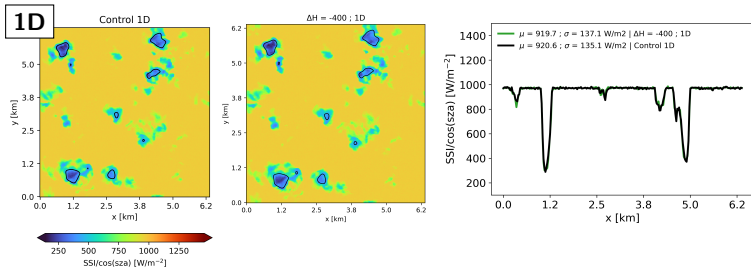
3. Comment les flux de surface dépendent-ils des propriétés macrophysiques des nuages ?



Control



3. Comment les flux de surface dépendent-ils des propriétés macrophysiques des nuages ?

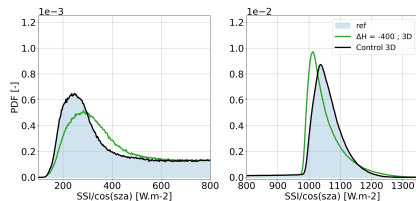
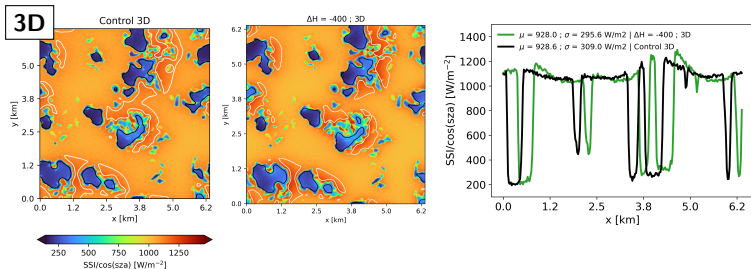


Control

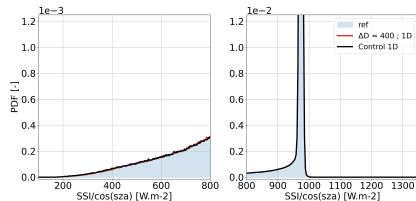
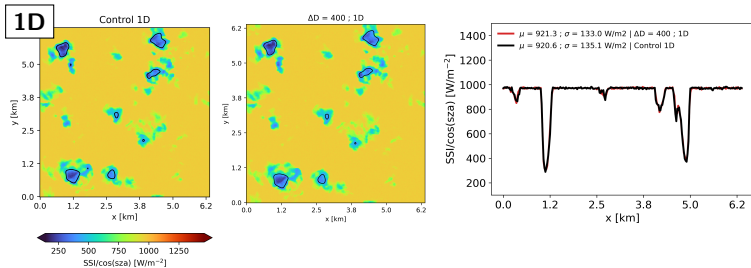
Lower clouds

$$3D-1D = 8.30 \text{ W.m}^{-2}$$

$$\text{sensib } 1D = -0.8 \text{ W.m}^{-2}$$
$$\text{sensib } 3D = -0.6 \text{ W.m}^{-2}$$



3. Comment les flux de surface dépendent-ils des propriétés macrophysiques des nuages ?

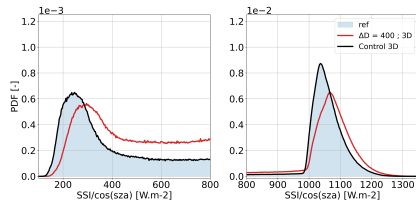
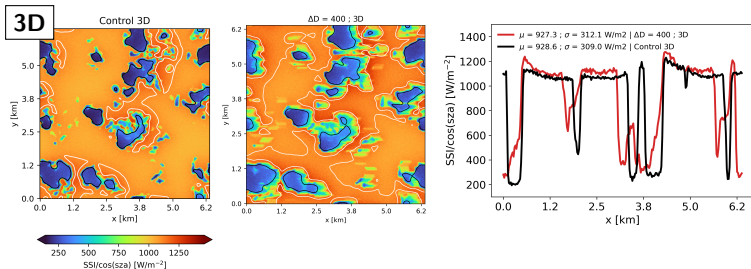


Control

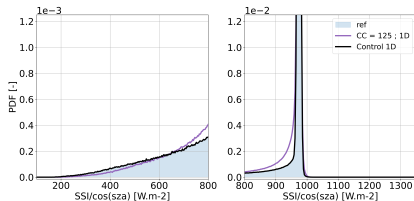
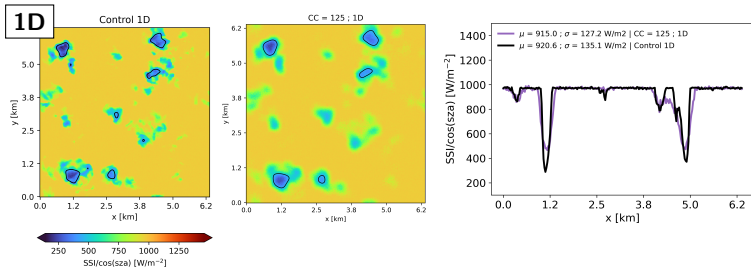
Thicker clouds

$$3D-1D = 5.96 \text{ W.m}^{-2}$$

$$\begin{aligned} \text{sensib } 1D &= 0.7 \text{ W.m}^{-2} \\ \text{sensib } 3D &= -1.3 \text{ W.m}^{-2} \end{aligned}$$



3. Comment les flux de surface dépendent-ils des propriétés macrophysiques des nuages ?



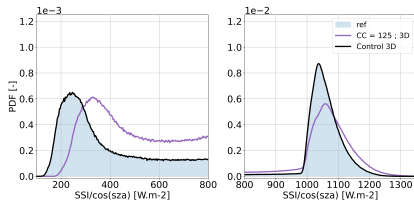
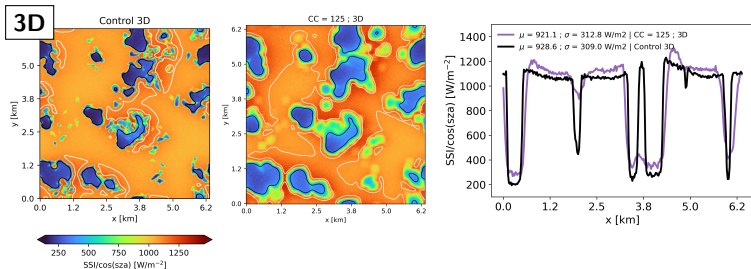
Control

Larger cloud frac

3D-1D = 6.09 W.m⁻²

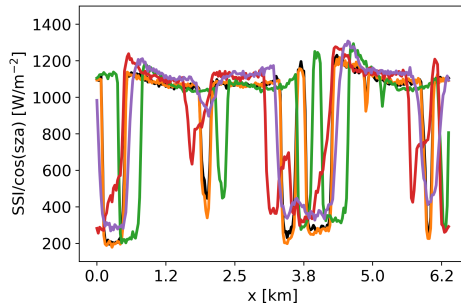
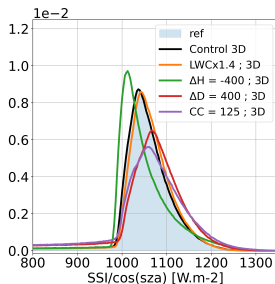
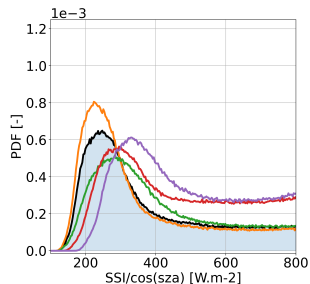
sensib 1D = - 5.5 W.m⁻²

sensib 3D = -7.5 W.m⁻²



Pour conclure...

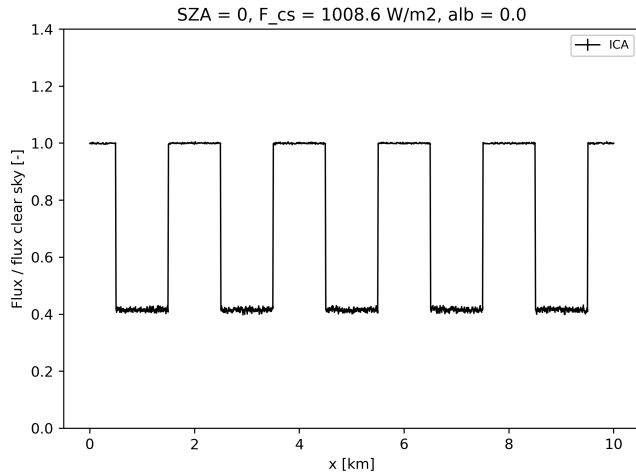
- Effets radiatifs 3D très importants pour la variabilité des flux de surface sous des cumulus
 - LES + Monte Carlo 3D produit des distributions réalistes en comparaison aux observations
 - Grande sensibilité des flux de surface aux propriétés des nuages $\Rightarrow$ de l'information à exploiter ?
-
- Pour consolider : domaines LES plus grands (ARMCU 25 km), nuages plus petits (RICO 25 km)
 - Pour mieux comprendre : nuages cubes idéalisés
 - Pour aller plus loin : autres types de nuages ? statistiques de chemins de photons ? rétroaction de cette variabilité sur l'atmosphère (à quelles échelles, dans quelles situations...) ? lien avec "organisation" ?



Biblio choisie

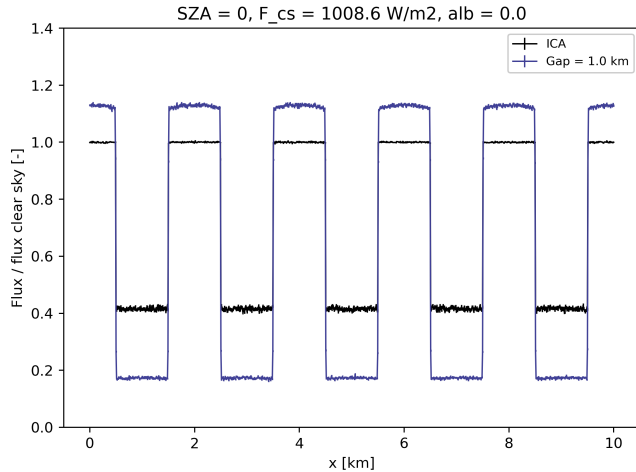
- Gristey, J. J., Feingold, G., Glenn, I. B., Schmidt, K. S., and Chen, H.: On the relationship between shallow cumulus cloud field properties and surface solar irradiance, *Geophys. Res. Lett.*, 47, e2020GL090152, <https://doi.org/10.1029/2020GL090152>, 2020a
- Gristey, J. J., Feingold, G., Glenn, I. B., Schmidt, K. S., and Chen, H.: Surface solar irradiance in continental shallow cumulus fields: Observations and large-eddy simulation, *J. Atmos. Sci.*, 77, 1065–1080, 2020b
- Jakub, F. and Mayer, B.: The role of 1-D and 3-D radiative heating in the organization of shallow cumulus convection and the formation of cloud streets, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 13317–13327, <https://doi.org/10.5194/acp-17-13317-2017>, 2017.
- Mol, W., Heusinkveld, B., Mangan, M. R., Hartogensis, O., Veerman, M., and van Heerwaarden, C.: Observed patterns of surface solar irradiance under cloudy and clearsky conditions, *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 150, 2338–2363, <https://doi.org/10.1002/qj.4712>, 2024
- Tijhuis, M., van Stratum, B. J., Veerman, M. A., and van Heerwaarden, C. C.: An Efficient Parameterization for Surface Shortwave 3D Radiative Effects in Large-Eddy Simulations of Shallow Cumulus Clouds, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 15, e2022MS003262, <https://doi.org/10.1029/2022MS003262>, 2023.

3. À quelle distance d'un nuage cesse-t-on de voir son effet ?



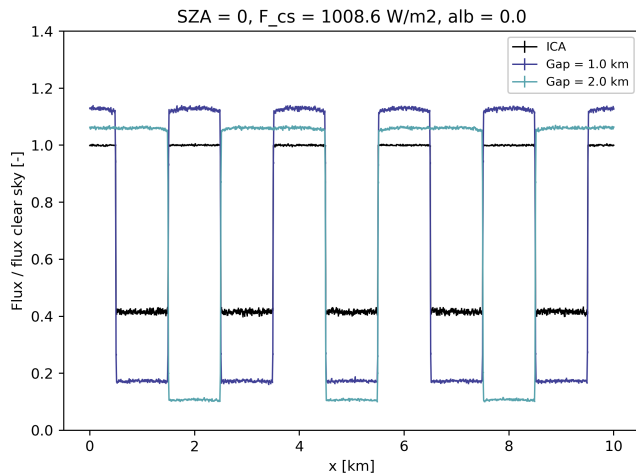
Un motif nuage cubique de 1km de côté
tous les 1 km, rayonnement 1D

3. À quelle distance d'un nuage cesse-t-on de voir son effet ?



Un motif nuage cubique de 1km de côté
tous les 1 km, rayonnement 1D
tous les 1 km, rayonnement 3D

3. À quelle distance d'un nuage cesse-t-on de voir son effet ?



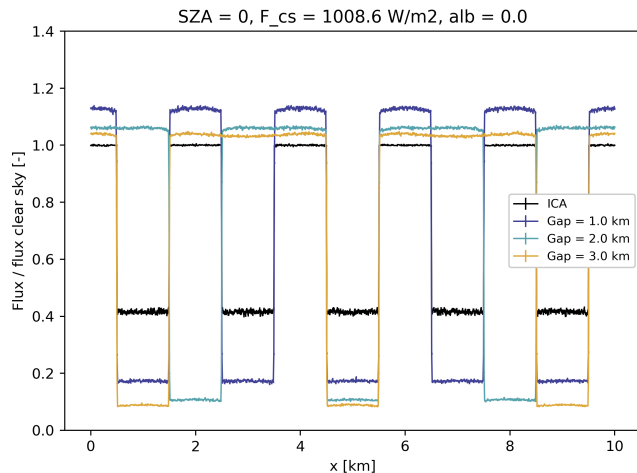
Un motif nuage cubique de 1km de côté

tous les 1 km, rayonnement 1D

tous les 1 km, rayonnement 3D

tous les 2 km, rayonnement 3D

3. À quelle distance d'un nuage cesse-t-on de voir son effet ?



Un motif nuage cubique de 1km de côté

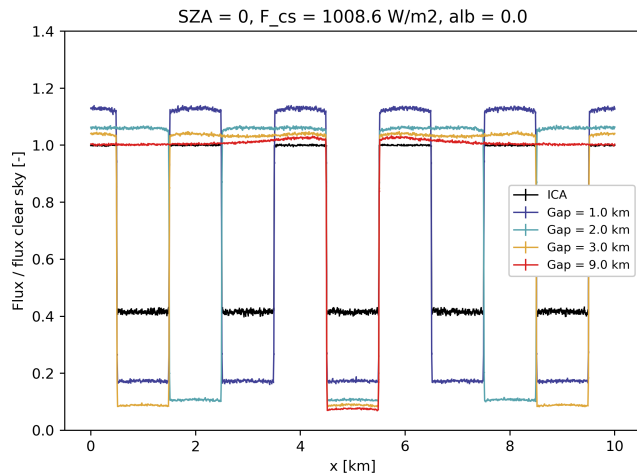
tous les 1 km, rayonnement 1D

tous les 1 km, rayonnement 3D

tous les 2 km, rayonnement 3D

tous les 3 km, rayonnement 3D

3. À quelle distance d'un nuage cesse-t-on de voir son effet ?



Un motif nuage cubique de 1km de côté

tous les 1 km, rayonnement 1D

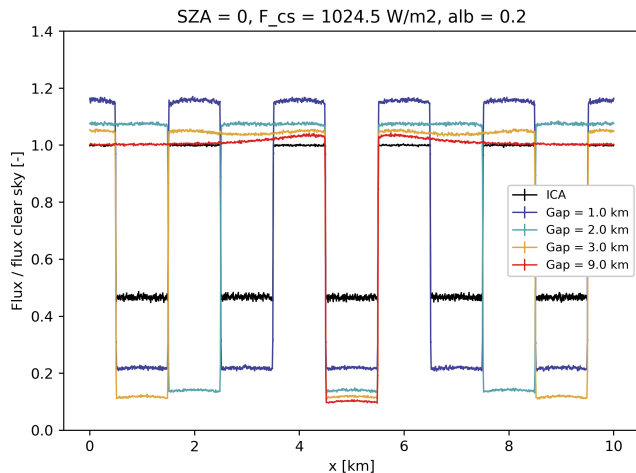
tous les 1 km, rayonnement 3D

tous les 2 km, rayonnement 3D

tous les 3 km, rayonnement 3D

tous les 9 km, rayonnement 3D

3. À quelle distance d'un nuage cesse-t-on de voir son effet ?



Un motif nuage cubique de 1km de côté

tous les 1 km, rayonnement 1D

tous les 1 km, rayonnement 3D

tous les 2 km, rayonnement 3D

tous les 3 km, rayonnement 3D

tous les 9 km, rayonnement 3D

avec albedo de surface = 0.2 au lieu de 0

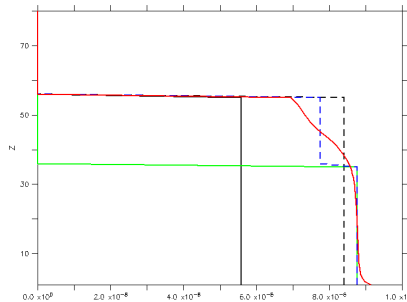
Aerosols

a. Vertical profiles of dust mixing ratio

FDNET (original) Ver 7.6
Run Date: 02-JUL-2024 16:00:00

DATA SET:
KIMMS43.1.DNET.V7.6.1_case3

T : 1



Dust mixing ratio profiles

b. SSI histograms

